

Análisis de imágenes multiespectrales para la prospección de depósitos de minerales metálicos en los proyectos de Boca del Rio-Tacna, Inchupalla-Puno, Perú y Berens-Sturgeon, Ontario, Canadá.

Diana Carolina Aristizabal Gómez y Jenny Paola Garcia Lobo

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geólogas

Director

Marco Antonio Nieto Patarroyo

Geólogo MSc

Codirector

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Geólogo MSc

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de Geología  
Bucaramanga

2021

**Dedicatoria**

*“Solo viviendo absurdamente  
se podría romper alguna vez  
este infinito absurdo”  
Julio Cortázar, Rayuela*

*La vida suele ser un ratito para disfrutar y aprender en nuestro intento de ser mejores  
personas cada día.*

*Agradezco a mis padres Luz Lobo y German García por todo su esfuerzo y lucha, por  
motivarme, apoyarme, por todas las enseñanzas que me dieron y por la formación que me  
brindaron, cada recuerdo de felicidad, impotencia y tristeza los guardo como aprendizajes y  
memorias en el fondo de mi alma.*

*A toda mi familia por quererme tanto, por enseñarme y mostrarme eso que puede llegar  
a ser la vida.*

*Y a mis amigas y amigos de vida, que, aunque parezca a veces haberlos olvidado, estaré  
siempre que necesiten una mano, un hombro o un oído.*

*A las enseñanzas del olvidado, porque muchos de mis más profundos pensamientos se los  
debo a él.*

*Jenny Garcia Lobo.*

### Dedicatoria

*Agradezco profundamente a mi padre Ricardo Aristizabal y a mi madre Janneth Gómez Chacón por sus esfuerzos, enseñanzas y apoyo para alcanzar este logro, por demostrarme que los actos valen más que las palabras.*

*A mi hermana Sandra Aristizabal por siempre estar para mí, por sus palabras de aliento y regaño, su ayuda y amor incondicional.*

*A David y Luz por ser las mejores personas que he conocido y ser el farol que ilumina mi vida, siempre los llevo conmigo en el corazón.*

*A Andrés, por enseñarme que es sonreír y siempre confiar en mí, aun cuando yo no lo hacía.*

*A Juan, por mostrarme lo importante es trabajar en pro de las cosas que se quieren y que todo se puede lograr con disciplina.*

*A mi familia, por su cariño y apoyo de manera directa e indirecta en este proceso de crecimiento personal.*

*A mis amigos y amigas, que sin ellos no sería la persona que soy hoy en día, gracias por todos los momentos y risas compartidas.*

*“No te rindas que la vida es eso,  
continuar el viaje,  
perseguir tus sueños,  
destrabar el tiempo,  
correr los escombros y destapar el cielo”  
-Mario Benedetti, No te rindas*

*Diana Carolina Aristizabal Gómez*

## Agradecimientos

*“Piensa que en ti está el futuro  
y encara la tarea con orgullo y sin miedo.  
Aprende de quienes puedan enseñarte.”  
Walt Whitman*

*Agradecemos a la vida por darnos la oportunidad de conocernos, haber vivido tantos momentos juntas y crecer como personas y como profesionales la una junto a la otra.*

*Al Magister Marco Antonio Nieto por darnos la oportunidad de trabajar junto a él, por su constante apoyo, por la motivación que nos brindó y su guianza en este proyecto.*

*A Magister Dilan Martínez por su gran ayuda y conocimiento para la elaboración de este proyecto.*

*A los profesores Francisco Velandia, Luis Carlos Mantilla y, Carlos García por sus enseñanzas y ejemplo como profesionales.*

*A Andrés Cabeza por sus recomendaciones y consejos como compañero y amigo en el transcurso de nuestra carrera.*

*A los geólogos Paula Acevedo, Jairo Ortega y especialmente a Juan Jaimes por su gran colaboración y asesoría para el desarrollo de este proyecto.*

*Y a todos nuestros amigos y compañeros, Lex, Xiomy, David, Tania, Laura, Karen, Natalia, Leidy, Fabian y aquellos que olvidamos mencionar, por todos los momentos vividos a lo largo de nuestra vida universitaria, por estar a nuestro lado y por su valiosa amistad.*

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	30
1 Objetivos .....	33
1.1 Objetivo General .....	33
1.2 Objetivos Específicos .....	33
2 Antecedentes .....	34
3 Marco Teórico .....	38
3.1 Desarrollo de los sensores remotos .....	38
3.2 Principios físicos .....	39
3.2.1 Espectro electromagnético .....	40
3.2.2 Terminología .....	42
3.2.3 Interacción de la energía electromagnética con la superficie .....	42
3.3 Tipos de resolución .....	45
3.4. Sensores .....	46
3.4.1 ASTER .....	47
3.4.2 SENTINEL-1 .....	49
3.5 Espectros de vegetación, minerales y rocas .....	52
3.5.1 Componentes de las firmas espectrales .....	56

3.5.2 Rasgos de absorción.....	57
3.5.3 Firmas espectrales en el sensor ASTER .....	58
3.6 Metodología de Sabins.....	63
3.7 Técnicas espectrales.....	64
3.7.1 Composiciones falso color.....	64
3.7.2 Matemática de banda .....	65
3.7.3 Índices de Ninomiya .....	66
3.7.4 Spectral Angle Mapper (SAM).....	67
3.8 Rasgos estructurales.....	68
4 Marco geológico.....	70
4.1 Perú .....	70
4.1.1 Tacna.....	70
4.1.1.1 Ubicación de la zona de estudio.....	70
4.1.1.2 Accesibilidad.....	71
4.1.1.3 Clima y vegetación .....	71
4.1.1.4 Geomorfología .....	72
4.1.1.5 Geología.....	72
4.1.1.6 Geología estructural .....	74
4.1.1.7 Metalogenia.....	75
4.1.2 Puno .....	76

4.1.2.1 Ubicación de la zona.....	76
4.1.2.2 Accesibilidad.....	77
4.1.2.3 Clima y vegetación .....	78
4.1.2.4 Geomorfología .....	78
4.1.2.5 Geología.....	78
4.1.2.6 Geología estructural .....	80
4.1.2.7 Metalogenia.....	80
4.2 Canadá.....	81
4.2.1 Berens .....	81
4.2.1.1 Ubicación de la zona de estudio.....	81
4.2.1.2 Accesibilidad.....	82
4.2.1.3 Clima y vegetación .....	82
4.2.1.4 Geomorfología .....	83
4.2.1.5 Geología.....	83
4.2.1.6 Geología estructural .....	85
4.2.1.7 Metalogenia.....	85
4.2.1.7.1 Historia de la mina.....	85
4.2.1.7.2 Mineralización .....	86
4.2.2 Sturgeon.....	88
4.2.2.1 Ubicación de la zona.....	88

4.2.2.2 Accesibilidad.....	89
4.2.2.3 Clima y vegetación .....	89
4.2.2.4 Geomorfología .....	90
4.2.2.5 Geología.....	90
4.2.2.6 Geología estructural .....	92
4.2.2.7 Metalogenia.....	92
5 Metodología.....	93
5.1. Diagrama de Flujo de datos nivel 0. Modificado de Caiza, 2018.....	93
5.1Diagrama de flujo de datos nivel 1. Adquisición de datos. Modificado de Caiza, 2018. .....	94
5.2Diagrama de flujo de datos nivel 1. Pre-procesamiento de las imágenes satelitales. .....	100
5.3.1 ASTER.....	102
5.3.1.1 Creación del Layerstacking.....	102
5.3.1.2 Calibración Radiométrica .....	102
5.3.1.3 Corrección Atmosférica .....	103
5.3.1.4 Elaboración de mascararas.....	103
5.3.1.4.1 Máscara de vegetación.....	104
5.3.1.4.2 Máscara de agua.....	104
5.3.1.4.3 Máscara de nubes.....	105

5.3.1.5 Corrección atmosférica termal .....	105
5.3.1.6 Normalización a emisividad .....	106
5.3.2 SENTINEL-1 .....	106
5.3.2.1 Aplicación de archivo de orbita .....	107
5.3.2.2 Eliminación del ruido termal .....	107
5.3.2.3 Eliminación del ruido de borde.....	107
5.3.2.4 Calibración .....	108
5.3.2.5 Filtrado de manchas .....	108
5.3.2.6 Corrección del terreno.....	108
5.3.2.7 Conversión a dB.....	108
5.4 Diagrama de flujo de datos nivel 1. Procesamiento de las imágenes satelitales.....	109
5.4.1 ASTER.....	109
5.4.1.1 Óptico.....	109
5.4.1.1.1 Combinaciones de bandas en RGB.....	111
5.4.1.1.2 Cocientes de bandas.....	111
5.4.1.1.3 Índices de Ninomiya .....	112
5.4.1.1.4 Spectral Angle Mapper (SAM).....	112
5.4.1.2 Termal .....	113
5.4.2 Sentinel-1 .....	114
5.5 Análisis .....	115

6	Resultados.....	116
6.1	Perú.....	116
6.1.1	Tacna.....	116
6.1.1.1	Aplicación de Máscaras.....	117
6.1.1.2	Combinación de Bandas.....	118
6.1.1.3	Cocientes de Bandas.....	121
6.1.1.4	Índices de Ninomiya.....	125
6.1.1.5	Cartografía Espectral por la técnica de clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper).....	128
6.1.1.6	Índices TIR.....	132
6.1.1.7	Lineamientos.....	133
6.1.2	Puno.....	134
6.1.2.1	Aplicación de Máscaras.....	135
6.1.2.2	Combinación de Bandas.....	136
6.1.1.3	Cocientes de Bandas.....	138
6.1.1.4	Índices de Ninomiya.....	142
6.1.2.5	Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper).....	146
6.1.2.6	Índices TIR.....	149
6.1.2.5	Rasgos Estructurales.....	150
6.2	Canadá.....	151

ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	11
6.2.1 Berens .....	151
6.2.1.1 Aplicación de Máscaras .....	152
6.2.1.2 Combinación de Bandas .....	153
6.2.1.3 Cocientes de Bandas .....	156
6.2.1.4 Índices de Ninomiya .....	159
6.2.1.5 Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper).....	159
6.2.1.6 Índices TIR.....	163
6.2.1.5 Rasgos Estructurales .....	164
6.2.2 Sturgeon .....	165
6.2.2.1 Aplicación de Máscaras .....	166
6.2.2.2 Combinación de Bandas .....	167
6.2.2.3 Cocientes de Bandas .....	169
6.2.2.4 Índices de Ninomiya .....	172
6.2.2.5 Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper).....	172
6.2.2.6 Índices TIR.....	175
6.2.2.7 Rasgos Estructurales .....	176
7 Análisis .....	178
7.1 Perú .....	179
7.1.1 Tacna.....	179
7.1.2 Puno .....	184

ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES	12
7.2 Canadá.....	189
7.2.1 Berens .....	189
7.2.2 Sturgeon.....	194
8 Discusión .....	198
8.1 Perú.....	198
8.2 Canadá.....	201
9 Conclusiones.....	203
10 Recomendaciones .....	207
Referencias Bibliográficas .....	208

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Compilación de los estudios más relevantes.....	35
Tabla 2. Terminología utilizada en el desarrollo del documento. Recopilado de Chuvieco (2008) .....	42
Tabla 3. Descripción de las bandas de ASTER y los instrumentos característicos. Modificado de Van der Meer et al. (2012).....	48
Tabla 4. Información general de Sentinel-1.....	51
Tabla 5. Enlaces iónicos caracterizados en las bandas ASTER con su respectiva alteración hidrotermal. Modificado de Marquetti et al. 2004.....	61
Tabla 6. Relación entre rasgos de absorción de minerales de alteración hidrotermal y bandas del sensor ASTER. (Modificada de Caiza, 2018.).....	62
Tabla 7. Matemática de banda de los Índices de Ninomiya (2004).....	66
Tabla 8. Índices del TIR de los autores Ninomiya y Guha & Kumar.....	67
Tabla 9. Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Tacna.....	70
Tabla 10. Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Puno.....	76
Tabla 11. Coordenadas geográficas de la zona de estudio Berens. ....	81
Tabla 12. Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Sturgeon .....	88
Tabla 13. Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Berens.....	96
Tabla 14. Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Sturgeon. ....	97
Tabla 15. Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Puno.....	97
Tabla 16. Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Tacna.....	98
Tabla 17. Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Berens.....	98

Tabla 18. Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Sturgeon.....	99
Tabla 19. Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Puno.....	99
Tabla 20. Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Tacna. ....	99
Tabla 21. Combinaciones de bandas utilizadas, que minerales identifican y los autores que las han utilizado.....	111
Tabla 22. Cocientes de bandas utilizados, que minerales identifica y los autores que lo han utilizado.....	111
Tabla 23. Minerales a mapear en el SAM.....	112
Tabla 24. Tabla resumen de las características de las combinaciones de bandas utilizadas. ....	119
Tabla 25. Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER.....	129
Tabla 26. Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER de la zona de Puno.....	146
Tabla 27. Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER para la zona de Berens.....	159
Tabla 28. Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER para la zona de Sturgeon. ....	172
Tabla 29. Targets de exploración en la franja metalogenética del Cretácico inferior en la zona de estudio de Tacna. ....	182
Tabla 30. Targets de exploración en la franja metalogénica en la zona de estudio de Puno. ....	187
Tabla 31. Targets de exploración en la zona de estudio de Berens. ....	193
Tabla 32. Tabla de resumen de los posibles targets en las zonas de estudio. ....	204
Tabla 33. Tabla resumen de los lineamientos determinados en las zonas de estudio.....	206

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Componentes de los sensores remotos. Modificado de Demirel & Düzgün (2011). .	38
Figura 2. Onda electromagnética. El campo eléctrico y magnético son ortogonales entre sí. $\lambda$ es la longitud de onda, $\nu$ es la frecuencia, y la $c$ es la velocidad de la luz. Modificada de Gupta (2018). .....	39
Figura 3. a) Espectro electromagnético. b) acercamiento a las regiones del espectro visible e infrarrojo. Modificado de Gupta (2018). .....	40
Figura 4. Mecanismos de interacción energética en la tierra. $E_i\lambda$ es la energía espectral incidente, $E_r\lambda$ , $E_a\lambda$ y $E_t\lambda$ son los componentes de la energía reflejada, absorbida y transmitida respectivamente. Modificado de Gupta (2018).....	43
Figura 5. Mecanismo de reflexión. a. reflexión especular. b. reflexión lambertiana (difusa). c. reflexión semidifusa (cuerpos naturales). Modificado de Gupta (2018). .....	44
Figura 6. Tipos de resolución. a) resolución espacial. b) resolución espectral. c) resolución radiométrica. d) resolución temporal. Recopilado de Bravo (2017) y Chuvieco (2008).....	46
Figura 7. Resolución espectral de Aster y otras plataformas destacadas para la teledetección geológica. Tomado de El Atillah et al. (2019).....	47
Figura 8. Modos de operación de Sentinel-1 tomada de Torres et al. 2012. ....	50
Figura 9. Firmas espectrales de características comunes en la tierra. Modificado de Demirel & Düzgün (2011). .....	52
Figura 10. Espectro de reflectancia de materiales comunes de la superficie y las bandas de ASTER a estas longitudes de onda. Tomado de Hewson et al. (2020) .....	53

Figura 11. Firmas espectrales de la Hematita, Jarosita y Goethita en la región del VNIR. Modificado de Gupta (2018).....	54
Figura 12. a) Firmas espectrales de minerales de arcilla. b) Firmas espectrales del TIR de los principales grupos minerales aniónicos Modificado de Gupta (2018). .....	55
Figura 13. Espectro de la goethita usado para ilustrar la terminología de continuo, absorción de la banda y la profundidad de absorción. Modificado de Gupta, 2018. ....	57
Figura 14. Principales rasgos de absorción, el enlace iónico que representan y los minerales que se pueden determinar. (Modificado de Cruz, 2008 y Hauff, 2008). ....	58
Figura 15. Características espectrales de minerales en los subsistemas del VNIR y SWIR del sensor ASTER. Tomado de Rodríguez, 2008. ....	58
Figura 16. Características espectrales de los minerales en el subsistema TIR del sensor ASTER. Tomado de Rodríguez, 2008. ....	59
Figura 17. Comportamiento espectral de los minerales en relación a las bandas ASTER. Modificado de Rowan and Mars (2006). ....	60
Figura 18. Posiciones esquemáticas del color en el diagrama de color ternarios B, G, R (o RGB). Tomado de Stackoverflow. ....	64
Figura 19. Representación del ángulo de referencia. Tomado de Künzer. ....	67
Figura 20. Mapa de localización de la zona de estudio de Tacna. A) Mapa de Perú donde resalta en naranja el departamento de Tacna; B) Acercamiento al departamento de Tacna (naranja) y la zona de estudio en rojo ubicada al SO cerca de la línea de costa; C) Área de estudio. ....	70
Figura 21. Mapa geológico de la zona de estudio Tacna. Cartografía geológica a escala 1:100.000 tomada del INGEMMET. ....	73

- Figura 22. Mapa de localización de la zona de estudio de Puno. A) Mapa de Perú donde resalta en amarillo el departamento de Puno; B) Acercamiento del departamento de Puno en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al S, al O del lago Titicaca; C) Área de estudio en Puno. .... 76
- Figura 23. Mapa geológico de la zona de estudio de Puno. Base cartográfica a 1:100.000 tomado del INGEMMET. .... 78
- Figura 24. Mapa de localización de la zona de estudio de Berens, A) Mapa de Canadá donde resalta en amarillo la provincia de Ontario; B) Acercamiento a la provincia de Ontario en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al NO cerca al límite con la provincia de Manitoba; C) Área de estudio en Berens. .... 81
- Figura 25. Mapa geológico en la zona de Berens. La cartografía geológica a escala 1:250.000 es tomada del OGS, 2011. .... 83
- Figura 26. Mapa de localización de Sturgeon. A) Mapa de Canadá donde resalta en amarillo la provincia de Ontario; B) Acercamiento a la provincia de Ontario en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al NO cerca al límite con la provincia de Manitoba; C) Área de estudio en Sturgeon Lake..... 88
- Figura 27. Mapa geológico en la zona de Sturgeon. La cartografía geológica a escala 1:250.000 es tomada del OGS, 2011. .... 90
- Figura 28. Diagrama de flujo de datos. Modificado de Caiza (2018)..... 93
- Figura 29. Diagrama de flujo de datos de la adquisición de datos. Modificado de Caiza (2018). .... 94
- Figura 30. A y B. diagrama de flujo de datos del pre-procesamiento de las imágenes satelitales ASTER, modificado de Caiza, 2018.C, diagrama de flujo de datos del pre-procesamiento de las imágenes satelitales de Sentinel-1, modificado de Filipponi (2019) ..... 100

Figura 31. Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes satelitales de la parte óptica. Modificado de Caiza (2018).....	109
Figura 32. Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes satelitales de la parte Termal. ....	114
Figura 33. Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes Sentinel-1.....	114
Figura 34. Diagrama de flujo de la correlación de los datos y su análisis. Modificado de Caiza (2018).....	115
Figura 35. Imagen satelital ASTER L1T en infrarrojo color de la zona de Tacna. ....	117
Figura 36. Aplicación de máscaras sobre la zona de Tacna. Máscara de vegetación color verde, máscara de agua en tonalidad azul y máscara de nubes en color cian.....	118
Figura 37. Combinaciones de bandas RGB. A) 468, B) 461, C) 4/5,4/6,4/7 y D) 5/6,7/6,7/5, muestra las zonas con minerales arcilloso y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro. ....	120
Figura 38. Cocientes de bandas. A) 2/1 - hierro férrico, B) 4/2 - Gossan, C) 4/5 - Alteración argílica avanzada, D) 4/6 - minerales arcillosos, E) 4/7 - alteración filica, F) 5/6 - fengita, G) 7/5 – Caolinita, H) 7/6 – moscovita, I) 7/5 – Caolinita y J)5/3+1/2 – hierro ferroso. ....	121
Figura 39. Áreas de interés a partir de los cocientes para Tacna. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro.....	124
Figura 40. Índices de Ninomiya. A) ALI (alunita), B) CLI (calcita), C) KLI (caolinita), D) OHIa (moscovita, illita y montmorillonita) y E) OHIb (pirofilita).....	125
Figura 41. Áreas de interés de índices de Ninomiya OHIa, OHIb, KLI, CLI y ALI en la zona de estudio, áreas de interés en recuadro blanco con borde negro. ....	127

- Figura 42. Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Tacna. Las áreas de interés resaltadas en el recuadro blanco con borde negro. .... 131
- Figura 43. Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Tacna A) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice B) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de mafico. .... 132
- Figura 44. Mapa de lineamientos de la zona de Tacna ..... 133
- Figura 45. Imagen satelital ASTER L1T en infrarrojo color de la zona de Puno..... 134
- Figura 46. Aplicación de máscaras sobre la zona de Puno. Máscara de vegetación color verde. .... 135
- Figura 47. Combinaciones de bandas RGB. A) 4,6,8; B) 5/6,7/6,7/5; C) 4,6,1; D) 5,3,1; E) 4/5,4/6,4/7 y F) 3,2,1; muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro. .... 137
- Figura 48. Cocientes de bandas. A) 4/5 - Alteración argílica avanzada; B) 4/7 - alteración filica; C) 4/6 - minerales arcillosos; D) 7/5 – Caolinita; E) 5/6 – fengita; F) 7/6 – moscovita; G) 2/1 – hierro férrico; H) 5/3+1/2 –hierro ferrosos y I) 4/2 – Gossan..... 138
- Figura 49. Áreas de interés a partir de los cocientes. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro..... 141
- Figura 50. Índices de Ninomiya. A) ALI (alunita), B) CLI (calcita), C) KLI (caolinita), D) OHIa (moscovita, illita y montmorillonita) y E) OHIb (pirofilita)..... 143
- Figura 51. Áreas de interés de índices de Ninomiya OHIa, OHIb, KLI, CLI y ALI en la zona de estudio de Puno, áreas de interés en recuadro blanco con borde negro. .... 145
- Figura 52. Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Puno. Las áreas de interés se encuentran en recuadros blancos con borde negro..... 148

Figura 53. Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Puno A) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice B) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos.....	149
Figura 54. Mapa de lineamientos de la zona de Puno.....	150
Figura 55. Imagen satelital ASTER L1T en infrarrojo color de la zona de Berens.....	151
Figura 56. Aplicación de máscaras sobre la zona de Berens. Máscara de vegetación color verde. .....	152
Figura 57. Combinaciones de bandas RGB. A) 3,2,1; B) 4,6,1; C) 4,6,8; D) 5,3,1 y E) 5/6,7/6,7/5, muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro.....	154
Figura 58. Cocientes de bandas. A) 2/1 – hierro férrico; B) 4/2 – Gossan; C) 5/3+1/2 –hierro ferroso y D) 7/5 – Caolinita. ....	157
Figura 59. Áreas de interés a partir de la unión de los cocientes de banda para la zona de Berens. Las áreas se encuentran recuadros blancos con marco negro. ....	158
Figura 60. Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Berens. Áreas de interés en recuadro blanco con borde negro. ....	161
Figura 61. Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Berens a) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice b) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos.....	163
Figura 62. Mapa de lineamientos de la zona de Berens.....	164
Figura 63. Imágenes Aster L1T en infrarrojo color para la zona de Sturgeon. ....	165
Figura 64. Aplicación de máscaras sobre la zona de Sturgeon. Máscara de cuerpos de agua en color azul y las nubes en color cian. ....	166

- Figura 65. Combinaciones de bandas RGB. A) 461; B) 531; C) 943 y D) 321, muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro. .... 167
- Figura 66. Cocientes de bandas. A) 4/5 - Alteración argílica avanzada; B) 4/6 - minerales arcillosos; C) 2/1 – hierro férrico; D) 5/3+1/2 –hierro ferrosos y E) 4/2 – Gossan..... 169
- Figura 67. Áreas de interés a partir de los cocientes. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro..... 171
- Figura 68. Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Sturgeon. Áreas de interés en recuadros blancos con borde negro. .... 174
- Figura 69. Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Sturgeon a) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice b) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos. .... 176
- Figura 70. Mapa de lineamientos de la zona de Sturgeon ..... 177
- Figura 71. Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) índices de Ninomiya y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Tacna. .... 179
- Figura 72. Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio de Tacna. .... 181
- Figura 73. Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) índices de Ninomiya y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Puno. .... 185
- Figura 74. Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio de Puno. .... 186

Figura 75. Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) cartografía de vegetación y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Berens. ....	189
Figura 76. Correlación de los ensambles mineralógicos con el mapa de vegetación. ....	191
Figura 77. Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio de Berens .....	192
Figura 78. Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) Cartografía Espectral SAM y D) Cartografía de vegetación, aplicadas sobre la zona de estudio de Sturgeon. ....	194
Figura 79. Correlación de los ensambles mineralógicos con el mapa de vegetación. ....	196
Figura 80. Mapa geológico de la zona de Sturgeon con los lineamientos determinados a partir de la imagen de radar Sentinel-1 y las ocurrencias minerales. ....	197

### **Lista de Apéndices**

**Apéndice A.** Mapas generados mediante el procesamiento de las imágenes satelitales de ASTER y Sentinel-1 en las zonas de estudio.

**Apéndice B.** Tablas de las características de los targets y firmas espectrales de los minerales.

**Apéndice C.** Diagrama de flujo de la metodología.

**Abreviaturas y Siglas**

**ASTER** - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

**Ag** - plata

**Al** - aluminio

**ALI** - Índice de Ninomiya de Alunita

**ARCGIS** - paquetes de softwares de Sistema de Información Geográfica

**Au** - oro

**BIL** - formato Band-interleaved-by-line

**BSQ** – formato Band Sequential

**CLI** – Índice de Ninomiya de Calcita

**Cociente 2/1** – hierro ferroso

**Cociente 4/2** – alteración gossan

**Cociente 4/5** – alteración argílica avanzada

**Cociente 4/6** – minerales arcillosos

**Cociente 4/7** – alteración filica

**Cociente 5/3+1/2** – hierro ferrico

**Cociente 5/6** - fengita

**Cociente 7/5** - caolinita

**Cociente 7/6** - moscovita

**Cu** - cobre

**E** – este

**ENVI** – Enviromental for Visualizing Images

**ESA** – European Space Agency

**Fe** – hierro

**GRD** – formato Golden Software Surfer

**KLI** – Índice Ninomiya de caolinita

**IAR** - Internal Average Relative Reflectance Correction

**IOCG** – Iron Oxide-Copper-gold deposits

**ISAC** – In-Scene Atmospheric Compensation

**INGEMMET** – Instituto geológico, minero y metalurgico

**L1T** – nivel de producto ASTER

**LANDSAT** – Land Remote Sensing Satellite

**Mg** – magnesio

**MRI** – Mafic Mineral bearing Rock Index

**N** – norte

**NASA** – National Aeronautics and Space Administration

**NDVI** – Normalized Difference Vegetation Index

**NDWI** – Normalized Difference Water Index

**NE** - noreste

**nm** – nanómetros

**NO** - noroeste

**O** – oeste

**OGS** – Ontario Geological Survey

**OH** - hidróxidos

**OH<sub>Ia</sub>** – Índice de Ninomiya de moscovita, illita y montmorillonita

**OH<sub>Ib</sub>** – Índice de Ninomiya de pirofilita

**Pb** – plomo

**POD** – Precise Orbit Determination

**POE** – Precise Orbit Efemerides

**Ppm** – partes por millón

**QRI** – Quartz bearing Rock Index

**RGB** – red green blue

**RGB** 468 y (5/6, 7/6, 7/5) red green blue para la cartografía de alteraciones

**RGB** 461 y 531- red green blue para la cartografía de minerales arcillosos

**RGB** 943, 321 y (4/5,4/6,4/7) red green blue para la cartografía de óxidos he hidróxidos

**S** – sur

**SAM** – Spectral Angle Mapper

**SAR** – Synthetic Aperture Radar

**SE** – sureste

**SNAP** – Sentinel Application Platform

**SO** – suroeste

**SWIR** – Short Wave Infrared Radiometer

**TIR** – Thermal Infrared Radiometer

**USGS** – United States Geological Survey

**UTM** – Universal Transverse Mercator

**VMS** – Volcanic Massive Sulphides

**VNIR** – Visible Near Infrared Radiometer

**Zn** - zinc

**µm** – micrómetro

### Glosario

**Irradiancia (E):** cantidad de energía que incide en una superficie horizontal de área unitaria por unidad de tiempo. Y se conoce como irradiancia espectral cuando se considera en una longitud de onda determinada.

**Radiancia (L):** energía total radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida (magnitud que detecta el sensor). Se mide en vatios por metro cuadrado y estereoradian ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ ).

**Emisividad ( $\epsilon$ ):** relación entre la emitancia de una superficie ( $M$ ), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura ( $M_n$ ).

**Reflectividad ( $\rho$ ):** relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.

**Absortividad ( $\alpha$ ):** relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.

**Transmisividad ( $\tau$ ):** relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Lógicamente  $\rho + \alpha + \tau = 1$ .

## Resumen

**Título:** Análisis de imágenes multiespectrales para la prospección de depósitos de minerales metálicos en los proyectos de Boca del Río-Tacna, Inchupalla-Puno, Perú y Berens-Sturgeon, Ontario, Canadá.\*

**Autor:** Diana Carolina Aristizabal Gómez, Jenny Paola García Lobo\*\*

**Palabras Claves:** Sensores remotos, alteraciones hidrotermales, prospección mineral, ASTER, Sentinel-1.

### Descripción:

Este estudio se realizó en cuatro áreas de aproximadamente 50Km<sup>2</sup> cada una, a excepción de Sturgeon que cubre un área de 312 Km<sup>2</sup>. Una en el departamento de Tacna, localizada al N del poblado Boca del río, otra en el departamento de Puno, al NO del poblado de Mazocruz, estas dos en Perú y se encuentran en ambientes áridos a semiáridos. Las otras dos zonas se localizan en Canadá, en la provincia de Ontario, la zona de Berens se ubica en el distrito de Kenora, mientras la zona de Sturgeon, en el distrito de Thunder Bay. Ambas se caracterizan por presentar una densa vegetación boreal que cubre la mayor parte de las zonas. Se aplicaron diferentes técnicas que han sido utilizadas para el reconocimiento de alteraciones hidrotermales. Las combinaciones de bandas RGB y los cocientes de bandas son técnicas eficientes para la cartografía de alteraciones hidrotermales, minerales arcilloso y óxidos. Los índices de Ninomiya aplicados al subsistema SWIR y la cartografía espectral por clasificación supervisada SAM comparando firmas espectrales, demostraron ser más eficientes en zonas áridas a semiáridas. Para corroborar las áreas correspondientes a las alteraciones se tuvieron en cuenta los ensambles mineralógicos según el tipo de depósito mineral de cada zona, no obstante, en los proyectos de Canadá se corroboraron que estos se localizaran en zonas sin vegetación. Se encontraron seis posibles targets de exploración para sistemas IOCG en Tacna con alteración de óxidos de Fe y arcillas; cuatro targets para sistemas epitermales de baja sulfuración en Puno con alteraciones argílica, propilítica y presencia de óxidos de Fe; tres targets en Berens que coinciden con los datos de depósitos minerales del OSG y corresponden a sistemas VMS, para el caso de Sturgeon, los ensambles mineralógicos mapeados coinciden con zonas vegetadas, por lo tanto, no se indicaron posibles sistema mineral.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Marco Antonio Nieto Patarroyo. Geólogo Msc. Codirector: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Geólogo Msc.

### Abstract

**Title:** Multispectral image analysis for the prospection of metallic mineral deposits at the Boca del Rio-Tacna, Inchupulla-Puno, Peru and Berens, Sturgeon, Ontario Canada Projects.\*

**Author:** Diana Carolina Aristizabal Gómez, Jenny Paola García Lobo <sup>1</sup>

**Key Words:** Remote sensing, hydrothermal alterations, mineral prospecting, ASTER, Sentinel-1.

### Description:

This study was carried out in four areas of approximately 50Km<sup>2</sup> each, except for Sturgeon which covers an area of 312 km<sup>2</sup>. One in the department of Tacna, located to the N of the town of Boca del Rio, and another in the department of Puno, to the NW of the town of Mazocruz, both in Perú and are located in arid to semi-arid environments. The other two zones are located in Canada, in the province of Ontario, the Berens zone locates in the district of Kenora, while the Sturgeon zone, is in the district of Thunder Bay. Both are characterized by a dense boreal vegetation that covers most of the zones. Different techniques were applied for the recognition of hydrothermal alterations. The RGB band combinations and band ratios are efficient techniques for mapping alterations, clay minerals and oxides. The Ninomiya indices applied to the SWIR subsystem and spectral mapping through supervised classification SAM to compare spectral signatures, have shown to be more efficient in arid to semi-arid zones. Mineralogical assemblages were taken into account according to the type of mineral deposit in each zone to corroborate the areas corresponding to the alterations, however, in the Canadian projects the assemblages were located in zones that did not have vegetation. Six possible exploration targets were found for IOCG systems in Tacna with alteration of Fe oxides and hydroxides and clays; four targets for low sulfidation epithermal systems in Puno with argillic and propylitic alteration and presence of Fe oxides; three possible targets at Berens that coincide with the OSG (2018) mineral deposit inventory data correspond to VMS systems; in the case of Sturgeon, the mapped mineralogical assemblages coincide with vegetated zones, and therefore, no possible mineral system were indicated.

---

\* Degree Project in the Research modality

<sup>1</sup> Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Marco Antonio Nieto Patarroyo. Geologist Msc. Co-director: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Geologist Msc.

### **Introducción**

El procesamiento, análisis e interpretación de las imágenes multiespectrales obtenidas por sensores remotos se ha convertido en una herramienta bastante útil para la prospección y exploración mineral, debido a que permite el reconocimiento de alteraciones hidrotermales y roca inalterada. Los sensores captan la energía que es reflejada, transmitida, absorbida o emitida por la superficie, por lo que la energía se transfiere en forma de radiación, y su intensidad dependerá de los atributos físicos o composicionales de esta. Por lo tanto, la radiación electromagnética representa el vínculo existente entre el sensor y el objeto, es caracterizada por medio de su longitud de onda y frecuencia, la dependencia de estos parámetros es conocido como el espectro electromagnético. Los sensores son capaces de captar las señales desde el visible hasta el infrarrojo termal ( $0.4 \mu\text{m} - 1 \text{mm}$ ), permitiendo diferenciar las diferentes propiedades de los objetos y así poder mapear su distribución en el suelo.

Chuvieco (2008) afirma que la teledetección es una técnica muy variable, que depende del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Las agencias espaciales y empresas tecnológicas han desarrollado diferentes plataformas para realizar proyectos de teledetección. El programa Landsat marcó un antes y después en la teledetección geológica, este programa inició con el lanzamiento de Landsat-1 en 1972 por la NASA, y ha lanzado hasta el momento 8 satélites con diferentes especificaciones. En 1999 se lanzó Landsat-7, y en diciembre de este año también fue enviado el sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) por medio del satélite TERRA de la NASA, el cual presenta una órbita heliosincrónica y se caracteriza por poseer mayor resolución espacial y espectral. La región óptica cuenta con nueve bandas, tres pertenecientes a la región del infrarrojo cercano (VNIR) con píxeles de 15 metros, las seis restantes identifican la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) con píxeles

de 30 metros, por último, presenta cinco bandas en la región del termal (TIR) con píxeles de 90 metros. El uso de las imágenes multiespectrales permite reducir costos al usuario final, debido a que la mayoría de esta información es proporcionada de forma gratuita.

Por otra parte, el programa Copernicus de la agencia espacial ESA desarrolló una serie de misiones denominadas Sentinel, con el objetivo de obtener datos de varios aspectos de la observación de la tierra. La misión Sentinel- 1 consta de dos satélites que comparten el mismo plano de órbita, Sentinel-1A fue lanzado el 3 de abril de 2014, mientras que Sentinel-1B el 25 de abril de 2016, estos cargan un instrumento de radar de apertura sintética, el cual permite obtener imágenes durante el día o la noche. Uno de los principales usos de estas imágenes es poder mapear las estructuras presentes en el área de estudio.

Perú se caracteriza por su potencial minero resaltando su histórico depósito Yanacocha. Al sur de Perú se localizan las regiones de Puno y Tacna, en las cuales se presentan importantes actividades mineras de depósitos metálicos. La primera presenta rocas sedimentarias, volcánicas y metamórficas de edades desde el Cámbrico hasta el Cuaternario y en la segunda afloran principalmente rocas volcánicas y sedimentarias de edades del Jurásico Inferior hasta el Cuaternario, destacando que las rocas intrusivas coinciden con la ubicación de las minas (Acosta *et al.*, 2011).

Canadá es otro país reconocido por su alto y explorado potencial minero. La provincia de Ontario se encuentra localizada principalmente en el escudo canadiense, en donde se ubican múltiples depósitos metálicos en diferentes grados de explotación y exploración, como son los casos de Berens y Sturgeon. Los dos se caracterizan por presentar rocas de edades Precámbricas. Las partes centrales del río Berens se encuentran rocas plutónicas félsicas y en menor proporción rocas metavolcánicas y metasedimentarias (Stone, 1998). Por otra parte, la estratigrafía de

Sturgeon se dividió en cuatro conjuntos siguiendo su litología y su distribución geográfica, estos comprenden varios ciclos volcánicos, cada uno de estos consta de una unidad inferior de metavolcánicas máficas y una superior de metavolcánicas intermedias a félsicas, según (Trowell, 1983).

En este estudio se propone correlacionar las respuestas de las imágenes Aster para la cartografía de alteraciones hidrotermales con los lineamientos obtenidos mediante Sentinel-1 para la determinación de áreas prospectivas para posibles depósitos metálicos en las regiones de Ontario, Canadá y Tacna y Puno, Perú.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Determinar áreas con potencial para exploración de depósitos metálicos mediante el uso de composiciones de falso color, matemáticas de banda, índices de Ninomiya y Spectral Angle Mapper en los proyectos de Boca del Rio-Tacna, Inchualla-Puno, Perú y Berens-Sturgeon, Ontario, Canadá.

### 1.2 Objetivos Específicos

Identificar zonas de alteración hidrotermal mediante el análisis de curvas espectrales derivadas del procesamiento digital de las imágenes ASTER.

Relacionar la información geológica y metalogénica existente de las zonas de estudio y sus alrededores, con los resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales multiespectrales.

Validar las zonas de alteración hidrotermal, mediante la técnica de clasificación supervisada *Spectral Angle Mapper* (SAM) y el uso de firmas espectrales de la biblioteca espectral de la USGS.

Establecer las principales estructuras geológicas y lineamientos que pudieron permitir el ascenso de fluidos mineralizantes mediante el tratamiento de imágenes de radar del satélite Sentinel-1.

Discriminar la eficacia del uso de imágenes satelitales multiespectrales en zonas vegetadas para identificación de alteraciones hidrotermales.

## 2 Antecedentes

La aplicación de las imágenes satelitales multiespectrales para la prospección de depósitos metálicos empezó alrededor en la década de 1970, después de que la plataforma Landsat fuera enviada al espacio (1972). Los satélites multiespectrales pueden captar longitudes de onda de 0.4 $\mu$ m hasta 1mm (VNIR-TIR). En estas regiones del espectro electromagnético es posible reconocer diferentes tipos de minerales, debido a sus características composicionales. Los espectros de reflexión de los minerales que ocurren en rocas alteradas hidrotermalmente y los suelos, registran sus características naturales en los anchos de banda del NIR según resalto (Hunt, 1979). Demarcando la importancia que es esta región para los propósitos de la teledetección, debido a que los minerales de alteración, y los minerales inalterados demuestran sus características en el SWIR. Sin embargo, se debe tener en cuenta, que la intensidad de la respuesta dependerá de la accesibilidad de la partícula mineral de la roca con la radiación que interactúa.

Esta técnica ha sido utilizada ampliamente en diferentes lugares del mundo con este objetivo, debido al avance en estas plataformas, las imágenes satelitales multiespectrales más utilizadas para mapear alteraciones hidrotermales relacionadas con depósitos metálicos es ASTER, debido a su alta resolución espectral, principalmente en la región del SWIR. Por otra parte, la implementación de imágenes de radar, como Sentinel-1 son ampliamente utilizadas para caracterizar las estructuras presentes en las áreas de estudio. Los resultados de algunas investigaciones se encuentran resumidos en la Tabla 1, y proveen la base para la discusión en este documento.

**Tabla 1.***Compilación de los estudios más relevantes*

<b>Metodología</b>	<b>Sensor</b>	<b>Lugar</b>	<b>Resultados</b>	<b>Estudios</b>
Comparación de técnicas de mejoramiento de imágenes digitales	Varias plataformas	Varios Lugares	Mejores filtros para resaltar. Contraste lineal simple, filtro pasabajo medio.	Masuoka, <i>et al.</i> (1988)
Utilización de técnicas para la cartografía de zonas alteración hidrotermal por medio de matemática y combinación de bandas y análisis de componentes principales	Landsat TM	Baguio (Filipinas)	Logro alcanzar gran precisión en la inducción a la clasificación supervisada para la cartografía de alteraciones hidrotermales en zonas de alta densidad vegetativa.	Carranza & Hale (2002)
Medición de la reflectancia y emitancia por medio de imágenes multiespectrales para la cartografía de alteraciones hidrotermales y la comparación con las propiedades espectrales y la composición litológica de muestras de roca para la diferenciación y caracterización de cada alteración.	Aster	Reko Diq (Pakistán)	Caracterizo la absorción en las regiones de VNIR, SWIR y TIR para cada alteración hidrotermal.	Rowan <i>et al.</i> (2006)
Diferenciación de Métodos avanzados de procesamiento de imágenes de dos plataformas para determinar zonas de alteración por medio de combinación y	Aster y Landsat TM	Patagonia (Argentina)	Deja clara la metodología del uso de imágenes multiespectrales para determinación de áreas de alteración en zonas áridas.	Crósta <i>et al.</i> (2009)

matemática de bandas.					
Realizaron matemáticas de bandas derivados de los espectros de la imagen (4/8, 4/2, 8/9) en RGB.	Aster	Abu-Marawat (Egipto)	Para la identificación de zonas de alteración es un buen método para la exploración de oro y concluyeron la efectividad del método en zonas áridas.	Gabr <i>et al.</i> (2010)	
Basado en el procesamiento de imágenes de imágenes satelitales multiespectrales para identificación de alteraciones hidrotermales.	Aster	Tacna, Moquegua y Puno (Perú)	Reconocimiento de zonas de diferentes alteraciones hidrotermales en yacimientos epitermales de Au y Ag de alta sulfuración.	Mamani y Malpartida (2014)	
Analizar la identificación de rasgos lineales que puedan estar manifestando la presencia de lineamientos estructurales y la discriminación de unidades texturales posiblemente vinculadas a distintas litologías.	Radarsat-1 y 2	Provincia de Santa Cruz (Argentina)	Determinación las potencialidades de las imágenes de radar de expresar variaciones litológicas y de favorecer la detección de rasgos estructurales y morfológicos.	Marchionni y Cavayas (2014)	
Utilizaron las bandas pertenecientes al SWIR para clasificar tipos de alunita, VNIR y TIR para discriminar sílice, y VNIR y SWIR para identificar Alunita asociada a sílice y óxidos de hierro.	Aster	Huancavelica, Ayacucho, Cuzco, Moquegua y Tacna (Perú)	Reconocimiento de depósitos epitermales, distinguiendo tipos de Alunita, asociada con sílice y óxidos de hierro.	Gonzales y SAC (2015)	
Aplico técnicas de cartografía espectral por medio cocientes	Aster	Cerro de Pasco (Perú)	Catografía de zonas de alteración hidrotermal y	Caiza (2018)	

de bandas, combinaciones de bandas, índices de Ninomiya y SAM para cartografiar alteraciones hidrotermales.				prospección de zonas de interés para exploración mineral.	
Uso de técnicas geomáticas para la determinación de una posible caldera de colapso	Sentinel-2, Alos Palsar y Sentinel-1	Campo Volcánico del Río Santa María (México)		La extracción de lineamientos permitió categorizar los lineamientos estructurales generales y detallados, necesarios para un realce morfológico y estructural de la zona.	Hernández (2018)
Por medio de técnicas de relación y combinación de bandas y análisis de componentes principales.	Aster y Sentinel-2	Barramiya– Mueilha (Egipto)		Cartografía de alteraciones hidrotermales y zonas de cizallamiento con técnicas independientes de la cantidad de vegetación presente.	Zoheir (2019)
Hizo la revisión de aplicaciones de plataformas multiespectrales e hiperespectrales para la exploración mineral, teniendo en cuenta los últimos avances de la época.	Sentinel-2 y Landsat-8	Varias zonas		Determina las plataformas existentes y más utilizadas para exploración mineral, las técnicas más comunes y la combinación de métodos y plataformas, basado en la metodología de Sabins (1997)	Adairi (2020)

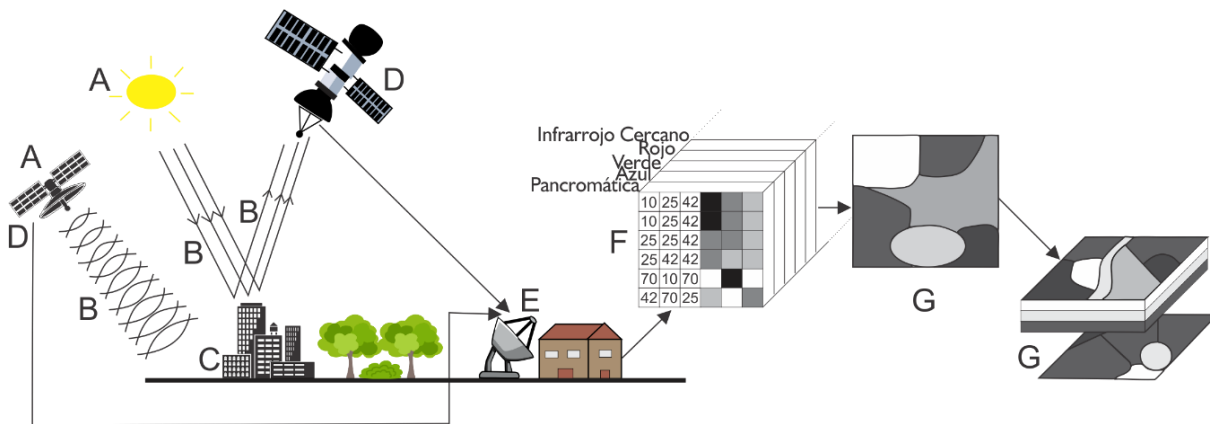
### 3 Marco Teórico

#### 3.1 Desarrollo de los sensores remotos

Según Chuvieco (2008), la teledetección es una técnica auxiliar, multidisciplinaria, discreta, y complementaria con otras disciplinas. Su principal función es obtener información de un objeto sin tocarlo (Chuvieco, 1996).

#### Figura 1.

*Componentes de los sensores remotos. Modificado de Demirel & Düzgiin (2011).*



Los componentes de los sensores remotos se pueden definir en siete elementos (Figura 1) según Demirel & Düzgiin (2011). El primer elemento es la fuente de energía (Figura 1A), este es el componente esencial debido a que proporciona la energía electromagnética al objeto o superficie la cual puede ser natural o inducida. El segundo es la radiación (Figura 1B), la cual proporciona la energía para viajar desde su fuente hasta el objetivo y del objetivo al sensor, interactuando con la atmosfera que atraviesa. El tercero es el objetivo (Figura 1C), este refleja la señal hacia el sensor. El cuarto es el sensor (Figura 1D), este se encarga de recoger y detectar la radiación electromagnética, después de que esta es dispersada, emitida, transmitida, reflejada o absorbida. Luego de esto, la información es enviada por el sensor a una estación de recepción (quinto elemento), donde es procesada y convertida en imagen (Figura 1E). El sexto elemento es la

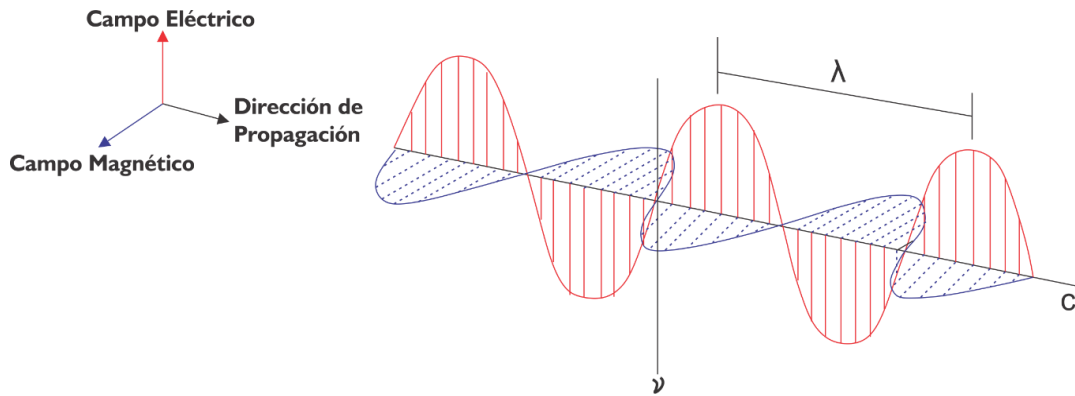
interpretación y análisis (Figura 1F) en esta se obtiene la información detectada a partir de los datos que conforman la imagen. El último elemento, es la aplicación (Figura 1G), este revela nueva información del objeto analizado para ayudar a resolver un problema o a introducir la problemática sobre este.

### 3.2 Principios físicos

La respuesta captada por los sensores remotos se debe a la interacción energética existente entre el sensor y el objeto, ya sea por la reflexión de la radiación solar o por emisión propia (Chuvienco, 2008). La radiación electromagnética se puede explicar mediante dos teorías. La primera es la propuesta por Huygens y Maxwell, donde esta se concibe como un haz oscilatorio que se transmite de un lado a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, que se encuentra contenido dentro de dos campos ortogonales entre sí, magnético y eléctrico (Figura 2). Este varía dependiendo de la longitud de onda y su frecuencia. La ecuación matemática que define esto es:  $c = \lambda * \nu$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\nu$  es la frecuencia, y la  $c$  indica la velocidad de la luz (constante de  $3 \times 10^8$  m/s al vacío). La segunda teoría la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero, esta es propuesta por Planck y Einstein (Chuvienco, 2008).

#### Figura 2.

*Onda electromagnética. El campo eléctrico y magnético son ortogonales entre sí.  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\nu$  es la frecuencia, y la  $c$  es la velocidad de la luz. Modificada de Gupta (2018).*



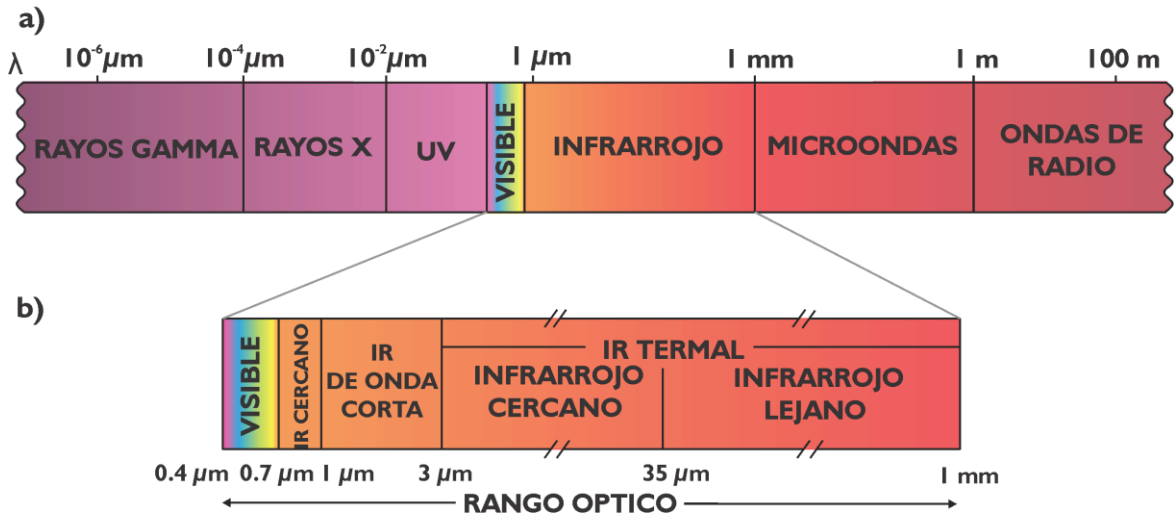
La radiación a mayor longitud de onda tendrá menor frecuencia, debido a esto, será más difícil de captar las señales y se necesitaran medios de detección óptimos (Chuvieco, 2008).

### 3.2.1 Espectro electromagnético

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se puede definir cualquier tipo de energía en función de su longitud de onda o frecuencia, por lo tanto, suelen formarse una serie de bandas donde la radiación electromagnética enseña un comportamiento similar, la organización de estas por la frecuencia o longitud de onda se conoce como el espectro electromagnético (Figura 3a; Chuvieco, 2008). Este define la energía que se mueve con la velocidad de luz en un patrón de onda armónica (Khorram *et al.*, 2016).

#### Figura 3.

a) Espectro electromagnético. b) acercamiento a las regiones del espectro visible e infrarrojo. Modificado de Gupta (2018).



En la teledetección, las regiones del espectro electromagnético más importantes y destacadas por su frecuente uso actualmente son, el espectro visible ( $0,4$  a  $0,7 \mu\text{m}$ ), este se caracteriza por qué es la única radiación que es perceptible por los ojos humanos, además, coincide con las longitudes de onda donde la radiación solar es máxima. En esta región se destacan tres bandas, el azul ( $0,4 - 0,5 \mu\text{m}$ ), verde ( $0,5 - 0,6 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0,6 - 0,7 \mu\text{m}$ ; Chuvieco, 2008). Seguido de este, sigue el infrarrojo cercano ( $0,7$  a  $1,0 \mu\text{m}$ ), después va el infrarrojo de onda corta ( $1 - 3 \mu\text{m}$ ) y, por último, el infrarrojo termal ( $3 \mu\text{m} - 1 \text{ mm}$ ); (Gupta, 2018).

Las regiones mencionadas anteriormente, entran en el rango óptico (Figura 3b), el cual demarca la parte del espectro electromagnético en donde los fenómenos de reflexión y refracción son utilizados para encaminar la radiación, por otra parte, se tiene el rango del microondas ( $1 \text{ mm}$  a  $1 \text{ m}$ ), el cual también es ampliamente usado para propósitos de teledetección terrestre (Gupta, 2018). En este rango se destacan los sensores de radar, los cuales se caracterizan debido a que, la energía es generada y captada por el mismo sensor, estos sistemas son llamados sensores activos; mientras que los que captan la energía solar, se conocen como sensores pasivos (Demirel & Düzgün, 2011).

### 3.2.2 Terminología

Por otra parte, para el entendimiento de esta interacción electromagnética, es preciso aclarar algunos términos utilizados en teledetección. Esto se puede resumir en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Terminología utilizada en el desarrollo del documento. Recopilado de Chuvieco (2008)*

<b>Terminología</b>	<b>Definición</b>
<b>Irradiancia (E)</b>	Cantidad de energía que incide en una superficie horizontal de área unitaria por unidad de tiempo. Y se conoce como irradiancia espectral cuando se considera en una longitud de onda determinada.
<b>Radiancia (L)</b>	Energía total radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida (magnitud que detecta el sensor). Se mide en vatios por metro cuadrado y estereoradian ( $W m^{-2} sr^{-1}$ ).
<b>Emisividad (<math>\epsilon</math>)</b>	Relación entre la emitancia de una superficie ( $M$ ), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura ( $M_n$ ).
<b>Reflectividad (<math>\rho</math>)</b>	Relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie.
<b>Absortividad (<math>\alpha</math>)</b>	Relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie.
<b>Transmisividad (<math>\tau</math>)</b>	Relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie. Lógicamente $\rho + \alpha + \tau = 1$

Cuando un sensor detecta un canal particular del espectro, esta es la medida más cercana a la observación remota, por lo tanto, la radiancia, emisividad, reflectividad, absortividad y transmisividad pueden completarse con el calificativo de espectral (colocando el subíndice  $\lambda$ ), cuando se refiere a una longitud de onda de una banda específica (Chuvieco, 2008)

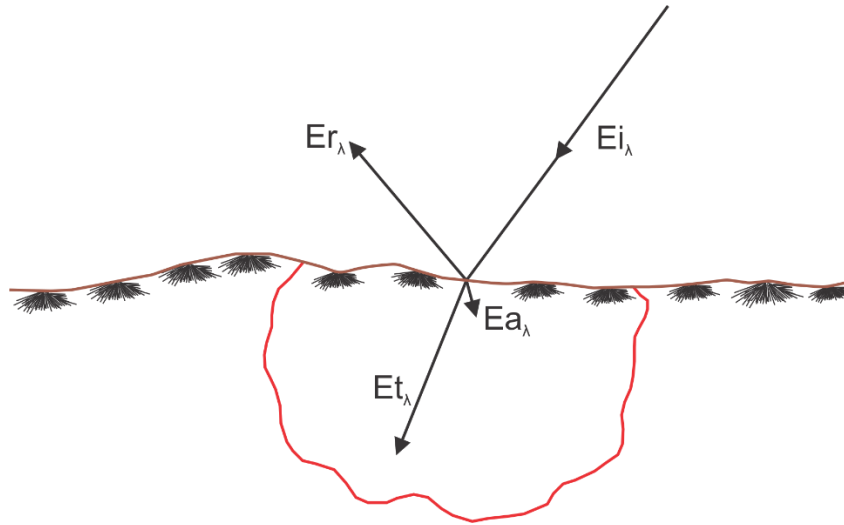
### 3.2.3 Interacción de la energía electromagnética con la superficie

Como se ha mencionado, la energía que pasa a través de la atmósfera interactúa con los objetos que se encuentran en la trayectoria del flujo de energía hasta llegar a la superficie terrestre, mediante tres procesos, reflexión, absorción y transmisión (Figura 4); (Demirel & Düzgün, 2011), siguiendo la Ley de Conservación de la Energía. La intensidad de estos procesos dependerá de las

características físicas y composicionales presentes en la superficie, y estas diferencias son las que permitirán discriminar los objetos para la medición en la teledetección (Gupta, 2018).

**Figura 4.**

*Mecanismos de interacción energética en la tierra.  $E_{i\lambda}$  es la energía espectral incidente,  $E_{r\lambda}$ ,  $E_{a\lambda}$  y  $E_{t\lambda}$  son los componentes de la energía reflejada, absorbida y transmitida respectivamente. Modificado de Gupta (2018).*



Además, el flujo de energía también depende de múltiples factores, uno de estos es la geometría de observación, esta influirá en la cantidad de energía que el sensor reciba, debido a su dependencia con el ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que forma el haz incidente con la posición del sensor (Chuvieco, 2008). Es decir, los principales factores externos que pueden afectar el comportamiento espectral según Chuvieco (2008) son:

- Ángulos de iluminación y observación, que varían con la latitud, fecha del años y hora de observación, además de la posición del sensor.
- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación: orientación de las laderas o pendiente.
- Influencia de la atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la absorción por nubes y a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda.

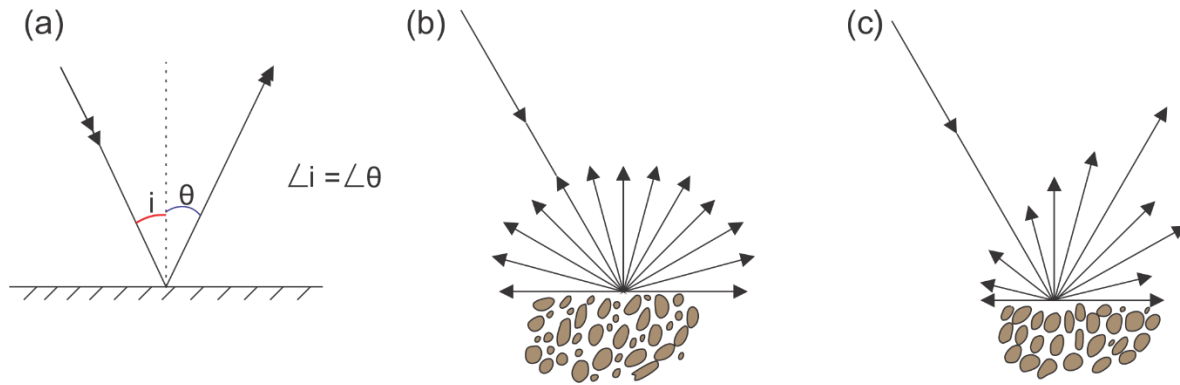
- Variaciones medioambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico, etc.
- Sustrato edafológico o litológico, especialmente influyente cuando la cubierta observada presenta una densidad media.

La radiación incidente en una determinada superficie no solo es la directa solar, también puede provenir de superficies vecinas o de la propia atmósfera, produciendo reflexiones en diferentes direcciones, esto se reconoce como irradiancia difusa. Esta incidencia atmosférica puede generar cambios o malas interpretaciones en el comportamiento espectral de la cubierta que se caracterizando.

Según Gupta (2018) si la superficie es un plano ideal similar a un espejo, ocurre una reflexión especular siguiendo la Ley de Snell, esto quiere decir que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (Figura 5a). Por lo general, las superficies rugosas reflejan en múltiples direcciones, esta se conoce como reflexión dispersa; un caso ideal es la superficie lambertiana, en la que la radiación se refleja uniformemente en todas las direcciones, independiente del ángulo incidente (Figura 5b); sin embargo, la mayoría de los cuerpos naturales tienen un comportamiento combinado, demostrando un patrón de reflexión semidifuso, por lo consiguiente, la radiación se dispersa en varias direcciones, pero es máxima en una dirección, esta corresponde a la Ley de Snell (Figura 5c).

### **Figura 5.**

*Mecanismo de reflexión. a. reflexión especular. b. reflexión lambertiana (difusa). c. reflexión semidifusa (cuerpos naturales). Modificado de Gupta (2018).*

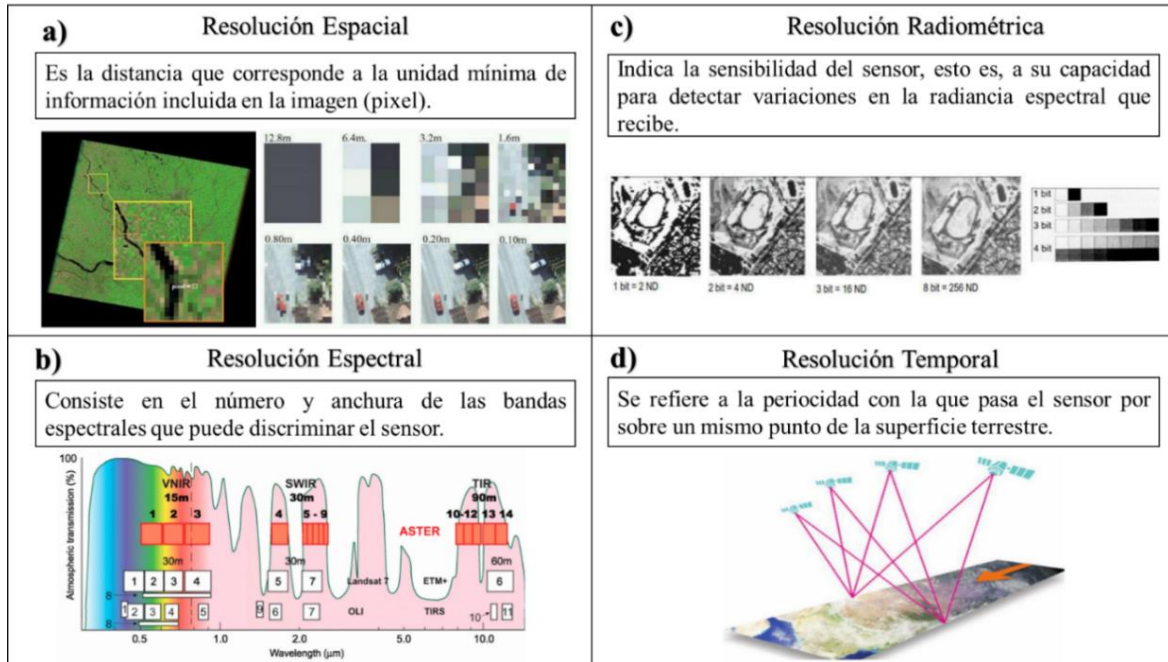


### 3.3 Tipos de resolución

Para mayor claridad, el termino de resolución en teledetección significa la capacidad de discernir objetos o características individuales capturados en una imagen (Khorram *et al.*, 2016). Además, este concepto se refiere al conjunto del equipo, y no cada una de sus partes, en otras palabras, la resolución dependerá del efecto combinado de sus distintos componentes (Chuvieco, 1996). Los datos pertenecientes a los sensores remotos son imágenes digitales. Estos datos se describen en términos de 4 resoluciones (Figura 6); resolución espacial, resolución espectral, resolución radiométrica y resolución temporal.

**Figura 6.**

*Tipos de resolución. a) resolución espacial. b) resolución espectral. c) resolución radiométrica. d) resolución temporal. Recopilado de Bravo (2017) y Chuvieco (2008).*

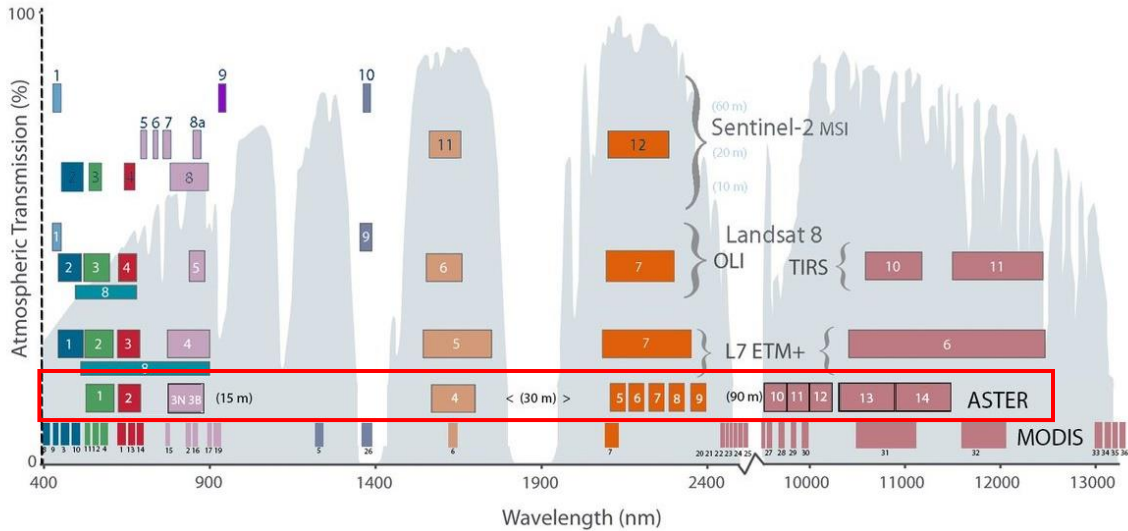
**3.4.**

### Sensores

Teniendo en cuenta los estudios previos mencionados anteriormente, el satélite Aster es uno de los satélites más utilizados para el reconocimiento de alteraciones hidrotermales ya que como menciona Zhang *et al.* (2007), fue el primer satélite con un instrumento de subsistema TIR de alta resolución espectral que por medio de la variación de emisividad espectral puede diferenciar minerales de la superficie. Este satélite cuenta con una alta resolución espectral que se divide en las regiones de longitud de onda VNIR, SWIR y TIR (Figura 7). Según Sabins (1999) otras plataformas importantes en la geología son los sensores de radar que son de gran utilidad para revelar las estructuras y lineamientos del terreno. Además, en algunos estudios como el de Aminov *et al.* (2019), se comparan diferentes plataformas para la extracción de lineamientos llegando a la conclusión que esta es la más eficaz.

**Figura 7.**

*Resolución espectral de Aster y otras plataformas destacadas para la teledetección geológica. Tomado de El Atillah et al. (2019)*



### 3.4.1 ASTER

El Radiómetro de Reflectancia y Emisión Térmica Espacial Avanzada ASTER, localizado en la plataforma Terra lanzada el 18 de diciembre de 1999, está diseñado con tres bandas en el rango espectral VNIR con una resolución espacial de 15 m, seis bandas en el SWIR con una resolución espacial de 30 m que permiten calcular una gran cantidad de índices minerales y cinco bandas en el TIR con una resolución espacial de 90 m que son de utilidad para mapear los índices de alteración (Tabla 3), (Abrams & Hook, 1995). La anchura de la franja es de 60 km x 60 km, y su resolución temporal es de 16 días. Los productos ASTER cuentan con calibración de la radiancia, reflectancia, emisividad y temperatura según su nivel de procesamiento adquirido (Origel y Sanchez, 2010). El nivel “1A” corresponde a la imagen en bruto y contiene datos de radiancia no proyectados, incluye los coeficientes de corrección radiométrica y geométrica en el encabezado interno, pero sin aplicar, de este se deriva el nivel “1T” que contiene la radiancia calibrada geoméricamente del sensor y ha sido girada a la proyección *north-up* UTM, este nivel

incluye tres bandas de infrarrojo cercano y visible VNIR, seis bandas de infrarrojo de onda corta SWIR y cinco de infrarrojo térmico TIR este nivel es requerido para realizar la ortorectificación, mientras que el nivel “1B” cuenta de igual forma con los datos de radiancia, sin embargo, este ya tiene aplicado los coeficientes de correcciones. El “2B” cuenta con corrección atmosférica, que proporciona una estimación de radiancia total emitida por la superficie, además de la estimación de la irradiancia, aunque esta depende de la cantidad de vapor de agua en la atmosfera. El nivel “3A” corresponde a archivos ortorectificados. En abril de 2008 los sensores del SWIR empezaron a tener fallos por saturación anómala de los valores de las bandas 5 a 9 que se atribuye a un aumento de la temperatura del detector por lo que la NASA los declaro públicamente no operativos a inicios del 2009 y parte de los datos del 2008 se demarcaron como inservibles.

**Tabla 3.**

*Descripción de las bandas de ASTER y los instrumentos característicos. Modificado de Van der Meer et al. (2012)*

Características	VNIR	SWIR	TIR
Rango Espectral	1: 0.52-0.60 $\mu\text{m}$	4: 1.600-1.700 $\mu\text{m}$	10: 8.125-8.475 $\mu\text{m}$
	2: 0.63-0.69 $\mu\text{m}$	5: 2.145-2.185 $\mu\text{m}$	11: 8.475-8.825 $\mu\text{m}$
	3N: 0.76-0.86 $\mu\text{m}$	6: 2.185-2.225 $\mu\text{m}$	12: 8.925-9.275 $\mu\text{m}$
	3B: 0.76-0.86 $\mu\text{m}$	7: 2.2335-2.285 $\mu\text{m}$	13: 10.25-10.95 $\mu\text{m}$
		8: 2.295-2.365 $\mu\text{m}$	14: 10.95-11.65 $\mu\text{m}$
		9: 2.360-2.430 $\mu\text{m}$	
Resolución espacial (m)	15	30	90

Rango de datos	62	23	4.2
(Mbits/s)			
Señalización	$\pm 24$	$\pm 8.55$	$\pm 8.55$
Cross-track ( $^{\circ}$ )			
Señalización	$\pm 318$	$\pm 116$	$\pm 116$
Cross-track (km)			
Tamaño de la imagen (Km)	60	60	60
Tipo de detector	Si	PtSi-Si	HgCdTe
Cuantización	8	8	12
(bits)			

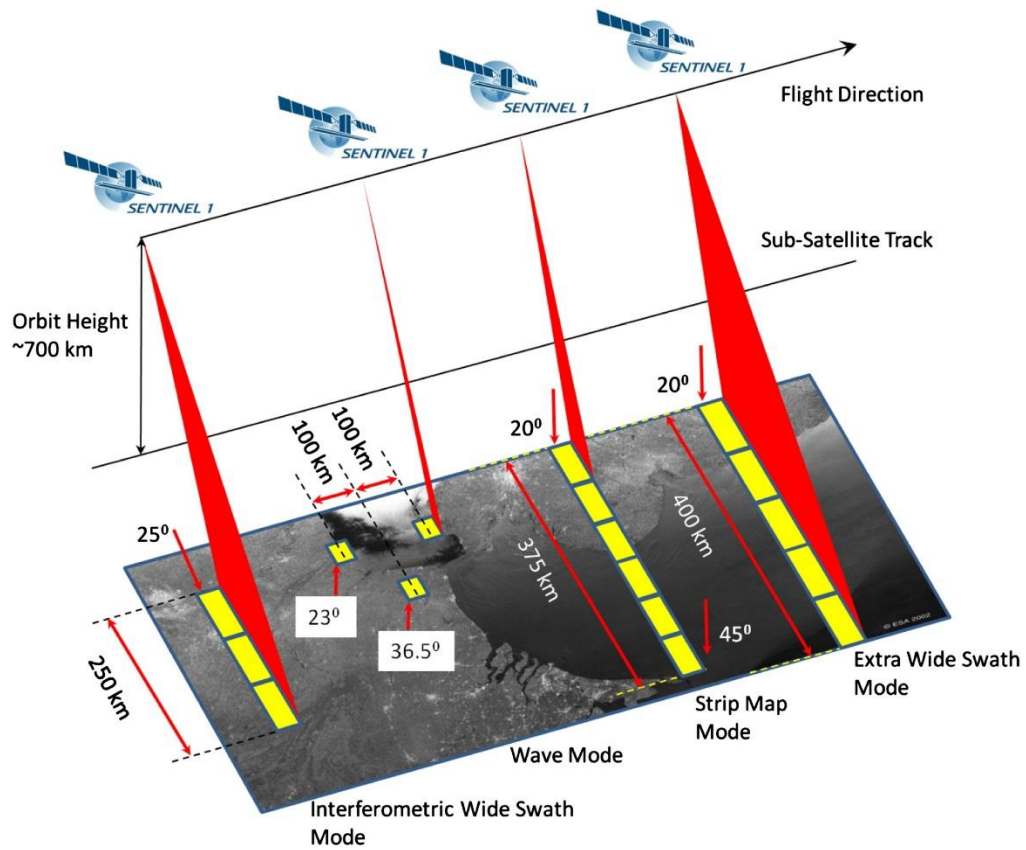
### 3.4.2 SENTINEL-1

El Observatorio europeo de radar que fue desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) como parte del componente espacial Copernicus, creó una constelación de dos satélites en órbita polar, el satélite Sentinel-1A que fue lanzado el 3 de abril del 2014 y Sentinel-1B el 25 de abril de 2016 (Raab *et al.*, 2020); en la Tabla 4 se puede observar una recopilación general de sus características. Estos satélites se encuentran equipados con un radar de apertura sintética (SAR) de banda C (5.405GHz) con una longitud de onda de 5.6cm (ESA, 2016); cuenta con una resolución temporal de 12 días cada satélite, además proporciona diferentes resoluciones y cobertura: *Interferometric Wide-IW* en donde los datos se adquieren en tres franjas utilizando la técnica *TOPSAR*, este es el modo operativo principal de este satélite; *Extra Wide-EW* que adquiere datos en cinco franjas utilizando la misma técnica que en *IW*; *StripMap-SM* en donde la franja del

terreno se ilumina con una secuencia continua de pulsos, mientras el haz de la antena apunta a un ángulo de azimut y elevación fijos; y por último el *Wave-WV* que adquiere los datos en pequeñas escenas de mapa o “*vignettes*” que están situadas en intervalos de 100 Km, este modo operativo es utilizado sobre océano abierto, además todos los modos excepto el modo WV puede funcionar con doble polarización como se puede observar en la Figura 8. El ancho del barrido es de 250 Km con una resolución espacial de 5x20m para IW y 400 Km de barrido con una resolución espacial 20x40m para EW (Torres *et al.* 2012). Los datos se pueden descargar en diferentes niveles de procesamiento como lo registra la ESA (2016) en su página oficial, el nivel 0 o sin procesar cuando son para uso específico, datos procesados en nivel 1 que pueden ser *Single Look Complex (SLC)* que tiene una distribución sistemática limitada a áreas específicas y *Ground Range Detected (GRD)* las cuales se encuentran con una distribución sistemática, los datos de nivel 2 u OCN para los parámetros geofísicos recuperados del océano, estos de igual forma se encuentran distribuidos sistemáticamente. Esta misión da continuidad a las misiones ERS-1 y 2 y ENVISAT SAR que finalizaron operaciones en 2000 y 2003 y 2012 respectivamente.

**Figura 8.**

*Modos de operación de Sentinel-1 tomada de Torres et al. 2012.*

**Tabla 4.**

*Información general de Sentinel-1*

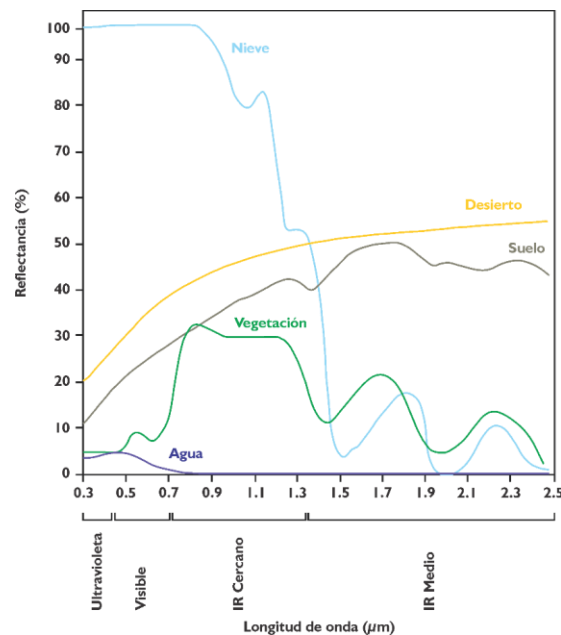
Parámetros	Características
Altitud de Orbita	693km
Bandas Radar	C-Band
Modo de imagen SAR	WV, IW, SM, EW
Polarización	VV+VH o HH+HV
Distancia de muestro	5 -20 m
Lanzamiento	2014
Expectativa de vida	2021
Resolución Temporal	12 días

### 3.5 Espectros de vegetación, minerales y rocas

Gupta (2018) define la relación entre la intensidad de la radiación electromagnética y la longitud de onda como la curva espectral o firma espectral, cada material tiene una firma única, por lo consiguiente, esta permite la clasificación de los materiales (Figura 9).

#### Figura 9.

*Firmas espectrales de características comunes en la tierra. Modificado de Demirel & Düzgün (2011).*

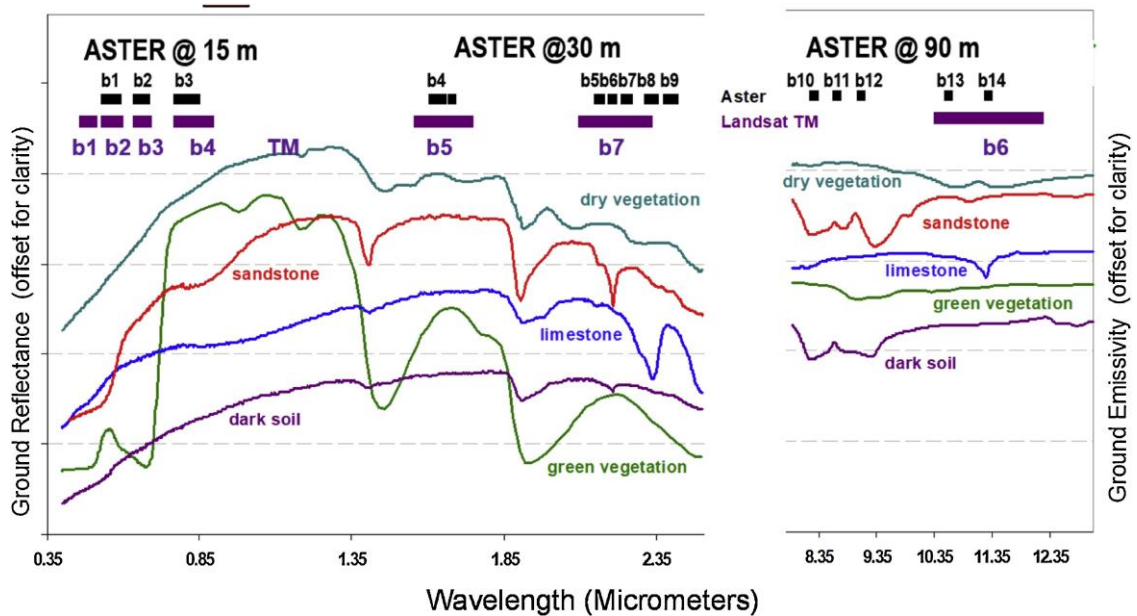


En términos de sensores remotos, los objetos se pueden clasificar por diferentes tipos de comportamiento espectral. El primero es la absorción selectiva, esta demarca que algunas de las bandas absorben selectivamente y su carácter espectral está marcado por una reflexión relativamente débil (región de reflexión solar). La segunda es, la reflexión selectiva, esta indica que a veces una determinada longitud de onda es fuertemente reflejada, si es muy intensa puede conducir a la separación de un haz monocromático (región del infrarrojo térmico). La tercera es, la emisión selectiva superior o inferior, esta resalta que algunos de los objetos pueden exhibir una emisión selectiva más alta o más baja en ciertas longitudes de onda (Gupta, 2018).

La vegetación presenta un pico de reflectancia a los 0.6  $\mu\text{m}$ , cuando la vegetación se encuentra saludable, pero esto cambia cuando la vegetación se encuentra enferma (Figura 10).

**Figura 10.**

*Espectro de reflectancia de materiales comunes de la superficie y las bandas de ASTER a estas longitudes de onda. Tomado de Hewson et al. (2020)*



Para la región del visible los pigmentos de las hojas dominan el espectro, la hoja pigmentada con clorofila presenta un pico de reflectancia menor en el verde, por eso esta toma este color, la hoja que se encuentra pigmentada con antocianina, la reflexión se pierde en el verde, pero es mayor en la longitud de onda del rojo, mientras, que la hoja que no presenta pigmentación presenta un nivel casi constante en la región del visible. El comportamiento espectral de la vegetación en el infrarrojo cercano depende del tipo de follaje y de la estructura celular, teniendo en cuenta que, las hojas de abeto y pino, reflejan muy poco en este, mientras que la hierba refleja con más fuerza (Gupta, 2018).

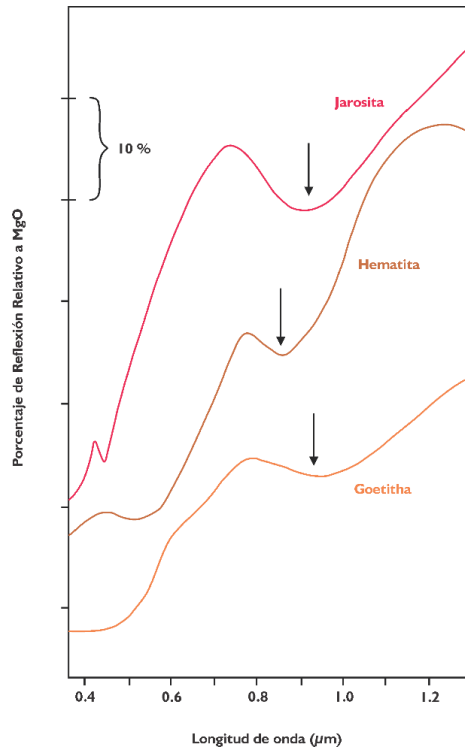
Como conclusión, el comportamiento espectral de una hoja sana en la región óptica se debe a que los pigmentos que absorben la mayor parte de la luz en la región del visible. La absorción a

0,48  $\mu\text{m}$  se presenta debido a la transición electrónica de los pigmentos carotenoides, estos funcionan como pigmentos accesorios de la clorofila en el proceso fotosintético, mientras que la absorción a 0,68  $\mu\text{m}$  se debe a una transición electrónica en la molécula de clorofila centrada en el componente de magnesio del sitio fotoactivo. La región de 0,8-1,3  $\mu\text{m}$  muestra una alta reflectancia y se denomina meseta del infrarrojo cercano, recordando que el comportamiento en esta depende de la estructura molecular y el follaje, el fuerte aumento alrededor de los 0.8  $\mu\text{m}$  se conoce como el borde rojo de la banda de absorción de la clorofila. La relación que se puede observar entre el visible y el infrarrojo cercano es en general un indicador de la capacidad fotosintética de la hoja. La región de 1,0-2,5  $\mu\text{m}$  (SWIR) contiene bandas prominentes de absorción de agua en 1,4, 1,9 y 2,45  $\mu\text{m}$ . La reflectancia en el SWIR está relacionada con el contenido bioquímico de la cubierta, como las proteínas (concentración de nitrógeno), lignina y otros componentes de las hojas (Gupta, 2018).

Por otra parte, los minerales debido a su estructura química se pueden identificar en diferentes subregiones del espectro electromagnético. En la región del VNIR (0.4 – 1.0  $\mu\text{m}$ ), las características espectrales están dominadas por procesos electrónicos en metales de transición (e.j. Fe, Mn, Cu, Ni, Cr, etc.). El hierro es el constituyente más importante en esta región, esto se debe al efecto de transferencia de carga (Gupta, 2018). Por lo tanto, los minerales que presentan hidróxidos y óxidos de hierro como la limonita, jarosita y hematita se distinguen porque presentan una baja reflectancia en el visible y alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano (Pour *et al.*, 2012; Figura 11).

### **Figura 11.**

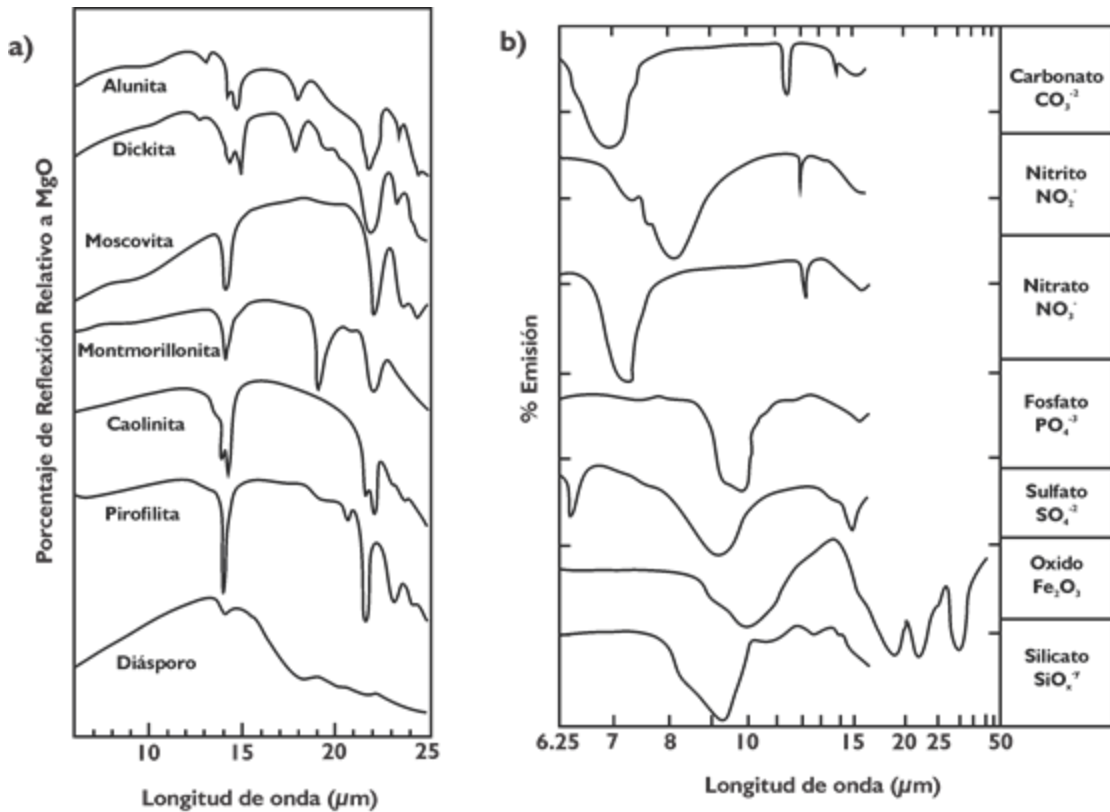
*Firmas espectrales de la Hematita, Jarosita y Goethita en la región del VNIR. Modificado de Gupta (2018).*



La región del SWIR (1.0 -3.0  $\mu\text{m}$ ), es importante para la identificación de características espectrales de hidroxilos y carbonatos, el comportamiento de estos puede variar según su grado de cristalinidad, también dependen de su granulometría, entre otros. El ion hidroxilo se puede encontrar en minerales formadores de arcillas, micas, clorita, etc. Las arcillas presentan un pico de absorción a 1,44  $\mu\text{m}$ . Además, Al combinarse con aluminio y magnesio (Al-OH y Mg-OH), sus características de absorción se pueden observar en 2,1 a 2,4  $\mu\text{m}$  (Figura 12a); (Gupta, 2018).

**Figura 12.**

*a) Firmas espectrales de minerales de arcilla. b) Firmas espectrales del TIR de los principales grupos minerales aniónicos Modificado de Gupta (2018).*



Esta región del termal (aproximadamente 3 - 25 μm) se caracteriza por exhibir características espectrales de varios grupos minerales formadores de roca (ej. Silicatos, carbonatos, óxidos, fosfatos, sulfatos, nitratos, nitritos, hidroxilos; Figura 11b); además, de que presenta las características de vibración de los grupos aniónicos. Por otra parte, pueden presentar variación debido a sus propiedades físicas como el tamaño de la partícula y el empaque, esto puede ocasionar cambios en los espectros de emisión en términos de profundidad relativa de la absorción, pero no en la posición de la banda espectral (Gupta, 2018). Se resalta, que las firmas espectrales constituyen la información básica para la interpretación de los de un experimento de teledetección.

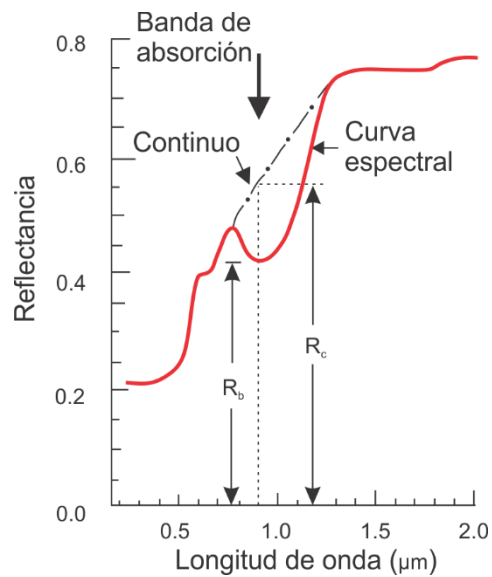
### 3.5.1 Componentes de las firmas espectrales

Las firmas espectrales se caracterizan por presentar picos de absorción, se encuentran compuestos por dos componentes: el continuo y de rasgos de absorción que tiene posiciones específicas de longitud de onda. Se entiende por continuo el nivel de fondo, en el cual se superpone

una característica particular de absorción (Gupta, 2018). Según Mustard & Sunshine (1999), se puede considerar como el límite superior de la curva general de un material (Figura 13).

**Figura 13.**

*Espectro de la goethita usado para ilustrar la terminología de continuo, absorción de la banda y la profundidad de absorción. Modificado de Gupta, 2018.*



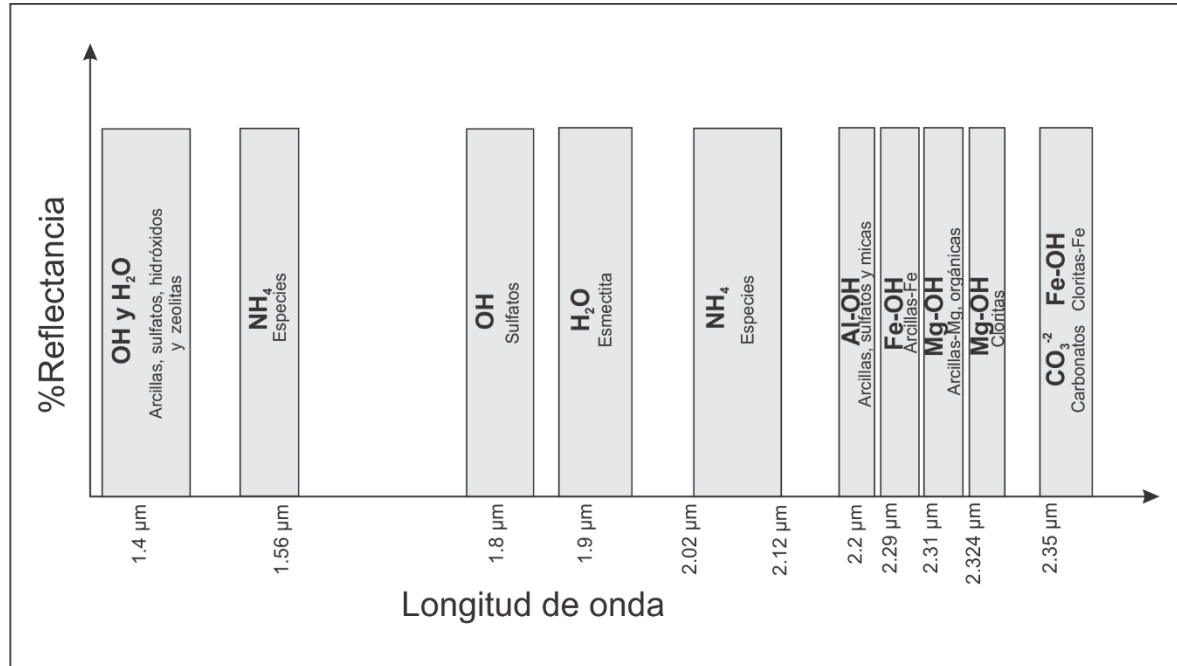
La intensidad de los rasgos de absorción dependerá de la intensidad de las vibraciones de energía presentes en las longitudes de onda específicas, estas son características individuales de cada mineral (Mamani, 2014).

### 3.5.2 Rasgos de absorción

El subsistema SWIR se caracteriza por presentar en este rango algunos iones y enlaces metal-ion con rasgos de absorción definidos, los cuales permiten identificar grupos mineralógicos (Pérez *et al.* 2010) como se observa en la Figura 14.

**Figura 14.**

Principales rasgos de absorción, el enlace iónico que representan y los minerales que se pueden determinar. (Modificado de Cruz, 2008 y Hauff, 2008).



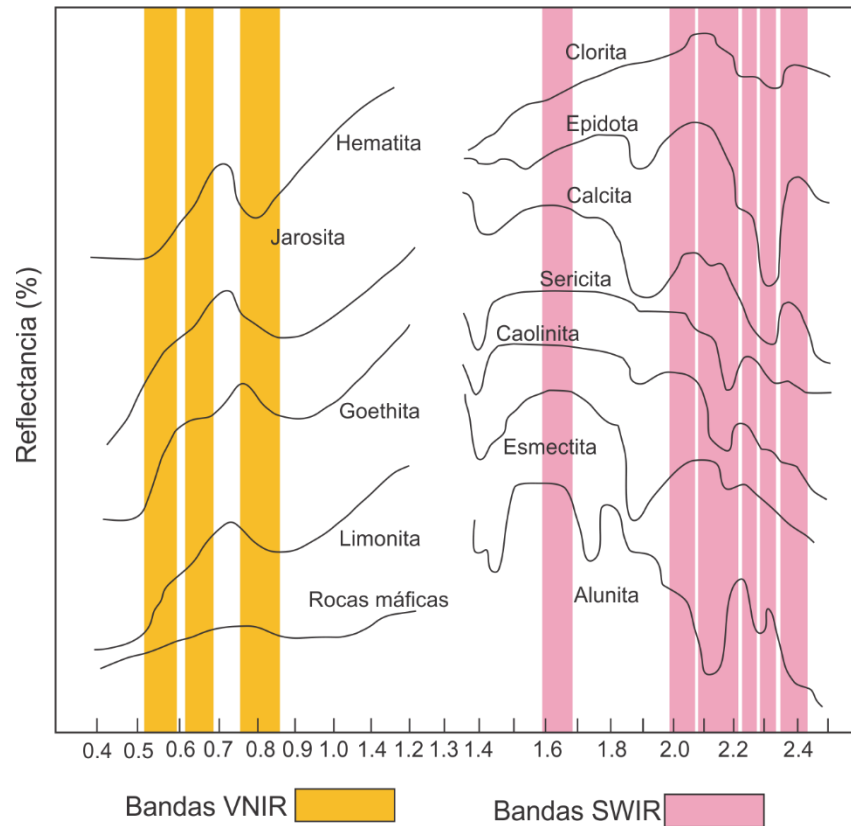
Debido a estas características se pueden determinar zonas que presentan alteraciones hidrotermales en las imágenes satelitales ASTER.

### 3.5.3 Firmas espectrales en el sensor ASTER

El sensor ASTER se caracteriza por presentar catorce bandas espectrales, con tres en el subsistema VNIR, seis en el subsistema SWIR y cinco en el subsistema TIR, permitiendo reconocer diferentes minerales (Figura 15 y 16).

**Figura 15.**

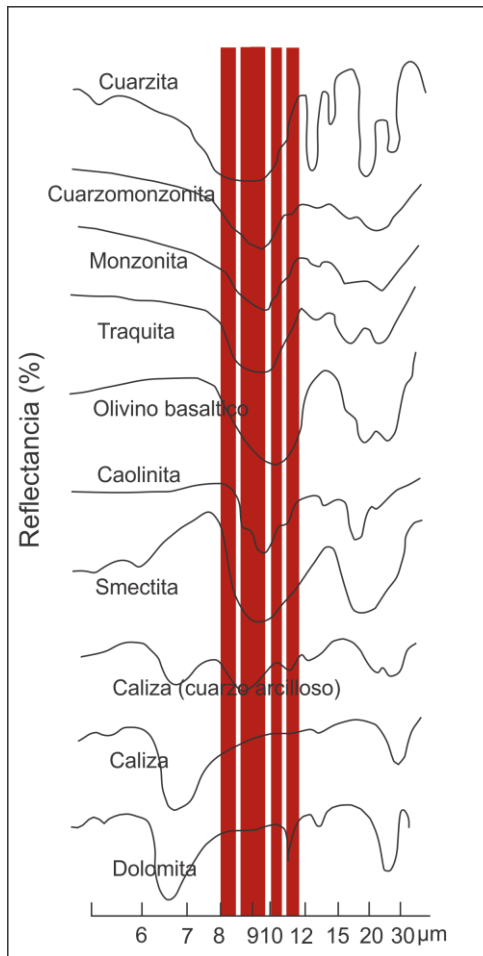
Características espectrales de minerales en los subsistemas del VNIR y SWIR del sensor ASTER. Tomado de Rodríguez, 2008.



La región del SWIR permite reconocer las características de absorción de los minerales Al-OH, Fe, Mg-OH, H-O-H y CO<sub>3</sub> (Pour *et al.*, 2010). Por esto mismo, los minerales que presentan en su estructura Al (OH) como la caolinita, muscovita, alunita muestra absorción en la banda 5 y 6; asimismo la montmorillonita y sericita presentan picos de absorción en la banda 6 y la pirofilita en la banda 5, la calcita se distingue en las bandas 8 y 9 de ASTER (Perez *et al.*, 2007; Pour *et al.*, 2010; Figura 17).

**Figura 16.**

*Características espectrales de los minerales en el subsistema TIR del sensor ASTER. Tomado de Rodríguez, 2008.*

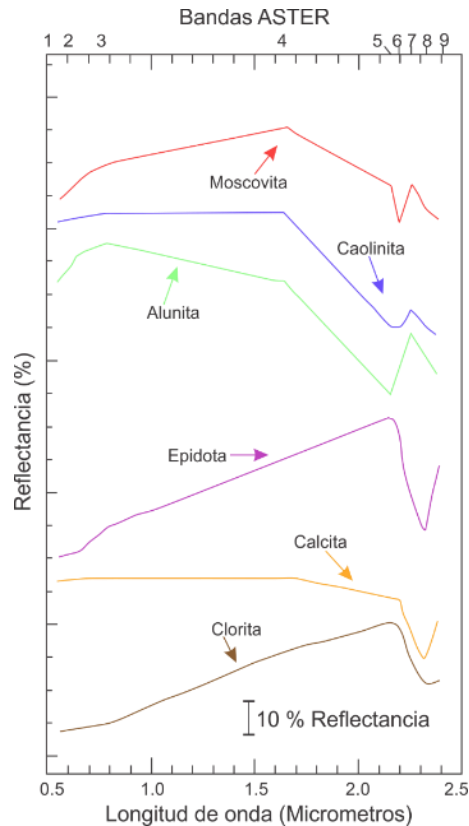


El subsistema de TIR se caracteriza por obtener la temperatura y emisividad de la superficie terrestre, debido a esto permite reconocer los minerales formadores de roca (silicatos), los cuales presentan sus picos de absorción en este rango (Figura 16).

Cada material presenta una distinta emisividad dependiendo de la longitud de onda, esto quiere decir que la emisividad es una propiedad inherente de cada material (Okyay, 2012).

**Figura 17.**

*Comportamiento espectral de los minerales en relación a las bandas ASTER. Modificado de Rowan and Mars (2006).*



Las alteraciones hidrotermales presentan minerales típicos, los cuales permiten distinguir una de otra; por ejemplo, la alteración filica se caracteriza por la presencia de illita/muscovita (sericita), su reconocimiento se da por el pico de absorción a 2.20  $\mu\text{m}$  ocasionado por la presencia de Al-OH, en este rango del espectro electromagnético se encuentra la banda 6 de ASTER (Pour *et al.*, 2012, Tabla 5).

**Tabla 5.**

*Enlaces iónicos caracterizados en las bandas ASTER con su respectiva alteración hidrotermal. Modificado de Marquetti et al. 2004.*

	$\lambda$	ASTER	Mineral	Alteración
<b>Al-OH</b>	2.16	Banda 5	alunita	Argilica avanzada
	2.2	Banda 6	montmorillonita, illita, sericita	Argilica y filica
<b>Fe-OH</b>	2.26	Banda 7	jarosita	Zonas de oxidación

<b>CO<sub>3</sub>, Mg-OH</b>	2.33	Banda 8	calcita, clorita, (epidota)	Propilitica
	2.4	Banda 9		

Por otra parte, la alteración argílica incluye minerales como la caolinita y alunita los cuales tienen un secundario pico de absorción de Al-OH a 2.17  $\mu\text{m}$  correspondiendo con la banda 5 de ASTER. Los minerales estratégicos de la alteración propilítica incluye la epidota, clorita y calcita; todos estos exhiben picos de absorción a 2.35  $\mu\text{m}$ , coincidiendo con la banda 8 de ASTER (Pour *et al.*, 2012; Tabla 5)

Los rasgos de absorción principales en la región del SWIR se encuentran determinados en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Relación entre rasgos de absorción de minerales de alteración hidrotermal y bandas del sensor ASTER. (Modificada de Caiza, 2018.)*

<b>Enlace Iónico</b>	<b>Minerales Captados</b>	<b>Rasgos de Absorción</b>	<b>Bandas ASTER</b>
<b>OH</b>	Sulfatos + caolinita	1.725 -1.85 $\mu\text{m}$	Banda 4
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Entre las láminas de las micas (enlace iónico + débil)	1.9 -2.025 $\mu\text{m}$	
<b>AlOH</b>	Alunita moscovita, illita, montmorillonita	2.150-2.225 $\mu\text{m}$	Banda 5 Banda 6
<b>FeOH</b>	Óxidos de hierro (hematita) e hidróxidos de hierro (goethita)	2.225-2.30 $\mu\text{m}$	Banda 7
<b>CO<sub>3</sub> y/o MgOH</b>	Carbonatos (calcita), clorita, epidota	2.3-2.4 $\mu\text{m}$	Banda 8 y 9

### 3.6 Metodología de Sabins

Según Sabins (1999), los métodos de procesamiento de la imagen se pueden agrupar en tres categorías: la primera es la restauración de la imagen, en esta se compensan los errores de la imagen como el ruido, las distorsiones geométricas inducidas durante la adquisición de los datos, grabación y reproducción, con el objetivo de restaurar la imagen, de tal forma que se asemeje al terreno. Para esto, en el procesamiento se ejecuta, (1) restauración de *line dropouts*, (2) restauración de *periodic line striping*, (3) restauración de *line offsets*, (4) filtración de ruido aleatorio, (5) corrección de la dispersión atmosférica y la (6) corrección de distorsiones geométricas. La segunda categoría corresponde al mejoramiento de la imagen, se altera el impacto visual que la imagen tiene en el intérprete, debido a que el propósito es mejorar el contenido de la información de la imagen, por lo consiguiente, este procesamiento incluye (1) mejoramiento del contraste, (2) corte de densidad, (3) mejoramiento del borde, (4) creación de mosaicos digitales, (5) transformación de la Intensidad, matriz y saturación, (6) combinación del conjunto de datos y (7) Imagen *synthetic stereo*. Y la tercera, es en donde se genera la extracción de la información, utilizando la combinación del conjunto de datos, con el fin de mostrar características espectrales que están presentes, pero que no son evidentes en la imagen restaurada y mejorada; en esta fase del procesamiento se encuentra incluido: (1) los componentes principales de la imagen, (2) matemática de imagen, (3) clasificación multiespectral y (4) detección de cambios en la imagen.

Además, por medio de estudios representativos reconoce dos enfoques diferentes para la exploración mineral, uno de estos se basa en la cartografía de patrones o fracturas a escala regional y local, debido a la importancia de los controles estructurales en los yacimientos minerales, ya que estas permiten el paso y entrapamiento de los fluidos mineralizantes; el otro enfoque se base en el reconocimiento de rocas con alteraciones hidrotermales, en esta se discriminan los conjuntos de

minerales de óxidos de hierro, arcillas y alunita. El autor reconoce que, para mejores resultados es óptimo combinar los dos enfoques.

Para el reconocimiento de zonas de arcillas y alunita en imágenes obtenidas del satélite Landsat, el autor realizó el cociente de las bandas 5/7 para el reconocimiento de rocas alteradas que contengan illita, caolinita y montmorillonita, debido a la respuesta que tienen estos minerales a ciertas longitudes de onda, como se observa por medio de sus firmas espectrales. Mientras que para los Óxidos de Hierro hizo una relación de bandas 3/1; los minerales de hierro tienen una baja reflectancia en la banda del azul visible y alta reflectancia en la banda del rojo visible, por lo tanto, al hacer la combinación los óxidos de hierro denotan valores altos. Asimismo, se generaron imágenes por medio de matemática de banda, las cuales se combinaron en falso color (RGB), 3/5, 3/1 y 5/7 respectivamente. En la imagen resultante los tonos amarillo y naranja delimitan las áreas externas e internas de las rocas con alteración hidrotermal; una ventaja de esta combinación es la relación que marca de las zonas de arcillas y los óxidos de hierro, sin embargo, el patrón es similar al de las imágenes de densidad cuando se analizan de forma individual. Por último, se realiza la clasificación de la imagen, esta se hace de forma no supervisada por medio de un software SIG.

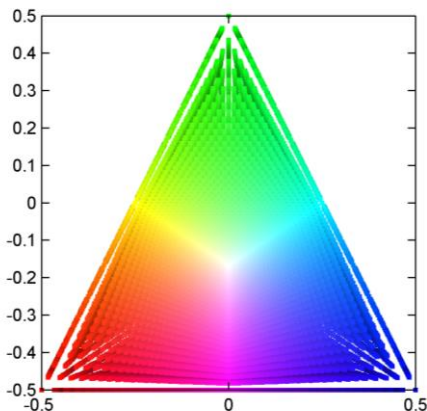
### **3.7 Técnicas espectrales**

#### **3.7.1 Composiciones falso color**

Los colores primarios aditivos son el rojo (red; R), verde (green; G) y el azul (blue; B), sumado en igual proporción producen luz blanca (Figura 18). Además, esta combinación permite generar una amplia gama de colores, sin embargo, no se puede generar todo el campo de colores (Gupta, 2018).

#### **Figura 18.**

*Posiciones esquemáticas del color en el diagrama de color ternarios B, G, R (o RGB). Tomado de Stackoverflow.*



Las combinaciones RGB son usadas para superponer conjuntos de datos de imágenes multiespectrales. Asimismo, esta técnica permite analizar elementos específicos de la superficie terrestre en función de su espectro de emisión y absorción, permitiendo identificar aspectos como la vegetación, los usos del suelo o masas de agua, entre otros, debido al comportamiento espectral de los objetos.

Estas imágenes se crean por el paso de bandas a través de tres canales: rojo, verde y azul. El paso de cada banda por un canal u otro permitirá teñir de colores los elementos que ofrezcan mayor o menor reflexión de las longitudes de onda. El resultado de esto es una imagen de falso color, en la cual realza elementos muy concretos para su posterior estudio y análisis.

Uno de los más usados para el análisis de la vegetación es la combinación del infrarrojo, debido a que la vegetación refleja en la región del infrarrojo y absorbe en la zona del visible del rojo, por lo tanto, el juego cromático de estas bandas permite elaborar mapas de vegetación.

### 3.7.2 Matemática de banda

La matemática de banda se caracteriza por resaltar los valores altos de los niveles digitales (ND), debido a que estos presentan firmas espectrales similares a materiales específicos (Pour and Hashim, 2011). La técnica consiste en dividir una banda en donde el mineral presente picos de reflectancia (valores DN altos) y otra en donde este mismo mineral presente picos de absorción

(valores DN bajos), (Pérez *et al.*, 2010); generando una imagen donde los valores se reescalan para llenar el rango dinámico (Roonwal, 2017). Al aplicar esta técnica, se debe tener en cuenta el comportamiento de los valores de reflectancia de los minerales para así poder distinguirlos en esta. Teniendo en cuenta lo anterior, para reconocer cuales son las mejores proporciones de banda que permitirán reconocer las diferentes alteraciones, es necesario tener conocimiento previo de la geología de la zona (Box, 2013).

### 3.7.3 Índices de Ninomiya

Los minerales de alteración por lo general presentan en su estructura enlaces de hidróxidos (OH) los cuales se pueden reconocer mediante la espectroscopia en la región del SWIR. Por consiguiente, basado en la reflectancia de algunos minerales de alteración (Ninomiya, 2004), propuso algunos índices para cartografiar las alteraciones hidrotermales (Tabla 7).

#### Tabla 7.

Matemática de banda de los Índices de Ninomiya (2004).

Índices de Ninomiya (SWIR)		
Índice	Identifica	Fórmula
OH1a	OH	$(7/6) * (4/6)$
OH1b	OH + Pirofilita	$(7/5) * (4/5)$
KLI	Caolinita	$(4/5) * (8/6)$
ALI	Alunita	$(7/5) * (7/8)$
CLI	Calcita	$(6/8) * (9/8)$

Estos índices han sido utilizados por varios autores (Zhang *et al.*, 2007; Gabr *et al.*, 2010; Testa, 2018), principalmente porque las alteraciones son denotadas por la presencia de óxidos de hierro e hidroxilos, estos presentan alta reflectancia en la banda 4, pero baja reflectancia en la banda 7 y 6, respectivamente (Xu *et al.*, 2004; Tesla, 2018). Además, Ninomiya & Fu (2002), definieron los índices de cuarzo, carbonatos y máfico. Sin embargo, Guha & Kumar (2016)

propusieron unos nuevos índices para delimitar la variación del cuarzo, feldespatos y minerales máficos en diferentes granitoides como se observa en la Tabla 8.

La emisividad espectral del cuarzo es relativamente baja en la región 8-9  $\mu\text{m}$  (banda 10 y 12 de ASTER) más que en la región de 10 -12  $\mu\text{m}$  (banda 13 y 14 de ASTER). Mientras, los minerales máficos tiene una emisividad espectral mayor en comparación al cuarzo y feldespatos en las bandas 10, 11 y 12, y presenta una similar a esto en la región 8-9  $\mu\text{m}$ .

**Tabla 8.**

*Índices del TIR de los autores Ninomiya y Guha & Kumar.*

Identifica		Ninomiya (2004)	Guha & Kumar (2016)	
<b>Cuarzo</b>	QI	11*11/10*12	QRI	10/12*13/12
<b>Maficos</b>	MI	12/13	MRI	12/13*14/13

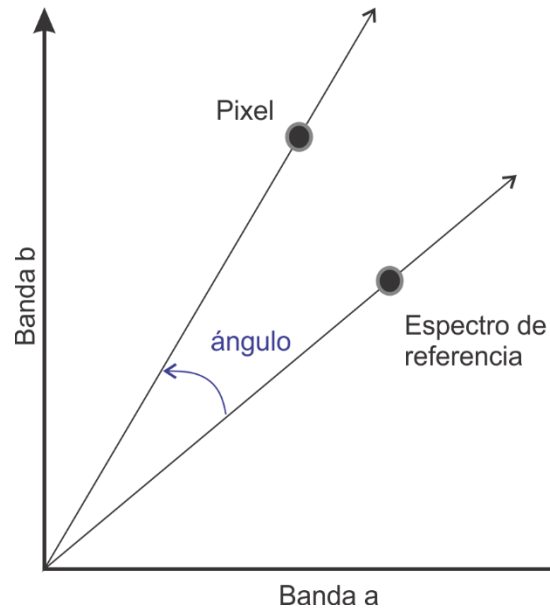
**3.7.4 Spectral Angle Mapper (SAM)**

Según Rashmi *et al.* (2014), el algoritmo de SAM es basado en una suposición ideal en la que un solo pixel de la imagen satelital representa un determinado material de la cobertera superficial y puede ser asignado de forma exclusiva a una sola clase de la cobertera superficial. Se caracteriza por ser una técnica comparativa, en donde se comparan de forma automática los espectros de cada pixel de la escena con espectros de referencia (Kruse *et al.* 1993).

Además, según Pérez *et al.* (2010), el algoritmo permite tratar los espectros como vectores en un espacio  $n$ -dimensional, en  $n$  es el número de bandas incluidas en la clasificación. Cada vector presenta asociado una dirección y un módulo, este último representa la incidencia del rayo solar (Pérez *et al.*, 2010), por lo tanto, el algoritmo determina la similaridad espectral entre dos espectros calculando el ángulo entre estos dos (Figura 19; Rashmi *et al.* 2014).

**Figura 19.**

*Representación del ángulo de referencia. Tomado de Künzer.*



La diferencia angular entre dos vectores espectrales se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

- n = número de bandas de la imagen
- t = espectro del pixel
- r = espectro de referencia
- $\alpha$  = ángulo espectral

El pixel es asignado a la clase en donde el espectro tuvo el menor ángulo, siendo estos los más oscuros y con mayor similitud entre espectros (Pérez *et al.* 2010). Del SAM se obtiene una imagen como resultado de la clasificación y un  $n$  número de imágenes de regla, en las que se muestra la distancia angular entre el espectro de la imagen y el de referencia, medida en radianes (Pérez *et al.* 2010).

### 3.8 Rasgos estructurales

Las imágenes de radar se caracterizan por tener menores problemas con la incidencia de la atmosfera, haciéndola capaz de penetrar la atmosfera en la mayoría de las condiciones, debido a

que están diseñadas para transmitir y recibir polarización plana en diferentes direcciones (Dong & Chen, 2017). Además, por las longitudes de onda que manejan, las imágenes son útiles para reconocer los posibles rasgos estructurales presentes en el terreno.

Para la identificación de los lineamientos se puede hacer de dos formas: *i)* indirecta y *ii)* directa. La primera se caracteriza por la observación de discontinuidades radiométricas (lineaciones o cambios abruptos en textura o color), rasgos morfológicos de los cuerpos hídricos (drenajes y/o cuerpos de agua alineados) y cambios en la morfología resaltados por la presencia de sombras de radar (cambios de pendiente, escarpas de falla, facetas triangulares, presencia de valles y depresiones); la segunda se determinan por la presencia de figuras características de ruptura, discontinuidades o desplazamientos de los afloramientos (Marchionni y Cavayas, 2014).

La detección de los rasgos estructurales dependerá de la dirección de iluminación y de la inclinación del haz de microondas que modifican las condiciones de iluminación de las superficies observada. Además, la visibilidad de los rasgos dependerá de su expresión morfológica y de la relación entre el ángulo de incidencia del haz del radar y la inclinación de las mismas, observándose como líneas claras (Marchionni y Cavayas, 2014). Debido a estos parámetros, la imagen de radar adquiere unas tonalidades, las pendientes que se encuentren orientadas hacia el radar, presentan tonos claros.

## 4 Marco geológico

### 4.1 Perú

#### 4.1.1 Tacna

##### 4.1.1.1 Ubicación de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra ubicada al suroccidente en Perú en el departamento de Tacna (Figura 20), a 5 km del noroeste de la ciudad de Yarada. El área aproximada de la zona es de 50 Km<sup>2</sup> y se encuentra en las coordenadas geográficas especificadas en la Tabla 9.

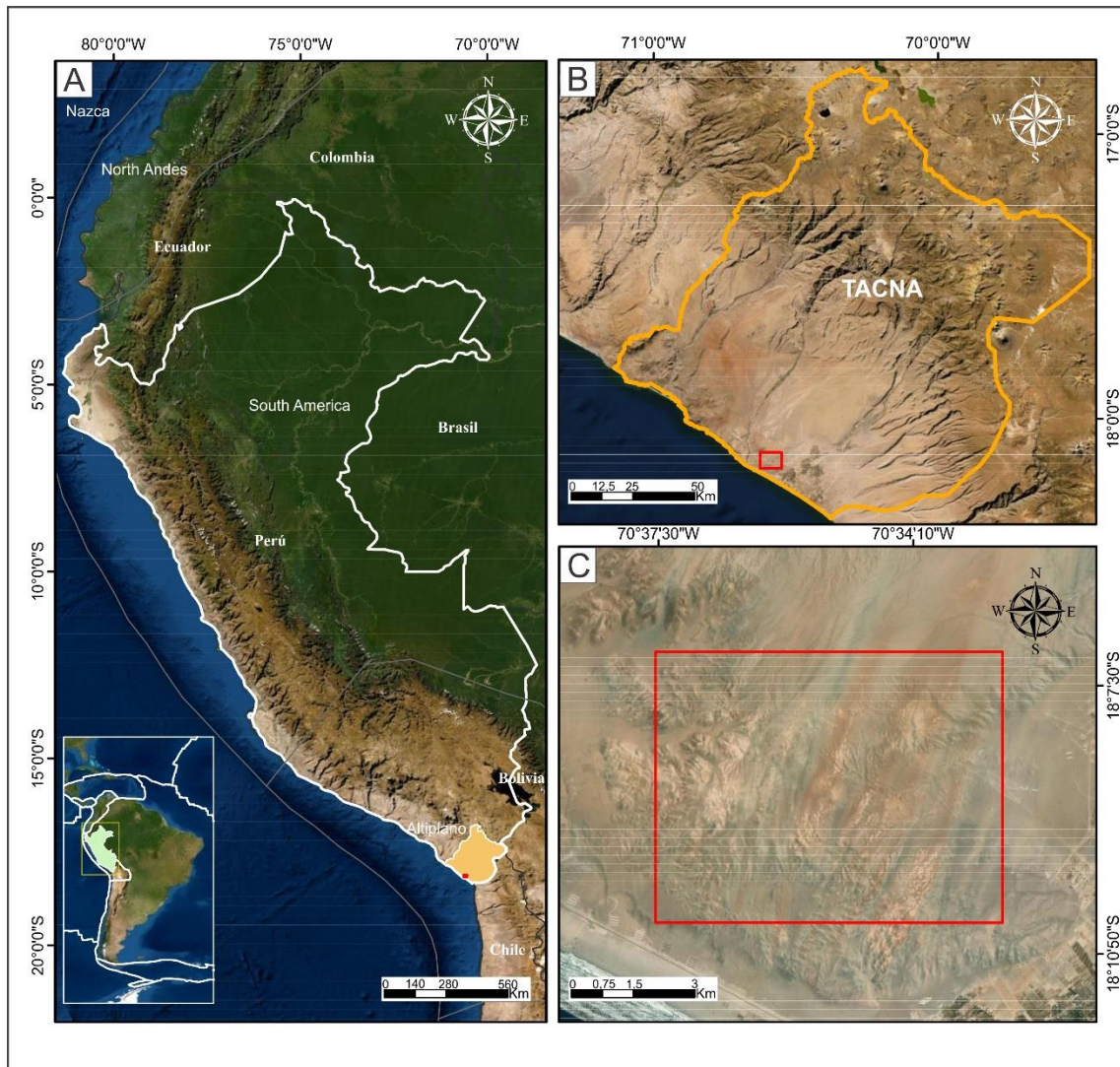
**Tabla 9.**

*Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Tacna.*

Vértice	Coordenadas Geográficas WGS 84	
	Latitud	Longitud
1	18°07'5.40"S	70°37'31.67"O
2	18°07'7.13"S	70°32'59.86"O
3	18°10'19.63"S	70°37'33.45"O
4	18°10'22.56"S	70°33'1.72"O

**Figura 20.**

*Mapa de localización de la zona de estudio de Tacna. A) Mapa de Perú donde resalta en naranja el departamento de Tacna; B) Acercamiento al departamento de Tacna (naranja) y la zona de estudio en rojo ubicada al SO cerca de la línea de costa; C) Área de estudio.*



#### 4.1.1.2 Accesibilidad

A la zona se puede acceder desde Lima por la carretera Panamericana sur hasta Tacna y de ahí desviarse por la carretera Costanera Sur, de esta parten varios caminos que permiten el ingreso a la zona de estudio.

#### 4.1.1.3 Clima y vegetación

El área presenta un clima diverso (árido, tropical y frío) dado por las 5 unidades morfoestructurales presentes: Faja Litoral, Cordillera de la Costa, Planicies Costaneras, ladera

oeste de la Cordillera Occidental y esta misma (Acosta *et al.* 2012). Este año el promedio de la temperatura máxima ha sido de 25.53°C y mínima de 16.38°C, con una humedad relativa de 86.71%. Presenta precipitaciones escasas a nulas.

Debido a la baja precipitación y a la humedad relativa se genera vegetación temporal en las lomas de la costa hasta una altura de 1.000 m.s.n.m (La Torre & Ortiz, 1963).

#### **4.1.1.4 Geomorfología**

Geomorfológicamente la zona se caracteriza por ubicarse en la Cordillera de la Costa, al occidente de la Cordillera Occidental de los Andes Centrales donde se reconocen relieves planos y desérticos de las planicies costeras, también al este de la faja litoral. La planicie costera se encuentra constituidas por sedimentos aluviales y eólicos del cuaternario con un ancho de 30 a 50 km a 500 m.s.n.m con una inclinación al sur y suroeste. La orientación promedio de las unidades geomorfológicas es NO-SE. Localmente en la zona de estudio asociado a la Cordillera de la Costa se encuentra el cerro Los Pabellones y el cerro La Yarada. Además, se presenta la Superficie Huaylillas (Acosta *et al.* 2012).

#### **4.1.1.5 Geología**

En la zona de estudio presenta rocas que van desde edades mesozoicas hasta depósitos cuaternarios (Figura 21). Las dos formaciones presentes son Guaneros y Huaylillas. La primera se caracteriza por dos unidades, en la primera se reconocen areniscas fosíferas, arcosas y aglomerados; la segunda presenta lavas andesíticas y de igual forma aglomerados. La segunda formación tiene Tobas dacíticas y riolíticas de composición riolítica. Los depósitos cuaternarios son aluviales, marinos y eólicos. Destacando que hacia la parte occidental de la zona se encuentra cartografiada una alteración hidrotermal.

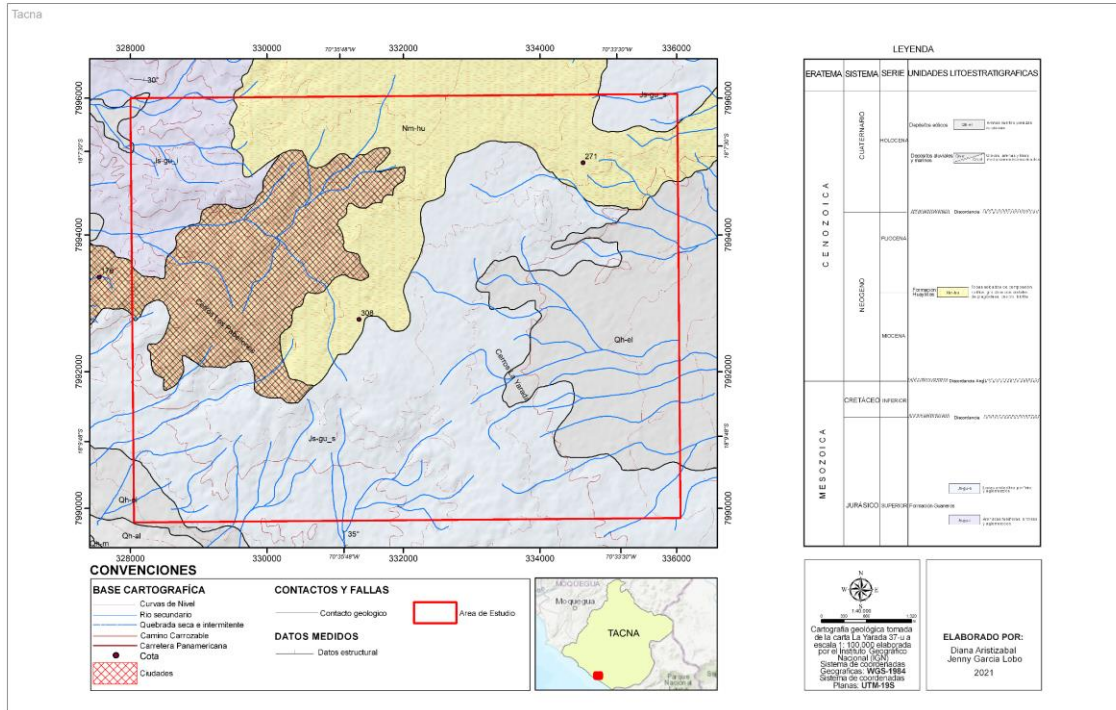
La Formación Guaneros se asocia al Arco Guaneros de edad Jurásica media a Cretácico superior en la Cordillera de la Costa (Martínez *et al.* 2020). En un marco tectonomagmático de subducción activa, arco y trasarcó volcánico; su fuente se asocia a una firma de manto (Martínez & Cervantes, 2003). Su geoquímica enseña una composición típica de magmas calcoalcalinos. A este se encuentran asociados depósitos de tipo IOCG (Iron Oxide Copper Gold) como lo son Hierro Morrito, Canicora, Posco, Yarai.

La Formación Huaylillas se puede dividir en tres miembros, destacando que entre estos existe poca diferenciación litológica, por tratarse de tufos ácidos de composición Dacítica y Riolítica. La zona de estudio se caracteriza por presentar rocas del miembro medio, el cual comprende una sucesión de tobas riolíticas y riodacíticas (Wilson & Garcia, 1962).

Hacia la Yarada se reconocen secuencias de andesitas basálticas correspondientes a los niveles inferiores de la Formación Guaneros. Las rocas intrusivas Superunidad Ilo, afloran en el sector Boca del Río, en manera de cuerpos elongado relacionado a fallas locales de dirección NE-SO y NO-SE. (Acosta *et al.* 2012). Esta Superunidad presenta Dioritas, Cuarzodioritas, Microdioritas, Metagronodioritas y Granodioritas foliadas (Martínez *et al.* 2020).

### **Figura 21.**

*Mapa geológico de la zona de estudio Tacna. Cartografía geológica a escala 1:100.000 tomada del INGEMMET.*



#### 4.1.1.6 Geología estructural

Regionalmente la zona de estudio se encuentra en un margen de subducción controlada por una tectónica de transurrencia en un margen oblicuo – transpresional (Martínez *et al.* 2020). La cuenca de la Yarada se clasifica como pull apart rellena con sedimentos de la Formación Chocolate y Huaylillas (Martínez *et al.* 2020). Regionalmente se pueden distinguir fallas asociadas al sistema de fallas Islay-Ilo en dirección NO-SE, estas son la Falla Miraflores (inversa con buzamiento entre 30° y 20° hacia el NE) y la Falla Chombo (representa esfuerzos secundarios R1 de la falla Miraflores). Este sistema de fallas representa los rasgos estructurales más importantes y notorios en la Cordillera de la Costa. Además, en dirección NE-SO al margen de la zona de estudio se reconocen el lineamiento Sama al oeste y el lineamiento Punta Morena al este. Localmente se registra el lineamiento Calvario (Acosta *et al.* 2012).

#### 4.1.1.7 Metalogenia

La zona se encuentra ubicada en la franja metalogenética VIII, la cual presenta depósitos de Fe-Cu-Au (IOCG) del Cretácico inferior (Acosta *et al.* 2009).

La Formación Guaneros se encuentra asociada a yacimientos de hierro como Morrito, Canicora o Chombo (localizados en Tacna). Estos se encuentran asociados a adelgazamiento cortical (Alejandro *et al.* 2006). Según Bellido y Guevara (1963), la mineralización de óxidos de cobre y hierro se presenta concordante a la estratificación de las secuencias volcanoclásticas de composición andesita-basalto de la Formación Guaneros; esto permite suponer una mineralización coetánea con la sedimentación, y presenta rumbo NNE-SSW. Según (Acosta *et al.* 2012) la mineralización está relacionada a diques de composición diorítica a andesítica, asociadas al emplazamiento de cuerpos de Diorita de la super unidad Ilo que favorecen a la ocurrencia de venas con minerales principales de hierro, cobre y oro.

En La Yarada, cerca de Boca del río en la Formación Guaneros se pueden observar manifestaciones hidrotermales con intensa oxidación y estructuras de cuarzo hidrotermal concordantes con los estratos de dirección andina mirando al SE (Martínez *et al.* 2020). Además, también se encuentran asociados al Batolito de Ilo (localizado al occidente del área de estudio) conformado por dioritas y granodioritas.

Según Martínez *et al.* (2020)., las principales ocurrencias de Fe-Cu-Au en La Yarada están claramente correlacionadas a la faja magmática de edad jurásica-cretácica de las unidades Punta Coles-Ilo y la Formación Guaneros.

Martínez *et al.* (2020) reunió el tratamiento de varios datasets (geoquímica de sedimentos activos, geofísica e imágenes satelitales); gracias a este proyecto se pudieron concluir 3 áreas con mayores posibilidades de exploración. La zona de estudio de este proyecto se encuentra incluida

en la tercera zona de prioridad 3, estos son clasificados como depósitos ciegos u ocultos posiblemente relacionados a depósitos tipo IOCG-DPCs.

#### 4.1.2 Puno

##### 4.1.2.1 Ubicación de la zona

El área se encuentra localizada al sur de Perú, en la provincia de Puno, al oeste del lago Titicaca (Figura 22), al E de la Cordillera Occidental la cual tiene una orientación NW-SE y sobre el altiplano Occidental, cubre un área de 48Km<sup>2</sup> y abarca fragmentos de las cartas 33-x (Ilave) y 34-x (Mazo Cruz) publicadas a escala 1:100.000, en la Tabla 10 se muestra la ubicación en coordenadas geográficas.

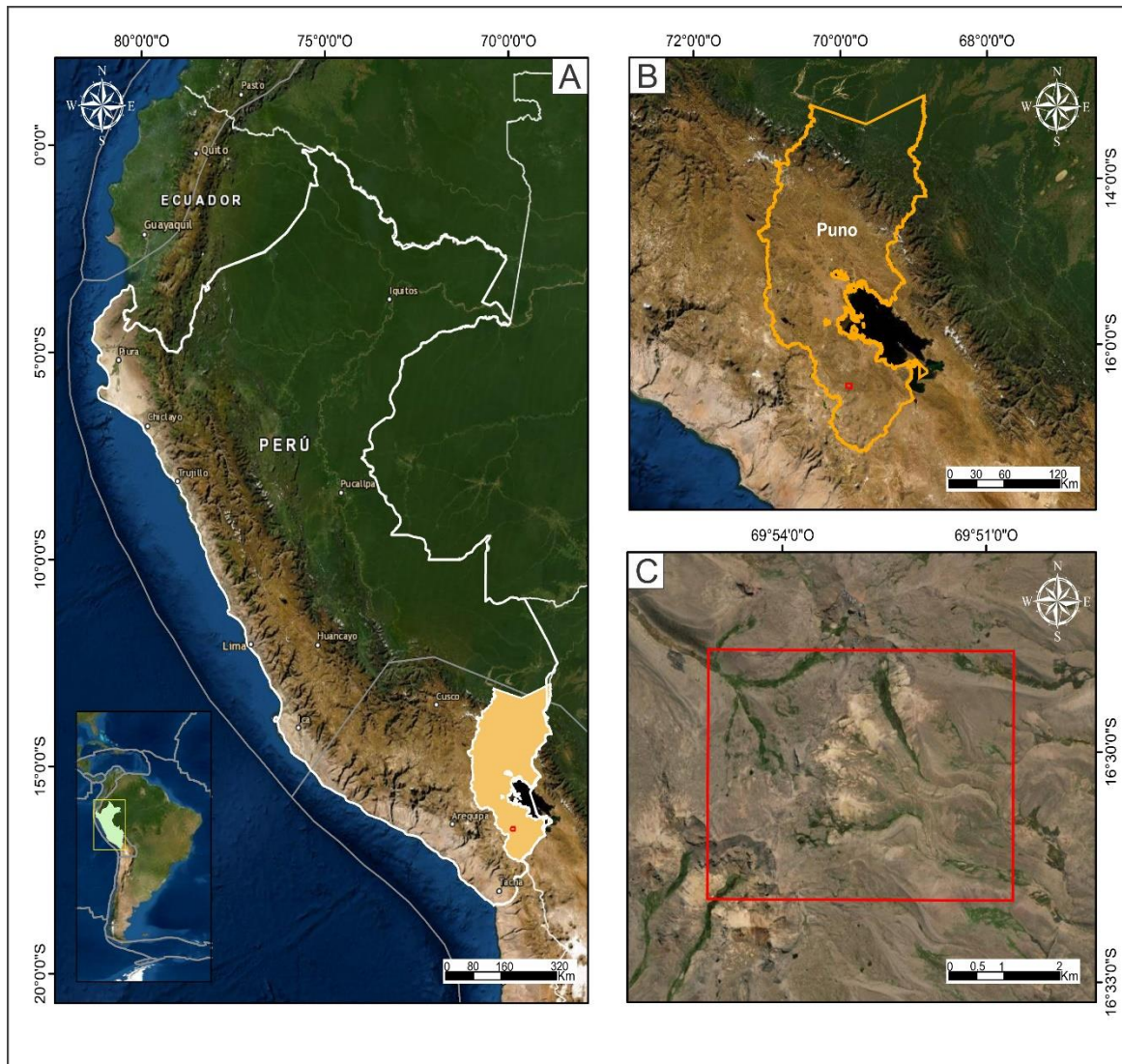
**Tabla 10.**

*Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Puno.*

Vértice	Coordenadas Geográficas WGS 84	
	Latitud	Longitud
1	16°28'39.68"S	69°55'05.27"O
2	16°28'40.76"S	69°50'34.49"O
3	16°31'56.03"S	69°50'36.38"O
4	16°31'54.94"S	69°55'06.16"O

**Figura 22.**

*Mapa de localización de la zona de estudio de Puno. A) Mapa de Perú donde resalta en amarillo el departamento de Puno; B) Acercamiento del departamento de Puno en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al S, al O del lago Titicaca; C) Área de estudio en Puno.*



#### 4.1.2.2 Accesibilidad

La zona de estudio se encuentra a 60Km de Ilave, tomando la vía que lleva hacia Ampaturi de esta forma se logra llegar a la región NW del área, otra ruta es desde Ilave tomando la vía que lleva a Mazocruz, pasando por Sorapa, a 75Km hay un desvío que conduce a la localidad de Anconasa llegando así a la parte SE del área.

#### 4.1.2.3 Clima y vegetación

Según los datos de la estación meteorológica más cercana al área de estudio, la cual se encuentra ubicada en la provincia de El Collao en el departamento de Puno, la temperatura varía de 17°C a -6°C, a lo largo del año la temperatura máxima se mantiene estable a diferencia a la temperatura mínima que alcanza valores menores entre mayo y septiembre alcanzando temperaturas de incluso 15°C bajo cero, este comportamiento es un régimen estacional típico del altiplano, en los meses de mayo a septiembre es la época de menor nubosidad y la más nublada corresponde de octubre hasta abril, además la temporada con mayor precipitación va del diciembre a marzo y la más seca va de abril a noviembre.

Por acción de la variabilidad en la temperatura la vegetación es limitada, los pequeños arbustos son los más comunes y se encuentran mayormente en las riveras de los ríos (Palacios y Klinck, 1993).

#### 4.1.2.4 Geomorfología

Se encuentra ubicada sobre el altiplano occidental, que se encuentra entre la Cordillera occidental y el Lago Titicaca, al Norte de la zona se encuentra el cerro Bencasa que cuenta con una altura de 4829m y el cerro Chuama con 4736m y al Sur el cerro Choquecota a 4920m y el cerro San Francisco Patakena a 4793m, (Carlotto *et al.* 2009).

#### 4.1.2.5 Geología

Las rocas aflorantes corresponden a rocas del Cenozoico en su mayoría rocas volcánicas dacíticas (Figura 23), erupcionadas desde el Neógeno hasta el presente pertenecientes al grupo Barroso como lo clasifico (Palacios *et al.* 1993).

#### **Figura 23.**

*Mapa geológico de la zona de estudio de Puno. Base cartográfica a 1:100.000 tomado del INGEMMET.*



#### 4.1.2.6 Geología estructural

Al NE de la zona de estudio se encuentra el sistema de fallas Cusco-Lagunillas-Mañazo, el cual es heredado del Permo-Triásico (Acosta *et al.* 2008). Se caracteriza por variar su comportamiento, en el Mesozoico tuvo un comportamiento transcurrente normal, luego, en el Paleógeno-Neógeno cambió a transcurrente inverso y funciono como control en el magmatismo potásico alcalino del Oligoceno dando lugar a la formación de yacimientos y controlando la sedimentación (Ramos, 2019). Finalmente, según Carlotto *et al.* (2005) en el cuaternario mostro una configuración en escalera, Además, este sistema de fallas se encuentra delimitando el dominio geotectónica Abancay-Condorama al SSO del área.

Durante el Mioceno-Plioceno se formaron los yacimientos epitermales de Au-Ag y polimetálicos de Pb-Cu-Zn en un marco tectónico compresivo debido a una subducción plana, en donde la corteza continental alcanzo espesores mayores a 40 Km. (Sillioy y Perelló, 2005).

#### 4.1.2.7 Metalogenia

El área se encuentra en la franja metalogénica XXI (Acosta *et al.* 2009). Según Rivera *et al.* (2005), la zona agrupa depósitos Au-Ag (Pb-Zn-Cu) de tipo epitermal de alta, baja e intermedia sulfuración hospedados en rocas volcánicas cenozoicas. Aunque, según Acosta *et al.* (2020) en esta área predominan depósitos epitermales de baja sulfuración. El mapa de ocurrencias minerales metálicas a escala 1:500.000 realizado por el INGEMMET, (2000), no registra depósitos en el área. Sin embargo, adyacente al SO de la zona se encuentran los depósitos de Natividad (Ag-Pb-Zn-Cu), Ultima hora (Pb,Ag,Zn,Cu), Sacata (Pb, Ag, Zn) y Pavico-Cacachara (Ag-Pb-Zn-Cu+Au).

## 4.2 Canadá

### 4.2.1 Berens

#### 4.2.1.1 Ubicación de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el país de Canadá en la provincia de Ontario (Figura 24), en el distrito de Kenora, con un área de 46 Km<sup>2</sup> dentro del Lago Favourable y parte del Lago Setting Net. Los centros poblados a esta son The First Nations de Deer Lake y North Spirit Lake (35 Km sureste), y Sandy Lake / Kee-Way- Wim (35 Km al nor-noreste / noreste). La zona se localiza en las coordenadas geográficas denotadas en la Tabla 11.

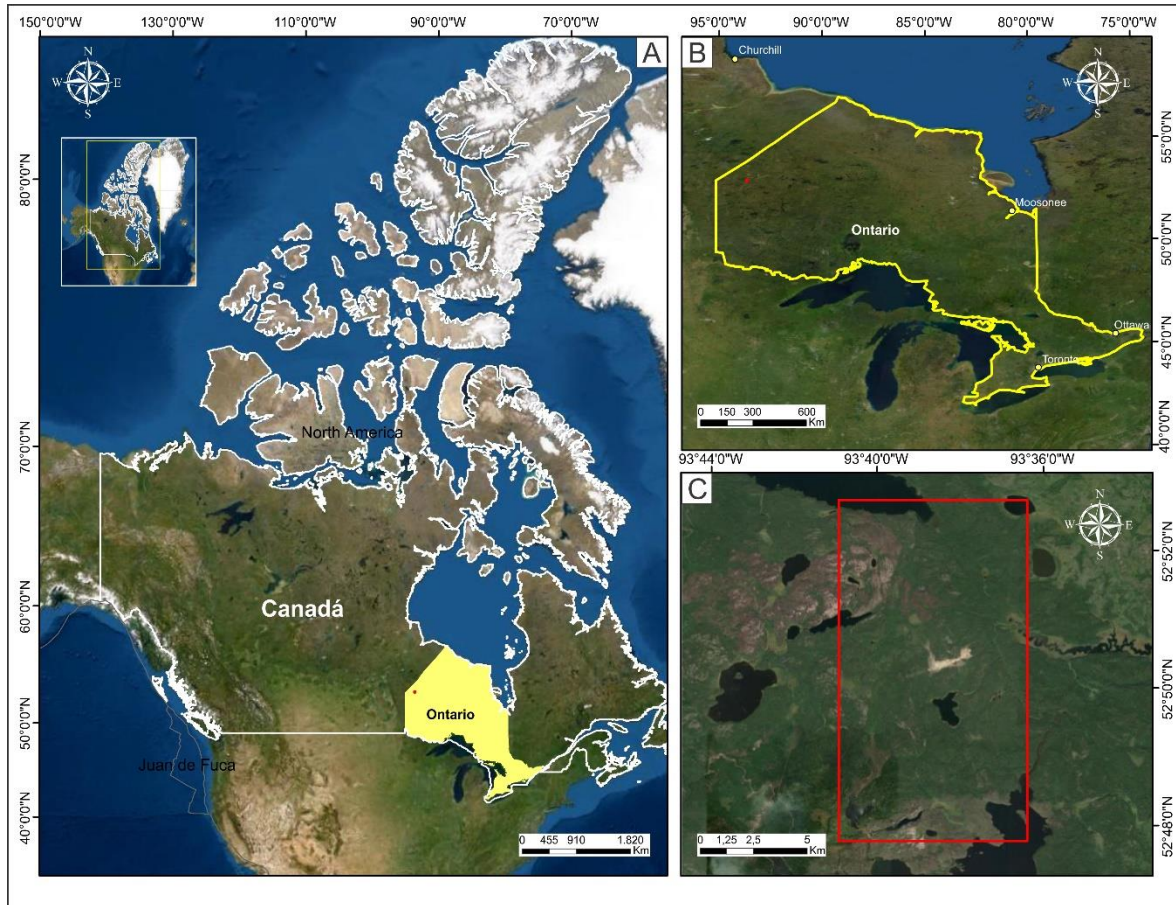
**Tabla 11.**

*Coordenadas geográficas de la zona de estudio Berens.*

Vértice	Coordenadas Geográficas WGS 84	
	Latitud	Longitud
1	52°52'43.12"N	93°40'55.16"O
2	52°52'43.51"N	93°36'22.28"O
3	52°47'46.05"N	93°40'55.24"O
4	52°47'46.04"N	93°36'22.42"O

**Figura 24.**

*Mapa de localización de la zona de estudio de Berens, A) Mapa de Canadá donde resalta en amarillo la provincia de Ontario; B) Acercamiento a la provincia de Ontario en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al NO cerca al límite con la provincia de Manitoba; C) Área de estudio en Berens.*



#### 4.2.1.2 Accesibilidad

El acceso a la zona se puede realizar mediante aviones equipados con flotadores o esquís que aterrizan en el Lago South Trout. También se puede acceder en los meses de invierno (mediados de enero a principios de marzo) por medio de un camino desde Red Lake. La zona se encuentra a 200 Km al norte de Red Lake, Ontario. Se puede acceder a Red Lake por la autopista 105 desde la autopista Trans-Canada 17 en Vermillion Bay.

#### 4.2.1.3 Clima y vegetación

El clima de la zona según la clasificación de Köppen es continental húmedo de verano cálido. El invierno empieza a finales de octubre o principios de noviembre y dura hasta finales de marzo, puede alcanzar temperaturas hasta de  $-40^{\circ}\text{C}$ . En el verano la zona experimenta un clima moderado con poca humedad y alcanza temperaturas de hasta  $30^{\circ}\text{C}$ . Además, este se ve afectado

por la influencia de las aguas frías de las bahías de Hudson y James. En su mayoría la región se encuentra cubierta por Taiga (bosque boreal o bosque de la nieve; bioma caracterizado por coníferas que comprenden principalmente pinos, abetos y alerces) caracterizada por un permafrost discontinuo (Hillmer & Bothwell, 2020).

#### **4.2.1.4 Geomorfología**

Regionalmente los lagos presentan dos direcciones, una en sentido NO y otra en sentido NE; estos tienen morfologías ovaladas o alargadas y son característicos de ambientes tectónicos en donde el agua se aloja en las depresiones formadas por los movimientos estructurales. La topografía es suave, con accidentes topográficos que no superan los 50m de altura, la elevación máxima en el área es 330m.s.n.m. La zona de estudio es ligeramente más alta hacia el S (Stone, 1998).

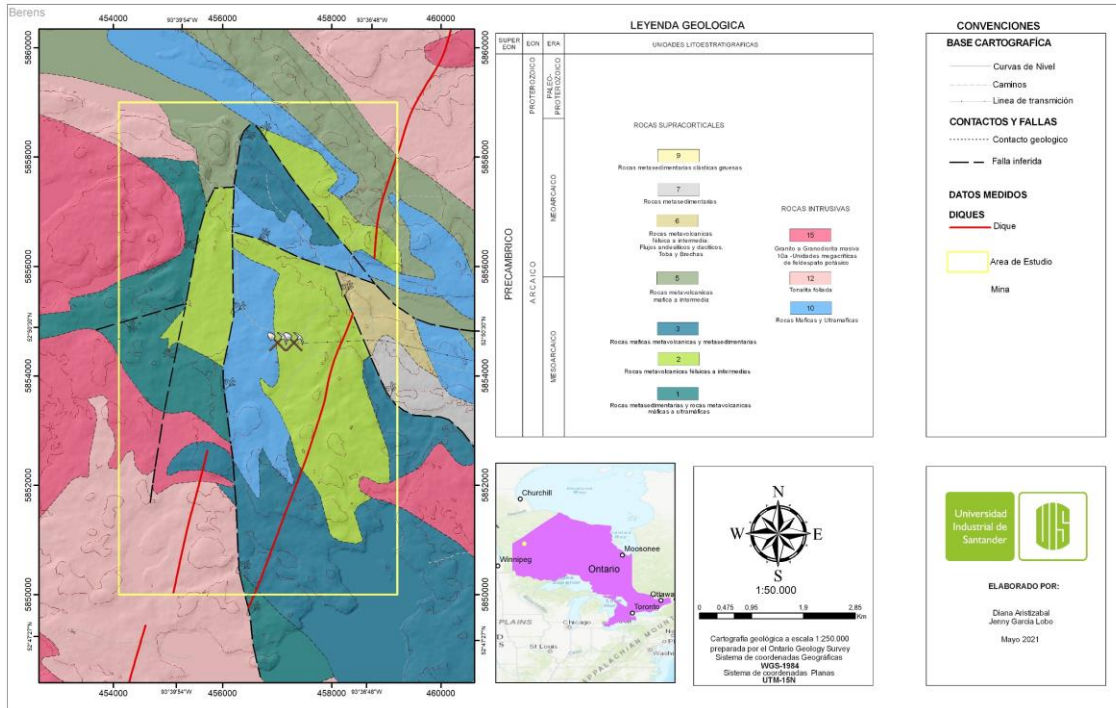
#### **4.2.1.5 Geología**

La zona se encuentra geológicamente ubicada en el Cinturón Verde *Favourable Lake* del Arcaico que hace parte de la Subprovincia de Sachigo de la Provincia Superior del Escudo Canadiense. La longitud del cinturón es de 160 Km, con una tendencia O–NO que se extiende desde el lago Northwind hasta el oeste de la frontera entre Ontario y Manitoba (Brown, 1988). Además, según Stone (1998), se extiende a lo largo del lado noreste de la Falla Bear Head, una estructura regional.

La zona se caracteriza principalmente por presentar rocas supracorticales del Arcaico específicamente del Mesoarcaico al Nearcaico (3.2 a 2.5 Ga) y algunas rocas intrusivas de esta misma edad (Figura 25).

#### **Figura 25.**

*Mapa geológico en la zona de Berens. La cartografía geológica a escala 1:250.000 es tomada del OGS, 2011.*



La mina de Berens River se encuentra subyacente a una secuencia de rocas metasedimentarias a metavolcánicas plegadas con un rumbo norte – sur con un ligero buzamiento hacia el este (Whittaker, 1989), generalmente paralelas a los bordes del cinturón (Ayres, 1970). Las metavolcánicas principalmente se encuentran conformadas por tobas y brechas volcánicas de composición félsica (Ayres, 1970). Mientras, las metasedimentarias presentan chert laminado, argilitas, limolita, tobas de grano fino, mármol y formación de hierro bandeado (Whittaker, 1989). Una estrecha unidad metasedimentaria clástica separa las rocas volcánicas félsicas de una intrusión diorítica a gabroica al oeste. Además, en la mina se encuentra los diques de gabro del Proterozoico, los cuales presentan un rumbo norte-noroeste en el enjambre de Molson (Stone, 1998).

Por otra parte, Adams (1976), subdivide las rocas de la mina en: *i.* secuencia de Caldera de rocas piroclásticas de composición félsica a intermedia, flujos y brechas intrusivas; *ii.* secuencia clástica, tobas y sedimentos químicos. La mineralización económica se encuentra reportada en la secuencia de Caldera (Adams, 1976).

#### **4.2.1.6 Geología estructural**

Estructuralmente la zona presenta fallas a escala regional con tendencia sureste con abundante desplazamiento vertical. No hay una dirección de falla consistente; sin embargo, dos principales sistemas de fallas (Falla Bear Head, presenta un comportamiento dextral transcurrente que divide las rocas plutónicas félsicas y neísicas del norte de la Subprovincia de Berens River.) tienen tendencia al norte y al este-sureste (Ayres, 1977; Mazurki, 1982).

Localmente se caracteriza por sistemas de venas mineralizadas con un rumbo y buzamiento de 110/70. Las venas de cuarzo-actinolita se encuentran controladas por fracturas y se dirigen hacia el este en los trabajos de la mina hasta el noreste en la zona sur cerca del lago Borthwick. Según Bateman (1939), las venas han sido cortadas por numerosas fallas menores mostrando desplazamiento de unos pocos centímetros a varios metros, especialmente en las formaciones metasedimentarias y metavolcánicas con una tendencia al noreste. Debido a esto, las venas se han desplazado mostrando el mineral casi vertical. Sin embargo, las venas presentan una inclinación hacia el sur.

#### **4.2.1.7 Metalogenia**

##### **4.2.1.7.1 Historia de la mina**

La zona cuenta con estudios de prospección desde 1929 en los cuales se descubrieron 4 venas mineralizadas, para 1936 se hizo una campaña de perforación y fue instaladas las máquinas de minado. En 1938 se desarrollaron campañas subterráneas en la vena número 1 que más tarde entro en operación hasta 1948. Fueron procesadas 560.607 toneladas de mena en una tasa de 250 ton por día de la vena 1 produciendo 157,696 oz de oro, 5.796.177 oz de plata, 6.105.872 libras de plomo y 1.797.091 libras de zinc. La mina dejo de operar en 1947 debido a sus leyes bajas y los

bajos precios en el mercado de los metales. Desde 1959 a hasta 2013 múltiples empresas obtuvieron títulos mineros e hicieron estudios físicos, químicos y campañas de perforación en la zona, pero la mayoría de estos fueron abandonados. Destacando que en el intervalo de 2002-2007 Anaconda Gold Corp. replanteó el área de la mina y llevo a cabo trabajos de prospección. En 2005 la zona entro en rehabilitación, en donde todas las estructuras fueron demolidas y la maquinaria dejada fue removida. Asimismo, en 2010 Golden Share realizó un trabajo de exploración en la zona, sus principales objetivos fueron verificar los bordes de la mina, rectificar que la zona se encontrará rehabilitada, la verificación de las zonas de alto grado de oro históricamente conocidas y prospección de nueva mineralización, entre otras (Huss & Geo, 2010).

Su producción aproximadamente para 1939-48 fue de 9072 toneladas pertenecientes en su mayoría al sistema de venas 1 (Huss & Geo, 2010).

#### **4.2.1.7.2 Mineralización**

La mineralización se encuentra hospedada en rocas metavolcánicas del Cinturón Verde Favourable Lake de la Subprovincia Sachigo.

Según Adams (1976), han sido identificadas dos tipos de mineralización: venas de sulfuros de cuarzo-actinolita que contienen oro, plata y metales base de sulfuros; y cuerpos estratiformes de pirrotina-pirita con baja ley de metales preciosos y base aladaña al pozo número 2. Las venas presentan un espesor de 15 cm a 4.5 m, a su vez muestran pellizcos y oleadas, y tienen longitudes de rumbo de varios cientos de metros (Huss & Geo, 2010). La producción de la mina se ha concentrado únicamente en las venas con sulfuros, cuarzo y actinolita.

Entre los minerales ganga se encuentran cuarzo azucarado y vítreo, actinolita, calcita, clorita, biotita, y como accesorio espesartita y turmalina. Los minerales mena de la mina son principalmente sulfuros como: esfalerita, galena, pirita, pirrotina, calcopirita, tetraedrita,

discrasita, plata nativa, plata rubí y oro con trazas de arsenopirita, antimonio nativo y bornita (Adams, 1976). Se cuentan con reportes de 6 sistemas de venas 1,2,3,4,19 y 20; siendo en la vena 19 donde se localiza la mejor muestra con 37.71 g/t Au. Se encuentran tenores en las venas 1,3 y 19, siendo estas las más importante.

La vena 1 se caracteriza por presentar un ensamble de magnetita, granate, clorita y actinolita (MGCA), esta se puede observar localmente como alteración hidrotermal. La meteorización de la magnetita produce afloramientos en superficie oxidados y de tipo gossan (Huss & Geo, 2010). Esta vena fue explotada de 1938-1948 presentando una producción 158.000 oz Au, 5.8M oz Ag, 1.7M lb Zn y G.1M lb Pb. La vena 3 puede seguirse por 300m en una dirección este-sureste sobre varios afloramientos, contiene sulfuros masivos y los mejores resultados que se han obtenido son de 31.88 g/t Au. La vena 19 se puede seguir por 75 metros en una dirección este-sureste, presenta un espesor de 50 a 60 cm, y tiene una dirección general de N110°, con un fuerte buzamiento al sur. Además, presenta una distribución heterogénea de mineralización de sulfuros (Huss & Geo, 2010).

Según Huss & Geo 2014 hay dos tipos de alteración presentes en la zona:

- Cuarzo-sericita, se presenta en cantidad variable, parece ser la primera alteración desarrollada en la zona. Ocurre como tapones o formaciones laminadas, a lo largo de las fracturas asociadas a las venas de cuarzo y los brotes de la mineralización.
- La segunda alteración es el ensamble de MGCA, se encuentra relacionado con las alteraciones y las áreas mineralizadas con oro-plata. La mineralización de piritita se encuentra ligada a esta alteración.

Se clasifica como un depósito polimetálico, aparentemente asociado a un modelo genético de Sulfuros Masivos Volcanogénicos (VMS). Sin embargo, existen varios puntos negativos del

modelo de VMS clásico, denotando la falta de estudios para la resolución de sus incógnitas (Huss & Geo, 2010).

#### 4.2.2 Sturgeon

##### 4.2.2.1 Ubicación de la zona

El área de estudio se encuentra ubicada en Canadá, en la provincia de Ontario en el distrito de Thunder Bay (Figura 26), comprende un área de 312Km<sup>2</sup>, se encuentra ubicada al Este del lago Nipigon y sobre parte del lago Sturgeon, cerca de lo que se conoce como lago Savant, en la Tabla 12 muestran la ubicación cuadrangular del área en coordenadas geográficas.

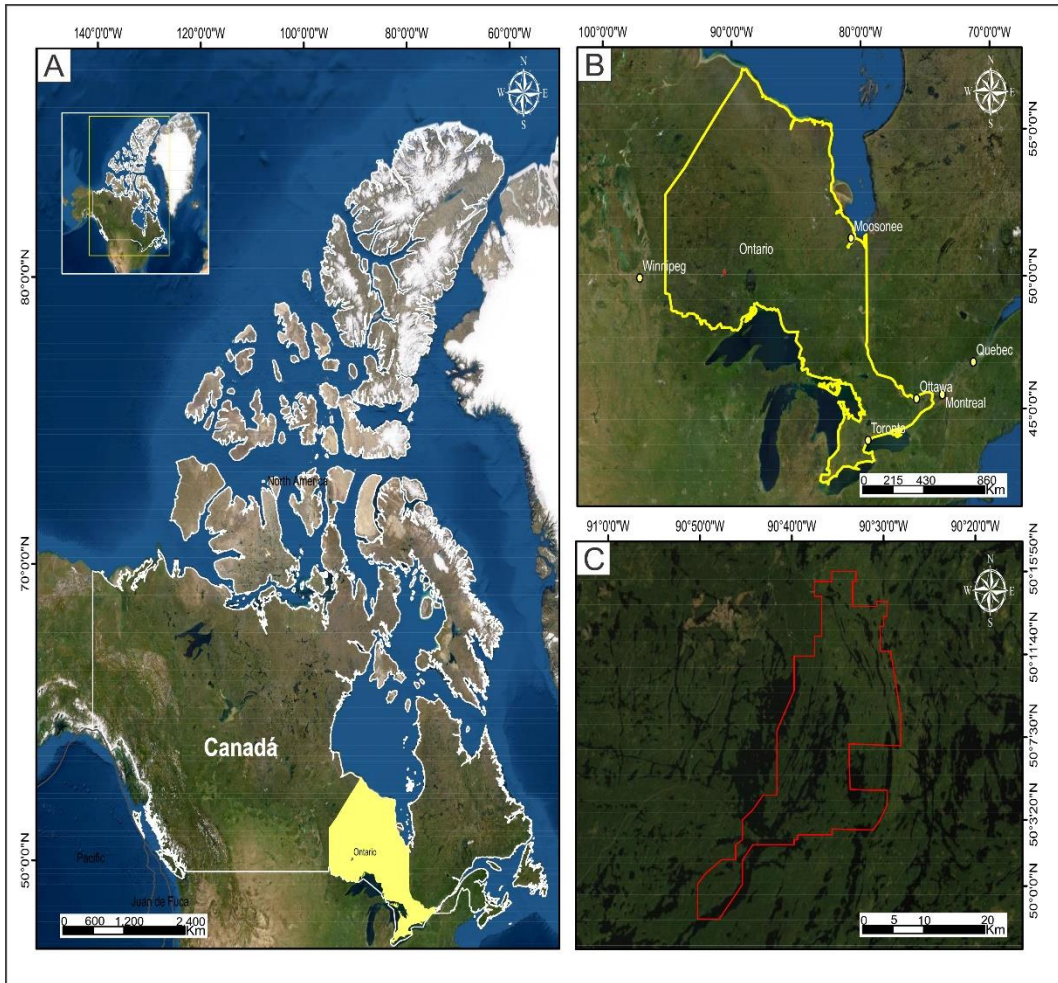
**Tabla 12.**

*Coordenadas geográficas de la zona de estudio de Sturgeon*

Vértice	Coordenadas Geográficas WGS 84	
	Latitud	Longitud
1	50°15'00.67"N	90°50'16.77"O
2	50°15'00.67"N	90°28'08.76"O
3	49°57'31.52"N	90°28'08.76"O
4	49°57'31.52"N	90°50'16.77"O

**Figura 26.**

*Mapa de localización de Sturgeon. A) Mapa de Canadá donde resalta en amarillo la provincia de Ontario; B) Acercamiento a la provincia de Ontario en Amarillo y la zona de estudio en rojo ubicada al NO cerca al límite con la provincia de Manitoba; C) Área de estudio en Sturgeon Lake.*



#### 4.2.2.2 Accesibilidad

Para acceder a la zona existe una vía que cruza en la parte norte del área, para esto se debe llegar por la ruta a Savant Lake, una pequeña comunidad ubicada sobre la autopista 599 entre Ignace y el lago Pickle a 150Km de Ignace sobre la autopista, se deben tomar desvíos por rutas destapadas que cubren la parte norte de la región, además el aeropuerto de Savant se encuentra en el costado Oeste del área por lo que es posible llegar en avión.

#### 4.2.2.3 Clima y vegetación

El área se caracteriza por ser estacional, en verano se alcanzan temperaturas de 24°C y comprende los meses de mayo a septiembre, la precipitación es mayor en esta época del año

variando entre 36 a 50 mm, en invierno la temperatura promedio es 18°C bajo cero, esta época del año va de octubre hasta abril, en este periodo de tiempo la precipitación es menor variando entre 19 a 30 mm al mes, la precipitación media anual es 636 mm y no llueve durante aproximadamente 148 días al año, la humedad media es de 83% y el índice UV es 3. En su mayoría, la región se encuentra cubierta por densos bosques de coníferas, pinos blancos y rojos (OMNR, 1998).

#### **4.2.2.4 Geomorfología**

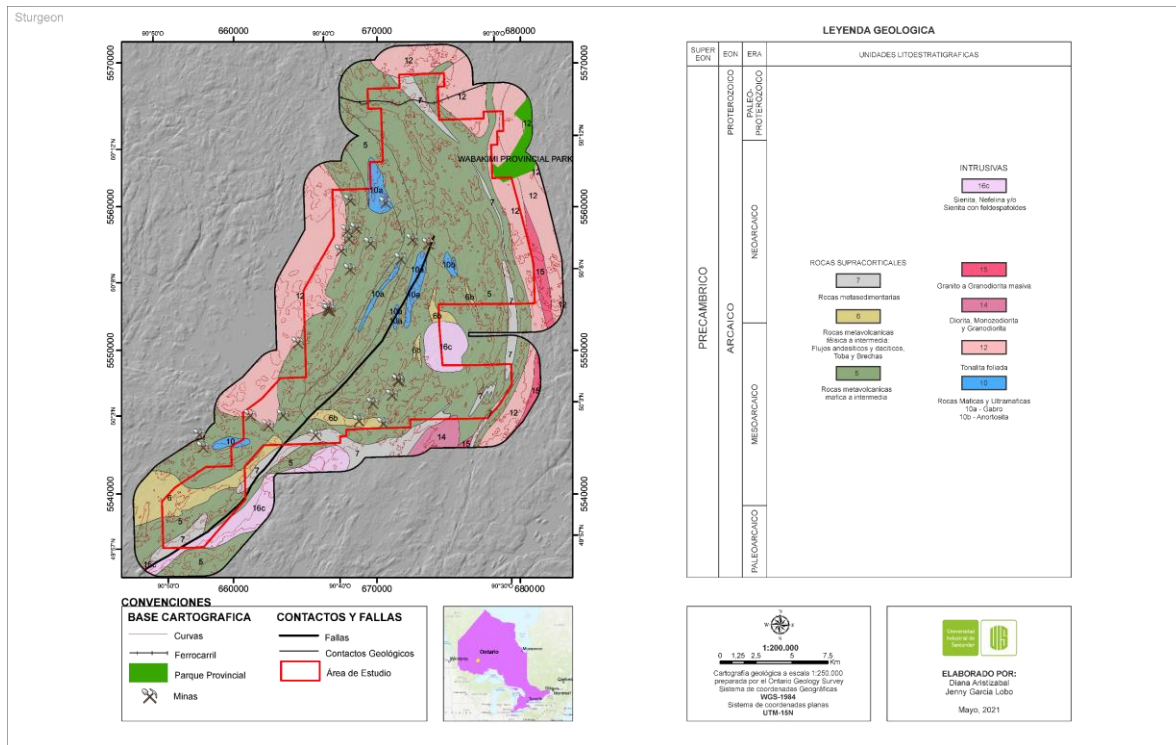
Los lagos presentan morfologías alargadas u ovaladas con una dirección predominante hacia el NE, aunque hacia el NE del área el sentido de los lagos cambia a NO y al E del área pasa a ser en sentido NS. Según Coates (1967), las fallas en la zona controlan la deposición de los sedimentos. La altura máxima registrada en el área es de 450 m.s.n.m, la topografía es suave y los accidentes geográficos no superan los 40 m, estos predominan en el N y S del área de estudio. Además, se presentan sierras alineadas en sentido NE.SW y cambios abruptos en los drenajes.

#### **4.2.2.5 Geología**

El área de estudio se localiza sobre la provincia superior en el complejo de caldera volcánica del lago Sturgeon (Holk *et al.*, 2008). La litología predominante corresponde a rocas supracorticales e intrusivas del Arcaico (Figura 27). Los datos fueron obtenidos de la Geología a escala 1:250.000 (OGS, 2011).

#### **Figura 27.**

*Mapa geológico en la zona de Sturgeon. La cartografía geológica a escala 1:250.000 es tomada del OGS, 2011.*



Se encuentran entre las unidades intrusivas el Grupo de Sienitas hornblendica – nefelínica que incluye Piroxenita, Diorita, Monzonita, Sienita, Sienita nefelínica y se encuentra en contacto intrusivo, también Granito a Granodiorita masiva a foliada, el grupo de Diorita – Monzodiorita y Granodiorita en donde se encuentran Dioritas, Cuarzo Diorita, Tonalita en pocas proporciones, Monzonita, Granodiorita, Sienita, también el grupo de las Tonalitas foliadas que incluye Tonalitas biotíticas y hornblendicas a Granodioritas que se encuentran de foliadas a masivas, así mismo rocas maficas y ultramaficas que incluyen Gabro, Anortosita y rocas ultramaficas.

Además, se encuentran rocas Supracorticales Metasedimentarias que incluyen Grauvacas, Limolitas arcosa, Argilita, Pizarras, Lodolitas, Mármol, Chert, Formaciones de hierro, rocas metavolcánicas menores, conglomerados, Areniscas, paraneis y migmatitas y hacen la diferenciación entre rocas metavolcánicas félsicas a intermedias y maficas a intermedias que incluyen Riolitas, Riodacitas, flujos dacíticos y andesíticos y basálticos, Tobs y Brechas, Chert,

formaciones de hierro y rocas intrusivas y metasedimentarias menores relacionadas con Migmatitas.

#### **4.2.2.6 Geología estructural**

El área muestra lineamientos en sentido NE-SO evidenciados por la disposición de los lagos en los que se infieren fallas. Según Holk *et al.* (2008), en la zona se encuentran presentes fallas de empuje que alteran los patrones hidrotermales sinvolcánicos más antiguos, estas tienen un componente permeable que es de importancia para la filtración de fluidos hidrotermales como indica (Dube *et al.*, 1989). Además, se observan también fallas posvolcanicas con tendencia NO-SE que cortan los depósitos actuales.

#### **4.2.2.7 Metalogenia**

Los depósitos de la zona son tipo Volcánicos de Sulfuros Masivos (VMS; Galley *et al.*, 2000); menciona que estos se encuentran dados por la intrusión sinvolcanica principalmente compuesta de tonalitas de hace 2735 Ma. Según Holk *et al.* (2008), la zona presenta múltiples etapas de metasomatismo hidrotermal antes, durante y después de la mineralización. Además, en su primera fase el complejo intrusivo se relaciona con las calderas que alojaban los VMS, proporcionando así energía térmica para el impulso del sistema de circulación hidrotermal. Asimismo, la presencia de la actividad hidrotermal sin y post mineralización está definida por zonas de alteración discordantes formadas durante las primeras etapas de circulación hidrotermal, incluyendo alteración silica con silicatos de Al con cloritoides y carbonatos o cloritos ricos en Fe, también sugiere un enfriamiento del fluido hidrotermal de 350°C a menos de 130°C.

Galley *et al.* (2000) menciona que la zona alberga una débil mineralización de sulfuros tipo pórfido Cu-Mo asociada con las zonas de brechas e hidrotermales en los enjambres de diques de

pórfido. Sin embargo, esta no se encuentra relacionada con el sistema VMS y como indica el autor es probable que se relacione con el magmatismo de arco oceánico posterior.

## 5 Metodología

Para la determinación de las áreas prospectivas para depósitos metálicos mediante imágenes satelitales se desarrolló la siguiente metodología conformada por cuatro fases (Figura 28):

- Revisión bibliográfica y colección de datos
- Pre-procesamiento
- Procesamiento
- Análisis

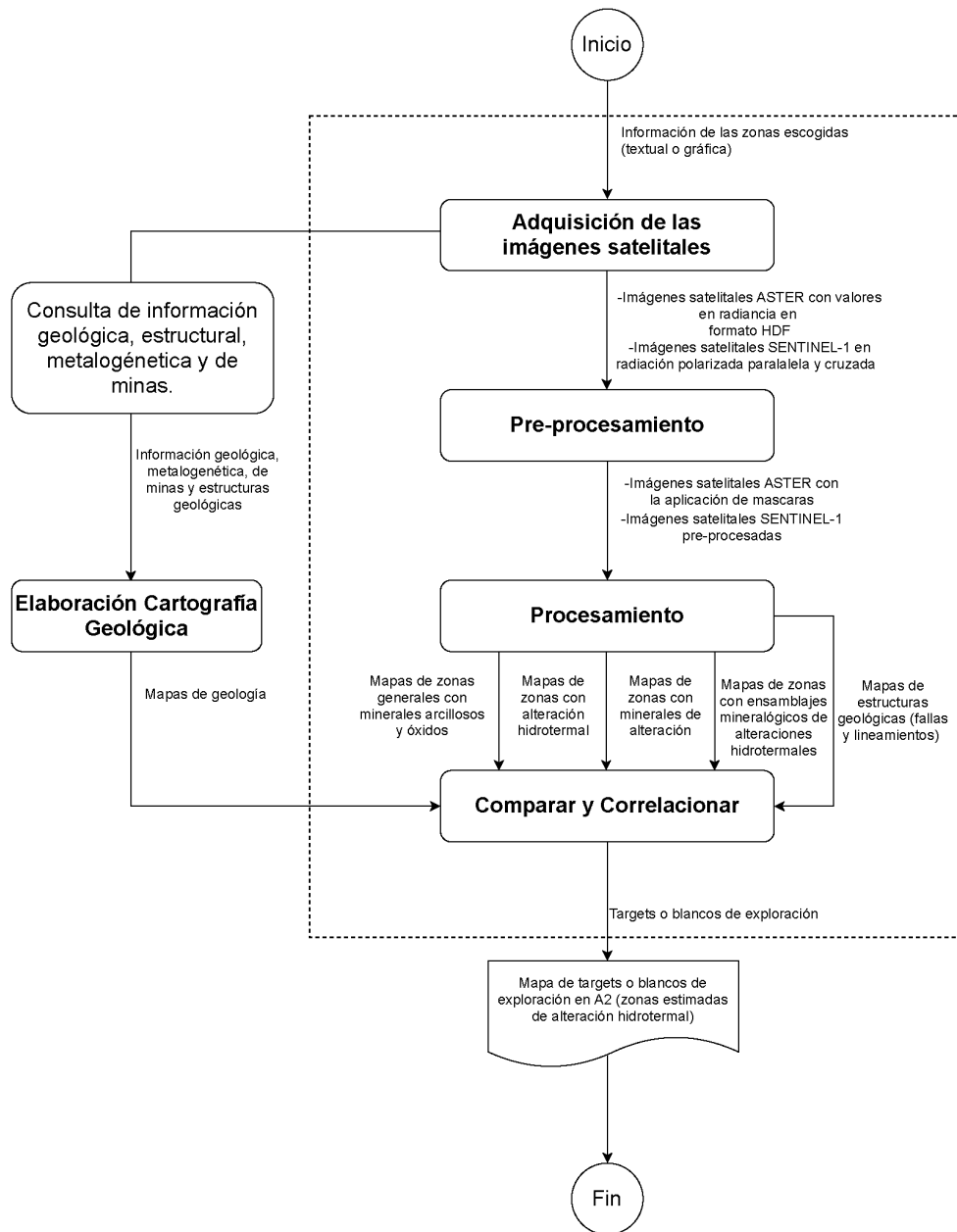
La representación gráfica se realizó mediante el uso de diagramas de flujos basados en el estándar UML (Unified Modeling Language), siguiendo el modelo de Caiza, 2018. Los diagramas de flujo se dividen en dos niveles:

- Nivel 0: Representa los procesos generales de la metodología
- Nivel 1: Detallan los sub-procesos y las técnicas de mejoramiento de imagen usadas en la metodología.

### 5.1. Diagrama de Flujo de datos nivel 0. Modificado de Caiza, 2018.

#### Figura 28.

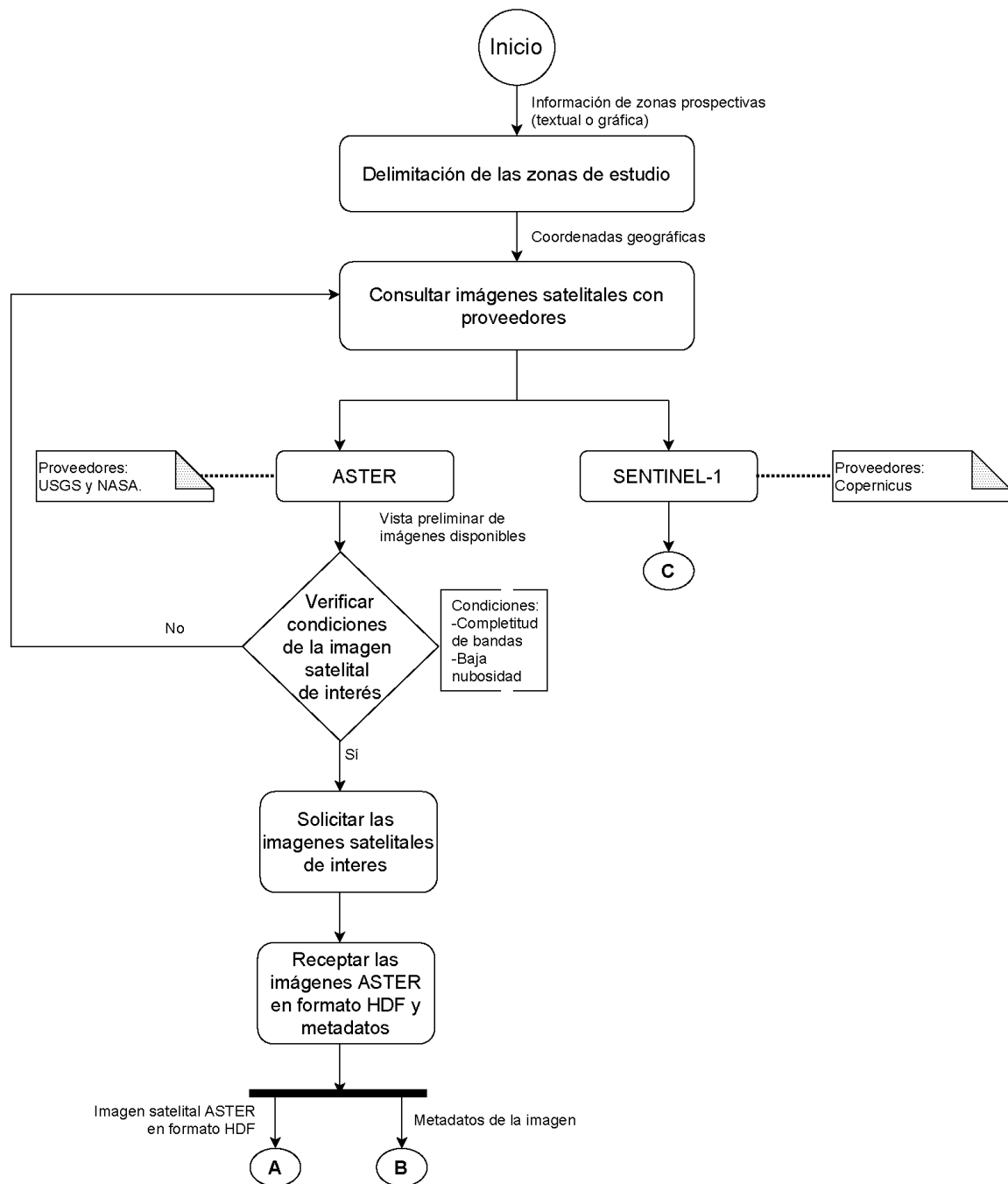
*Diagrama de flujo de datos. Modificado de Caiza (2018).*



5.1 Diagrama de flujo de datos nivel 1. Adquisición de datos. Modificado de Caiza, 2018.

Figura 29.

Diagrama de flujo de datos de la adquisición de datos. Modificado de Caiza (2018).



*Nota:* los resultados A, B y C, continúan en el diagrama de la figura 30.

La primera fase consistió en la recopilación de la información bibliográfica de libros y artículos relacionados a sensores remotos, teledetección y prospección mineral mediante imágenes satelitales multiespectrales, haciéndose uso de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander (UIS). La información más específica de las zonas de estudio como, mapas geoquímicos, geofísicos, geológicos, metalogénicos, proyectos mineros realizados en las zonas de estudio o aledañas a estas, fue buscada en la base de datos del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en el caso de Perú, mientras para Canadá, se utilizó el Geological Survey of Canada y Ontario Geological Survey.

Se adquirieron 5 imágenes satelitales correspondientes a Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER nivel 1T) obtenidas del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS; Figura 29); sus características se encuentran de la Tabla 13 a la 16. Resaltando, que, en el caso de la zona de Tacna, al ser una zona de una altura aproximada de 250 m.s.n.m presenta bastante incidencia atmosférica, observándose en la imagen, esto es propio de la zona y no de la imagen satelital ASTER (se revisaron también imágenes Sentinel-2 y Landsat-8); en el caso de las imágenes del área de Sturgeon, se realizó la unión de las imágenes antes de iniciar con el preprocesamiento. De igual forma, se adquirieron 4 imágenes de radar del sensor Sentinel-1 en la página oficial de Alaska Satellite Facility (ASF); sus características se encuentran contenidas en las Tablas 17 a 20.

**Tabla 13.**

*Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Berens.*

Parámetro	Valor
ID	AST_L1T_00305192002172815_20150422140433_3641
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor (km)	705.000
Elevación del terreno (km)	0,32
Tamaño de píxel (m)	15.000
Centro de la imagen	52 36 30,77N; -93 26 51,12W

Fecha de vuelo	19-mayo-2002
Hora de vuelo GMT	17:28:15
Día/Noche	Día
% Nubosidad	2
Proporción de mezcla de $CO_2$ (ppm)	390,000
Ángulo cenital	180 0 0
Ángulo azimutal	0 0 0

**Tabla 14.**

*Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Strugeon.*

Parámetro	Valor
ID Imagen superior	AST_L1T_00308192000172942_20150411042314_27740
ID Imagen inferior	AST_L1T_00308192000172950_20150411042311_76757
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor (km)	705.000
Elevación del terreno (km)	0,425
Tamaño de píxel (m)	15.000
Centro de la imagen	50 7 28,81N; -90 30 59,88W
Fecha de vuelo	19-agosto-2000
Hora de vuelo GMT	17:29:42 – 17:29:50
Día/Noche	Día
% nubosidad	1
Proporción de mezcla de $CO_2$ (ppm)	390,000
Ángulo cenital	180 0 0
Ángulo azimutal	0 0 0

**Tabla 15.**

*Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Puno.*

Parámetro	Valor
ID	AST_L1T_00308182005145809_20150510194956_97048
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor (km)	705.000
Elevación del terreno (km)	4,750
Tamaño de píxel (m)	15.000
Centro de la imagen	-16 35 31,02N; -69 41 54,06W
Fecha de vuelo	18-agosto-2005
Hora de vuelo GMT	14:58:09
Día/Noche	Día
% Nubosidad	1

Proporción de mezcla de $CO_2$ (ppm)	390,000
Ángulo cenital	180 0 0
Ángulo azimutal	0 0 0

**Tabla 16.**

*Características de la imagen ASTER utilizada para el área de Tacna.*

Parámetro	Valor
ID	AST_L1T_00304092004145908_20150504000046_2555
Tipo de sensor	Aster
Altitud de sensor (km)	705.000
Elevación del terreno (km)	4,750
Tamaño de píxel (m)	15.000
Centro de la imagen	-16 35 31,02N; -69 41 54,06W
Fecha de vuelo	09-abril-2004
Hora de vuelo GMT	14:59:08
Día/Noche	Día
% Nubosidad	1
Proporción de mezcla de $CO_2$ (ppm)	390,000
Ángulo cenital	180 0 0
Ángulo azimutal	0 0 0

**Tabla 17.**

*Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Berens.*

Parámetro	Valor
ID de la Imagen	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200903T235948_20200904T000013_023218_02C176_3282
Tipo de sensor	Sentinel-1B
Tipo de producto	GRD
Modo de adquisición	IW
Fecha de la adquisición	04-Sep-2020 04:47:59. 052554
Fecha del estadio del vector	03-Sep-2020 23:58:45. 500165
Ciclo de orbita	139
Polarización	VH
Polarización	VV

**Tabla 18.***Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Sturgeon.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
ID de la Imagen	S1B_IW_GRDH_1SDV_20200910T235038_20200910T235103_023320_02C497_F70D
Tipo de sensor	Sentinel-1B
Tipo de producto	GRD
Modo de adquisición	IW
Fecha de la adquisición	11-Sep-2020 08:00:16.426602
Fecha del estadio del vector	10-Sep-2020 23:49:32.123573
Ciclo de orbita	140
Polarización	VH
Polarización	VV

**Tabla 19.***Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Puno.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
ID de la Imagen	S1B_IW_GRDH_1SDV_20210129T230730_20210129T230755_025375_0305B8_4D34
Tipo de sensor	Sentinel-1B
Tipo de producto	GRD
Modo de adquisición	IW
Fecha de la adquisición	30-Ene-2021 09:27:08.583786
Fecha del estadio del vector	29-Ene-2021 23:06:23.699722
Ciclo de orbita	151
Polarización	VH
Polarización	VV

**Tabla 20.***Características de la imagen Sentinel-1 utilizada para el área de Tacna.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
ID de la Imagen	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210703T231604_20210703T231632_038619_048E97_BB46
Tipo de sensor	Sentinel-1B
Tipo de producto	GRD
Modo de adquisición	IW
Fecha de la adquisición	04-Jul-2021 00:30:06.837469
Fecha del estadio del vector	03-Jul-2021 23:14:55.000000

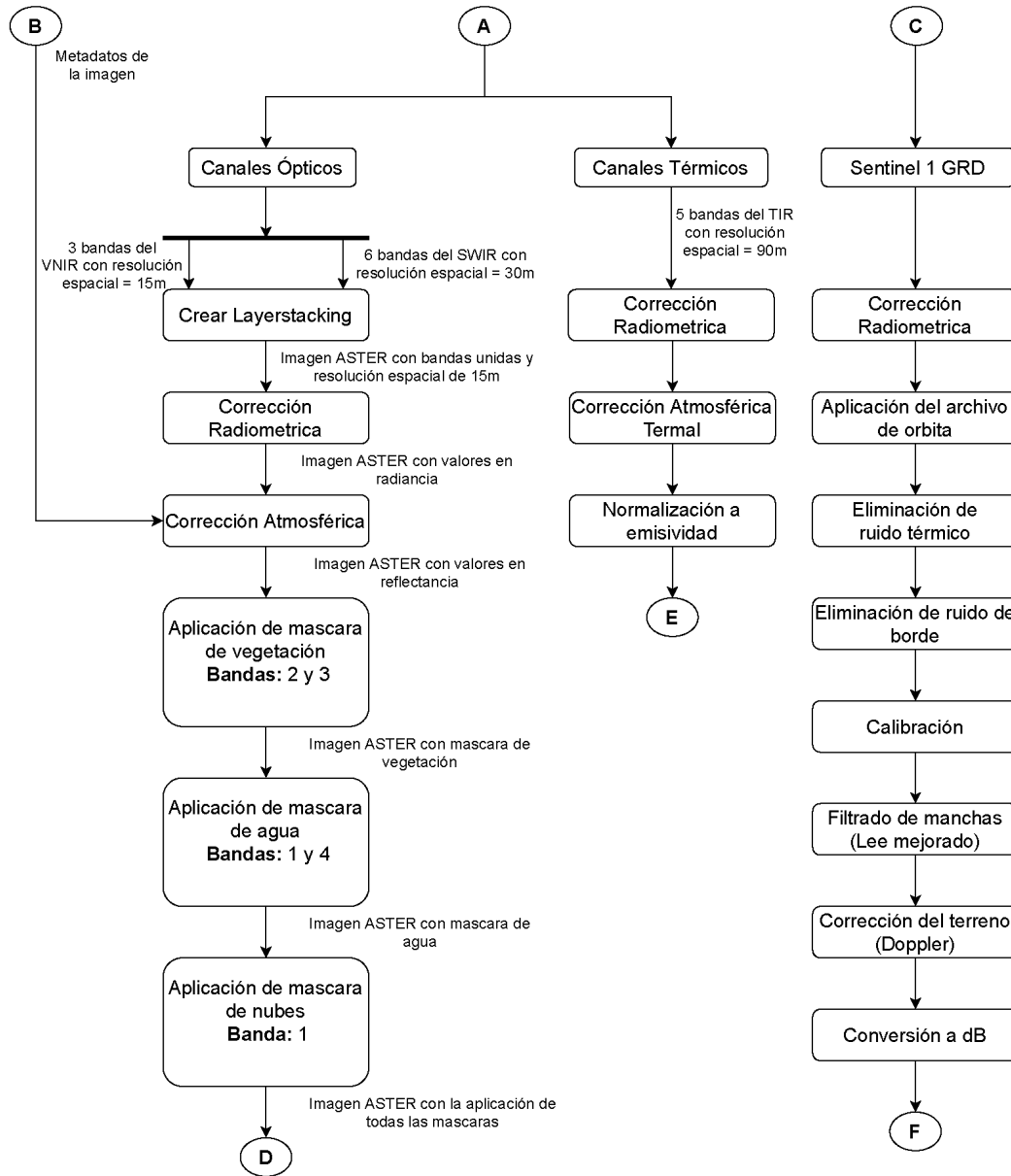
Ciclo de orbita	235
Polarización	VH
Polarización	VV

---

## 5.2 Diagrama de flujo de datos nivel 1. Pre-procesamiento de las imágenes satelitales.

### Figura 30.

*A y B. diagrama de flujo de datos del pre-procesamiento de las imágenes satelitales ASTER, modificado de Caiza, 2018. C, diagrama de flujo de datos del pre-procesamiento de las imágenes satelitales de Sentinel-1, modificado de Filipponi (2019)*



Esta etapa correspondió al tratamiento de imágenes satelitales. La imagen satelital ASTER debe presentar ciertas correcciones con el fin de mejorar su calidad eliminando el ruido (calibración del sensor, la eliminación de rayas, ruido periódico y de picos; Gupta, 2018), y así obtener un análisis preciso.

### 5.3.1 ASTER

Las imágenes ASTER se encuentran en nivel de procesamiento L1, por lo tanto, ya presentan la corrección del efecto Crosstalk (SWIR) y se encuentran ortorectificadas y georreferenciadas. Por consiguiente, las técnicas utilizadas para la calibración de los valores de reflectancia fueron: el layerstacking, la calibración radiométrica y la corrección atmosférica para las bandas ópticas (Figura 30).

Además, se realizaron la aplicación de máscaras (nubes, agua, vegetación, etc.). Las bandas térmicas se caracterizan por representar la emisividad de los cuerpos, por lo tanto, para su apropiado análisis debe realizarse tres técnicas para un correcto resultado: calibración radiométrica, corrección atmosférica termal y la conversión a emisividad.

Todos estos procesos se realizarán en el software ENVI, el cual es especializado en el procesamiento y análisis de imágenes geoespaciales.

#### 5.3.1.1 Creación del Layerstacking

Consistió en la unión de las 3 bandas del subsistema VNIR con las seis bandas del subsistema SWIR en un solo archivo, creando un archivo de 9 bandas integradas, con una resolución espacial de 15 m.

#### 5.3.1.2 Calibración Radiométrica

La calibración radiométrica se utiliza para homogenizar los datos de radiancia, reflectancia o temperatura que contiene la imagen en cada pixel, considerando las variaciones en la intensidad que puede ser causadas por varios motivos como fallos del sensor, alteraciones en el movimiento de este y la interferencia con la atmosfera. El software ENVI calibra la radiancia mediante la herramienta *Radiometric Calibration*, convirtiendo los datos de radiancia de *byte-scaled* en

*Floating-point* (ENVI, 2004), homogenizando el histograma de los datos. La imagen de salida estará en unidades de  $\mu\text{W}(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$ .

### 5.3.1.3 Corrección Atmosférica

Al tener la imagen calibrada se procedió a pasar los valores de radiancia a reflectancia por medio de la corrección atmosférica. La corrección atmosférica es necesaria debido a los efectos de la absorción y dispersión causada por las moléculas y partículas en suspensión, los cuales pueden cambiar los datos obtenidos por los sensores (Khorram *et al.*, 2016). Por consiguiente, el objetivo fundamental de la corrección atmosférica es recuperar los valores reales de reflectancia o emitancia de la superficie de los datos obtenido a partir de una imagen satelital, eliminando la influencia atmosférica en la radiancia de una imagen (Gupta, 2018).

Teniendo en cuenta, que las bandas ópticas captan la radiación reflejada de la superficie, a diferencia de las bandas térmicas que captan la radiación emitida por esta, se deben utilizar diferentes módulos para esta corrección atmosférica.

La corrección atmosférica para las bandas ópticas se realizó mediante el módulo IAR proporcionado por el software ENVI. Este trabaja con el metadato de la imagen, por consiguiente, tiene en cuenta los parámetros geográficos y temporales de la imagen satelital. Además, realiza la recodificación de la imagen transformando las bandas secuenciales (BSQ) a bandas por línea (BIL), debido a que esta incluye un ordenamiento espacial de los datos y la inclusión de cierta información clave sobre las características del sensor.

### 5.3.1.4 Elaboración de mascarar

Para la elaboración de máscaras se tuvieron en cuenta las características espectrales de la vegetación, agua y nubosidad. Estas se construyeron mediante la herramienta *build a mask* y se aplicaron con la herramienta *apply a mask* de ENVI.

#### 5.3.1.4.1 Máscara de vegetación

La vegetación presenta un comportamiento cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible, valores más elevados en el infrarrojo cercano y menores en el infrarrojo de onda corta. Teniendo esto en cuenta, presenta un pico de reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (banda 3) y un pico de absorción en la banda del rojo (banda 2). Para la realización de la máscara fue necesario usar El Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) para reconocer la vegetación mediante la fórmula establecida por Ninomiya (2004):

$$NDVI = \frac{\text{Banda 3 ASTER} - \text{Banda 2 ASTER}}{\text{Banda 3 ASTER} + \text{Banda 2 ASTER}}$$

Después de realizar el índice se procedió a enmascarar las zonas que presentan vegetación en la zona de Perú, considerando un umbral de 0.0401 – 0.3825 en la zona de Tacna y de 0.1493 – 0.5038 en la de Puno. Teniendo ya las zonas enmascaradas se creó la máscara de vegetación. Por último, se aplicó la máscara a la imagen satelital con los datos en valores de reflectancia.

#### 5.3.1.4.2 Máscara de agua

El agua presenta valores bajos de reflectancia en la banda 5, debido a que el agua absorbe energía en el rango de 2.145 – 2.185  $\mu\text{m}$ . La realización de la máscara se hizo mediante el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) propuesto por (Gao, 1996).

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

1500 a 1750 nm. Mientras que en el infrarrojo cercano el agua no absorbe.

Después de realizar el índice se procedió a enmascarar las zonas que presentan agua en las zonas de estudio, considerando un umbral de 0,1471 – 0,8465 en la zona de Berens, 0.1504 – 0,7932 en la zona de Sturgeon y 0.0769 – 0,7644 en la zona de Tacna. Teniendo ya las zonas

enmascaradas se creó la máscara de agua. Por último, se aplicó la máscara a la imagen satelital con los datos en valores de reflectancia.

#### **5.3.1.4.3 Máscara de nubes**

Las nubes presentan altos valores de reflectancia en la banda 1, debido a que no absorben energía en el rango 0.52 – 0.60  $\mu\text{m}$ . El umbral para el enmascaramiento de las nubes se hizo a partir de esta banda considerando los valores 1.1474 – 1,8395 en la zona de Tacna y 1.3444 – 6,2547 en la zona de Sturgeon.

Teniendo ya las zonas enmascaradas se creó la máscara de nubes. Por último, se aplicó la máscara a la imagen satelital con los datos en valores de reflectancia.

#### **5.3.1.5 Corrección atmosférica termal**

ENVI incluye el módulo *Thermal Atmospheric Correction* que sirve para aproximar o eliminar los datos de radiación térmica infrarroja que incluyen contribuciones atmosféricas, para esto los datos deben estar en valores de radiancia antes de aplicar el módulo. El algoritmo de corrección atmosférica que utiliza el software es similar al algoritmo ISAC o *In-Scene Atmospheric Compensation*. Según la guía de usuario de (ENVI, 2004). Este algoritmo asume que la atmósfera es uniforme sin resplandor reflejado y que existe una superficie cercana a un cuerpo negro, por lo que utiliza un solo valor aproximado para la atmósfera. Primero determina la longitud de onda que más se repite y que tiene la temperatura máxima para ser usada como longitud de onda de referencia y solo los espectros con mayor temperatura en esta longitud de onda se utilizan para calcular la compensación atmosférica. Luego, se grafican los valores de radiancia del cuerpo negro de referencia frente a las radiancias medidas para cada longitud de onda. En la gráfica, se ajusta una línea a los puntos más altos en los datos graficados y el ajuste se pondera para asignar más peso a las regiones con muestreo más denso. La compensación para esta banda se aplica luego

como la pendiente y el desplazamiento derivados de la regresión lineal de estos datos con sus radiancias de cuerpo negro calculadas en la longitud de onda de referencia. La radiación atmosférica ascendente y la transmisión atmosférica se aproximan utilizando la temperatura de la superficie de cada píxel que se calcula a partir de los datos y usando la función de Planck y asumiendo una emisividad de 1. El *regression pixels* se mantiene para todos en donde se toma el valor máximo en cada píxel y el *Fitting Technique* se mantiene en *Top of Bins*, el cual ajusta una línea en la parte superior del gráfico que corresponde a aquellos píxeles con emisividad cercana a 1.

#### **5.3.1.6 Normalización a emisividad**

Con el fin de convertir los valores a emisividad se utilizó la técnica de Normalización de la Emisividad que es la más usada mediante la función *Emissivity Normalization* (ENVI, 2004). Esa técnica sirve para calcular los valores de emisividad y temperatura a partir de los datos de radiancia térmica infrarroja, calculando la temperatura para cada píxel en cada banda teniendo un valor de emisividad fijo. La temperatura más alta de cada píxel es usada para calcular los valores de emisividad usando la función de Planck. Los valores de radiancia deben estar en unidades  $W/m^2/\mu m/sr$ . Para este proyecto se mantuvo el valor asumido de emisividad predeterminado en el software, siendo este 0.96. Sin embargo, no se genera imagen de temperatura ya que este proyecto no lo requiere.

#### **5.3.2 SENTINEL-1**

Las imágenes de Sentinel-1 al ser datos SAR son obtenidas independiente de las condiciones climáticas, por lo tanto, no son necesarias correcciones atmosféricas a diferencia de las imágenes ASTER. Además, las imágenes no cuentan con ningún preprocesamiento en el momento de la adquisición, por lo que se debe aplicar correcciones que ajusten la órbita de la

imagen y que disminuyan el ruido de borde y termal. Asimismo, se debe realizar la corrección del terreno como explica (Foumelis *et al.*, 2018).

Para el preprocesamiento de estas imágenes se utilizó el software SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA). SNAP tiene la ventaja de ser un software libre, no obstante, los tiempos de procesamiento en este son largos y consumen bastante memoria del equipo, esto se debe tener en cuenta al momento de utilizarlo.

### **5.3.2.1 Aplicación de archivo de orbita**

Los datos se encuentran dentro del metadato de los productos, sin embargo, no son precisos. La precisión de la órbita de los satélites es determinada después de varios días y están disponibles de días a semanas después de la generación del producto. El software SNAP permite la descarga y la actualización automática de los vectores de estado de la órbita para cada escena SAR en sus metadatos de producto proporcionando una información precisa de satélite y velocidad de información. El servicio POD, *Precise Orbit Determination* de Sentinel-1 proporciona los archivos de orbita restituidos y el POE, *Precise Orbit Efemerides* los archivos de orbita precisos.

### **5.3.2.2 Eliminación del ruido termal**

Esta función permite la eliminación del ruido térmico, reduce los efectos del ruido en la textura entre sub-trayectorias, en particular, normalizando la señal de retrodispersión de toda la escena de Sentinel-1 y reduciendo las discontinuidades entre las sub-trayectorias para las escenas en los modos de adquisición multitrayectoria.

### **5.3.2.3 Eliminación del ruido de borde**

Este permite el remover la baja intensidad del ruido y los datos no validos en los bordes de la escena.

#### 5.3.2.4 Calibración

Revierte el factor de escala aplicado durante la generación del producto nivel 1, además, aplica un desplazamiento constante y una ganancia dependiente del rango, incluyendo la constante de calibración absoluta. Esta calibración convierte la intensidad de la retrodispersión recibida por el sensor en la sección transversal normalizada del radar como una media calibrada que tiene en cuenta el ángulo de incidencia global de la imagen dentro de otras características específicas del sensor. La configuración se mantuvo por defecto según sugieren en el manual de SNAP (Braun, 2020)

#### 5.3.2.5 Filtrado de manchas

El módulo de *Speckel filtering* reduce el moteado de la imagen, sin embargo, se debe tener cuidado cuando se aplica por que puede borrar la información. Esta corrección homogeniza el efecto sal pimienta o moteado que es causado por diferentes fuentes a la intensidad de la retrodispersión por debajo de la resolución de los pixeles. Este es un prerequisite para el adecuado análisis que se hará posteriormente, debido a que elimina patrones no deseados que pueden ser malinterpretados.

#### 5.3.2.6 Corrección del terreno

El *Terrain Correction* se genera debido a la corrección geométrica causada por la topografía, como las sombras y acercado. Para su aplicación se usa un modelo digital de elevación para corregir la localización de cada pixel. La codificación geométrica convierte la imagen de la geometría del rango inclinado del terreno en un sistema de coordenadas de mapa.

#### 5.3.2.7 Conversión a dB

Se usa debido a que el coeficiente de retrodispersión se convierte en dB mediante una transformación logarítmica ya que los valores de  $\sigma_{0\_VV}$  oscilan aproximadamente entre 0 y

1, con valores de retrodispersión promedio de 0.07 (VV) y 0.02 (VH), esto significa que hay muchos píxeles oscuros y muchos pocos píxeles brillantes con valores altos, esto no es ideal estadísticamente hablando y se representa en contrastes visuales bajos por lo que para lograr una distribución normal de los valores se debe aplicar esta corrección. Los valores de los datos en dB calibrados oscilan aproximadamente entre -35 y 10dB.

#### **5.4 Diagrama de flujo de datos nivel 1. Procesamiento de las imágenes satelitales.**

Esta fase incluye la mejora de la imagen, con el propósito de mejorar el contenido de estas, resaltando contrastes, bordes, entre otras. En primer lugar, se utilizaron técnicas de mejoramiento de imagen para las bandas ópticas (Figura 31) como: *i*) combinaciones de bandas en RGB; *ii*) cocientes de banda, *iii*) índices de Ninomiya y *iv*) Spectral Angle Mapper (SAM). En segundo lugar, para las bandas termales se realizó cocientes de bandas. Las técnicas se realizaron mediante el software ENVI.

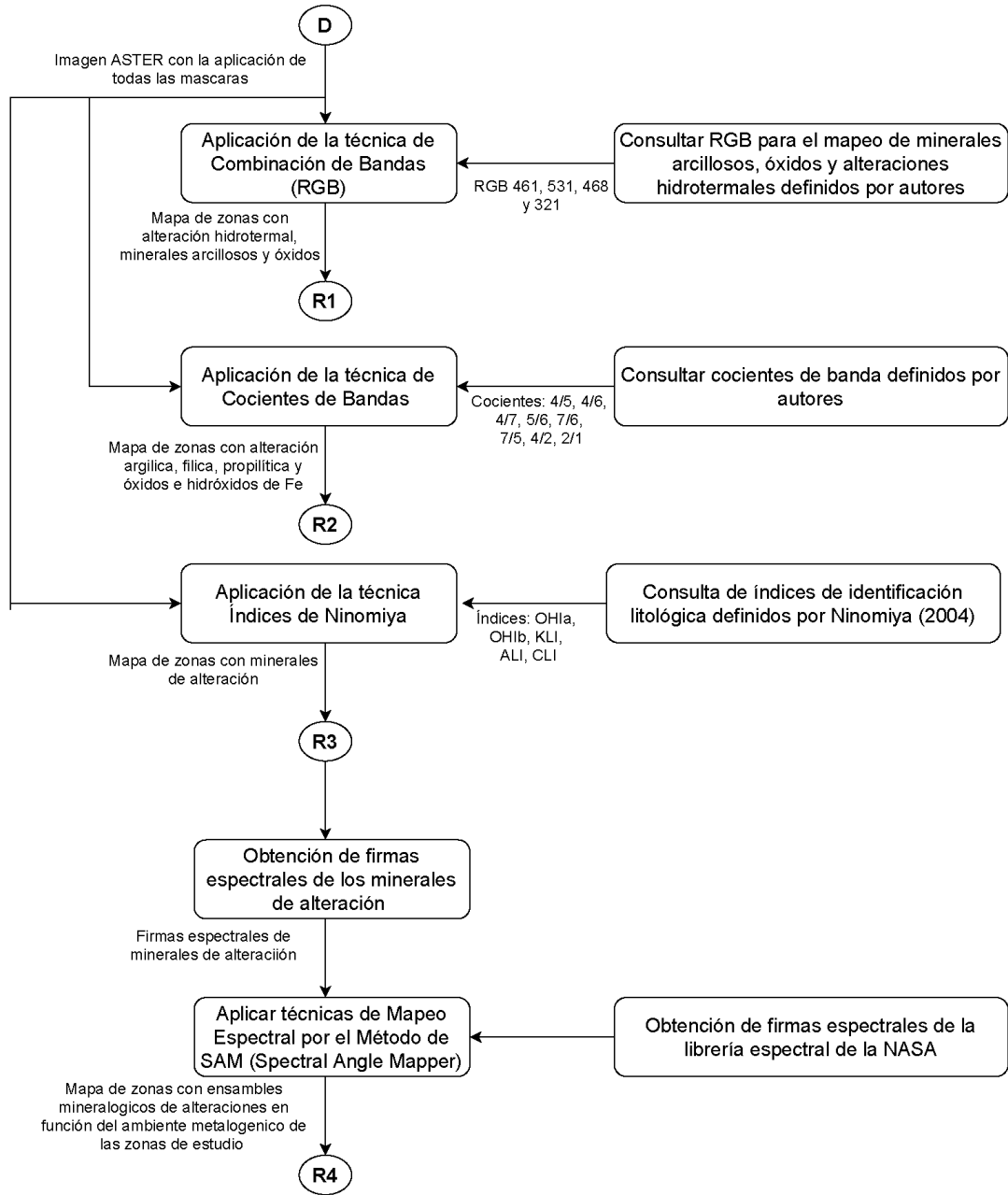
Por último, mediante el uso de imágenes de Sentinel-1 se realizó la cartografía de las estructuras presentes en las zonas, el procesamiento se realizó en el software ARCGIS.

#### **5.4.1 ASTER**

##### **5.4.1.1 Óptico**

#### **Figura 31.**

*Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes satelitales de la parte óptica. Modificado de Caiza (2018).*



#### 5.4.1.1.1 Combinaciones de bandas en RGB

Para las zonas de estudio se aplicaron las combinaciones de bandas en RGB, definidas por varios autores (Tabla 21) para mapear zonas de alteración hidrotermal, con minerales arcillosos y óxidos.

**Tabla 21.**

*Combinaciones de bandas utilizadas, que minerales identifican y los autores que las han utilizado*

Combinación de bandas				
R	G	B	Identifica	Autores
4	6	1		Caiza (2018)
5	3	1	Minerales arcillosos	Azcurra <i>et al.</i> (2003); Caiza (2018)
4	6	8	Alteraciones hidrotermales	Mamani (2017); Testa <i>et al.</i> (2018)
3	2	1	Óxidos	Marquetti <i>et al.</i> (2004); Testa <i>et al.</i> (2018)
4/5	4/6	4/7	Alteraciones hidrotermales	Pérez <i>et al.</i> (2007)
5/6	7/6	7/5	Minerales AlOH y Alteración argilica avanzada	Hewson <i>et al.</i> (2020)

#### 5.4.1.1.2 Cocientes de bandas

Para las zonas de estudio se aplicaron los cocientes de bandas, definidas por varios autores (Tabla 22) para mapear zonas de alteración hidrotermal, minerales arcillosos y óxidos, además, se realizó limpieza de pixeles sueltos que pudieran generar ruido en la interpretación.

**Tabla 22.**

*Cocientes de bandas utilizados, que minerales identifica y los autores que lo han utilizado.*

Cocientes de Banda		
Cociente	Identifica	Autores
5/6	Fengita	Rowan (2006); Velosky <i>et al.</i> (2003)
7/6	Moscovita	Pour <i>et al.</i> (2010)
7/5	Caolinita	Marquetti <i>et al.</i> (2004)
4/2	Gossan	Velosky <i>et al.</i> (2003); Pour <i>et al.</i> (2010)
4/6	Minerales de arcilla	Xu <i>et al.</i> (2004); Marquetti <i>et al.</i> (2004); Testa <i>et al.</i> (2018)
2/1	Hierro ferrico Fe 3+	Rowan (2006)
4/5	Alt. Argilica avanzada	Caiza (2018)
4/7	Alt. Filica	Testa <i>et al.</i> (2018)
5/3+1/2	Hierro ferroso Fe 2+	Rowan (2006)

#### 5.4.1.1.3 Índices de Ninomiya

Para las zonas de estudio se aplicaron los índices del SWIR definidos por Ninomiya (2004) para mapear minerales de alteración (ver Tabla 7). Además, se realizó limpieza de pixeles sueltos que pudieran generar ruido en la interpretación.

#### 5.4.1.1.4 Spectral Angle Mapper (SAM)

El SAM al ser una técnica de clasificación supervisada, se debe entrenar primero al algoritmo teniendo en cuenta la información reportada previamente de las zonas en el capítulo cuatro. Debido a las características mineralógicas y metalogénicas de las zonas, se escogieron los minerales a mapear (Tabla 23).

#### Tabla 23.

*Minerales a mapear en el SAM.*

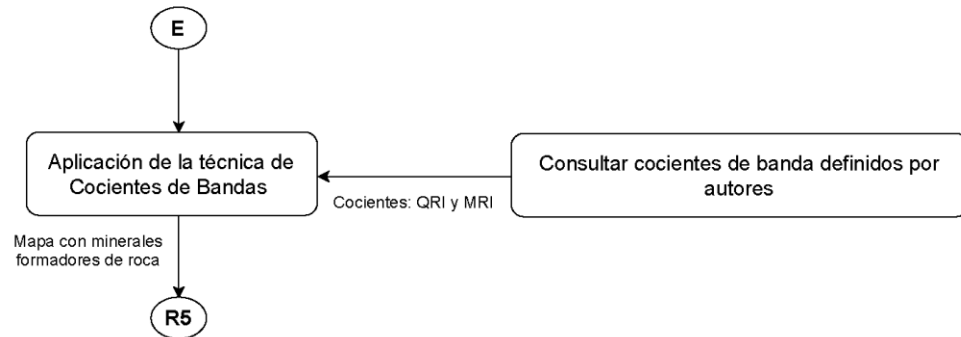
Grupo Mineralógico	Minerales	Fórmula Química
Óxidos	Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
	Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
	Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
Arcillas	Caolinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Dickita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Pirofilita	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Micas blancas	Illita	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$
	Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
	Paragonita	$\text{NaAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Biotitas	Biotita	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$
Esmectitas	Montmorillonita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.33}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Cloritas	Clorita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6$
Epidota	Epidota	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$
Anfiboles	Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5[(\text{OH}, \text{F})\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2$
	Calcita	$\text{CaCO}_3$
	Ankerita	$\text{Ca Fe}(\text{CO}_3)_2$
Carbonatos	Siderita	$\text{FeCO}_3$
	Alunita	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$
Sulfatos	Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$
	Pirita	$\text{FeS}_2$
Turmalina	Turmalina	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Li})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Mn})_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \cdot (\text{OH}, \text{F})_4$

#### 5.4.1.2 Termal

Se realizaron los cocientes de banda definidos por Guha & Kumar (2015), para la cartografía de rocas de alto contenido de cuarzo y máficos (Figura 32). Además, teniendo en cuenta la resolución espacial de este subsistema de bandas (90m) no se descarta la posibilidad de mezcla mineral.

**Figura 32.**

*Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes satelitales de la parte Termal.*

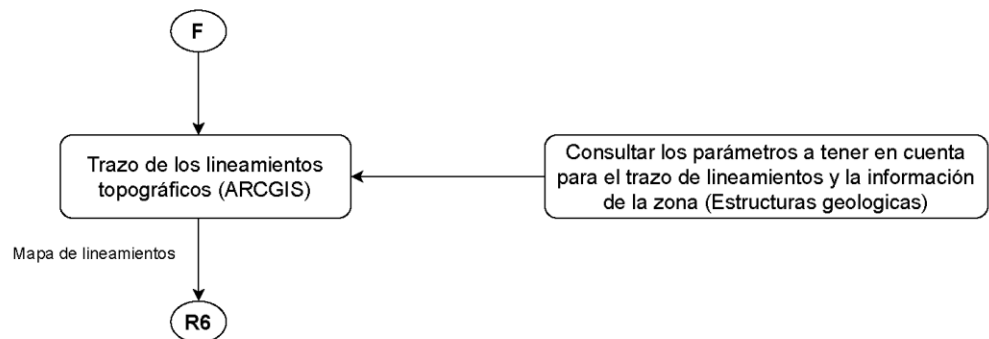


#### 5.4.2 Sentinel-1

Para el procesamiento de las imágenes Sentinel-1 se realizó la interpretación de lineamientos basado en la observación indirecta de lineaciones o cambios abruptos en textura o color, drenajes y/o cuerpos de agua alineados y cambios en la morfología resaltados por la presencia de sombras de radar como los cambios de pendiente, escarpas de falla, facetas triangulares, presencia de valles y depresiones. Además, se tuvo en cuenta la información bibliográfica existente en las zonas como la geológica, hidrogeológica y estructural (Figura 33).

**Figura 33.**

*Diagrama de flujo de datos del procesamiento de las imágenes Sentinel-1.*

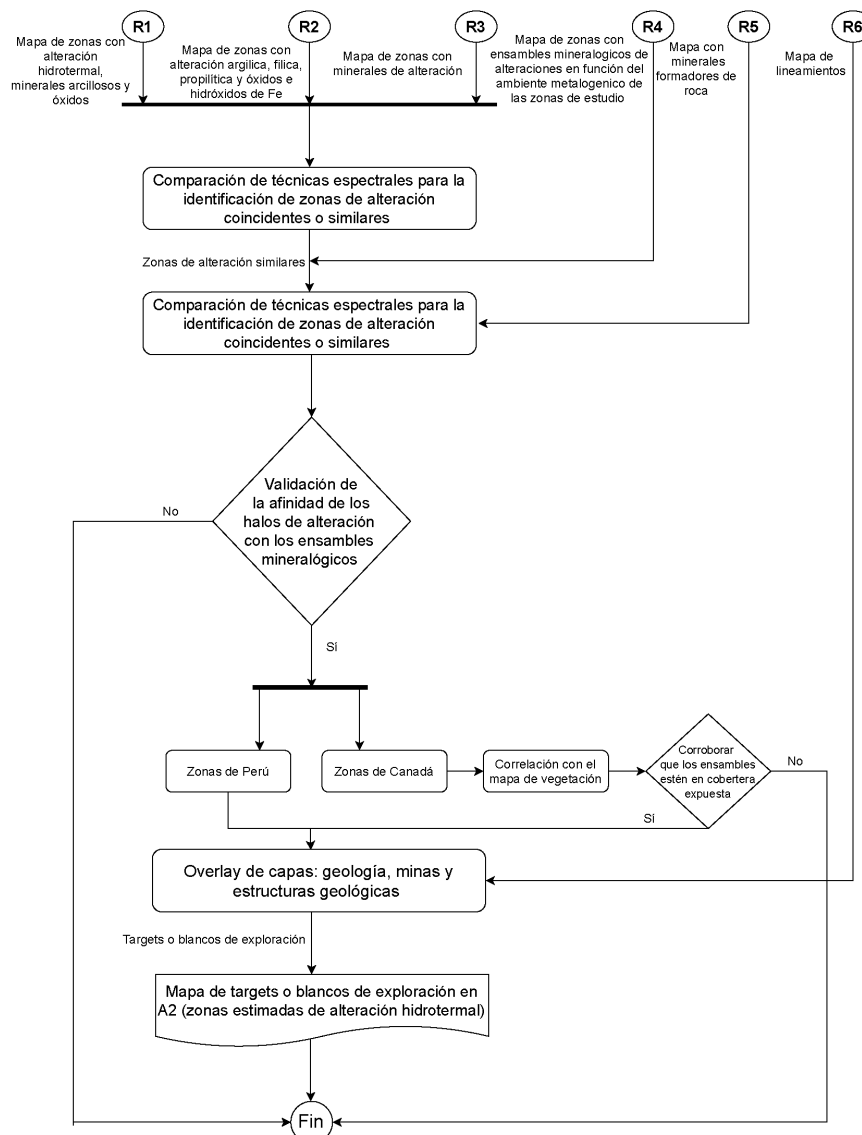


## 5.5 Análisis

La fase final del proyecto comprende el análisis y la interpretación de las imágenes satelitales multiespectrales después del procesamiento, para así determinar las áreas prospectivas dentro de las zonas de estudio (Figura 34). También incluye la redacción del informe final, el cual lleva toda la información de las zonas y los resultados obtenido en todas las fases, junto con las conclusiones y recomendaciones

**Figura 34.**

*Diagrama de flujo de la correlación de los datos y su análisis. Modificado de Caiza (2018).*



## **6 Resultados**

En el presente trabajo de investigación se usaron cinco imágenes multiespectrales del sensor ASTER en nivel L1T y 4 imágenes de radar del sensor Sentinel-1, una de cada tipo para las cuatro zonas de estudio. Las primeras imágenes se utilizaron para la cartografía de minerales y caracterización de alteraciones hidrotermales en las zonas y las segundas para la identificación de rasgos estructurales debido a su geometría de observación lateral y fuerte direccionalidad del haz del radar (Marchionni & Cavayas, 2014).

Las zonas de Perú se caracterizan por estar en contexto estructural de margen de deformación activa, las estructuras son relativamente recientes. Mientras, las zonas de Canadá son complejas estructuralmente, debido a todos los procesos que ha sido sometido el cratón.

En esta sección se presenta los resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes técnicas en las respectivas imágenes para cada zona de estudio.

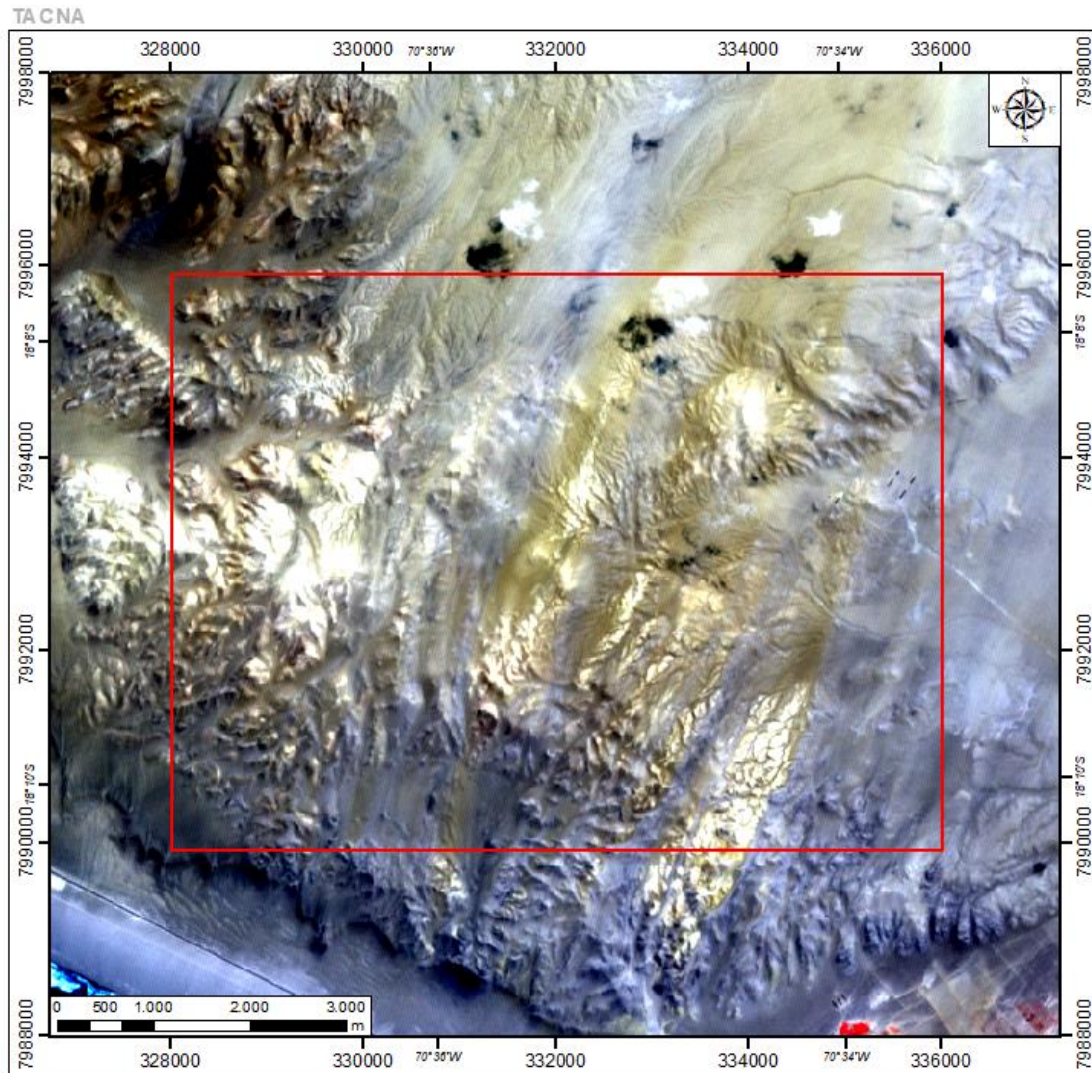
### **6.1 Perú**

#### **6.1.1 Tacna**

La imagen satelital de la zona de estudio de Tacna presenta al SE vegetación en tonalidades rojizas, al SO el mar en color negro, en tonalidades moradas y café la cobertera superficial, debido a la incidencia atmosférica que presenta al ubicarse en la Cordillera de la Costa, en una altura promedio de 200 m.s.n.m. La nubosidad se concentra principalmente al NE (Figura 35). Estas características fueron determinadas a partir de la imagen de infrarrojo color.

**Figura 35.**

*Imagen satelital ASTER LIT en infrarrojo color de la zona de Tacna.*

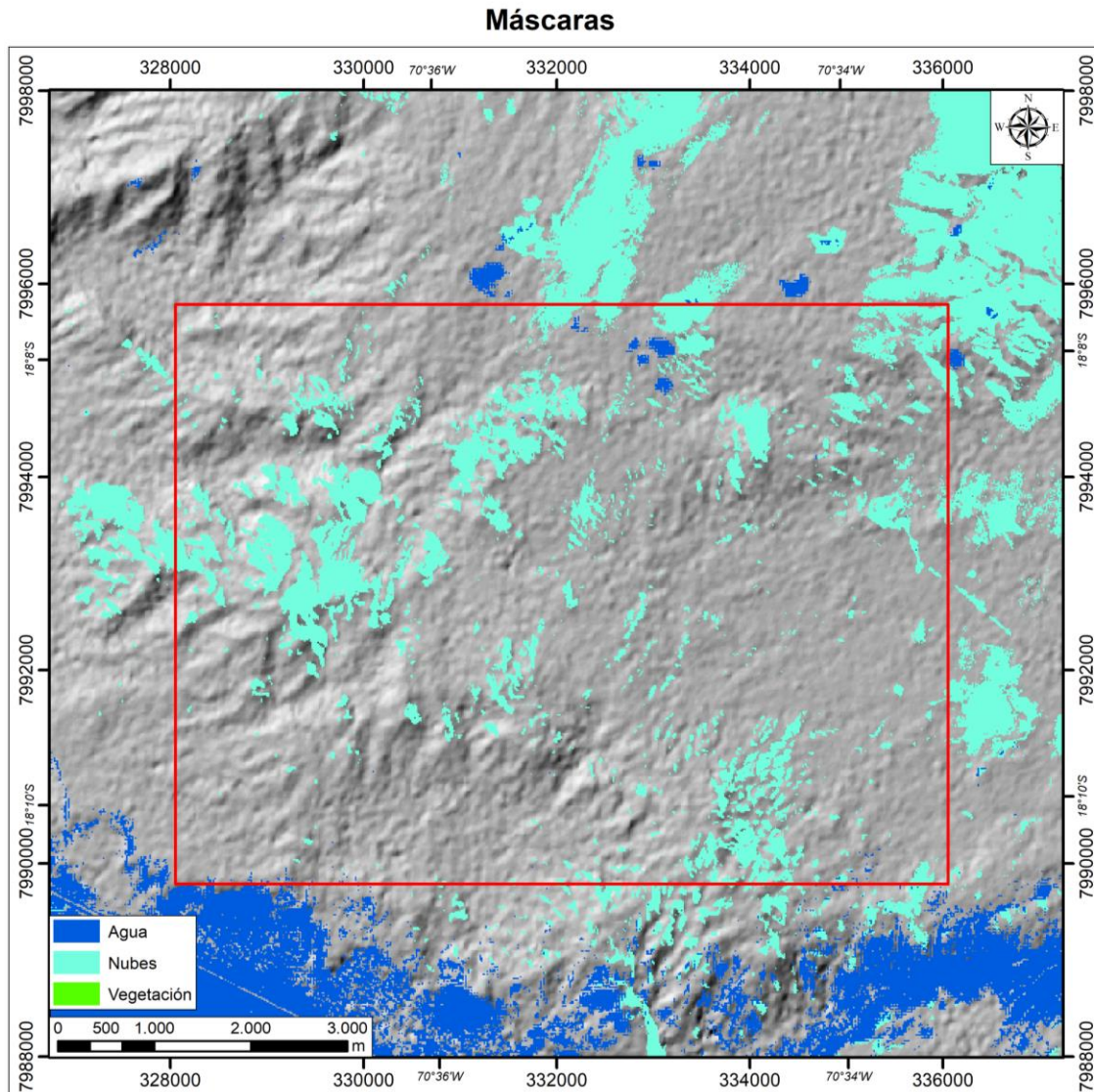


### 6.1.1.1 Aplicación de Máscaras

Se generaron máscaras de vegetación, nubes y agua para evitar ruido y mal interpretación en la respuesta a la aplicación de las técnicas espectrales. Las nubes son las que presentan mayor extensión con un área de 14,22%, localizándose al NE, el mar se encuentra hacia el SO con un área de 10,10% y la vegetación al SE con una extensión de 0,46% (Figura 36).

**Figura 36.**

*Aplicación de máscaras sobre la zona de Tacna. Máscara de vegetación color verde, máscara de agua en tonalidad azul y máscara de nubes en color cian.*



### 6.1.1.2 Combinación de Bandas

Con la intención de reconocer las áreas que presentan minerales arcillosos, óxidos y alteraciones hidrotermales se utilizaron las combinaciones de bandas mencionadas en la Tabla 21.

La Tabla 24 denota que resalta cada combinación y en que tonalidad se resalta cada una de estas.

**Tabla 24.**

*Tabla resumen de las características de las combinaciones de bandas utilizadas.*

RGB	Enlace iónica y Minerales	Resalta	Identifica	
4,6,1	4	(OH) Sulfatos, Caolinita, Arcillas	Arcillas- Morado	
	6	Al (OH) Moscovita, Illita, Montmorillonita	Minerales arcillosos	
	1			
5,3,1	5	Al (OH) Alunita		Alunita- Rojo
	3	Óxidos de Fe	óxidos Fe-Cian	
	1			
4,6,8	4	(OH) Sulfatos, Caolinita, Arcillas	Argílica Filica- Rosado	
	6	Al (OH) Moscovita, Illita, Montmorillonita	Silica- Blanco	Alteraciones hidrotermales
	8	Mg (OH) Calcita, Clorita, Epidota		
3,2,1	3		Óxidos de Fe- Blanco	
	2			Óxidos
	1			
4/5,4/6,4/7	4/5	Argílica	Arcillas y micas- Blanco	
	4/6	Argílica	Min. AlOH- Verde pálido	
	4/7	Filica	Alteraciones hidrotermales	
5/6,7/6,7/5	5/6	Filica		Moscovita y Caolinita- Cian
	7/6	Moscovita		Alt. Filica- Amarillo Naranja
	7/5	Caolinita		

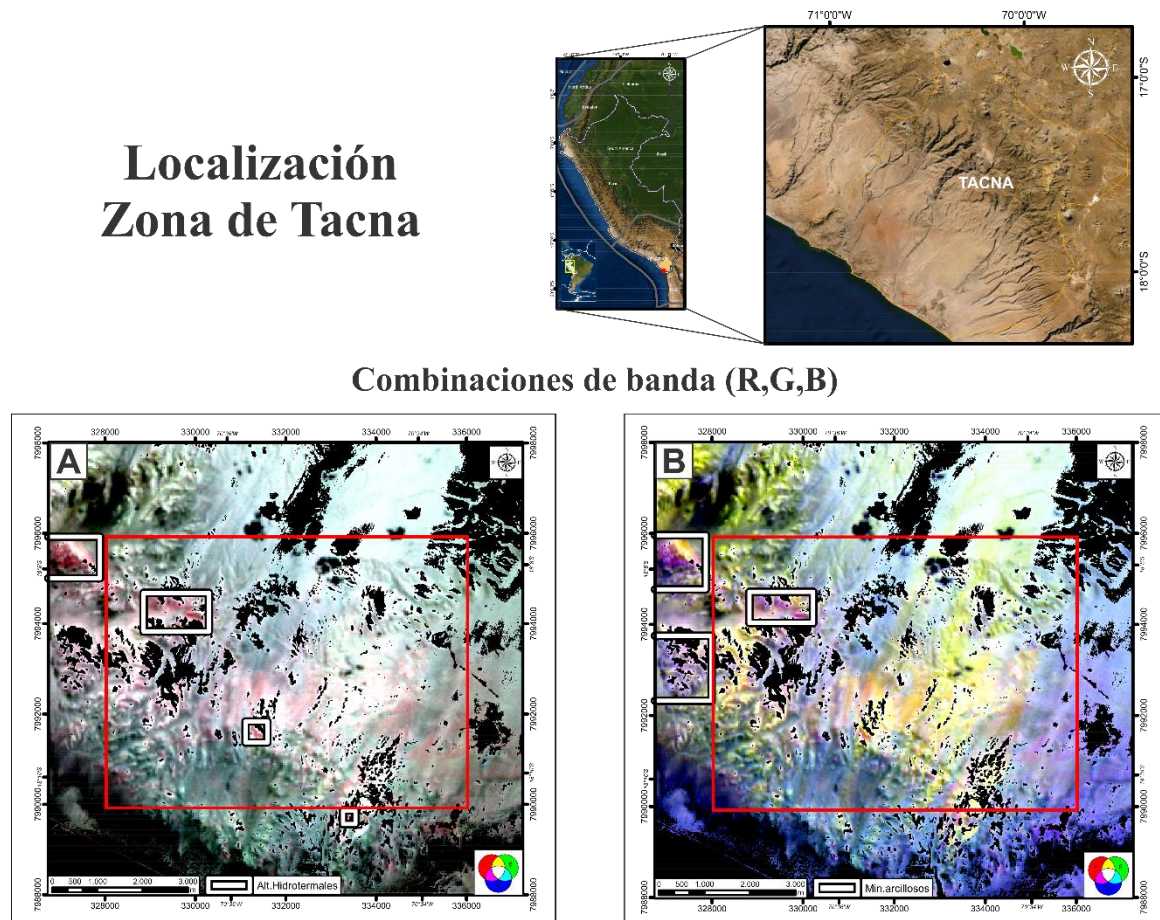
*Nota: Recopilación bibliográfica y análisis propio.*

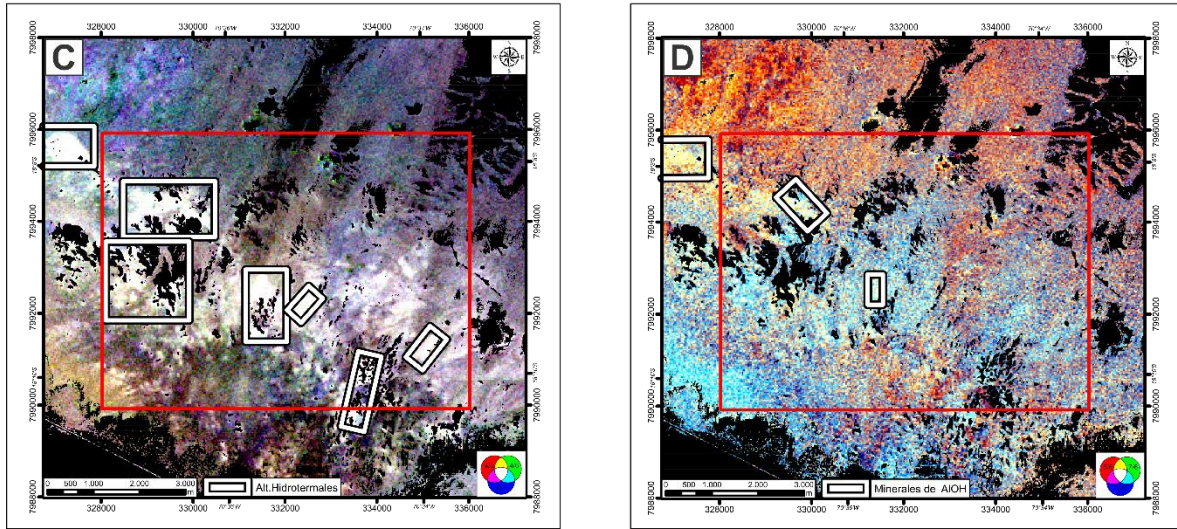
Los resultados obtenidos indican que las principales zonas con presencia de minerales arcillosos y alteraciones hidrotermales se encuentra al NO de los Cerros Los Pabellones (Figura 37). La combinación RGB 4,6,8 resalta la alteración argílica en tonalidades rojizas (Figura 37A); el RGB 4,6,1 resalta a los minerales arcillosos en morado (Figura 37B), el RGB 4/5, 4/6, 4/7 resalta a los minerales arcillosos en blanco identificando a la alteración argílica (Figura 37C), el RGB 5/6,7/6, 7/5 resalta a los minerales que presentan el enlace iónico AlOH, como los presentes en la

alteración filica en tonalidades amarillentas pálidas (Figura 37D). Las combinaciones 3,2,1 y 5,3,1 no permiten mapear zonas de interés, debido a la presencia atmosférica en la zona que se resalta en la banda 1, generando tonalidades no muy claras (ver el Apéndice A, mapas 6 y 7).

### Figura 37.

*Combinaciones de bandas RGB. A) 4/6/8, B) 4/6/1, C) 4/5,4/6,4/7 y D) 5/6,7/6,7/5, muestra las zonas con minerales arcillosos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro.*





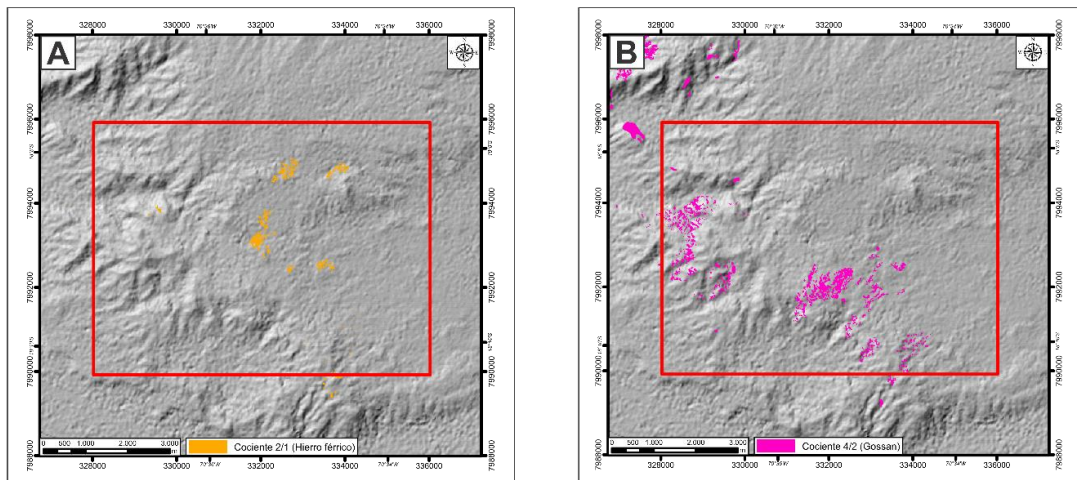
**6.1.1.3 Cocientes de Bandas**

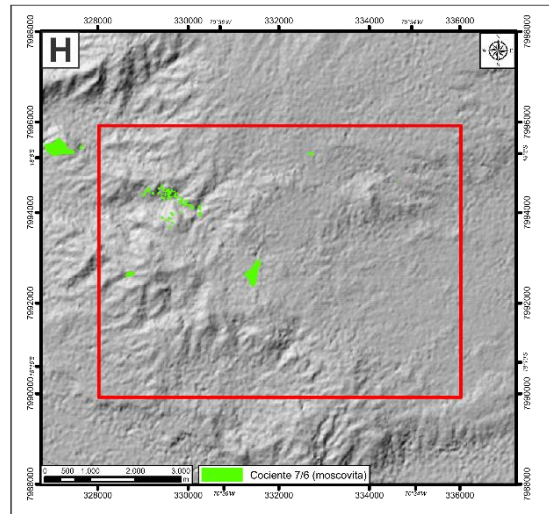
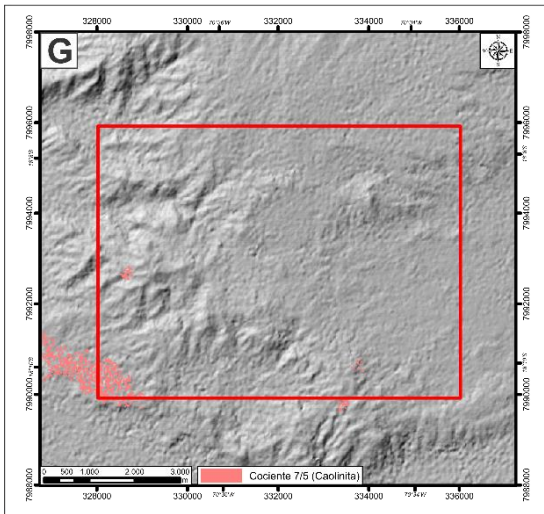
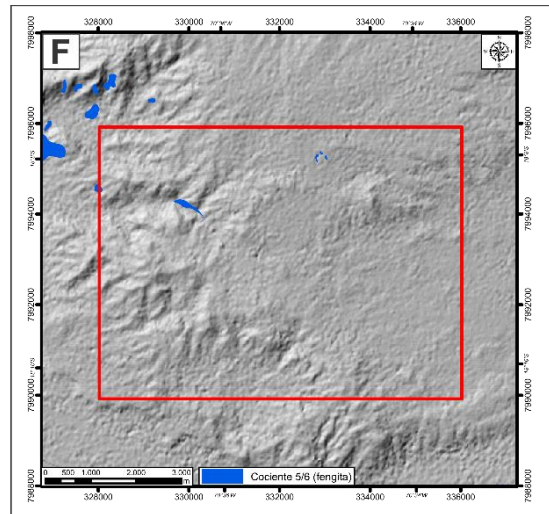
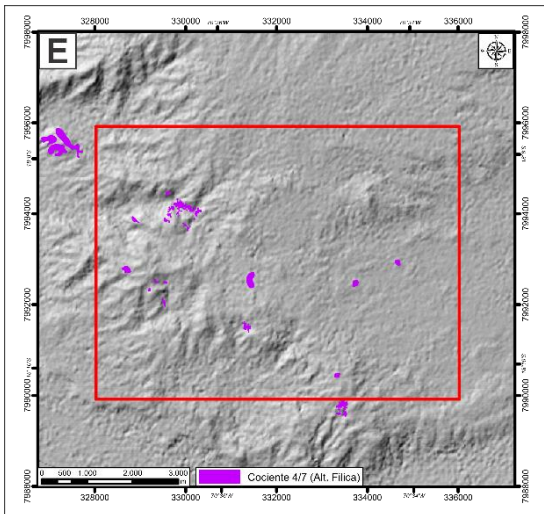
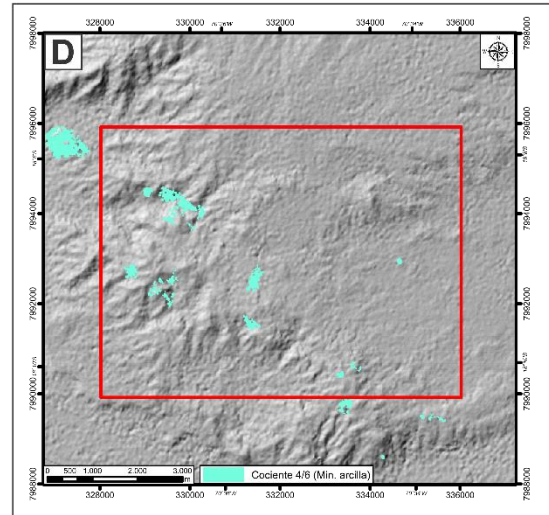
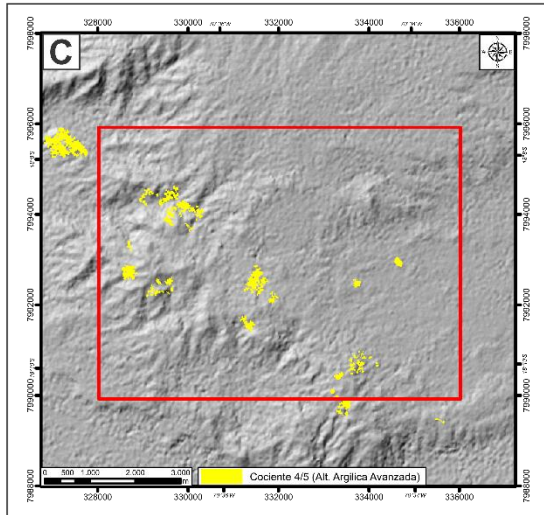
Esta técnica también permite reconocer óxidos, minerales arcillosos y alteraciones hidrotermales asociados a estos. Esta técnica trabaja con las características de absorción y reflectancia de cada mineral respecto a las longitudes de onda relacionadas a las bandas de ASTER, teniendo como relevancia los picos de absorción.

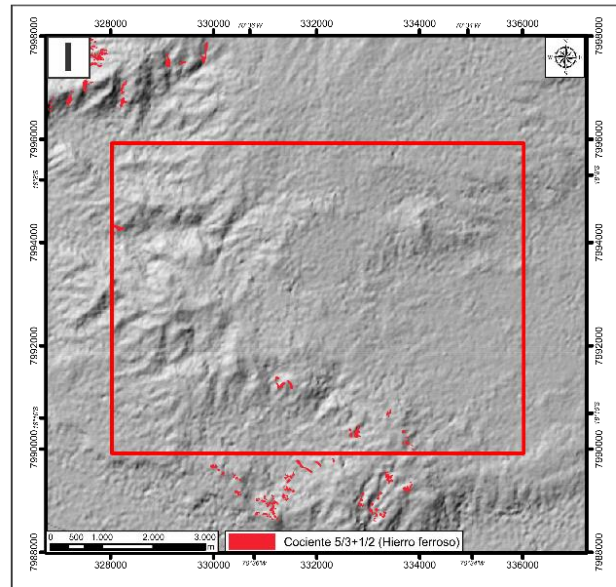
**Figura 38.**

*Cocientes de bandas. A) 2/1 - hierro férrico, B) 4/2 - Gossan, C) 4/5 - Alteración argílica avanzada, D) 4/6 - minerales arcillosos, E) 4/7 - alteración filica, F) 5/6 - fengita, G) 7/5 - Caolinita, H) 7/6 – moscovita, I) 7/5 – Caolinita y J) 5/3+1/2 – hierro ferroso.*

**Cocientes de bandas**







*Nota:* Las imágenes resultantes de los cocientes se pueden visualizar en el Apéndice A, mapas 8,10,12,14,16,18,20,22 y 24.

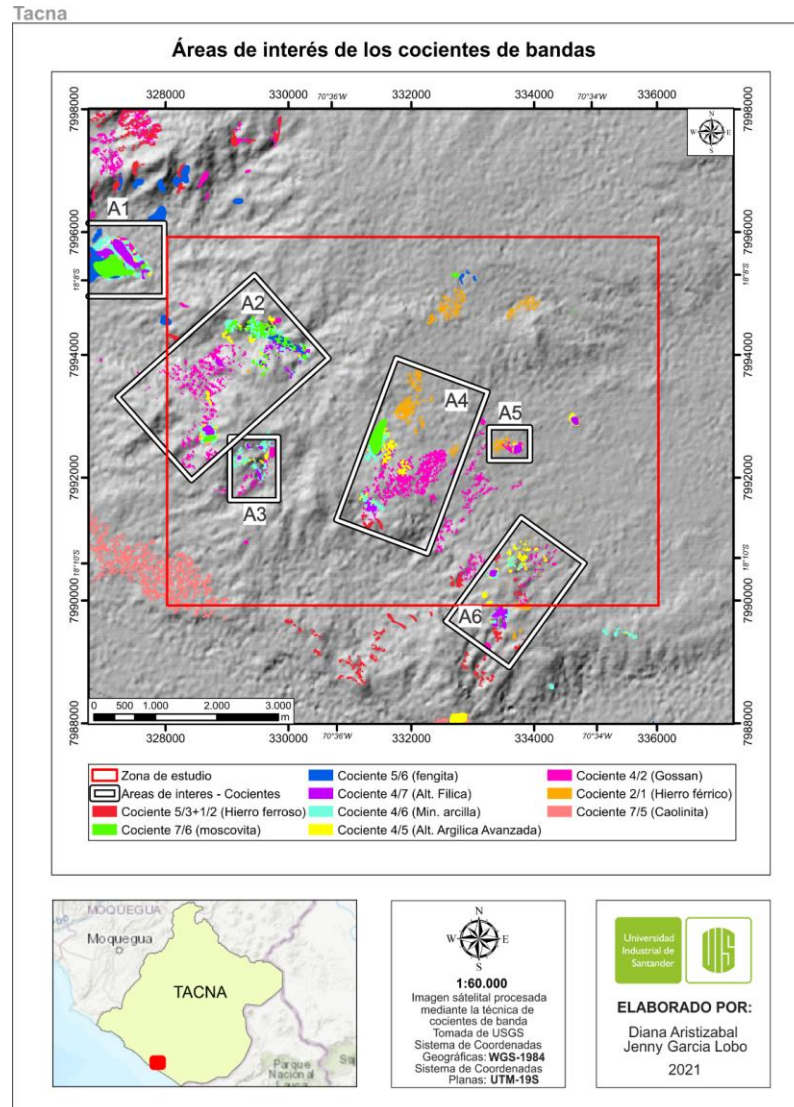
En la Figura 38A se observa que hacia el centro de la zona se encuentran las zonas que presentan hierro férrico. En una tendencia NO a SE resalta la alteración supergena gossan, localizándose principalmente en la parte occidental de los Cerros Los Pabellones y la Yarada (Figura 38B). La alteración argílica avanzada, los minerales de arcilla y la alteración filica también presentan esta tendencia, pero en menor proporción, concentrándose hacia NO (Figura 38C, D y E, respectivamente). Las zonas con presencia del mineral fengita están hacia la parte más NO (Figura 38F). Mientras, la caolinita hace presencia hacia la zona SO (Figura 38G). La moscovita también se localiza desde el centro hasta el NO (Figura 38H). Las zonas que presentan hierro ferroso son hacia el S y el NO (Figura 38J).

De acuerdo a lo anterior, fueron definidas seis áreas de interés en una tendencia NO-SE. El área 1 se caracteriza por presentar todas los cocientes y en mayor proporción fengita, minerales arcillosos, moscovita y alteración filica. El área dos hacia NE presenta mayor contenido

de moscovita, mientras hacía SO tiene mayor proporción de gossan. El área 3 tiene mayor presencia de minerales arcillosos y la alteración supergena de óxidos (gossan). El área 4 hacia el NO presenta hierro férrico, mientras hacía SE gossan y menor proporción de los demás cocientes hacia SO. El área 5 es la de menor extensión y se resaltan el hierro férrico, el gossan y la alteración filica. El área 6 se caracteriza por presentar mayor dispersión de los cocientes sin denotar alguna principalmente (Figura 39).

### Figura 39.

*Áreas de interés a partir de los cocientes para Tacna. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro.*



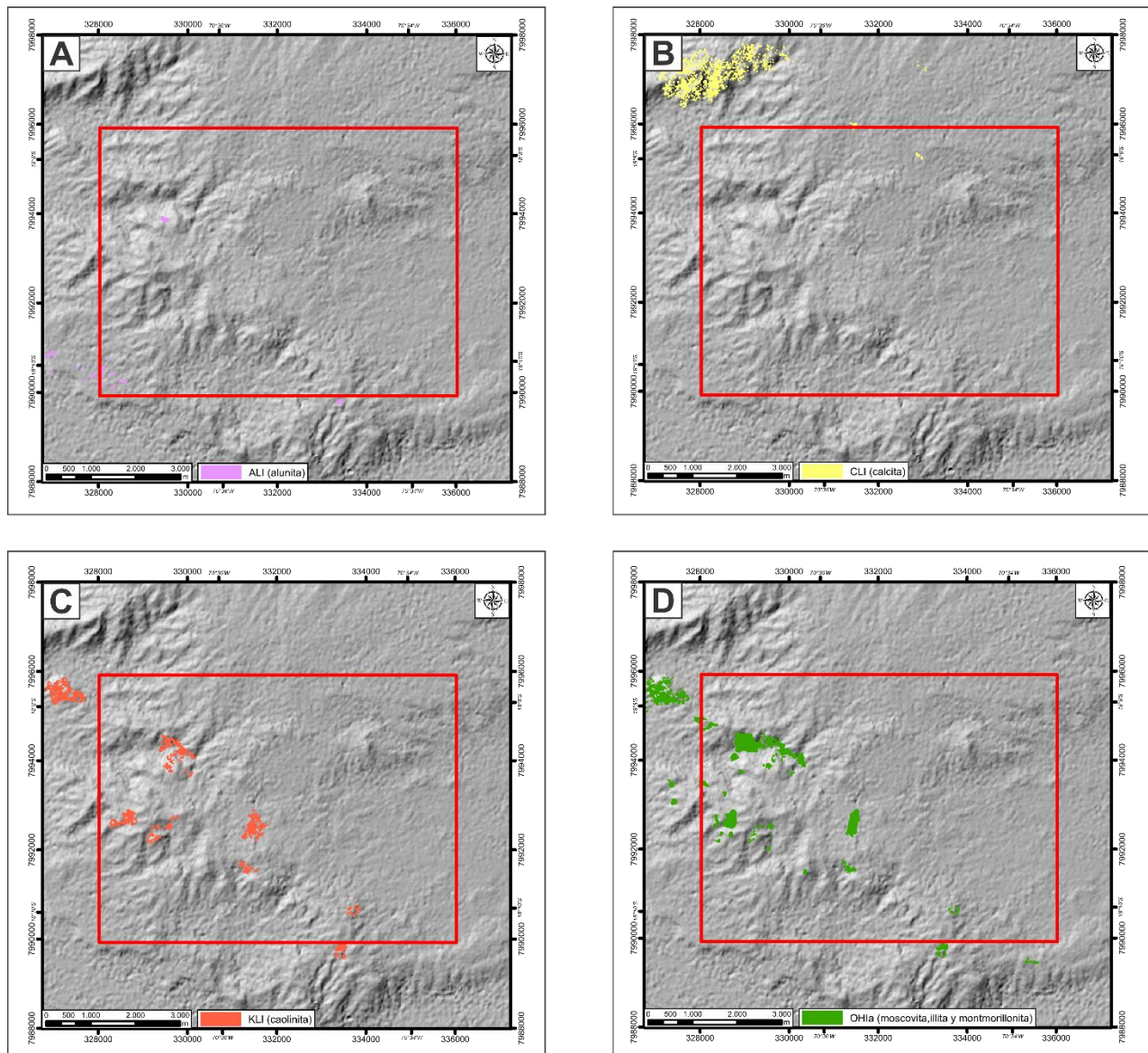
### 6.1.1.4 Índices de Ninomiya

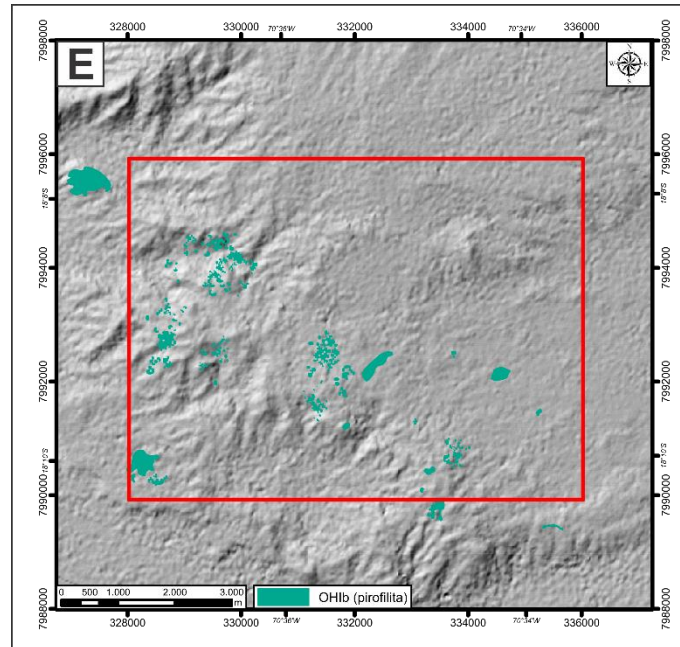
Los índices de Ninomiya se caracterizan por denotar los minerales arcillosos de origen hidrotermal que se identifican en la región del SWIR por la presencia del enlace iónico OH, la presencia de H<sub>2</sub>O y de AlOH, FeOH, CO<sub>3</sub> y MgOH.

**Figura 40.**

*Índices de Ninomiya. A) ALI (alunita), B) CLI (calcita), C) KLI (caolinita), D) OH1a (moscovita, illita y montmorillonita) y E) OH1b (pirofilita).*

### Índices de Ninomiya





*Nota:* Las imágenes resultantes de los índices de Ninomiya se pueden visualizar en el Apéndice A, mapas 27,29,31, 33 y 35.

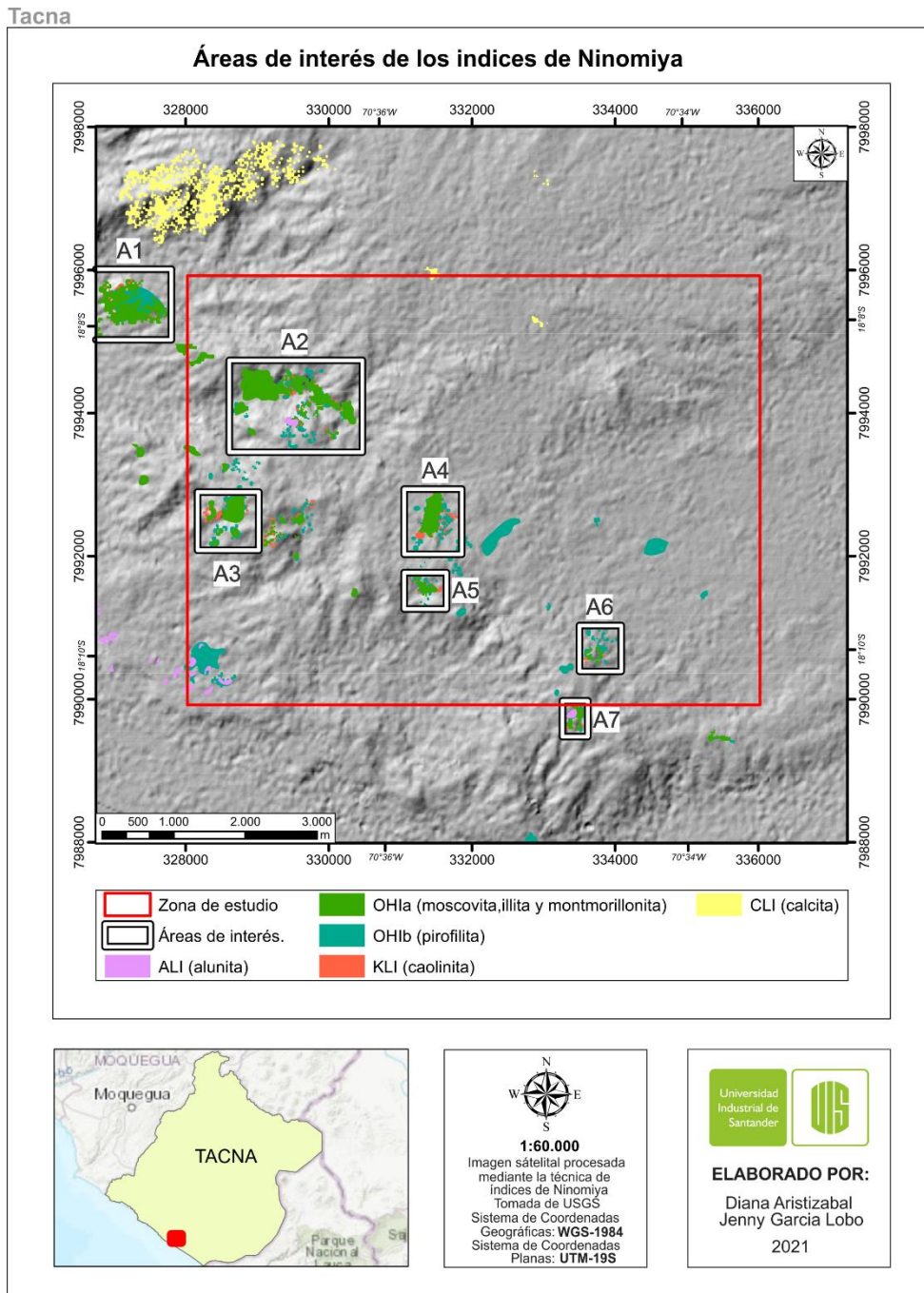
En la Figura 40, se observan áreas con minerales de alteración como moscovita, illita, montmorillonita (índice OHIa), pirofilita (índice OHIb) y caolinita (KLI) que presentan una tendencia NO – SE, con mayor proporción hacia el NO (Figura 40C, D y E). Mientras, el índice de alunita no presenta buena respuesta en la zona de estudio (Figura 40A), el índice de calcita se resalta hacia la parte más NO de la zona de estudio (Figura 40B).

Al correlacionar la respuesta de los índices, se destacan siete áreas de interés. El área 1 se localiza hacia el NO de la zona de estudio, en donde se observa mayor proporción del índice OHIa (moscovita, illita y montmorillonita), en menor proporción caolinita y pirofilita. El área 2 y 3 también presenta estas características, destacando que el área 2 se observa un poco de alunita, ubicándose en la alteración hidrotermal mapeada por Jaén & Ortiz (1963) en la zona de estudio. El área 4 y 5 se localizan más hacia al centro de la zona de estudio, estas también presentan en mayor proporción de moscovita, illita y montmorillonita (índice OHIa). El área 6 y 7 se ubican al SE de la zona de estudio, la primera presenta mayor contenido de pirofilita y en menor proporción

caolinita y moscovita, illita y montmorillonita; la segunda presenta alunita y mayor proporción el índice OH1a (Figura 41).

### Figura 41.

Áreas de interés de índices de Ninomiya OH1a, OH1b, KLI, CLI y ALI en la zona de estudio, áreas de interés en recuadro blanco con borde negro.



### 6.1.1.5 Cartografía Espectral por la técnica de clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper)

La técnica SAM permite realizar una comparación entre la firma espectral teórica (previamente conocida, por ejemplo, USGS) con la firma espectral práctica (directa de la imagen ASTER). Debido a que el algoritmo considera las firmas espectrales como vectores, es decir, tienen un módulo y dirección, se realizó la comparación en términos de la diferencia angular (ángulo espectral) entre los vectores de la imagen y los de referencia (Caiza, 2018). Según Pérez *et al.* 2010, el resultado es una imagen de clasificación medida en radianes y que el ángulo de los minerales clasificados no supere los 0.1 radianes, si se aumenta o disminuye este ángulo el resultado tendrá un margen de error más alto.

Para la clasificación supervisada de esta zona se utilizaron 14 firmas espectrales de la biblioteca espectral del USGS, específicamente las de *Minerals Beckman 3375* que viene incluida en el software ENVI 5.3. Los minerales seleccionados se subdividen en las cuatro zonas de estudio dependiente del tipo de depósito que registra la bibliografía. Las firmas de la USGS se compararon con la respuesta de la firma espectral obtenida directamente de la imagen ASTER (Tabla 25).

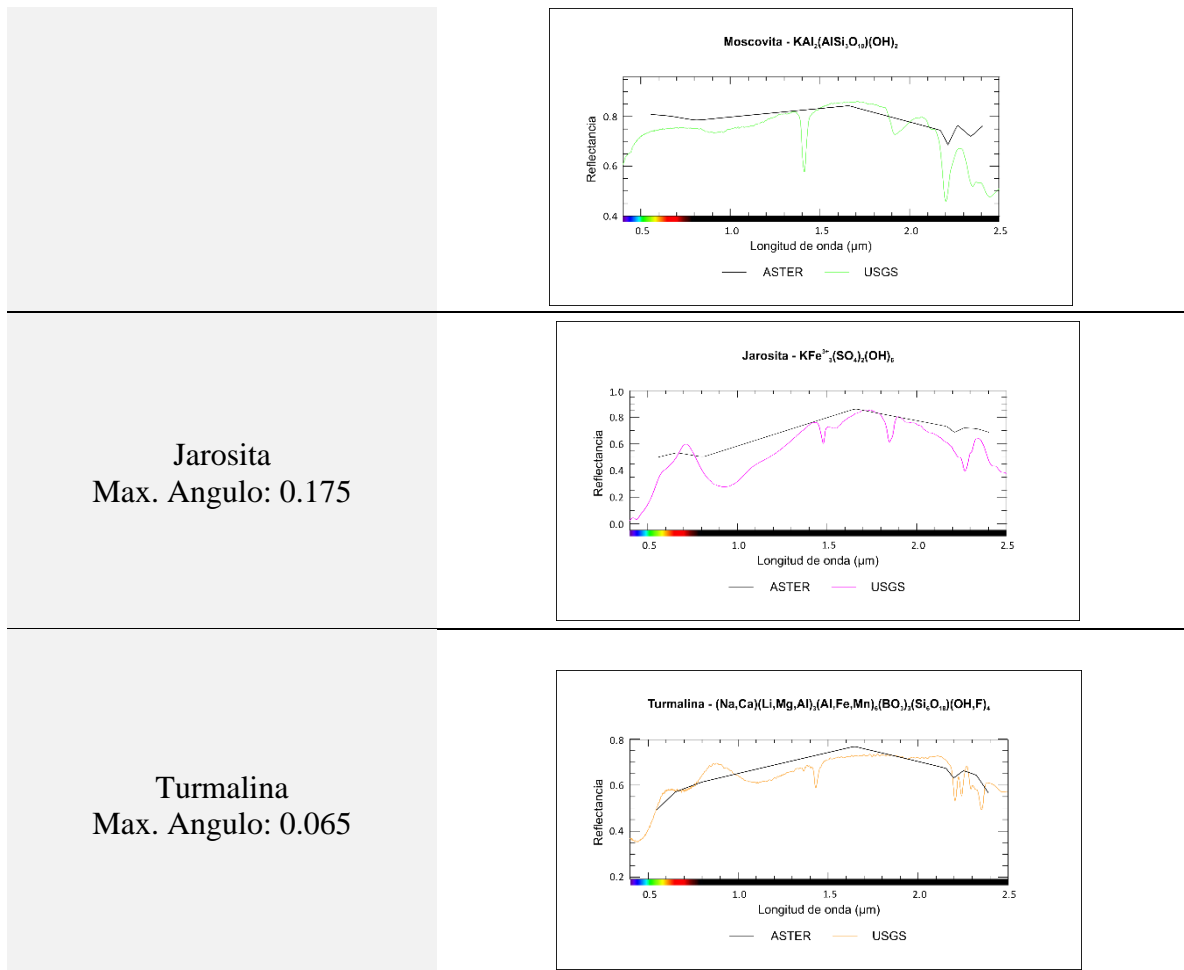
La firma espectral de la Goethita tiene su pico de absorción en  $0.51 \mu\text{m}$  en la banda 1 y entre  $2.225 \mu\text{m}$  y  $2.3 \mu\text{m}$  en la banda 7, la magnetita se caracteriza por su rango de absorción al igual que la goethita en la banda 7, la epidota tiene picos de absorción en  $1.55 \mu\text{m}$ ,  $1.83 \mu\text{m}$ ,  $1.95 \mu\text{m}$  y en las bandas 8 y 9 entre  $2.3$ - $2.4 \mu\text{m}$  al igual que la calcita que presenta rangos de absorción en  $1.88 \mu\text{m}$ ,  $2.15 \mu\text{m}$  y  $2.32 \mu\text{m}$ , la moscovita se caracteriza por sus picos de absorción en el rango de  $1.41 \mu\text{m}$  que corresponde al enlace iónico (OH),  $2.18$ - $2.2 \mu\text{m}$  en donde se resalta (AlOH) en la banda 6 y doble rasgo de absorción en  $2.34 \mu\text{m}$  y  $2.43 \mu\text{m}$ , la jarosita tiene sus picos de absorción en  $1.47 \mu\text{m}$  y  $1.52 \mu\text{m}$  en donde se resalta ( $\text{H}_2\text{O}$  y OH),  $1.84 \mu\text{m}$  y doble pico en  $2.2$  y  $2.26 \mu\text{m}$ , la

turmalina tiene un pico de absorción en el rango  $0.52\mu\text{m}$  en la banda 1,  $1.43\mu\text{m}$  y  $2.15\mu\text{m}$  en la banda 5.

**Tabla 25.**

*Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER.*

<b>Tacna</b>	
<b>Mineral</b>	
Goethita Max. Angulo: 0.2	<p><b>Goethita - <math>\text{Fe}^+\text{O}(\text{OH})</math></b></p>
Magnetita Max. Angulo: 0.1	<p><b>Magnetita - <math>\text{Fe}^+\text{Fe}^{2+}_2\text{O}_4</math></b></p>
Epidota Max. Angulo: 0.2	<p><b>Epidota - <math>\text{Ca}_m\text{Fe}^{2+}_n\text{Al}_k(\text{Si}_l\text{O}_3)_m(\text{SiO}_3)_n(\text{OH})</math></b></p>
Calcita Max. Angulo: 0.075	<p><b>Calcita - <math>\text{CaCO}_3</math></b></p>
Moscovita Max. Angulo: 0.12	

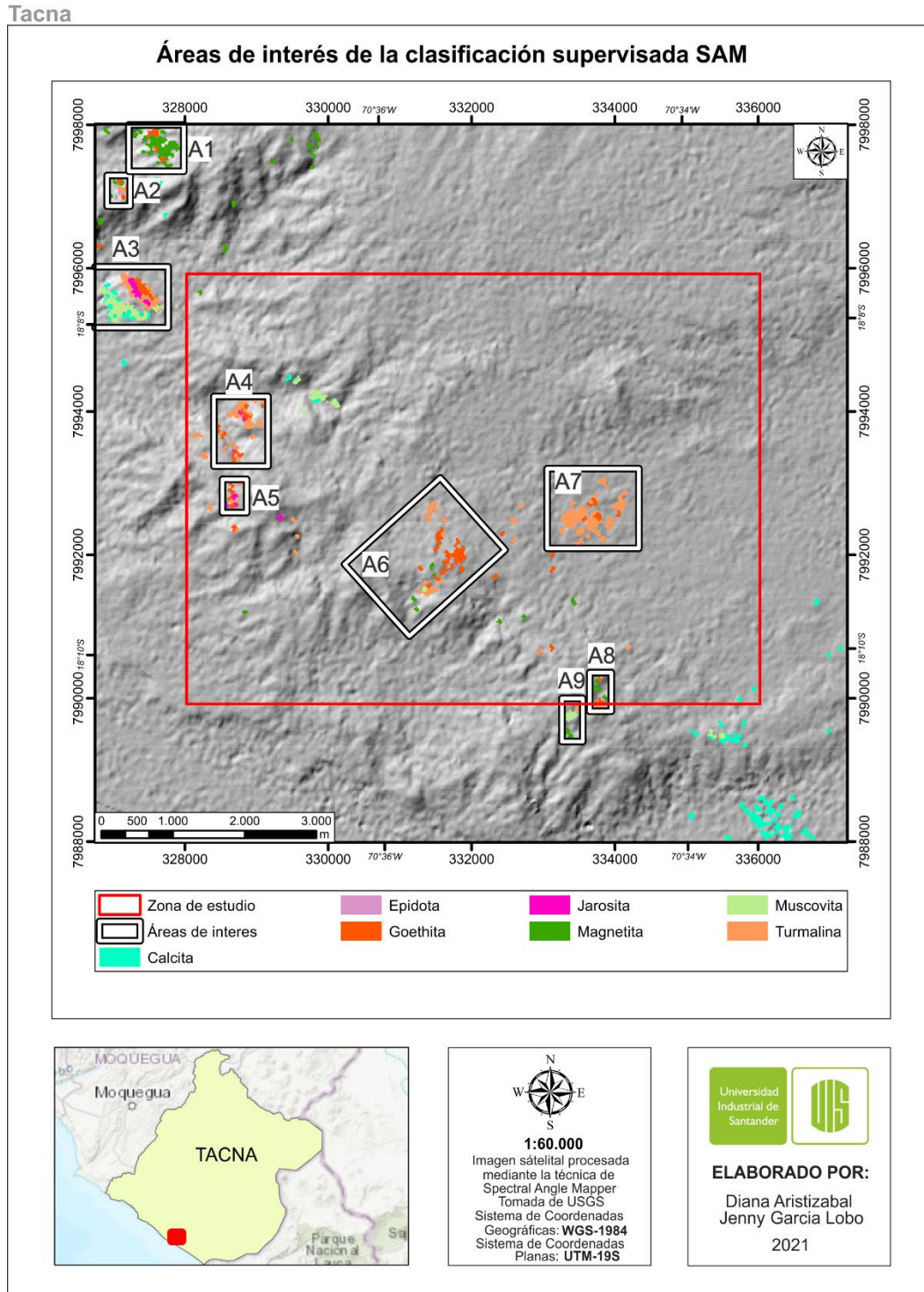


*Nota:* Firma ASTER en negro, firma de la biblioteca espectral en color. Las firmas se pueden visualizar en el Apéndice B.

En la Tabla 25 se observan las firmas espectrales de los minerales para la zona de Tacna, en el caso de la magnetita el rango de absorción del 2.25-2.3 $\mu$ m no está claramente marcado en la firma extraída de la USGS, sin embargo, se marca levemente en la firma espectral de practica extraída de la imagen ASTER. Por otra parte, la firma de la calcita resalta un comportamiento inverso en donde el pico de absorción está claramente definido en la firma tomada de la USGS y no en la firma practica asociada a la imagen ASTER. Las demás firmas contenidas en la Tabla 25 concuerdan con los rangos de absorción teóricos coincidiendo con las bandas de la imagen ASTER.

**Figura 42.**

*Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Tacna. Las áreas de interés resaltadas en el recuadro blanco con borde negro.*



Se reconocieron 9 áreas de interés mediante la cartografía espectral SAM. Las mayores concentraciones de moscovita, calcita, goethita, jarosita y turmalina en conjunto se localizan al NO del área por fuera de la zona de estudio, y de forma individual o agrupada en conjuntos minerales de dos o tres al NO dentro del área de estudio y en la zona central como se observa en la Figura 42.

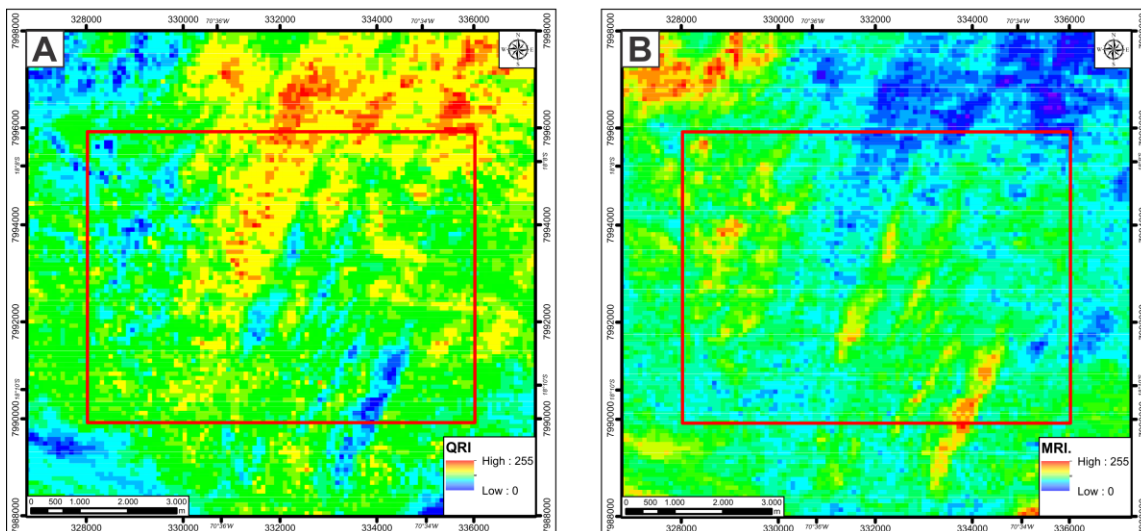
### 6.1.1.6 Índices TIR

El índice QRI muestra claramente altos contenidos de sílice en la parte N del área de estudio con coloraciones rojo y amarillo que representan los valores más altos del índice, como se ve en la figura 43A. Por otro lado, el índice MRI muestra valores altos con coloraciones rojo y amarillo que indican rocas de composición máfica en el NO, SE y en la parte central de la zona de estudio (Figura 43B).

#### Figura 43.

*Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Tacna A) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice B) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de mafico.*

### Índices del TIR (QRI y MRI)

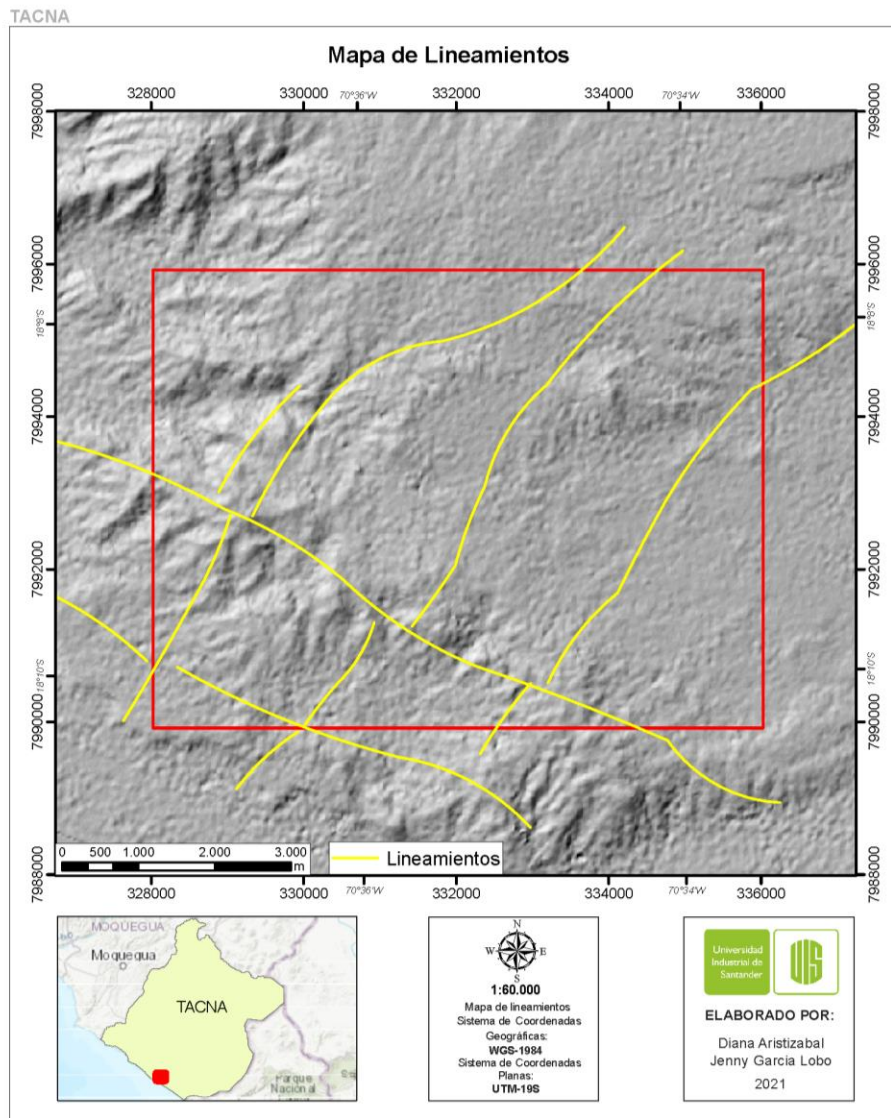


### 6.1.1.7 Lineamientos

La zona se caracteriza por presentar dos tendencias preferenciales de lineamientos, la primera tendencia es SO – NE con 4 lineamientos en sentido paralelo, los cuales se encuentran desplazadas de forma dextral por la segunda tendencia que es NO – SE (Figura 44).

**Figura 44.**

*Mapa de lineamientos de la zona de Tacna*

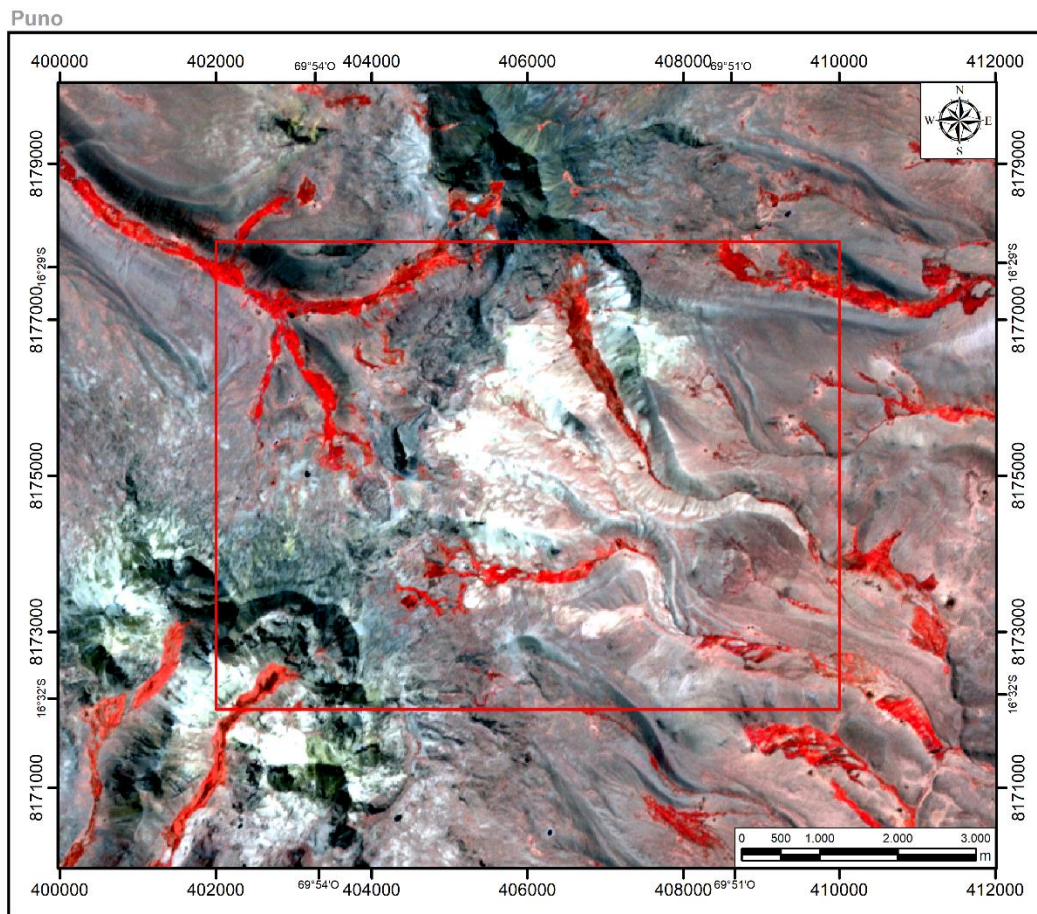


### 6.1.2 Puno

La imagen satelital de la zona de estudio de Puno es del año 2005, y cubre un área de 116,5 Km<sup>2</sup>. En el área procesada se tienen zonas vegetadas en tonalidades rojizas que se distribuyen de manera uniforme en las partes bajas del NO, E y SO, la roca expuesta se distingue en tonalidades cafés y material arcilloso en color blanco. Estas características se determinaron por medio de la imagen en Infrarrojo color (Figura 45).

#### Figura 45.

*Imagen satelital ASTER LIT en infrarrojo color de la zona de Puno.*

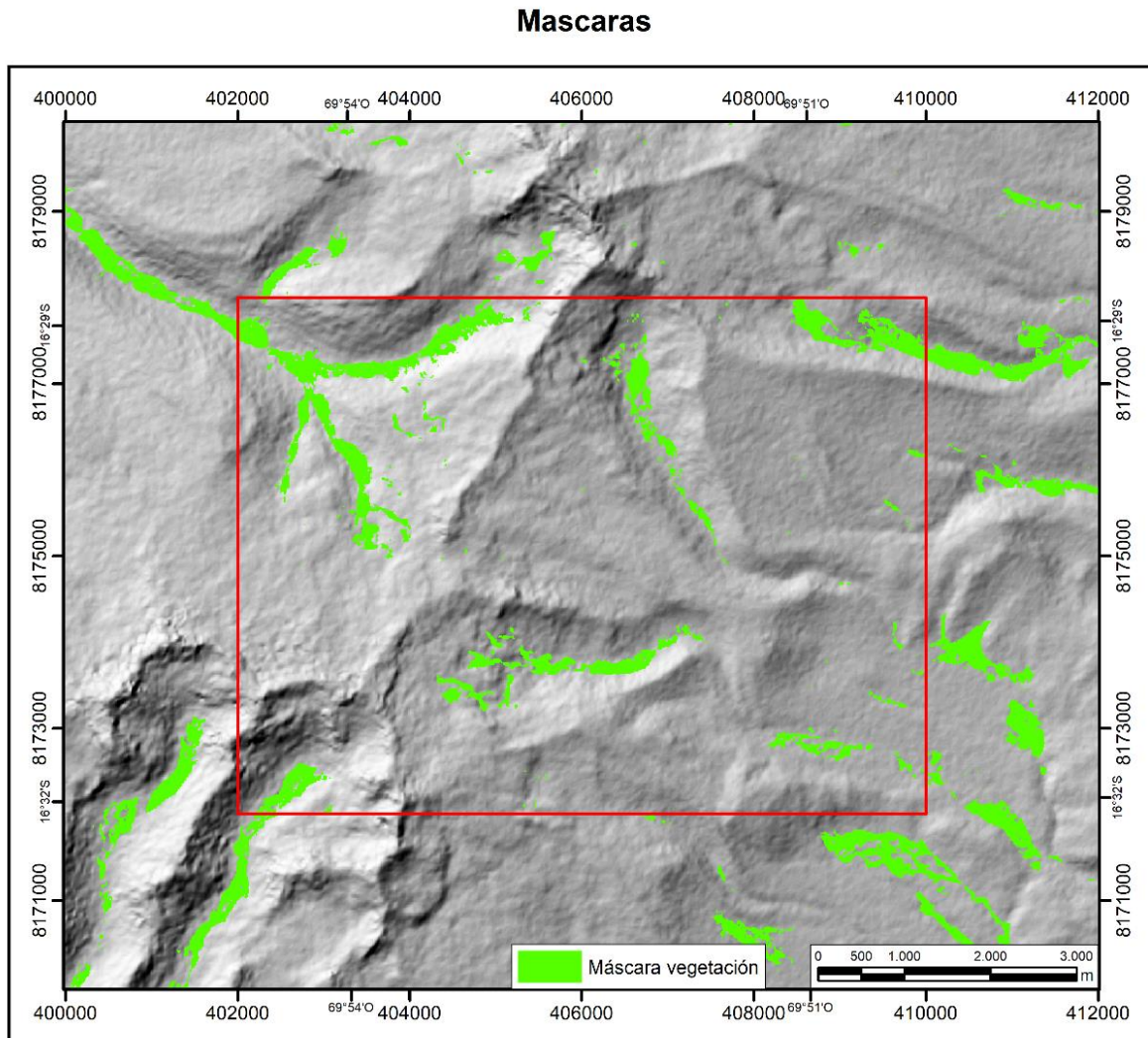


### 6.1.2.1 Aplicación de Máscaras

Se generaron máscaras de vegetación para reducir el ruido y evitar una interpretación errónea en la respuesta a la aplicación de las técnicas espectrales, debido a que estas pueden alterar el resultado. La vegetación presenta un área de 6,11 Km<sup>2</sup> y corresponde al (5,24%) de la imagen (Figura 46).

#### **Figura 46.**

*Aplicación de máscaras sobre la zona de Puno. Máscara de vegetación color verde.*



### 6.1.2.2 Combinación de Bandas

Con la intención de reconocer las áreas que presentan minerales arcillosos, óxidos y alteraciones hidrotermales se utilizaron las combinaciones de bandas definidas en la Tabla 21.

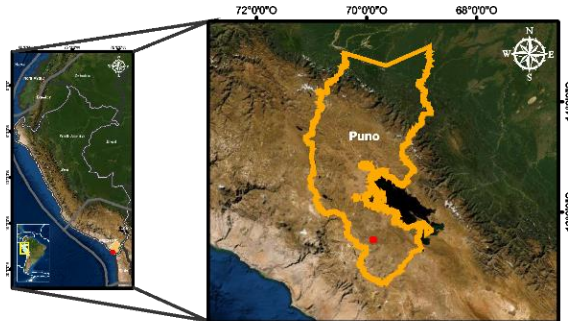
En la Tabla 24 se describe que resalta cada banda de la combinación y de que coloración se espera la respuesta.

Los resultados obtenidos indican que las principales zonas con presencia de minerales arcillosos y alteraciones hidrotermales se encuentra al SO del área y el centro (Figura 47), presentando concordación con las áreas que presentan óxidos. La combinación RGB 4,6,8 resalta la alteración argílica en tonalidades rojizas a blancuzcas (Figura 47A); el RGB 5/6,7/6, 7/5 denota alteraciones hidrotermales en tonalidades cian y naranjozas (Figura 47B); el RGB 4,6,1 a los minerales arcillosos en tonalidades moradas y verduzcas (Figura 47C), el RGB 5,3,1 resalta en colores rojizos minerales arcillosos y en color cian óxidos (Figura 47D); el RGB 3,2,1 resalta los óxidos de Fe en color blanco (Figura 47F) y el RGB 4/5, 4/6, 4/7 resalta minerales de AlOH en color amarillezco pálido (Figura 47G).

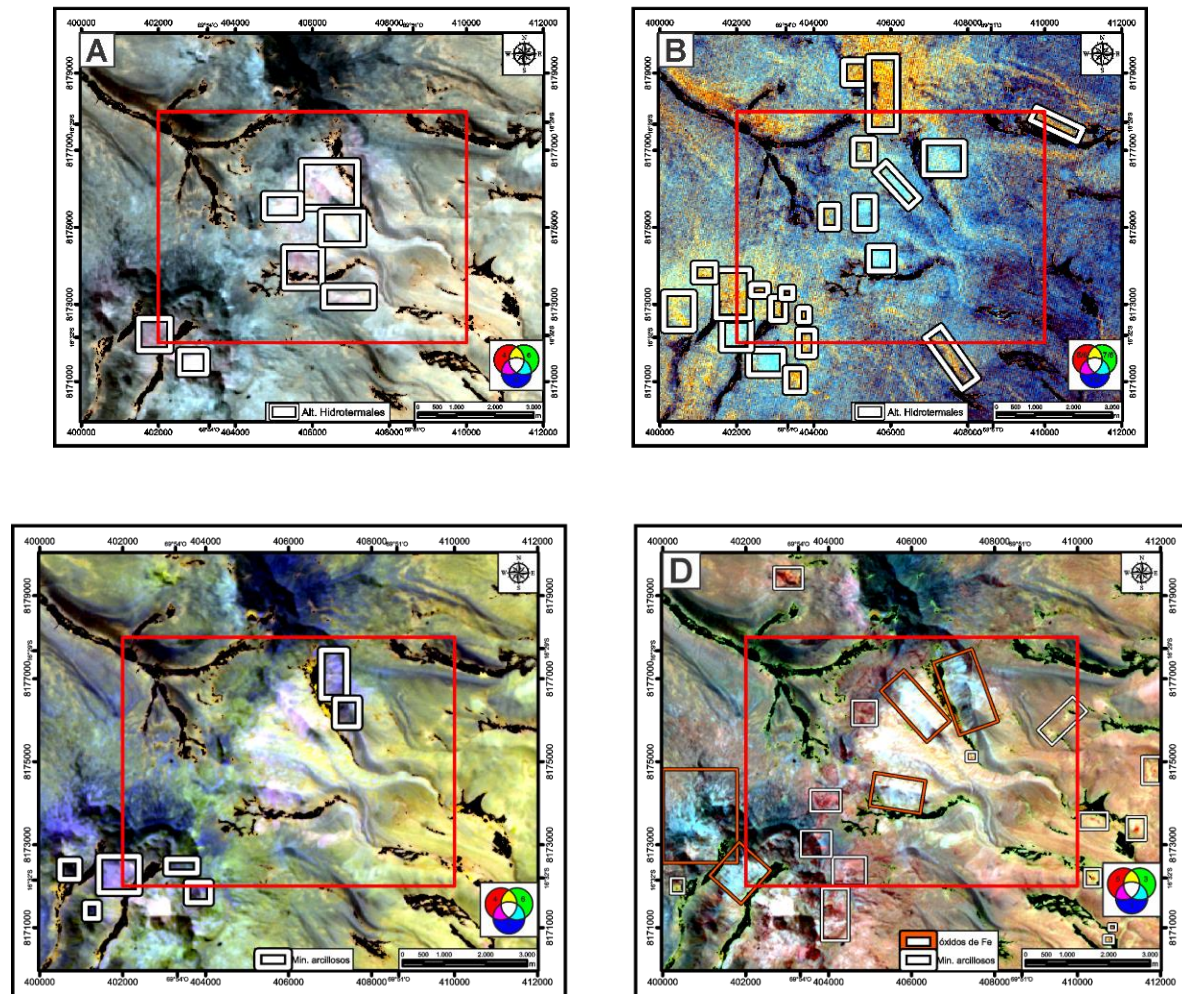
**Figura 47.**

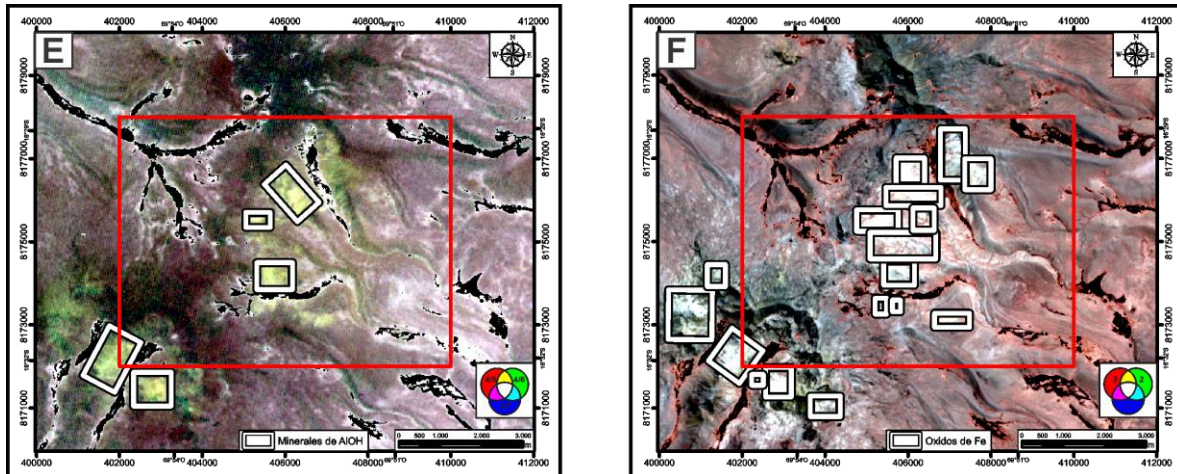
*Combinaciones de bandas RGB. A) 4,6,8; B) 5/6,7/6,7/5; C) 4,6,1; D) 5,3,1; E) 4/5,4/6,4/7 y F) 3,2,1; muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro.*

## Localización Zona de Puno



Combinaciones de banda (R,G,B)





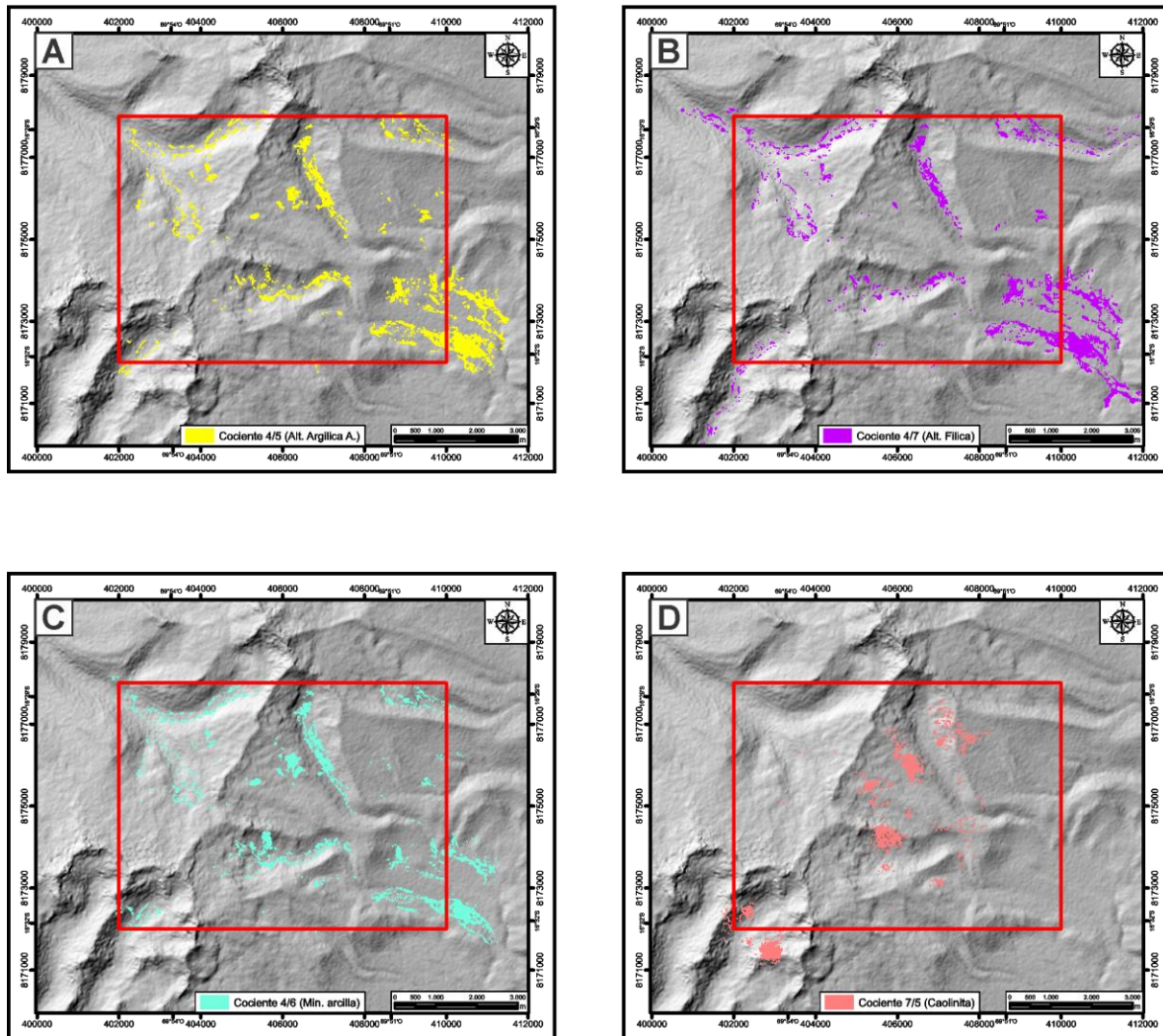
### 6.1.1.3 Cocientes de Bandas

Los resultados de los cocientes de banda en el área de Puno a diferencia de los de la zona de Tacna no presentan una tendencia preferencial, estos se encuentran principalmente hacia los valles y los filos de las montañas.

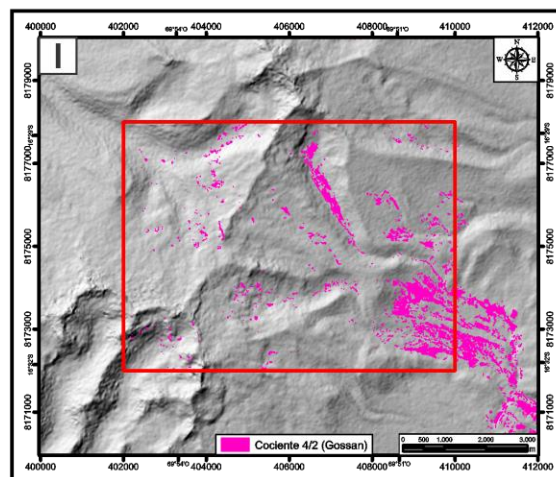
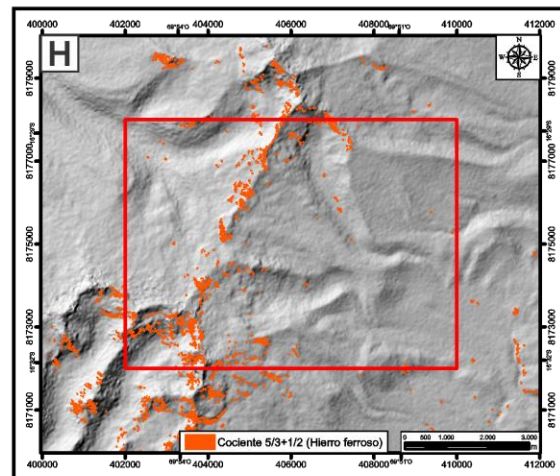
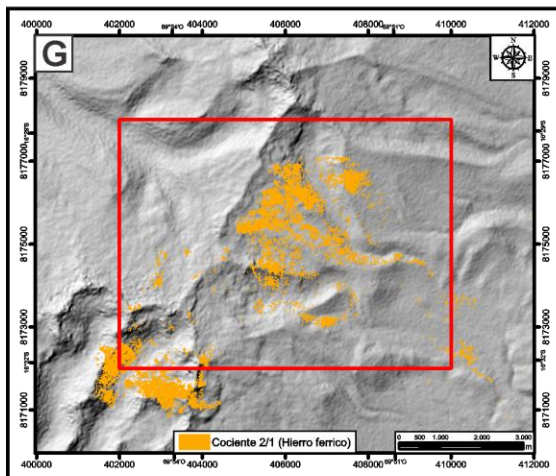
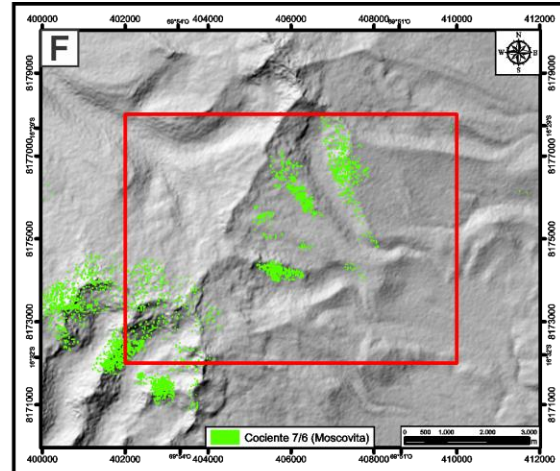
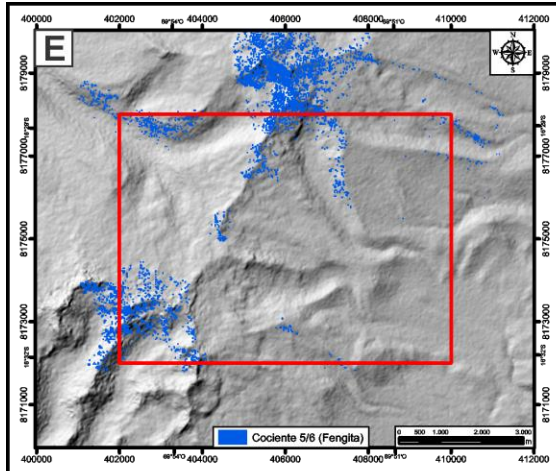
#### Figura 48.

*Cocientes de bandas. A) 4/5 - Alteración argílica avanzada; B) 4/7 - alteración filica; C) 4/6 - minerales arcillosos; D) 7/5 - Caolinita; E) 5/6 - fengita; F) 7/6 - moscovita; G) 2/1 - hierro férrico; H) 5/3+1/2 -hierro ferrosos y I) 4/2 - Gossan.*

## Cocientes de bandas



Nota: Las imágenes resultantes de los cocientes se pueden visualizar en el Apéndice A, mapas 52,54,56 y 58.



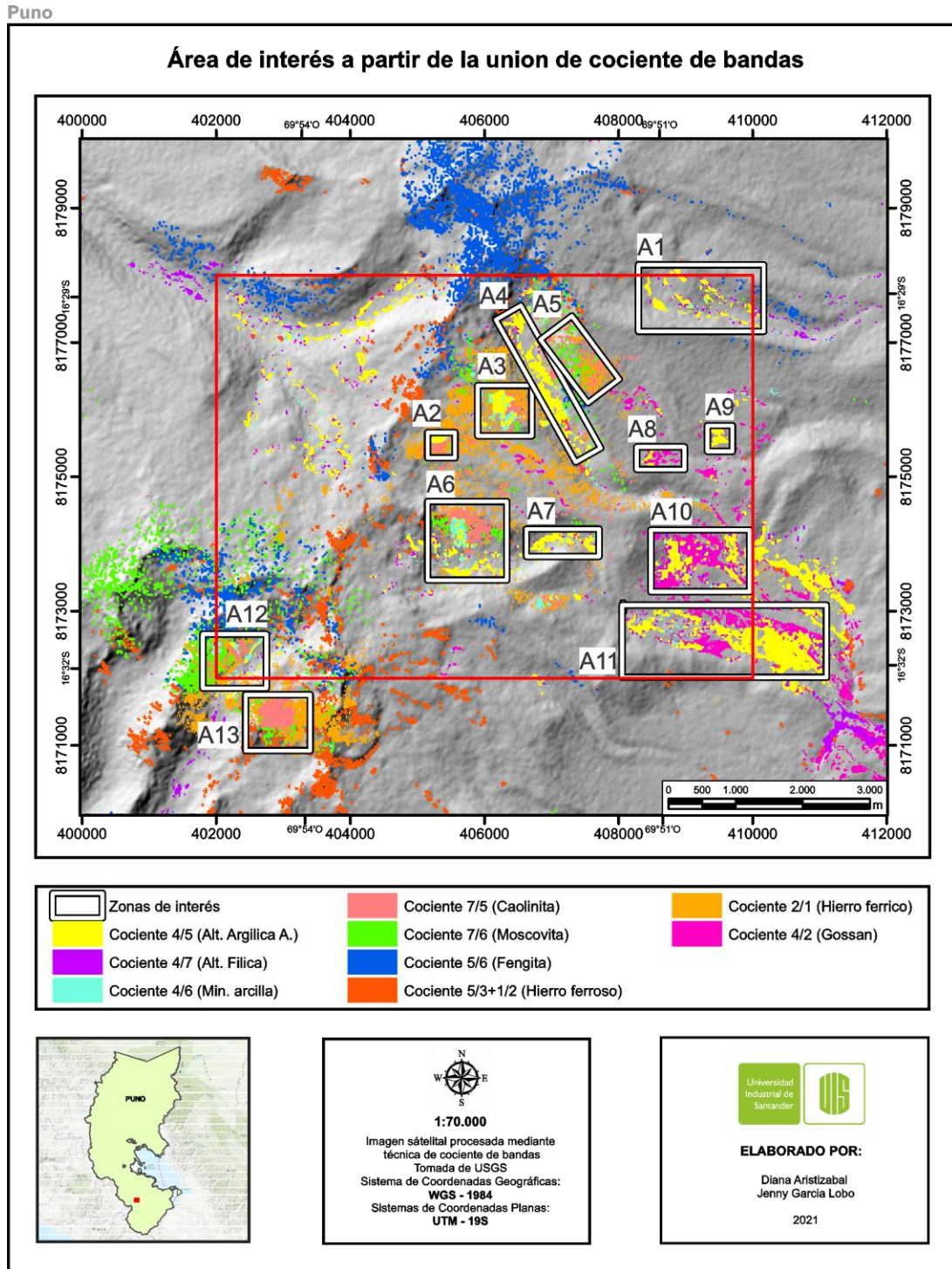
Nota: Las imágenes resultantes de los cocientes se pueden visualizar en el Apéndice A, mapas 60,62,64,66 y 68.

La Figura 48A se observa una tendencia NO – SE de la alteración argílica avanzada, principalmente hacia los valles y con mayor proporción en el SE, presentando concordancia con la alteración filica y los minerales arcillosos (Figura 48B y C). Por otra parte, la caolinita presenta una distribución más variada localizándose en el centro y en el SO de la zona de estudio (Figura 48D). La fengita presenta una tendencia NE – SO localizándose principalmente en los filos (Figura 48E); la moscovita, el hierro férrico y ferroso también presentan esta distribución, pero con mayor concentración hacia la parte SO a diferencia de la fengita (Figura 48F, G y H). Sin embargo, la alteración supergena gossan presentan una mayor distribución en la parte SE de la zona, con una tendencia SE-NO (Figura 48I).

De acuerdo a lo anterior, fueron definidas 13 áreas de interés en una tendencia NE-SO, sin embargo, también se encuentran áreas hacia SE. El área uno a siete (A1-A7) se caracteriza por presentar respuesta en todos los cocientes, en mayor proporción minerales arcillosos, moscovita y alteración filica, la alteración argílica avanzada se encuentra en la zona central, N y NE. Las áreas ocho a once (A8-A11) hacia SEE presenta mayor contenido de alteración argílica avanzada y una mayor proporción de alteración supergena gossan. Las áreas doce y trece (A12-A13) presentan hierro férrico, caolinita, moscovita, hierro ferroso, minerales de arcilla y fengita se encentra hacia el SO de la zona en las partes topográficamente más altas. (Figura 49).

**Figura 49.**

*Áreas de interés a partir de los cocientes. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro.*



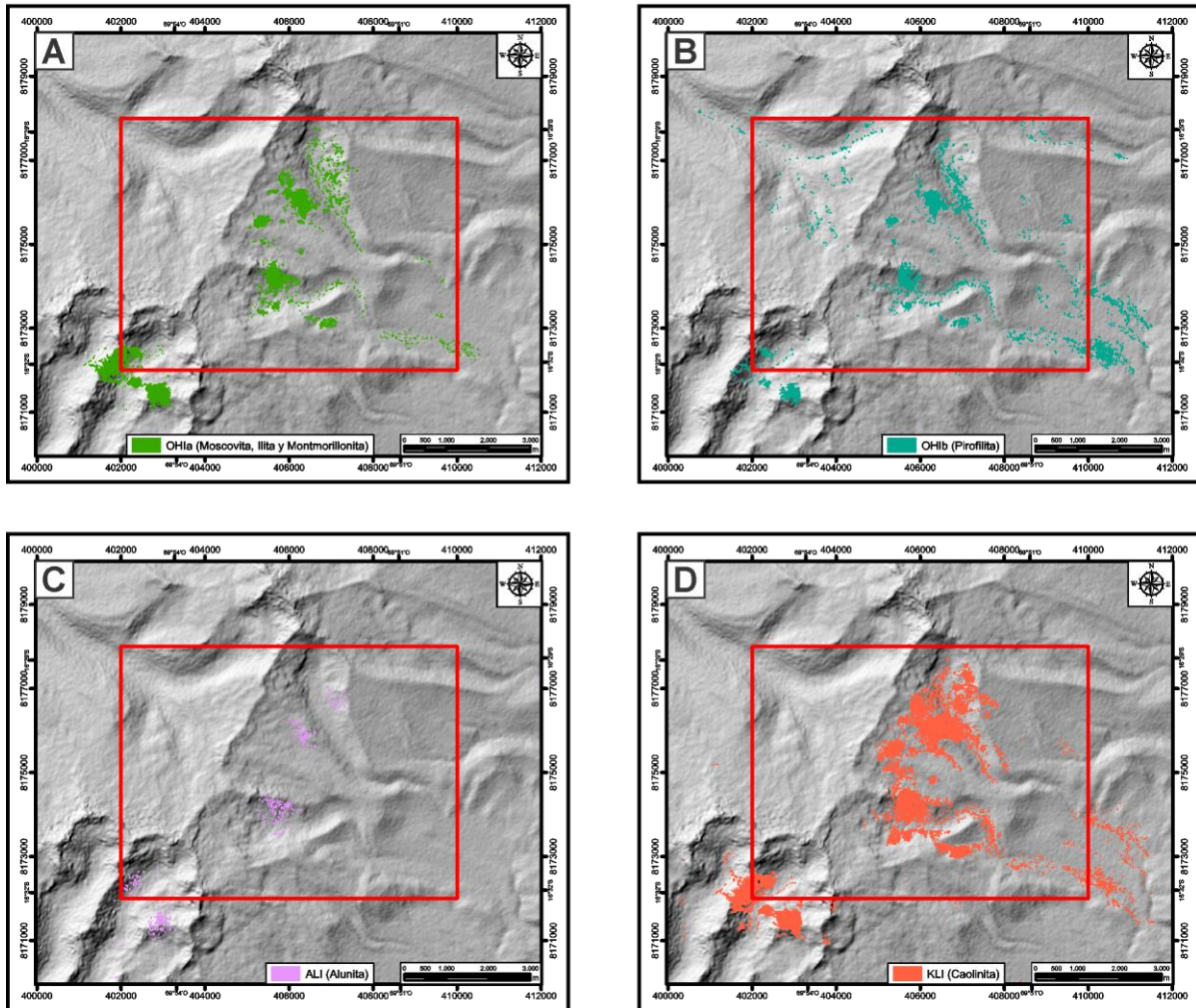
### 6.1.1.4 Índices de Ninomiya

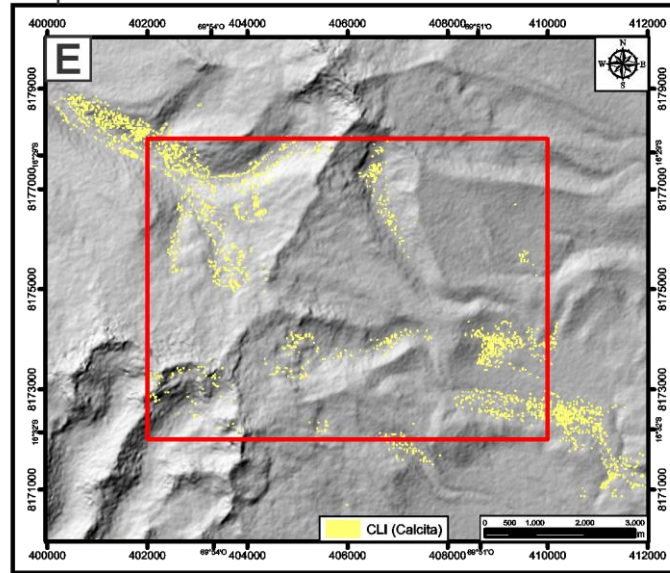
Para el área de Puno los índices de Ninomiya presentan una buena respuesta, resaltando los minerales característicos de alteraciones hidrotermales en la región del SWIR.

Figura 50.

Índices de Ninomiya. A) ALI (alunita), B) CLI (calcita), C) KLI (caolinita), D) OHIa (moscovita, illita y montmorillonita) y E) OHIb (pirofilita).

## Índices de Ninomiya





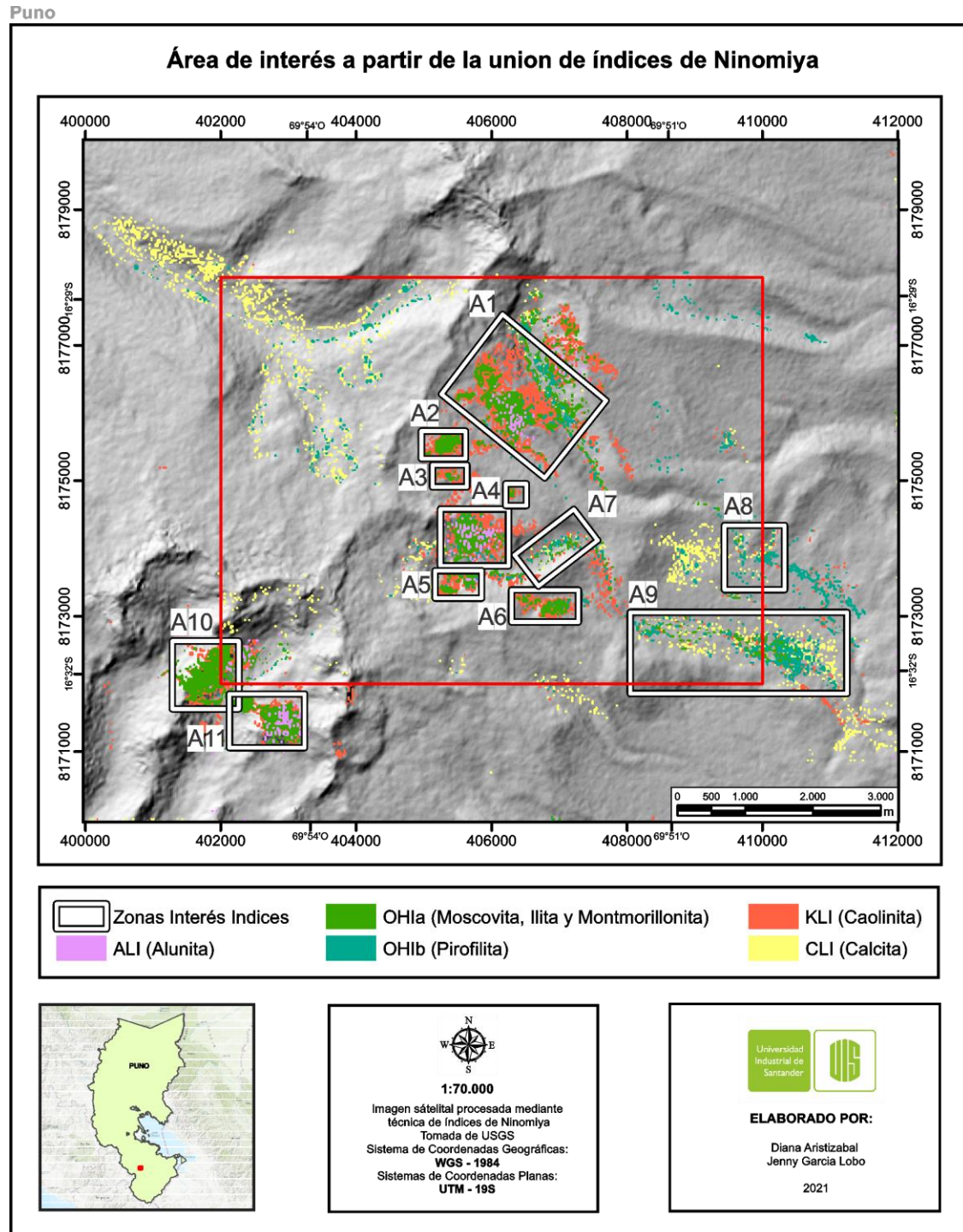
Nota: Las imágenes resultantes de los índices de Ninomiya se pueden visualizar en el Apéndice A, mapas 71,73,75,77 y 79.

En la Figura 50A y D, se observan áreas con minerales de alteración como moscovita, illita, montmorillonita (índice OHIa), y caolinita (KLI) respectivamente, que se localizan principalmente al SE de la zona, con una menor proporción de estos al SO. Mientras, la pirofilita (OH Ib) y la calcita (CLI) presentan una tendencia NO – SE, la primera presenta mayor cantidad al SE y la segunda al NO, las dos presentan unos parches aislados en menor proporción al SO (Figura 50B y E). El índice de alunita no presenta buena respuesta en la zona de estudio y se encuentra distribuido en el centro y parte SO de la zona (Figura 50C).

Al correlacionar la respuesta de los índices, se destacan once áreas de interés. Las áreas uno a siete (A1-A7) se localiza hacia el N y centro de la zona de estudio y las áreas diez y once (A10-A11) hacia el SO, en estas se observa mayor proporción del índice OHIa (moscovita, illita y montmorillonita), caolinita, pirofilita y menor proporción calcita y alunita. En las áreas ocho y nueve (A8-A9) los datos se encuentran dispersos, incluyen calcita, pirofilita, moscovita, illita y montmorillonita (OH Ia y OH Ib) (Figura 51).

Figura 51.

Áreas de interés de índices de Ninomiya OH1a, OH1b, KLI, CLI y ALI en la zona de estudio de Puno, áreas de interés en recuadro blanco con borde negro.

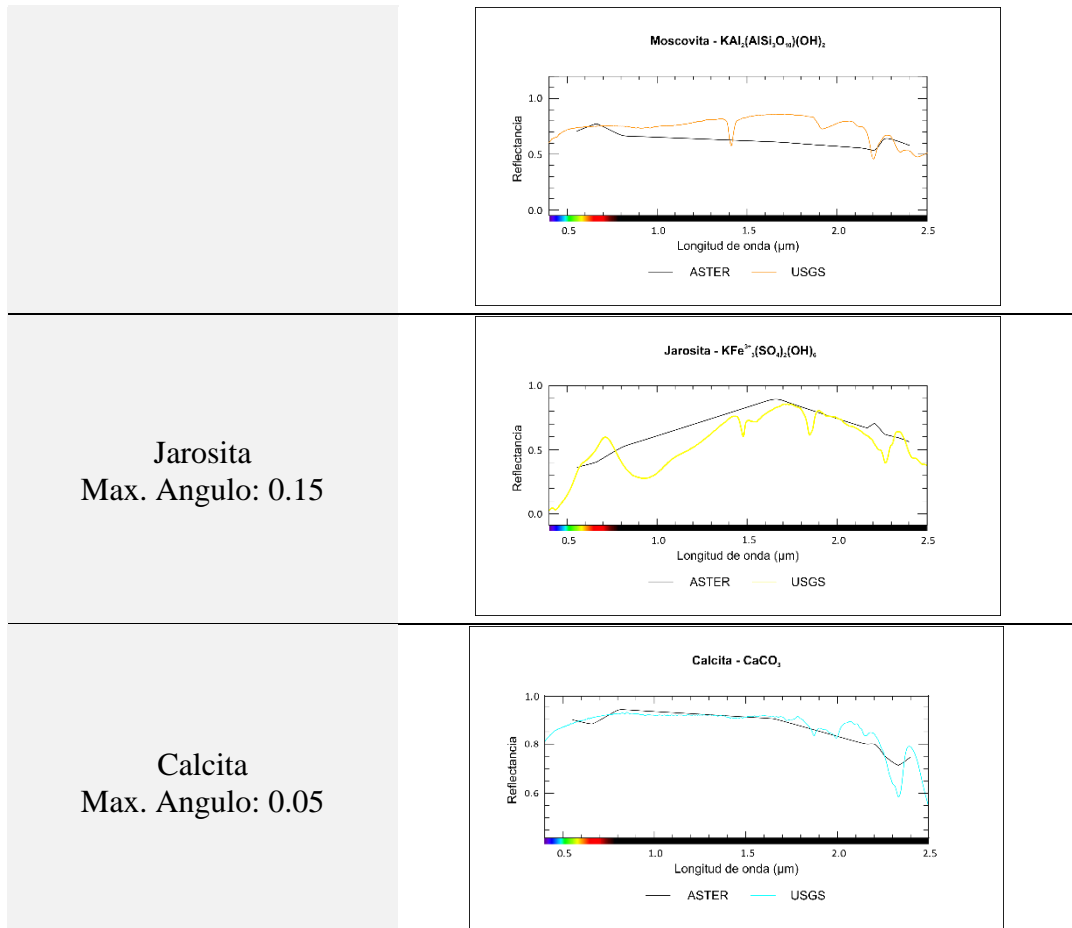


## 6.1.2.5 Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper)

Tabla 26.

Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER de la zona de Puno.

<b>Puno</b>	
<b>Mineral</b>	
Goethita Max. Angulo: 0.15	<p style="text-align: center;"><b>Goethita - Fe<sup>3+</sup>O(OH)</b></p>
Magnetita Max. Angulo: 0.075	<p style="text-align: center;"><b>Magnetita - Fe<sup>3+</sup>Fe<sup>2+</sup>O₄</b></p>
Caolinita Max. Angulo: 0.18	<p style="text-align: center;"><b>Caolinita - Al, Si₂O₅(OH)₄</b></p>
Illita Max. Angulo: 0.15	<p style="text-align: center;"><b>Illita - (K,H,O)(Al, Mg, Fe)₃(Si, Al)₄O₁₆</b></p>
Moscovita Max. Angulo: 0.11	

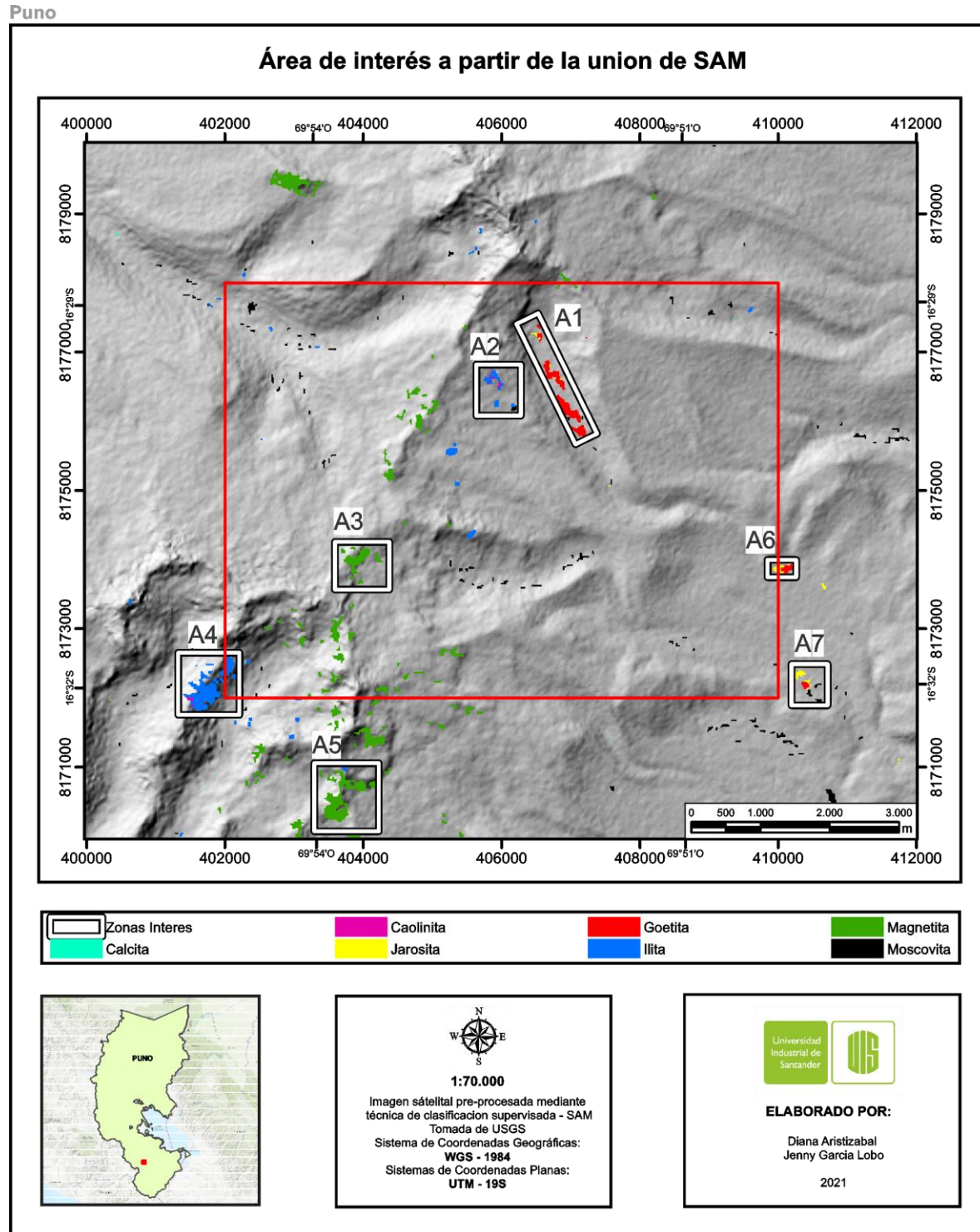


*Nota:* Firma ASTER en negro, firma de la biblioteca espectral en color, las firmas se pueden visualizar en el Apéndice B.

Los rangos de absorción de la caolinita se encuentran en 1.4-1.41 $\mu$ m y 2.16-2.2 $\mu$ m en la banda 5, hay otro minerales que tienen los mismos rangos de absorción como la Alunita y dickita pero menos marcados que esta, el pico de absorción en 1.83 $\mu$ m es típico de las caolinitas con alto grado de cristalinidad y en menor rango 2.38 $\mu$ m se da cuanto hay mezcla mineral por ejemplo pirofilita, caolinita, dickita, esto se observa en la Tabla 26 en la firma tomada de la USGS y se ve levemente en la firma extraída de la imagen ASTER, la illita cuenta con tres picos de absorción característicos, en 1.4 $\mu$ m, 1.91 $\mu$ m y 2.2 $\mu$ m, este último coincide con la absorción en la banda 6 de la imagen ASTER y es el pico que resalta claramente en la Tabla 26.

**Figura 52.**

*Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Puno. Las áreas de interés se encuentran en recuadros blancos con borde negro.*



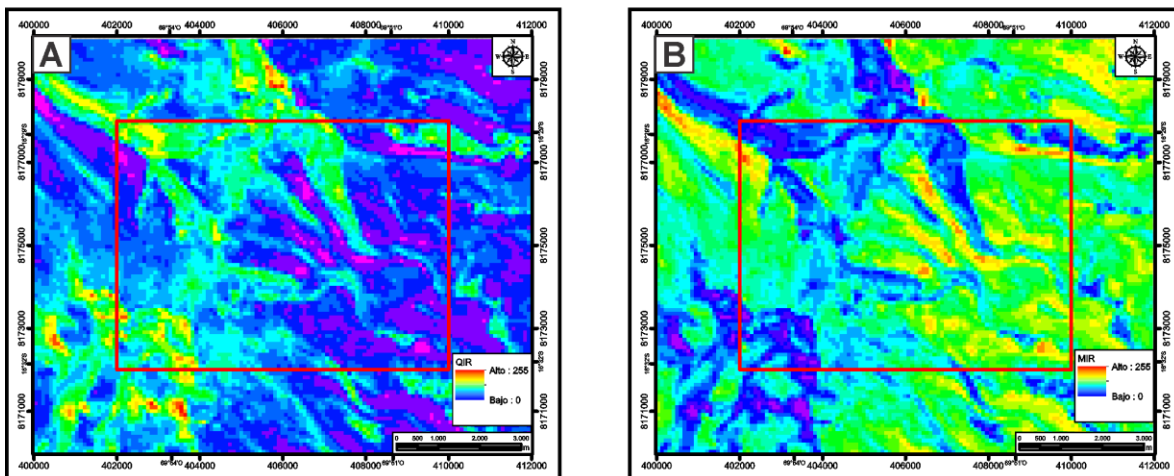
En la Figura 52 se observan siete zonas de interés en donde se muestran concentraciones de goethita y jarosita hacia el N y al SEE del área de estudio, también concentraciones de magnetita, illita y pequeñas cantidades de caolinita en el sector SO del área. Además, concentraciones de magnetita que siguen la dirección NE de la topografía pasando por el centro de la zona de estudio.

### 6.1.2.6 Índices TIR

#### Figura 53.

*Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Puno A) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice B) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos.*

### Índices del TIR (QRI y MRI)



Los resultados de la aplicación de los índices QRI (Quartz minerals bearing rock index) corresponden a una imagen en escala de color como se ve en la Figura 53A, las tonalidades rojas y amarillas que corresponde a los valores más altos es decir en donde resalta litología compuesta principalmente por sílice, esta aflora al N y al SO del área en las partes más altas topográficamente. El índice MRI (Mafic mineral bearing rock index) funciona como un inverso del índice QRI ya

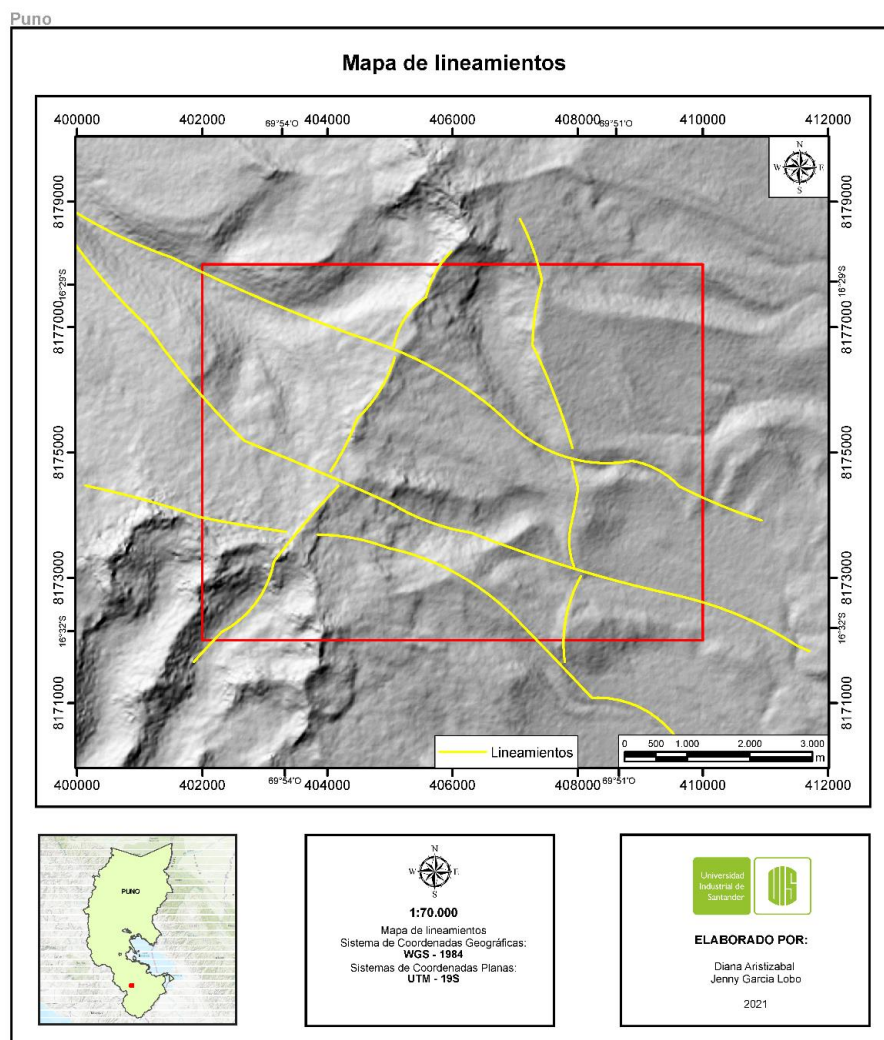
que representa la ausencia de contenido de sílice es decir presencia de contenido máfico en la roca, en la Figura 52B podemos observar que las zonas de color rojo y amarillo se encuentran hacia el NO, N, NE y SE del área de estudio, además de la parte central.

#### 6.1.2.5 Rasgos Estructurales

La zona de Puno se caracteriza por presentar dos tendencias preferenciales de lineamientos, la primera con orientación NE – SO. La segunda se encuentra cortando y desplazando en sentido sinistral a la primera, esta tiene una orientación preferencial de NO – SE (Figura 54).

#### Figura 54.

*Mapa de lineamientos de la zona de Puno*



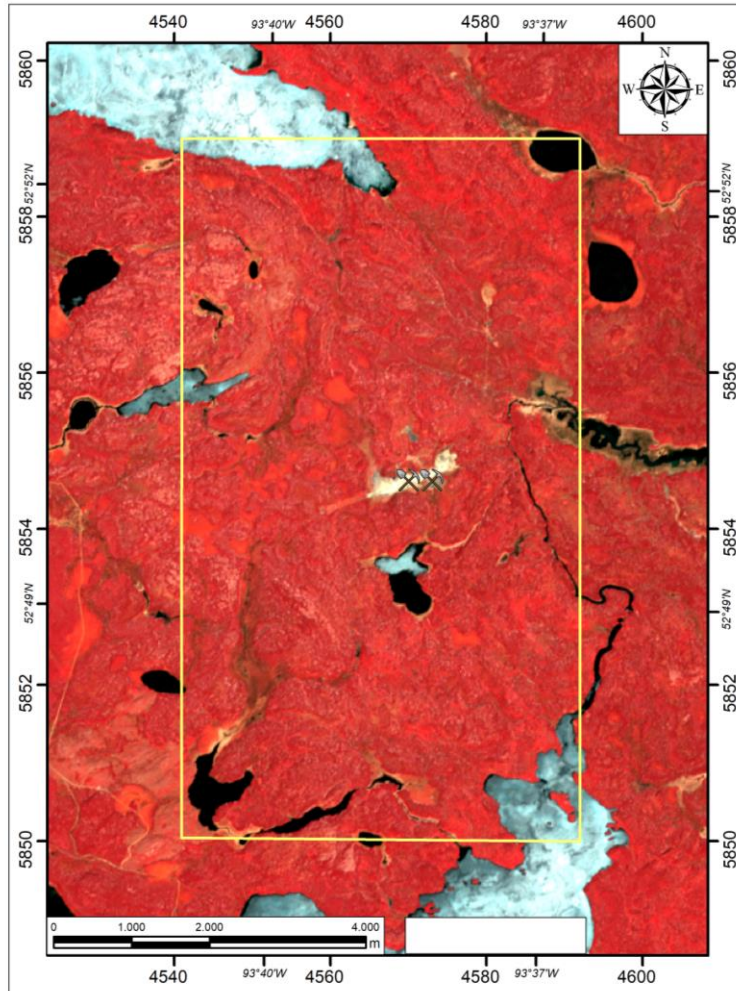
## 6.2 Canadá

### 6.2.1 Berens

La imagen satelital de la zona de estudio de Berens se caracteriza por presentar vegetación del tipo bosque boreal (coníferas, pinos, abetos y alerces), esta es resaltada en tonalidades rojizas, los cuerpos de agua se encuentran dispersos en la zona de estudio en color negro, los que presentan todavía hielo se distinguen por las tonalidades grisáceas a blancas, la cubierta superficial que se encuentra expuesta se resalta en tonalidades amarillezcas pálidas, localizándose principalmente en el borde de los lagos, caminos y la ubicación de las antiguas minas de Berens. Estas características fueron determinadas a partir de la imagen de infrarrojo color (Figura 55).

#### **Figura 55.**

*Imagen satelital ASTER LIT en infrarrojo color de la zona de Berens.*

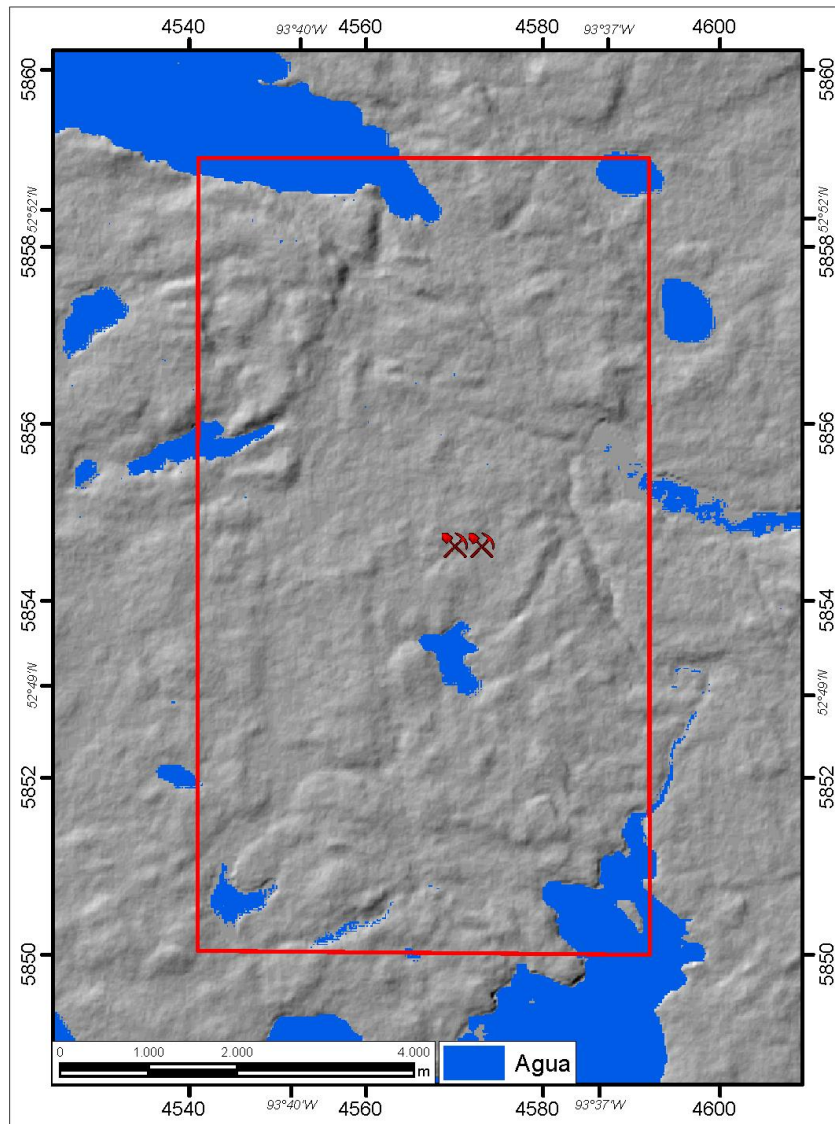


### 6.2.1.1 Aplicación de Máscaras

Se generó máscaras de los cuerpos de agua para que esto no ocasionaran ruido a la hora del procesamiento de la imagen y no tener un resultado alterado. Los cuerpos de agua ocupan un área de 17,4361 Km<sup>2</sup> y corresponde al (14,93%) de la imagen (Figura 56).

#### **Figura 56.**

*Aplicación de máscaras sobre la zona de Berens. Máscara de vegetación color verde.*



### 6.2.1.2 Combinación de Bandas

Con la intención de reconocer las áreas que presentan minerales arcillosos, óxidos y alteraciones hidrotermales se utilizaron las combinaciones de bandas definidas en la Tabla 21.

La Tabla 24 denota que resalta cada banda de la combinación y en que tonalidad se destaca.

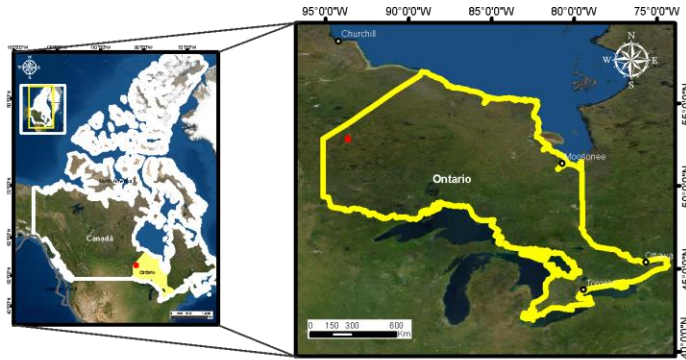
Los resultados de las combinaciones de bandas en la zona de Berens denotan la presencia de la vegetación, sin embargo, se tuvieron en cuenta la cobertera superficial que se alcanza a observar en la zona de estudio (bordes de lagos, minas antiguas y carreteras).

En la zona se distinguen óxidos de Fe en tonalidades blancas a cian (Figura 57A), en el RGB 4,6,1 se observan los minerales arcillosos en tonalidades blancas a amarillezcas (Figura 57B), mientras en el RGB 5,3,1 se distinguen solo en tonalidades amarillezcas a magenta (Figura 57D). El RGB 4,6,8 presenta las alteraciones hidrotermales en color blanco (Figura 57C). Los minerales AIOH, principalmente los minerales que se reconocen en el subsistema del SWIR no presentan una buena respuesta en la zona, debido a la presencia de la vegetación, sin embargo, en la zona donde se ubica la antigua mina de Berens River se resalta en color cian (Figura 57E). Asimismo, la combinación 4/5, 4/6, 4/7 no presenta respuesta en la zona, observándose salpimentada (Apéndice A, mapa 89). En la zona donde se localizan las antiguas minas de Berens River se resaltan zonas de interés.

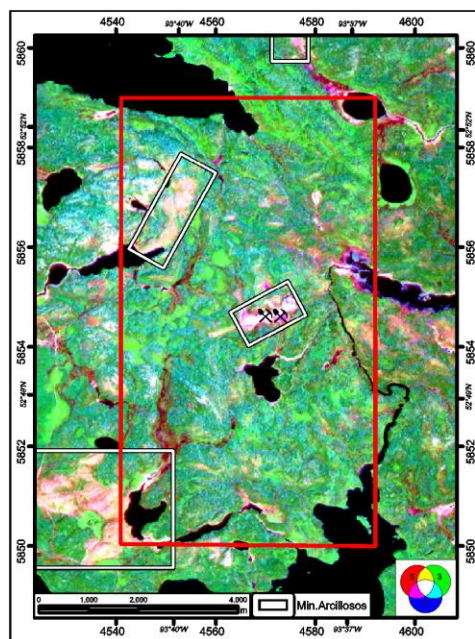
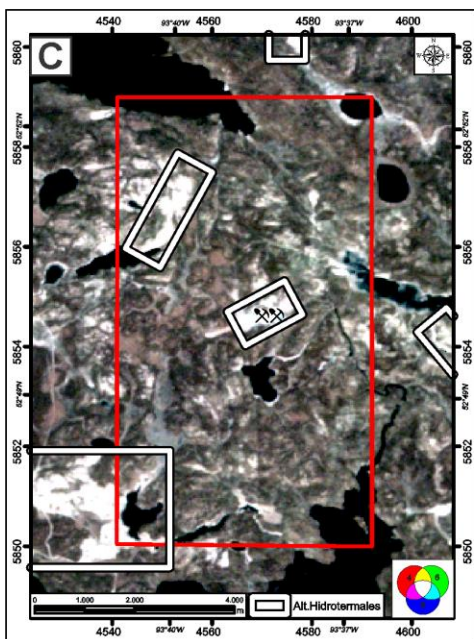
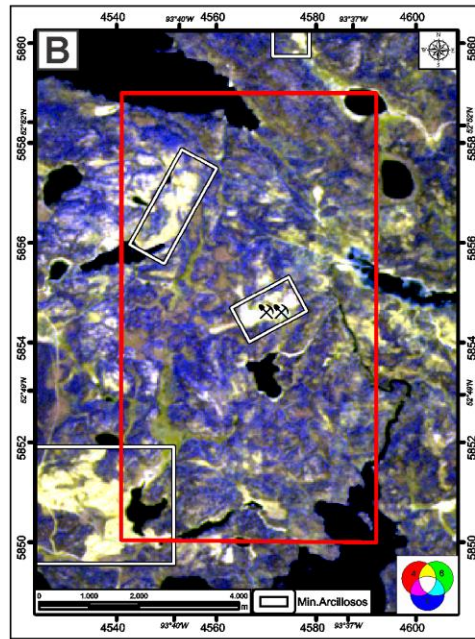
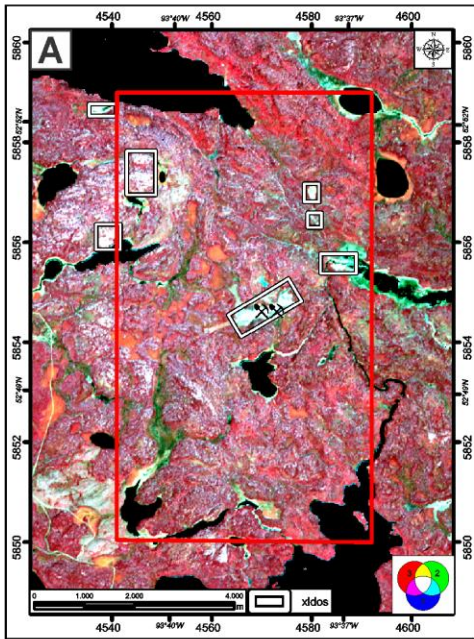
**Figura 57.**

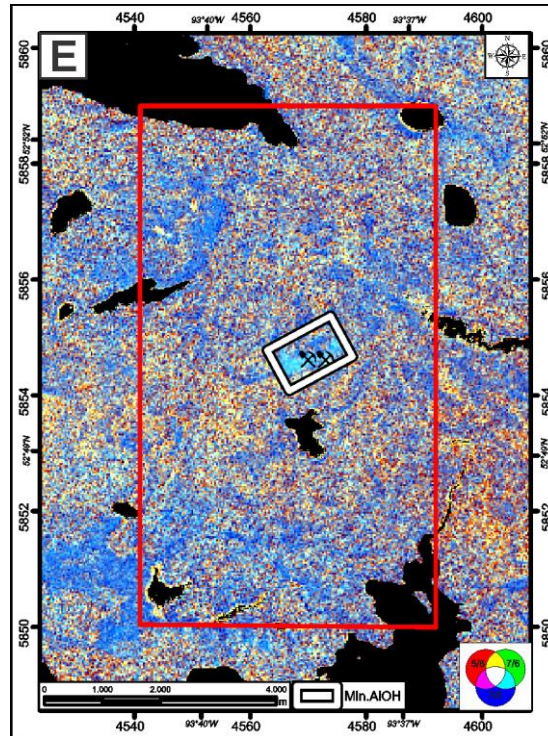
*Combinaciones de bandas RGB. A) 3,2,1; B) 4,6,1; C) 4,6,8; D) 5,3,1 y E) 5/6,7/6,7/5, muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro.*

# Localización Zona de Berens



## Combinaciones de banda (R,G,B)





### 6.2.1.3 Cocientes de Bandas

En la zona de Berens no todos los cocientes mostraron una respuesta clara y sin mezcla de pixel debido a la presencia de la vegetación. Los mejores resultados son los que utilizan el subsistema VNIR, debido a que en este se reconocen las características espectrales de la vegetación y los picos de absorción de los óxidos de Fe (Huaff, 2008), las zonas preferenciales de estos son en los bordes de los lagos.

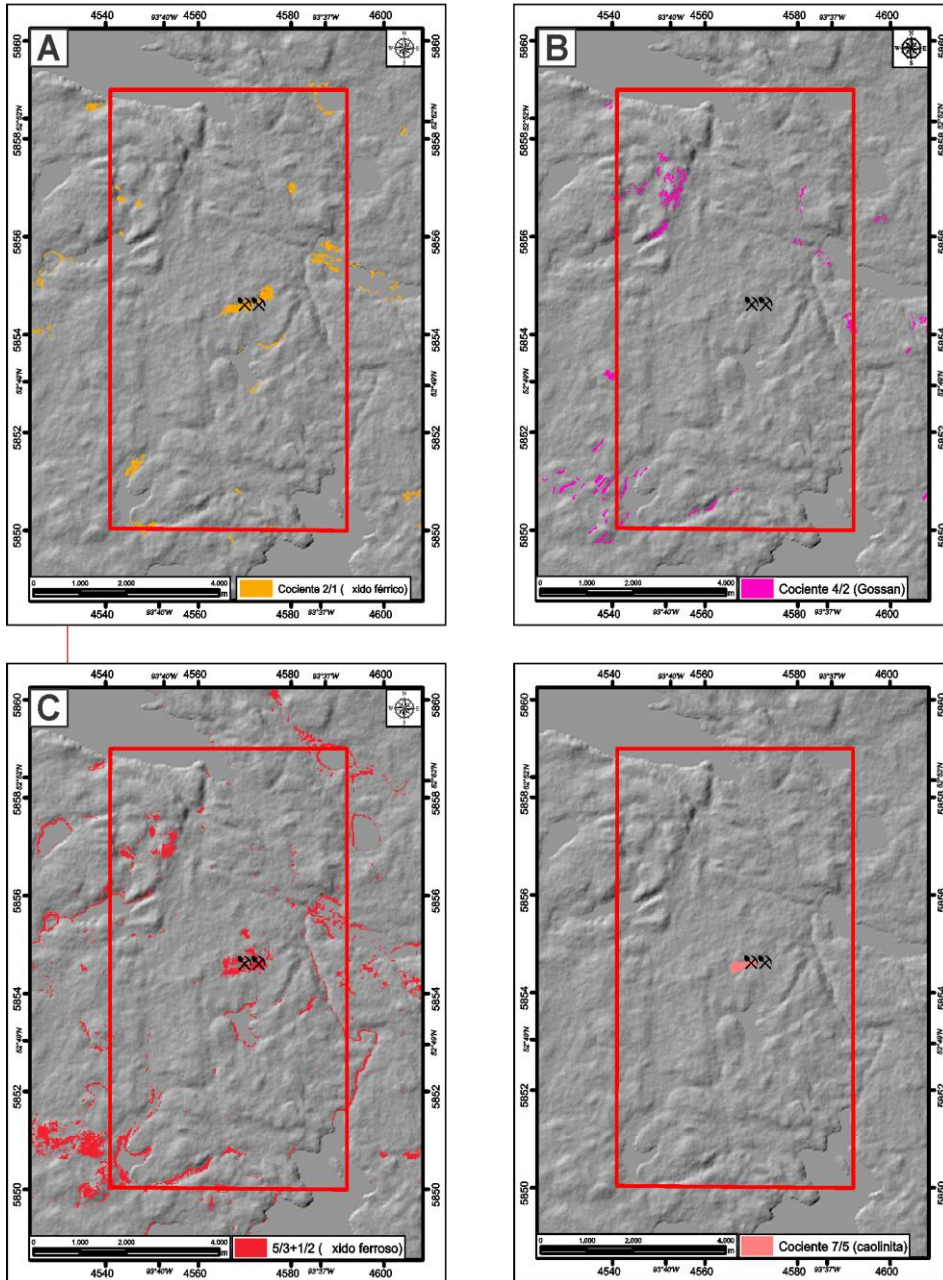
En la Figura 58A se observa el óxido férrico, este se encuentra disperso por toda la zona mostrando su mayor concentración hacia la parte central con tendencia al E. La alteración supergena Gossan se encuentra de igual forma dispersa, sin embargo, con mayor concentración al NO (Figura 58B). Por otra parte, el óxido ferroso es el que presenta mejor respuesta, concentrándose en el SO y en los bordes de los lagos (Figura 58C). La caolinita solo presenta

respuesta en la localización de las antiguas minas de Berens River (Figura 58D). La respuesta de los demás cocientes se puede verificar en el Apéndice A, mapas 104, 105, 106, 107 y 108

### Figura 58.

Cocientes de bandas. A)  $2/1$  – hierro férrico; B)  $4/2$  – Gossan; C)  $5/3+1/2$  –hierro ferroso y D)  $7/5$  – Caolinita.

#### Cocientes de banda

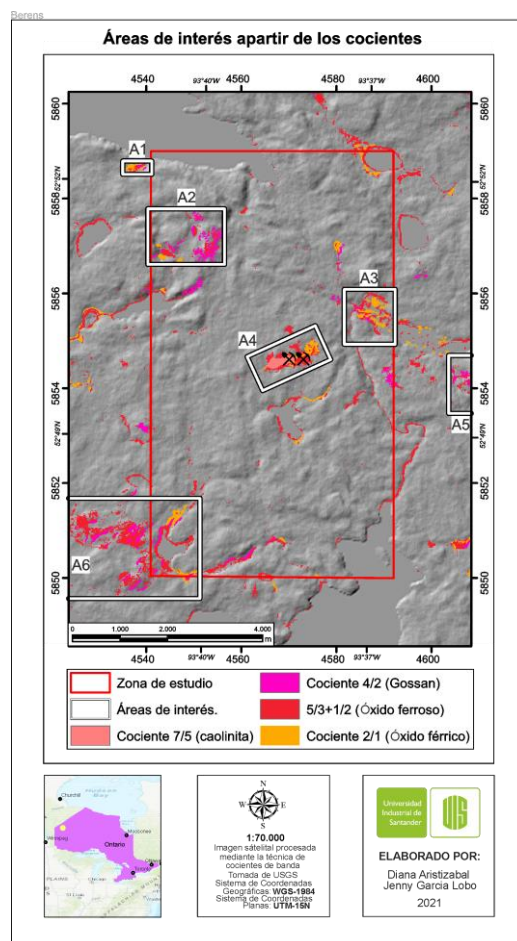


Nota: Las imágenes resultantes de los cocientes se pueden visualizar en el apéndice A, mapas 96, 98, 100 y 102.

De acuerdo con lo anterior, fueron definidas 7 áreas de interés, las cuales se encuentran al SO, E y NO de la zona de estudio. El área A1 se caracteriza por presentar óxidos y tener poca extensión. El área A2 presenta en mayor proporción la alteración gossan y en menor óxido férrico. En la zona donde se ubican las minas antiguas se mapean todos los óxidos, hasta la caolinita denotando esta como el área A3 de interés. El área A4 presenta todos los óxidos en mayor proporción el férrico, en la A5 solo se distinguen el gossan y el ferroso. Mientras, en la A6 se encuentra en mayor cantidad el óxido ferroso y en menor cantidad el férrico.

### Figura 59.

Áreas de interés a partir de la unión de los cocientes de banda para la zona de Berens. Las áreas se encuentran recuadros blancos con marco negro.



### 6.2.1.4 Índices de Ninomiya

Para el área de Berens no presento resultados. Debido a la presencia de la vegetación en la zona que altera la adquisición de los valores de reflectancia, por consiguiente, los resultados no discriminaron y mostraron la mezcla de pixel denotándose en salpimentado (Apéndice A, mapas 110,111,112, 113 y 114).

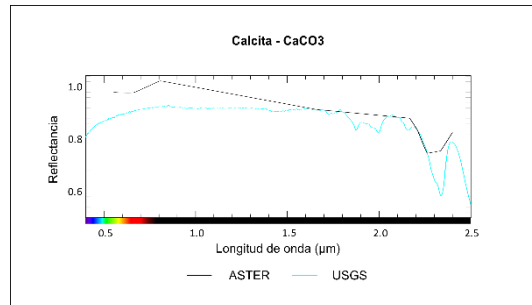
### 6.2.1.5 Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper)

**Tabla 27.**

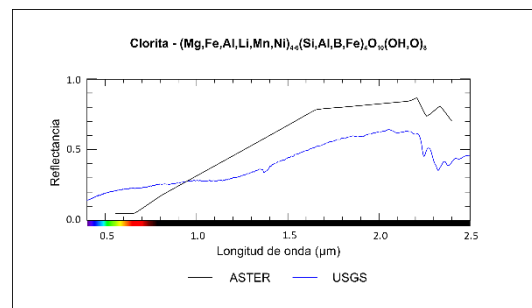
*Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER para la zona de Berens*

<b>Berens</b>	
<b>Mineral</b>	
Goethita Max. Angulo: 0.15	
Magnetita Max. Angulo: 0.06	

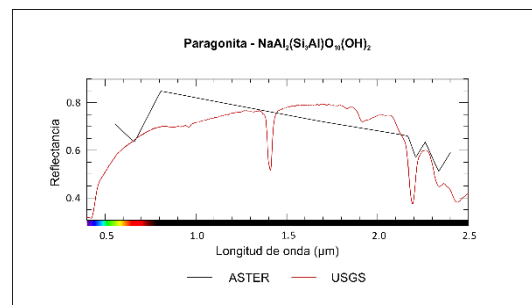
Calcita  
Max. Angulo: 0.06



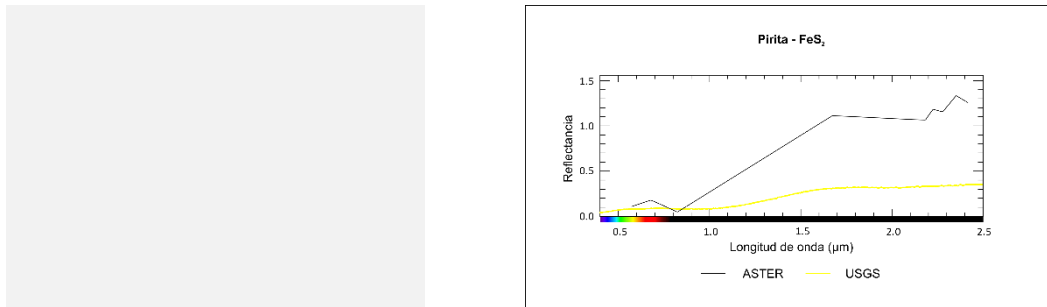
Clorita  
Max. Angulo: 0.16



Paragonita  
Max. Angulo: 0.14



Pirita  
Max. Angulo: 0.09

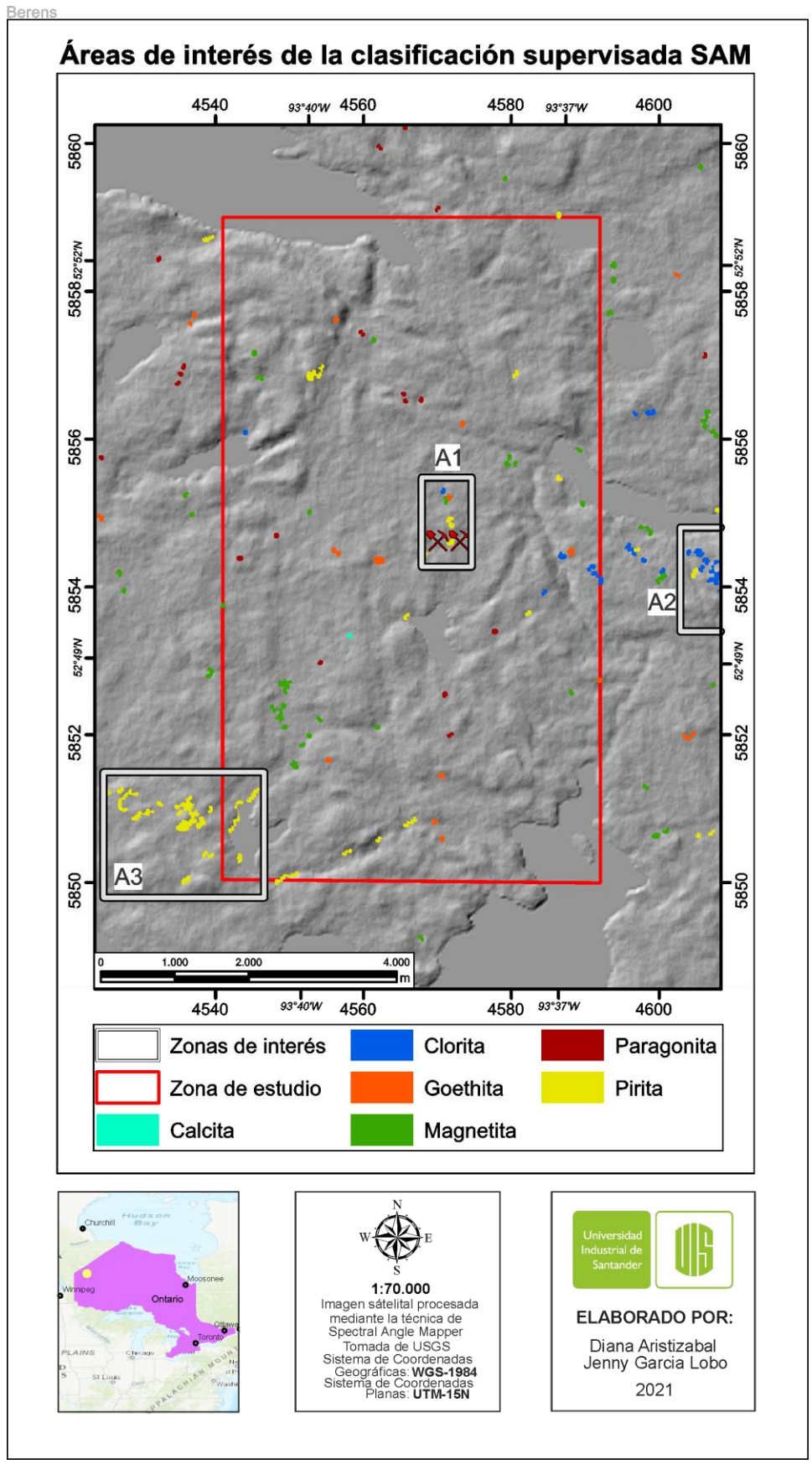


*Nota:* Firma ASTER en negro, firma de la biblioteca espectral en color. Las firmas se pueden visualizar en el Apéndice B.

La clorita tiene picos de absorción, característicos en 1.4μm aunque esto varía según el tipo de clorita, además de los picos en 1.9μm y doble pico en 2.2-2.3μm, siendo este último el que se encuentra marcado en la firma espectral extraída de la imagen ASTER, la paragonita cuenta con dos picos de absorción bien marcados en 1.4μm 2.2μm como se observa en la firma tomada de la USGS de la Tabla 27 y la pirita muestra mayor absorción por su contenido de Fe entre 0.35-1.35μm, esto se ve reflejado en la firma de práctica extraída de la imagen ASTER al igual que en la tomada de la USGS.

### **Figura 60.**

*Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Berens. Áreas de interés en recuadro blanco con borde negro.*



En la zona de Berens resaltan tres áreas de interés, se aprecian concentraciones en la parte central (Área A1), coincidiendo con la presencia de las minas de Berens, además de concentraciones sobresalientes de pirita al SO (Área A3) de la zona y de clorita y pirita al E (Área A2), (Figura 60).

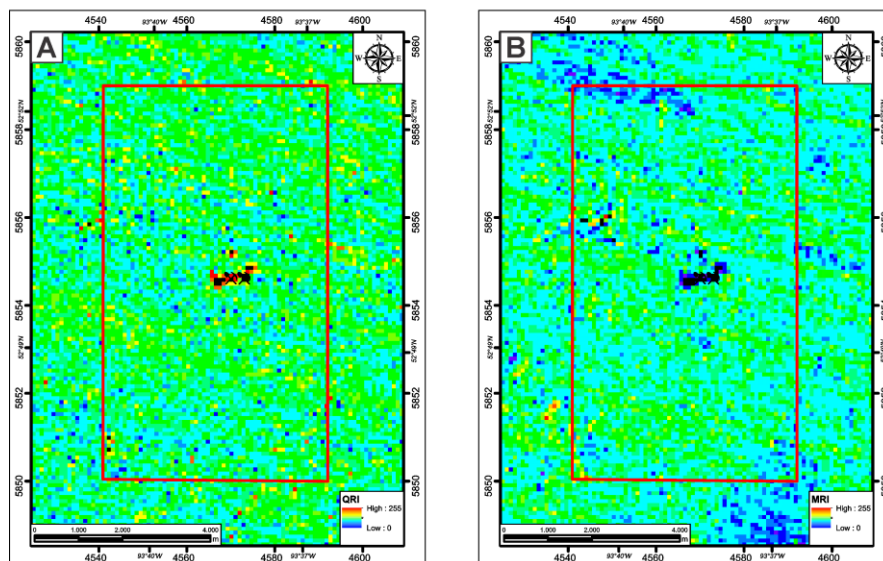
### 6.2.1.6 Índices TIR

El contenido de sílice en la superficie terrestre se identifica con el índice QRI, los valores altos en este se representan con coloraciones rojo y amarillo, resaltándose en la parte central del área, esta coincide con la presencia de las minas de Berens River y con las zonas de interés resultantes de las combinaciones de banda, las uniones de cocientes de banda y el SAM (Figura 61A). El índice MRI identifica las áreas con alto contenido de máficos en valores altos, representados con tonalidades rojo y amarillo, en la Figura 61B se resaltan al NOO y SO de la zona de estudio.

**Figura 61.**

*Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Berens a) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice b) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos.*

**Índices del TIR (QRI y MRI)**

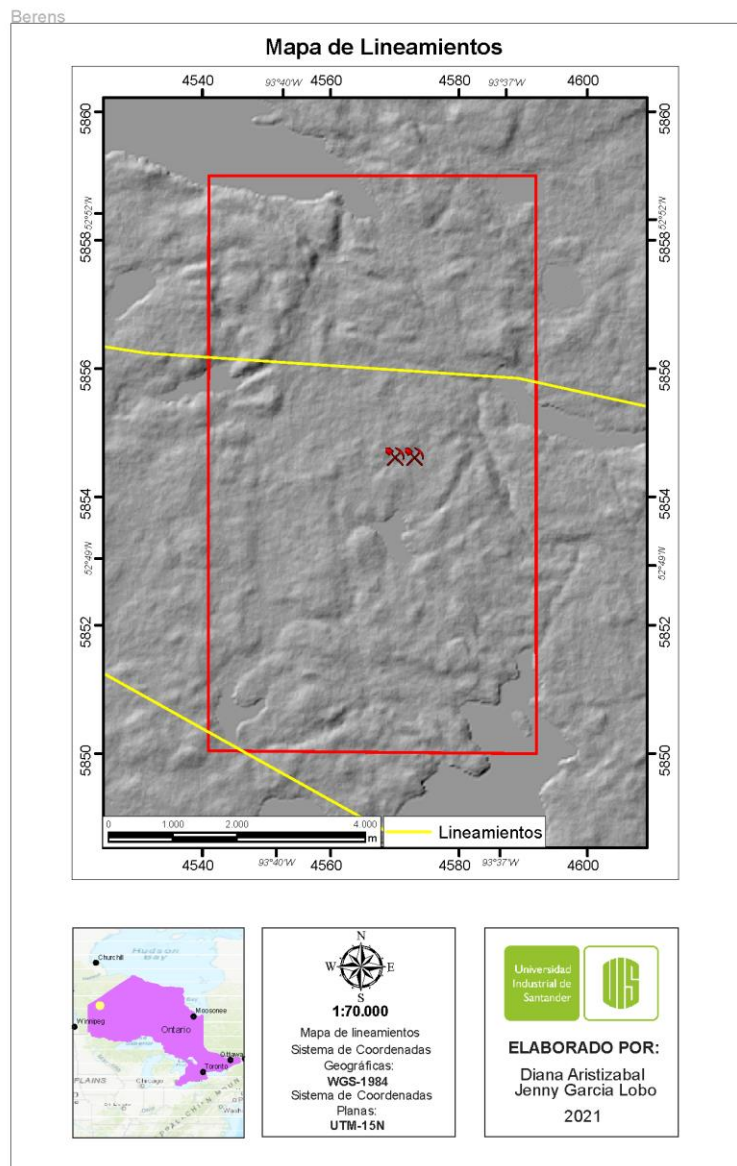


### 6.2.1.5 Rasgos Estructurales

La zona de Berens presenta dos lineamientos, uno hacia la parte central de la zona en sentido O – E y otro hacia el SO en sentido NO – SE (Figura 62).

#### Figura 62.

*Mapa de lineamientos de la zona de Berens*

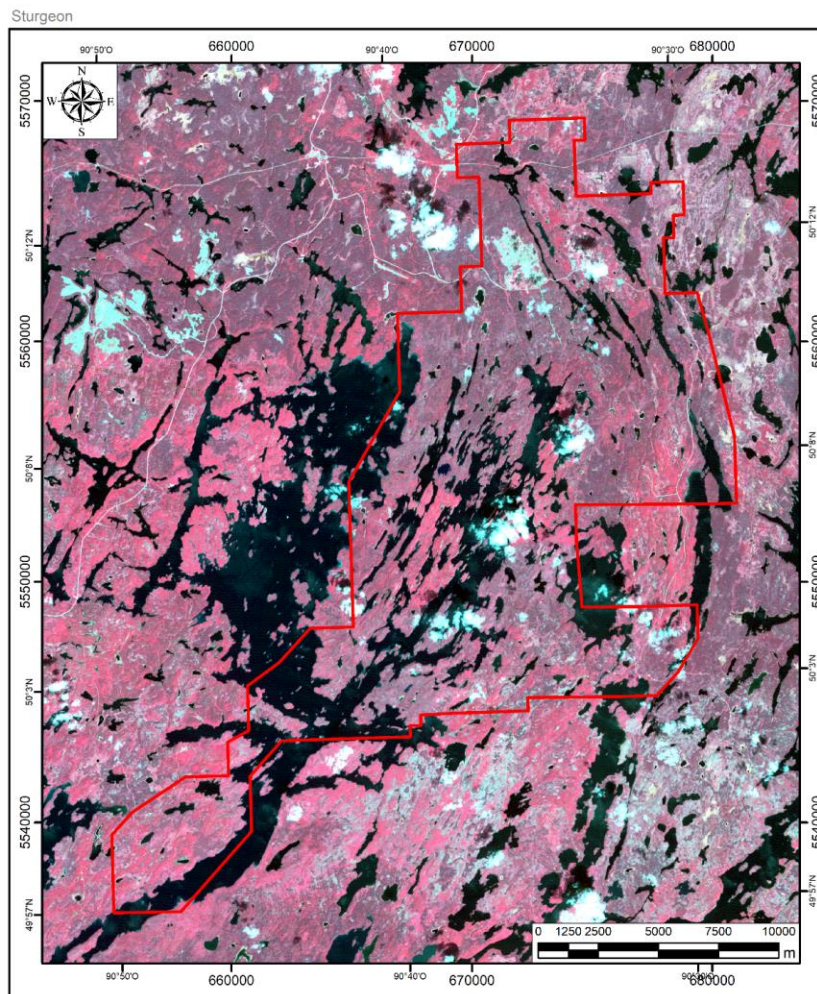


### 6.2.2 Sturgeon

Para el trabajo en esta zona se utilizaron dos imágenes ASTER L1T del año 2000, que cubre una extensión de 1172,147 Km<sup>2</sup>. La zona se encuentra compuesta en su mayoría por vegetación que corresponde a bosque boreal, esta se observa en coloración rojiza, los cuerpos de agua se encuentran ampliamente distribuidos por toda la zona en coloraciones oscuras y las nubes en colores blancos-cian. Todas las características fueron determinadas por composición de infrarrojo color (Figura 63).

#### Figura 63.

*Imágenes Aster L1T en infrarrojo color para la zona de Sturgeon.*



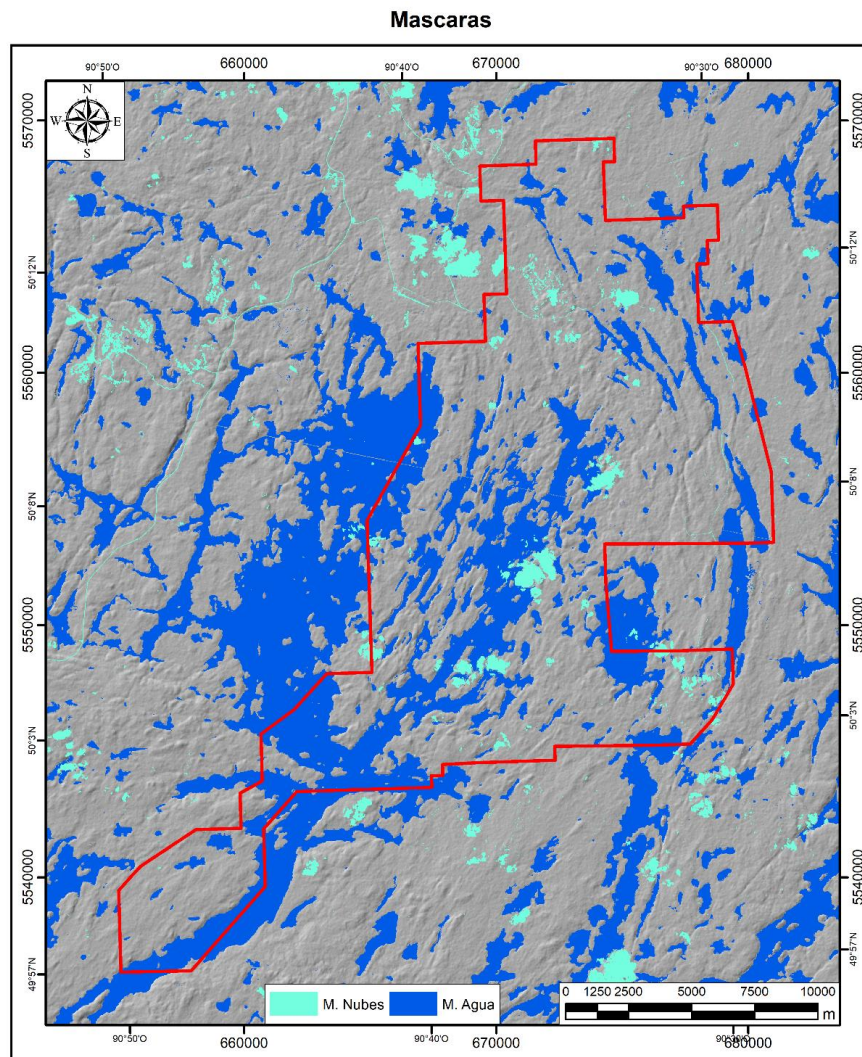
### 6.2.2.1 Aplicación de Máscaras

Se generaron

máscaras a los cuerpos de agua, los cuales ocupan el 22,72% de la zona y las nubes en un 2,45%, esto se hizo para reducir el ruido y evitar una interpretación errónea en la respuesta a la aplicación de las técnicas espectrales (Figura 64).

#### Figura 64.

*Aplicación de máscaras sobre la zona de Sturgeon. Máscara de cuerpos de agua en color azul y las nubes en color cian.*



### 6.2.2.2 Combinación de Bandas

Con la intención de reconocer las áreas que presentan minerales arcillosos, óxidos y alteraciones hidrotermales se utilizaron las combinaciones de bandas definidas en la Tabla 21. Además, la Tabla 24 describe que resalta las combinaciones de bandas y en que tonalidad se espera que se muestre.

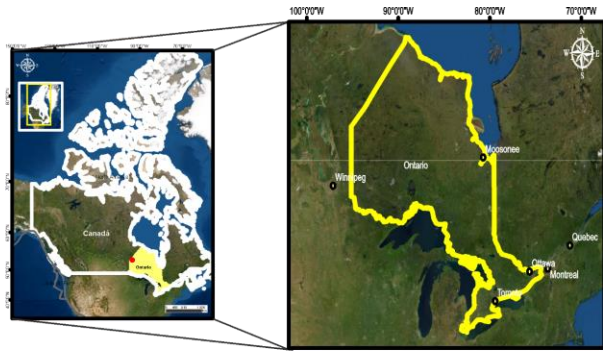
Los resultados de las combinaciones de bandas en la zona de Sturgeon denotan la presencia de la vegetación, sin embargo, se tuvo en cuenta la cobertera superficial que se alcanza a denotar en la zona de estudio (bordes de lagos, minas antiguas y carreteras). La zona presenta una tendencia NO – SE.

En la Figura 65A los minerales arcillosos se resaltan en color blanco principalmente hacia SE y NO de la zona de estudio, asimismo la combinación 5,3,1 los resalta en una coloración rosada, presentando una concordancia con las zonas (Figura 65B). La combinación 3,2,1 permite reconocer los óxidos en color cian (Figura 65c). Las combinaciones 4,6,8; 4/5, 4/6, 4/7 y 5/6,7/6,7/5 no permiten el reconocimiento de zonas de interés para minerales de alteración hidrotermal (ver Apéndice A, mapas 128, 129 y 130).

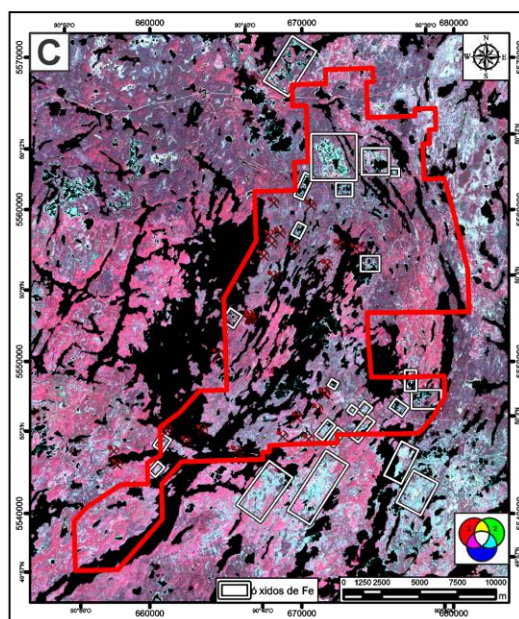
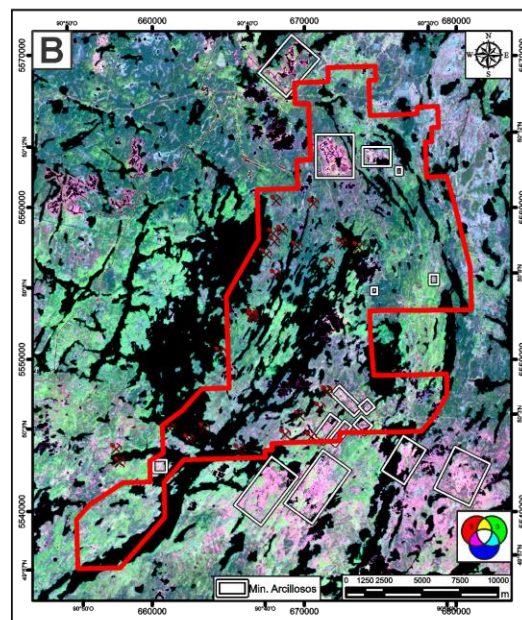
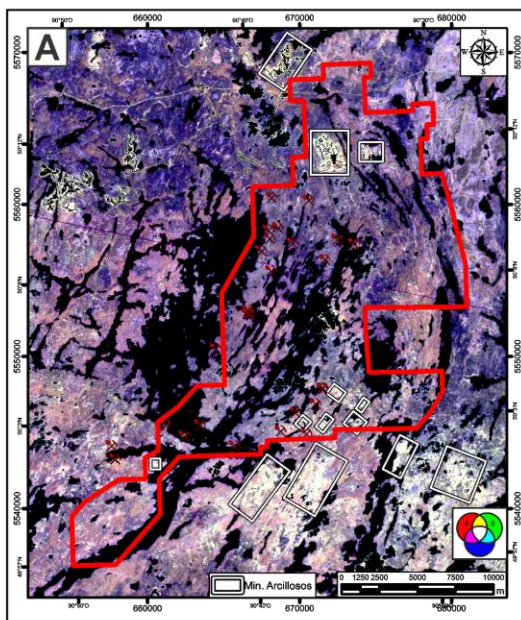
#### **Figura 65.**

*Combinaciones de bandas RGB. A) 461; B) 531; C) 943 y D) 321, muestra las zonas con minerales arcilloso, óxidos y alteraciones hidrotermales, resaltados en recuadros blancos con borde negro.*

# Localización Zona de Sturgeon



## Combinaciones de banda (R,G,B)



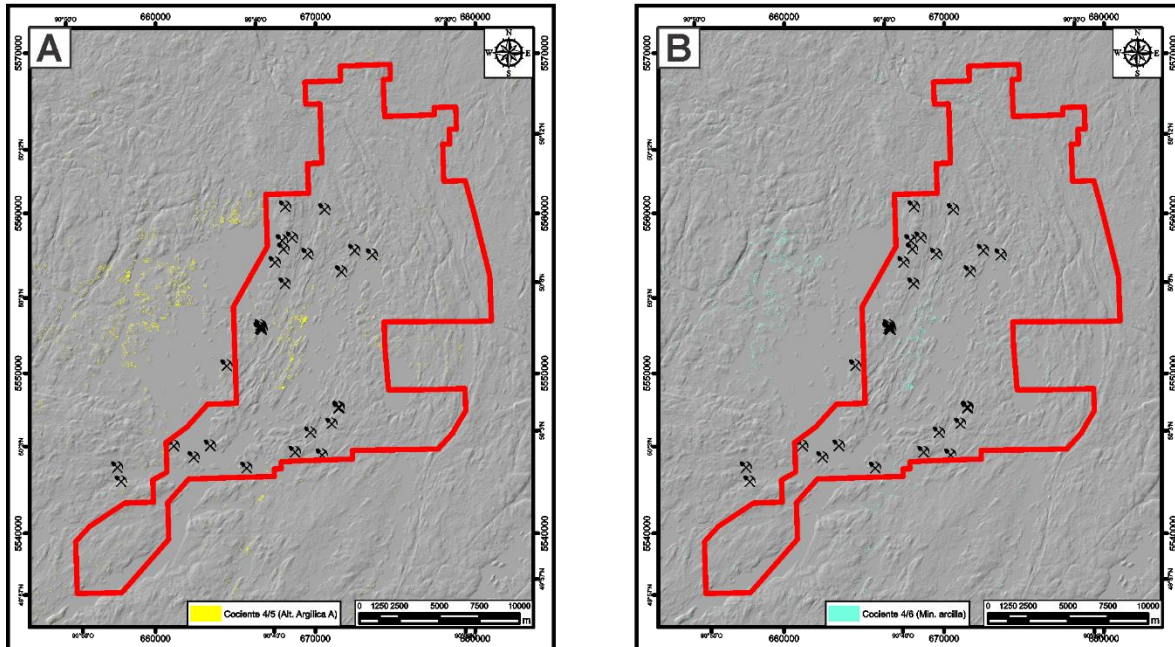
### 6.2.2.3 Cocientes de Bandas

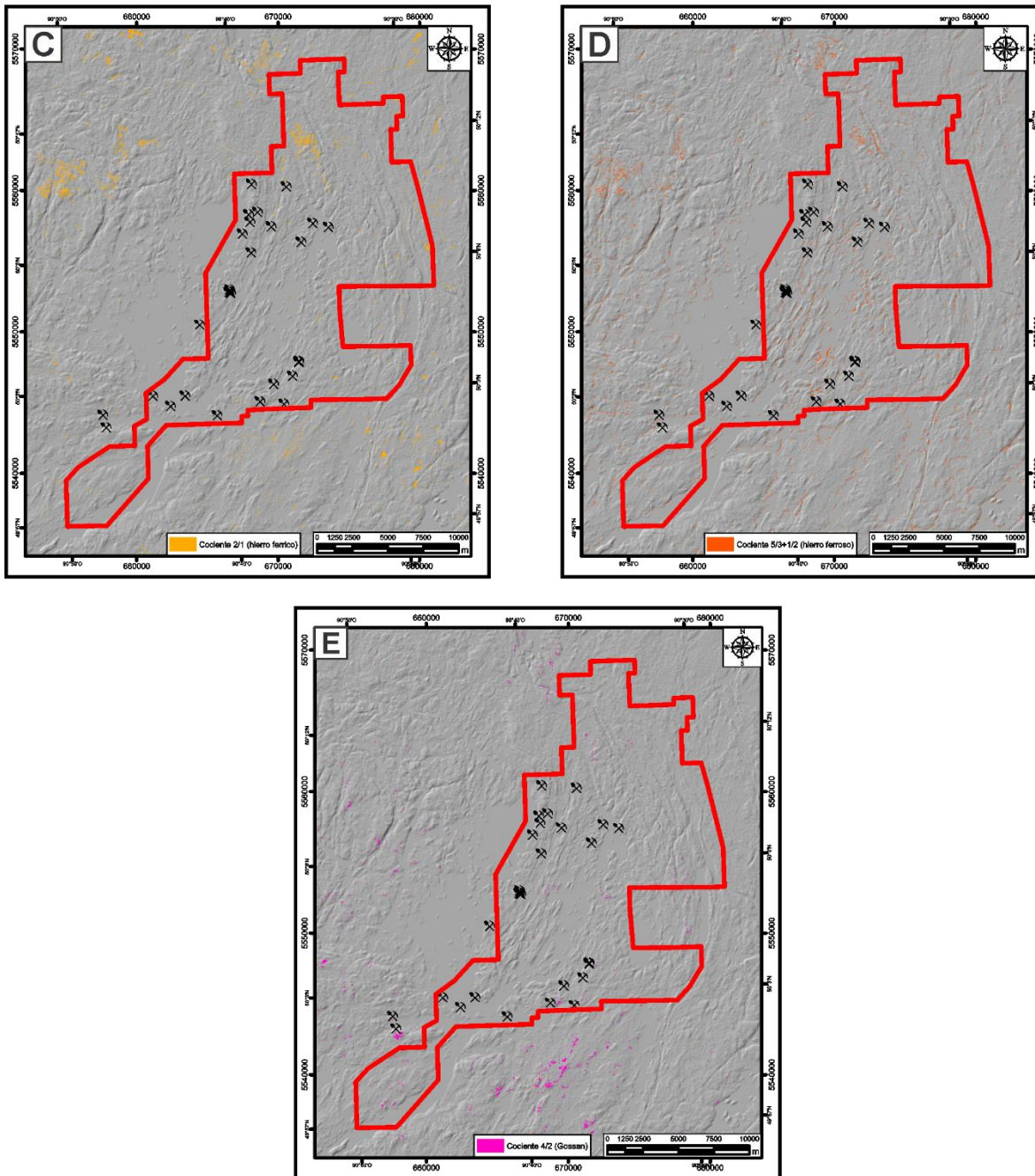
Los resultados de los cocientes de banda en el área de Sturgeon no presentan una orientación preferencial, se encuentran dispersos en el área, asociados principalmente con los bordes de los lagos y las vías. Los cocientes que permitieron su reconocimiento son los asociados a óxidos e hidróxidos de hierro.

#### Figura 66.

*Cocientes de bandas. A) 4/5 - Alteración argílica avanzada; B) 4/6 - minerales arcillosos; C) 2/1 - hierro férrico; D) 5/3+1/2 - hierro ferrosos y E) 4/2 - Gossan.*

### Cocientes de banda





Nota: Las imágenes resultantes de los cocientes se pueden visualizar en el apéndice A, mapas 131, 133, 135, 137 y 139.

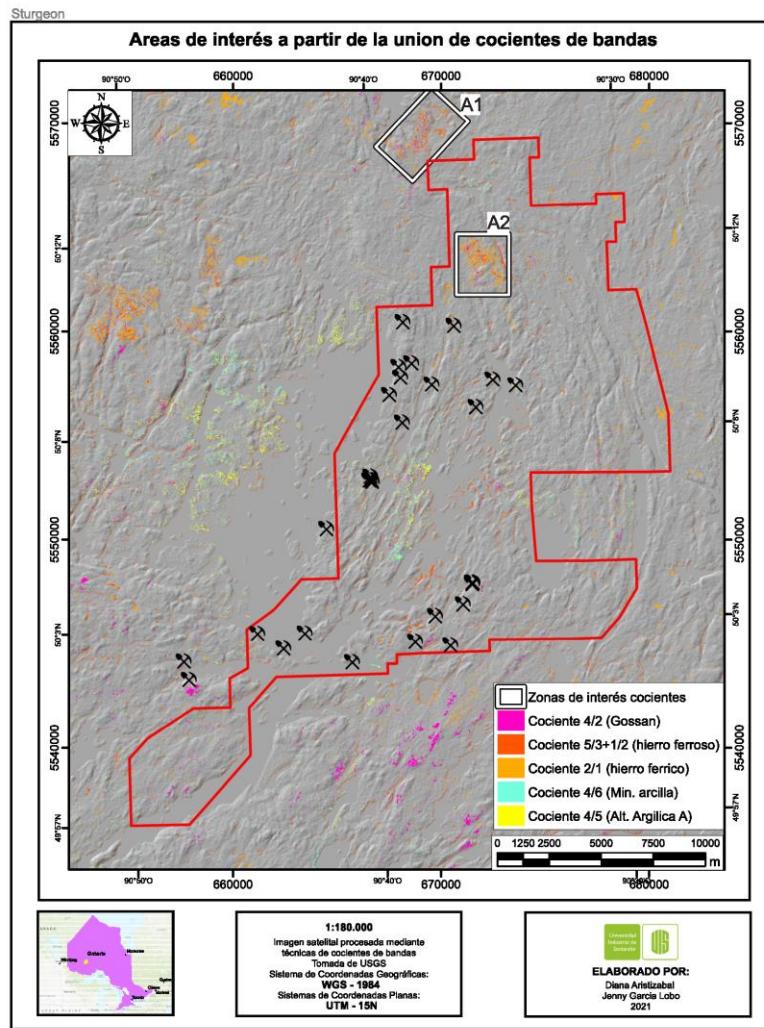
El cociente 4/5 (alteración argílica avanzada) y 4/6 (minerales de arcillas) se encuentran disperso por la zona de estudio, con una mayor concentración hacia el oeste como lo denota la

Figura 66A y B, respectivamente. Los cocientes que discriminan los minerales de óxidos presentan una distribución aleatoria por toda la zona, concentrándose en los bordes de los lagos (Figura 66C, D y E). Los cocientes que no presentaron buena respuesta se puede visualizar la imagen resultante en el Apéndice A, mapas 141, 142, 143 y 144.

Se marcaron dos zonas de interés, la A1 se encuentra aledaña a la zona de interés, el área dos resalta alteración supergena gossan, hierro ferroso y hierro férrico (Figura 67).

### Figura 67.

*Áreas de interés a partir de los cocientes. Las áreas se encuentran en recuadros blancos con marco negro.*



### 6.2.2.4 Índices de Ninomiya

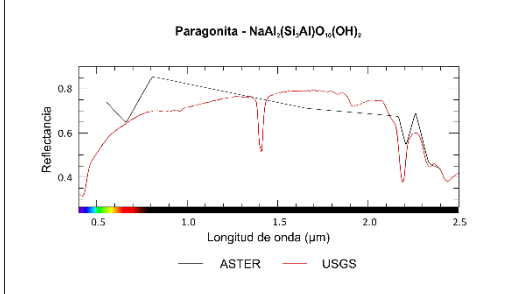
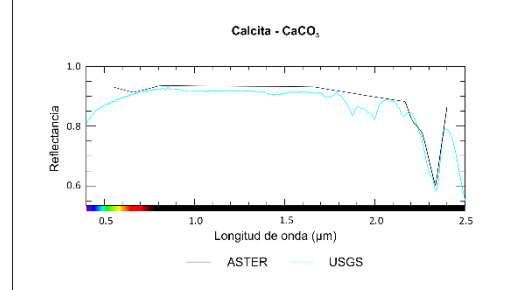
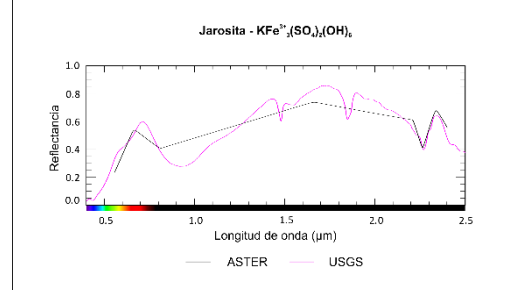
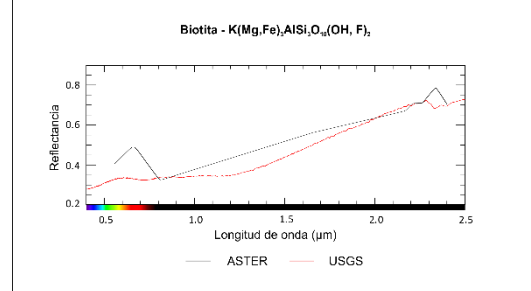
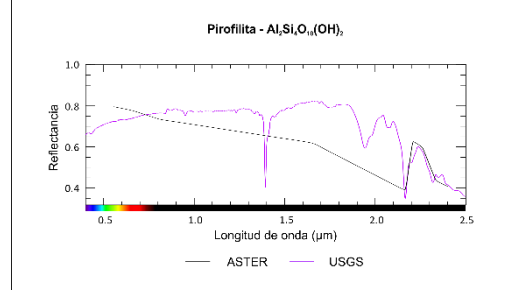
Para el área de Sturgeon los índices de Ninomiya presentan una respuesta baja, los datos se encuentran dispersos y las imágenes generadas no resaltan zonas en particular, debido a la alteración de los datos por la presencia de vegetación que en las bandas que tienen en cuenta estos índices tiene una baja reflectancia (Apéndice A, mapas 146, 147, 148, 149 y 150)

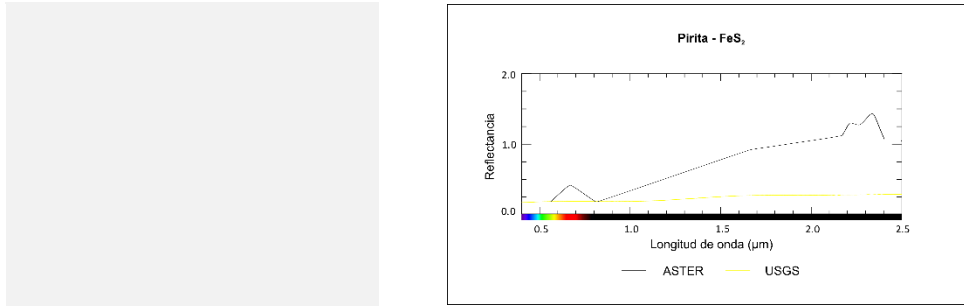
### 6.2.2.5 Clasificación supervisada SAM (Spectral Angle Mapper)

**Tabla 28.**

*Minerales mapeados con la técnica SAM, comparación de la firma teórica (USGS) y la firma de la imagen ASTER para la zona de Sturgeon.*

<b>Sturgeon</b>	
<b>Mineral</b>	
Goethita Max. Angulo: 0.16	
Magnetita Max. Angulo: 0.07	
Clorita Max. Angulo: 0.175	
Paragonita Max. Angulo: 0.15	

	<p style="text-align: center;"><b>Paragonita - <math>\text{NaAl}_2(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2</math></b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Calcita</b> Max. Angulo: 0.06</p>	<p style="text-align: center;"><b>Calcita - <math>\text{CaCO}_3</math></b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Jarosita</b> Max. Angulo: 0.175</p>	<p style="text-align: center;"><b>Jarosita - <math>\text{KFe}^+(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6</math></b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Biotita</b> Max. Angulo: 0.175</p>	<p style="text-align: center;"><b>Biotita - <math>\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH, F})_2</math></b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Pirofilita</b> Max. Angulo: 0.15</p>	<p style="text-align: center;"><b>Pirofilita - <math>\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2</math></b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>Pirita</b> Max. Angulo: 0.15</p>	

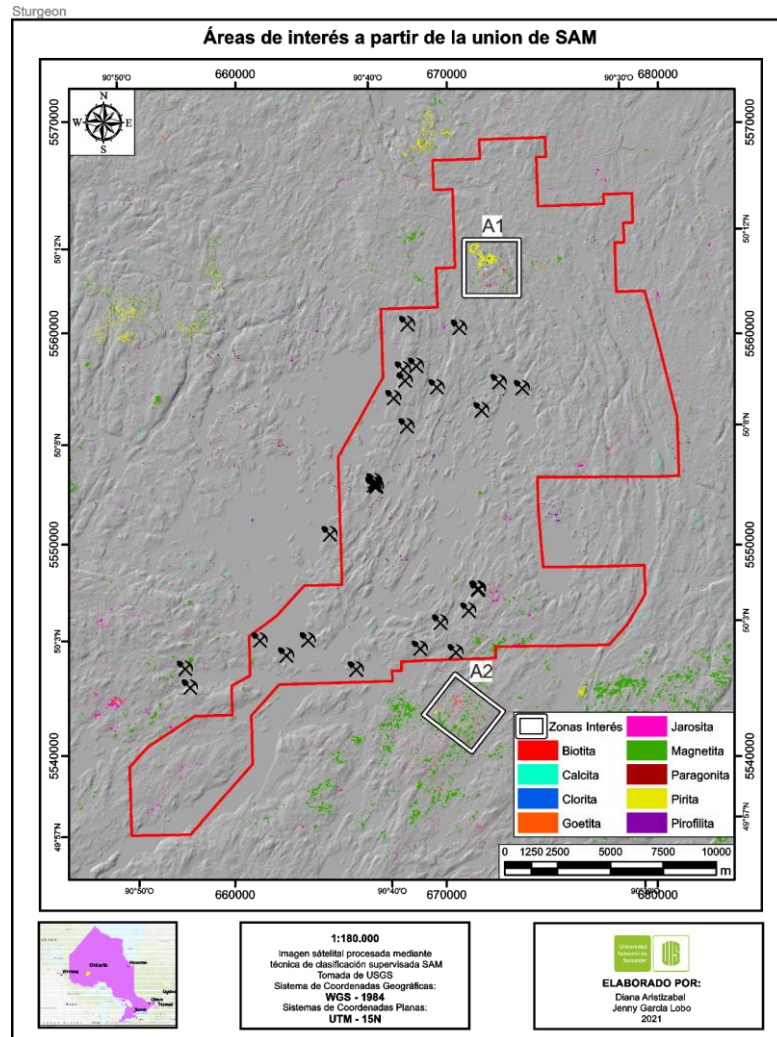


*Nota:* Firma ASTER en negro, firma de la biblioteca espectral en color. Las firmas espectrales se pueden visualizar en el Apéndice B.

Los picos de absorción de la pirofilita se marcan en  $1.39\mu\text{m}$  ( $\text{H}_2\text{O-OH}$ ),  $2.07\mu\text{m}$  y  $2.16\mu\text{m}$  que resalta en la banda 5 (AlOH) y  $2.31\mu\text{m}$  (banda 8), los picos en el rango  $2.07\mu\text{m}$  y  $2.3\mu\text{m}$  son comunes cuando existe mezcla de la pirofilita con otro mineral, se puede observar en la Tabla 28 el pico que se marca en la firma espectral extraído de la imagen ASTER se encuentra en  $2.15\mu\text{m}$ , la biotita tiene alta absorción entre  $0.8-1.2\mu\text{m}$  formando un valle en la firma espectral además del pico característico en  $2.3\mu\text{m}$ , sin embargo, en la firma espectral extraída de la imagen de la Tabla 28 no es notorio.

### Figura 68.

*Mapa de concentraciones minerales extraídos mediante técnicas de SAM para la zona de Sturgeon. Áreas de interés en recuadros blancos con borde negro.*



En la Figura 68 muestra dispersión en los datos resaltando dos áreas de interés, el A1 al norte del área de estudio que incluye una importante concentración de pirita y en menor proporción clorita, goethita, magnetita y jarosita. Aledaña al área de estudio, hacia el S se encuentra la segunda área, contiene magnetita y en menor proporción biotita, jarosita y pirita y los datos se encuentra dispersos al igual que el área uno.

### 6.2.2.6 Índices TIR

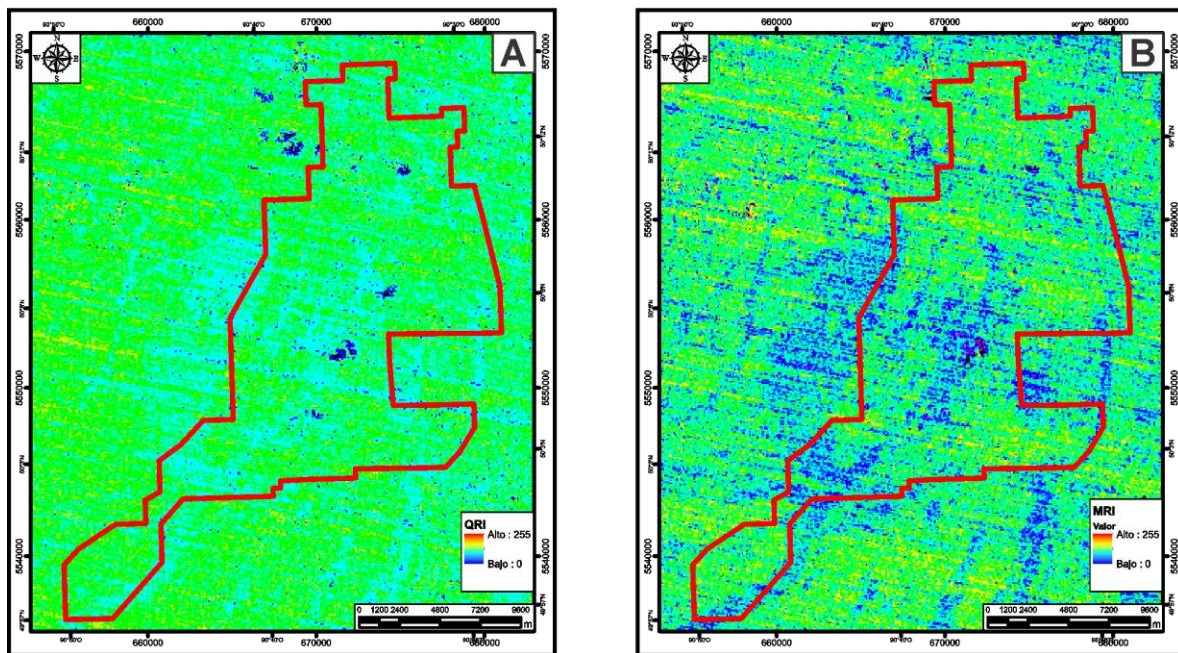
El índice QRI revela el contenido de sílice de la superficie terrestre, sin embargo, en la imagen (Figura 69A) podemos observar que las zonas resaltadas de color rojo se deben a la dispersión de los datos en la imagen y el ruido del sensor por lo que no revelan áreas con alto

contenido de sílice a diferencia del índice MRI (Figura 69B) en donde se observa al NO de la zona de estudio una zona con coloraciones roja y amarillo. La baja respuesta de esta técnica en esta zona se da por la presencia de la vegetación, debido a que los valores de emisividad se ven afectados por las propiedades térmicas de las plantas, ya que parte de la energía solar que reciben es re-emitida para mantener el balance energético (Chuvieco, 2008).

### Figura 69.

*Mapas de los índices de la región del TIR para la zona de Sturgeon a) mapa del QRI en donde los mayores valores son los altos en contenido de sílice b) mapa del MRI en donde los mayores valores resaltan el contenido de máficos.*

## Índices del TIR (QRI y MRI)

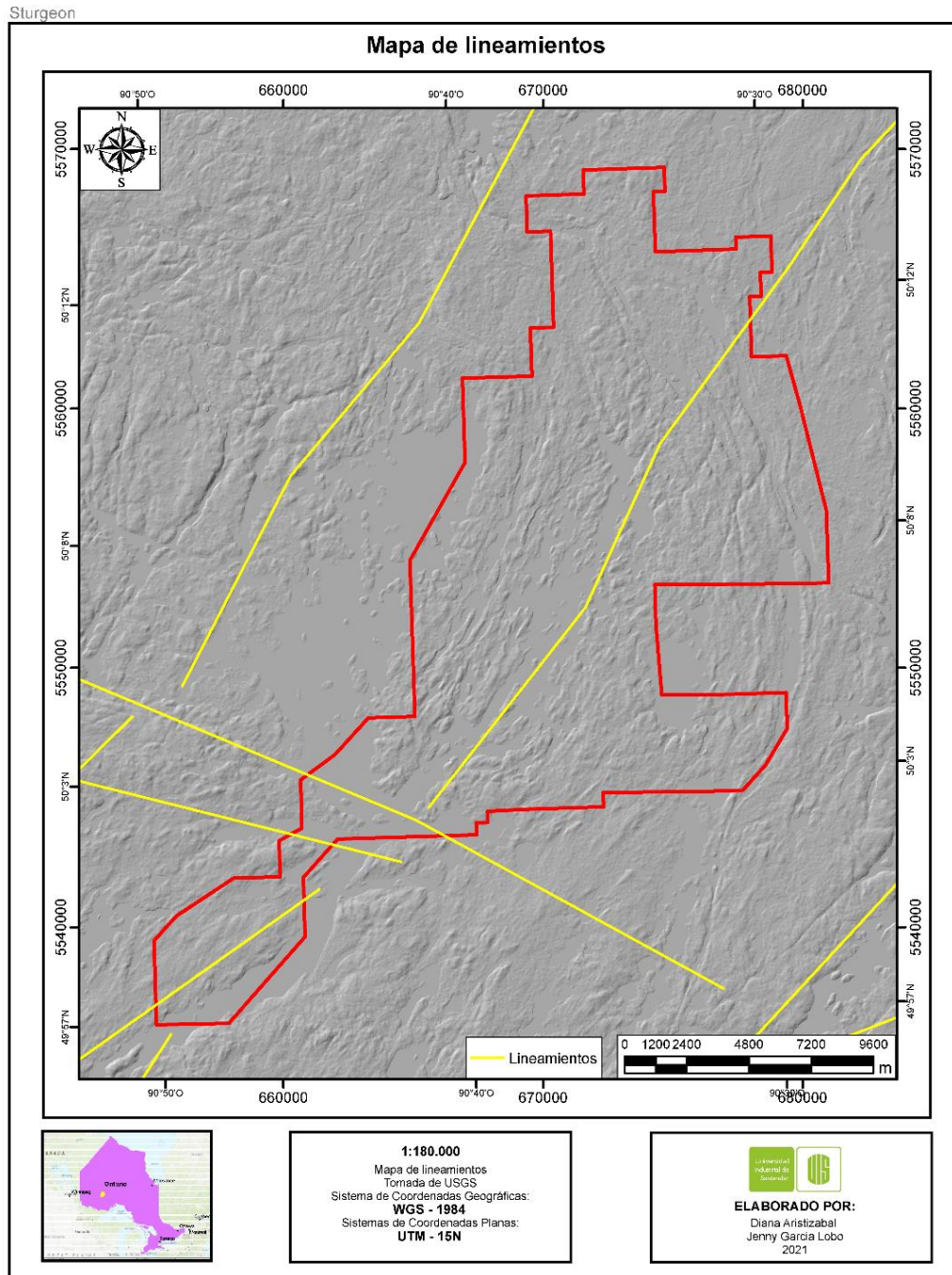


### 6.2.2.7 Rasgos Estructurales

La zona de Sturgeon se caracteriza también por presentar dos tendencias principales, la primera tiene una dirección NE – SO, presentando concordancia con la orientación de los lagos. La segunda se localiza hacia la parte SO de la zona con una orientación NO-SE (Figura 70).

**Figura 70.**

*Mapa de lineamientos de la zona de Sturgeon*



## 7 Análisis

En el presente proyecto se aplicaron cinco técnicas espectrales para la búsqueda de zonas con alteración hidrotermal que pueden estar relacionadas a sistemas mineralizantes, presentando interés para programas exploratorios; dichas técnicas se aplicaron sobre imágenes ASTER. La primera técnica espectral de **combinación de bandas**, sirvió para determinar áreas con alteraciones hidrotermales, minerales arcillosos y óxidos. El segundo método correspondió a **cocientes de bandas**, los cuales establecieron áreas de interés en donde se resaltan alteraciones, grupos minerales específicos entre los cuales están los de las arcillas y óxidos. La tercera técnica fue la de los **índices de Ninomiya**, esta denotó los minerales arcillosos de origen hidrotermal. La técnica de cartografía espectral de **clasificación supervisada SAM** resaltó los minerales propuestos por Thompson & Thompson (1996), teniendo en cuenta el ambiente metalogénico y el tipo depósito descrito en la bibliografía. Los **índices de Guha** aplicados a las bandas del TIR mostraron la composición general, es decir, la tendencia máfico o félsica de las rocas que componen la superficie. Por otra parte, se reconocieron los lineamientos topográficos mediante un procesamiento visual indirecto en las imágenes pre-procesadas de radar obtenidas del satélite Sentinel-1.

La técnica de cartografía espectral SAM normalmente se utiliza para verificar y comparar los resultados obtenidos por las otras técnicas espectrales, con la finalidad de definir más detalladamente la distribución de las alteraciones hidrotermales por medio de los ensambles mineralógicos de (Thomposon *et al.*, 1999). Asimismo, a partir de las cuatro primeras técnicas espectrales se determinaron zonas de interés acorde a los resultados de cada una. Sin embargo, en las áreas de Berens y Sturgeon en la provincia de Ontario se tuvo en cuenta la cartografía de la

vegetación mediante el Índice de Vegetación Normalizada (NDVI) para la corroboración de que los ensambles mineralógicos estén resaltando en cobertera superficial expuesta.

Posteriormente las zonas resultantes de cada técnica fueron correlacionadas para la identificación de targets o posibles áreas prospectivas para exploración mineral, teniendo en cuenta también la información geológica, las estructuras geológicas (lineamientos y fallas), las minas en caso de haberlas y la información metalogénica disponible.

A continuación, se describe el análisis para cada zona de estudio:

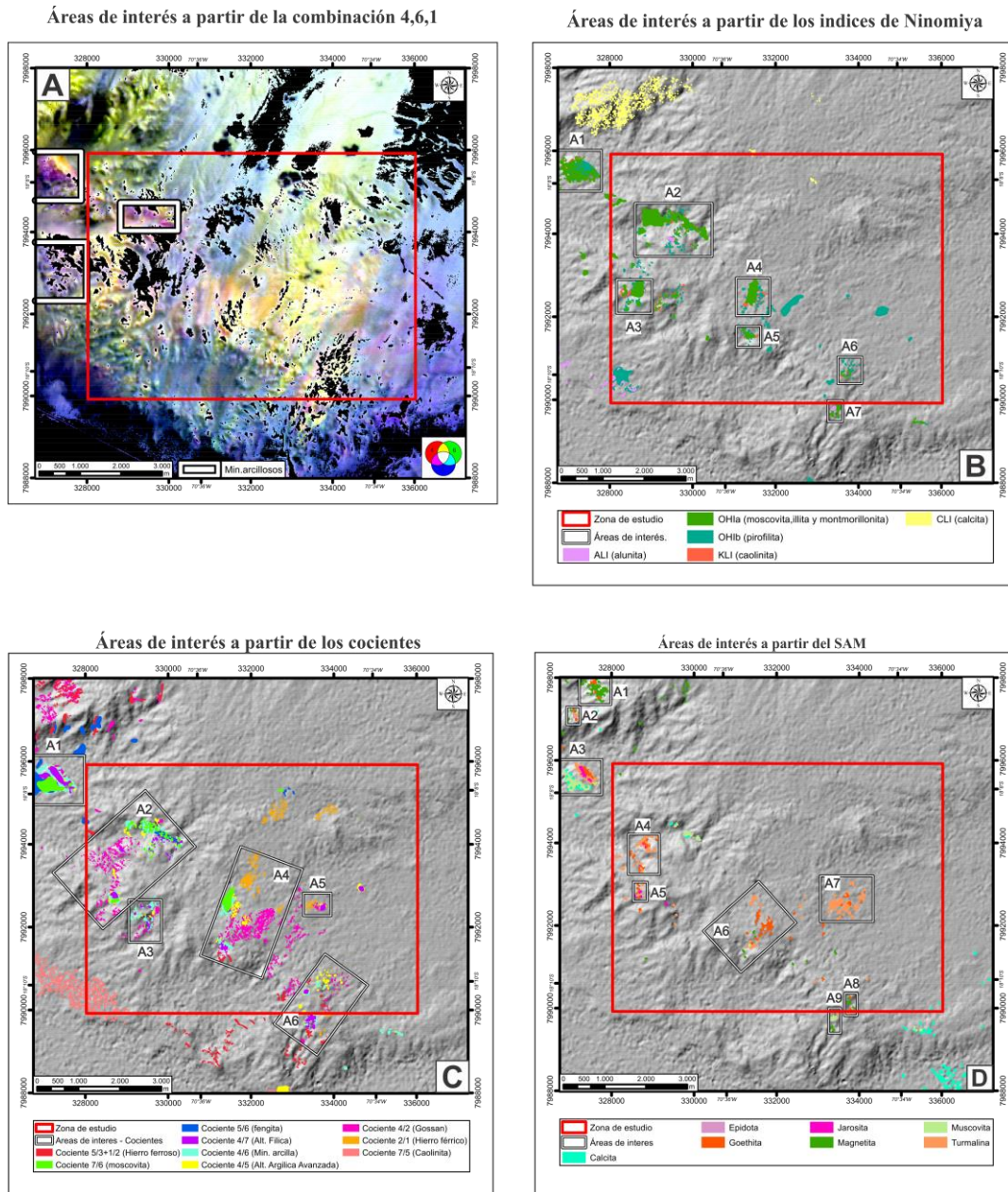
## **7.1 Perú**

### **7.1.1 Tacna**

En la Figura 71 se observa la ubicación de las áreas de interés definidas por las técnicas espectrales usadas en este estudio. La Figura 71A enseña las áreas identificadas a partir de la aplicación de las combinaciones de bandas, la Figura 71B las áreas reconocidas a partir de los cocientes de bandas, la Figura 71C las áreas reconocidas a partir de los índices litológicos de Ninomiya, mientras la Figura 71D denota las áreas expuestas mediante la aplicación del método SAM, el cual permitió reconocer ensambles mineralógicos de óxidos e hidróxidos de Fe (goethita-magnetita- alteración gossan) y minerales arcillosos los cuales pueden estar estrechamente relacionados a depósitos IOCG.

#### **Figura 71.**

*Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) índices de Ninomiya y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Tacna.*



Por otra parte, el reconocimiento de los lineamientos mediante la imagen de Radar permitió establecer una correlación con los resultados obtenidos a partir de la imagen ASTER. Debido a que estos denotan los posibles canales de ascenso para los fluidos mineralizantes.



La zona de estudio se encuentra ubicada al SO de la franja metalogénica VIII, esta franja se encuentra asociada a depósitos de Cu-Fe-Au (IOCG) del Cretácico inferior (Acosta *et al.*, 2009). De manera general, la mineralización en el sector de la Yarada se encuentra asociada a diques de composición diorítica a andesítica de la super unidad Ilo, los cuales son concordantes a la estratificación de las secuencias volcanoclásticas de la Formación Guaneros; denotando una mineralización coetánea a la sedimentación (Bellido & Guevara, 1963). Las características de los targets se encuentran definidas en la Tabla 29.

**Tabla 29.**

*Targets de exploración en la franja metalogenética del Cretácico inferior en la zona de estudio de Tacna.*

Tacna								
Target	Ubicación	Coordenadas		Tipo de Alteración	Ensamble Mineralógico	Geología y Edad	Estructuras Geológicas	Tipo de Target
		X	Y					
1	NO	329487	799493 4	Arcilla		Arenisca fosilífera de la Formación Guaneros (Jsgu_i) del Jurásico Superior (Alteración hidrotermal)	Lineamiento NE-SO	
		330550	799434 7					
		330162	799364 5					
		329099	799423 3					
2	NO	328387	799421 0	Óxidos	Óxidos e hidróxidos de hierro y alteración Gossan	Arenisca fosilífera de la Formación Guaneros (Jsgu_i) del Jurásico Superior (Alteración hidrotermal)	Lineamiento NE-SO	
		329002	799421 0					
		329002	799316 7					
		328387	799316 7					
3	NO	328205	799304 7	Arcilla		Arenisca fosilifera de la Formación Guaneros (Jsgu_i) del Jurásico Superior (Alteración hidrotermal)	Lineamiento NE-SO y NO-SE	IOCG
		329750	799304 7					
		329750	799216 2	Óxidos	Óxidos e hidróxidos de hierro y alteración Gossan			
		328205	799216 2					
4	Al NE del Cerro Los Pabellones	331176	799300 0	Óxidos	Óxidos e hidróxidos de hierro y alteración Gossan	Tobas soldadas de composición riolitica de la Formación Huaylillas (Nmhu) del Neogeno y arenisca fosilifera de la	Lineamiento NE-SO	
		331835	799300 0					

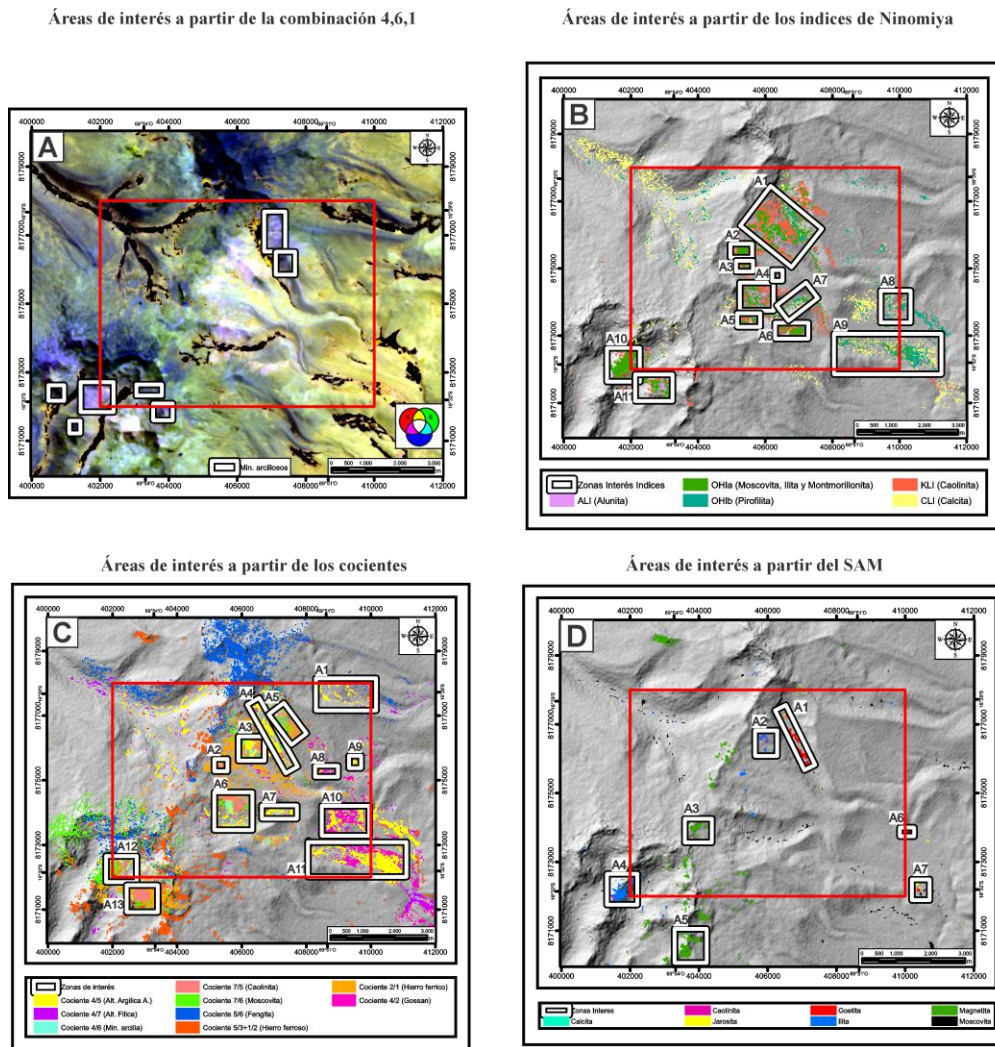
		331835	799209 5	Arcilla		Formación Guaneros (Js- gu_s) del Jurásico Superior	
		331176	799209 5				
		331065	799199 2	Arcilla		Tobas soldadas de composición riolítica de la Formación	
		331716	799199 2				
5	Al NE del Cerro Los Pabellones	7991992	799135 7	Óxidos	Óxidos e hidroxi dos de hierro y alteraci ón Gossan	Huaylillas (Nm- hu) del Neogeno y arenisca fossilifera de la Formación Guaneros (Js- gu_s) del Jurásico Superior	Line ami ento NE- SO
		331065	799135 7				
		333930	798951 6	Arcilla			
		333264	798951 6				
6	SE	333264	799037 2	Óxidos	Óxidos e hidroxi dos de hierro y alteraci ón Gossan	Arenisca fossilifera de la Formación Guaneros (Js- gu_s) del Jurásico Superior	Line ami ento NO- SE
		333930	799037 2				

### 7.1.2 Puno

En la Figura 73A se observa la cartografía de minerales arcillosos por medio de combinación de bandas, en la Figura 73B los zonas de interés de la unión de los cocientes de bandas, la Figura 73C muestra la cartografía por medio de índices de Ninomiya y en la Figura 73D la unión de las áreas mapeadas con la clasificación supervisada SAM. Posterior a esto se correlacionaron entre ellas en base a los ensambles mineralógicos para alteraciones hidrotermales de depósitos epitermales de alta y baja sulfuración propuestos por (Thompson & Thompson, 1996).

**Figura 73.**

Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) índices de Ninomiya y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Puno.

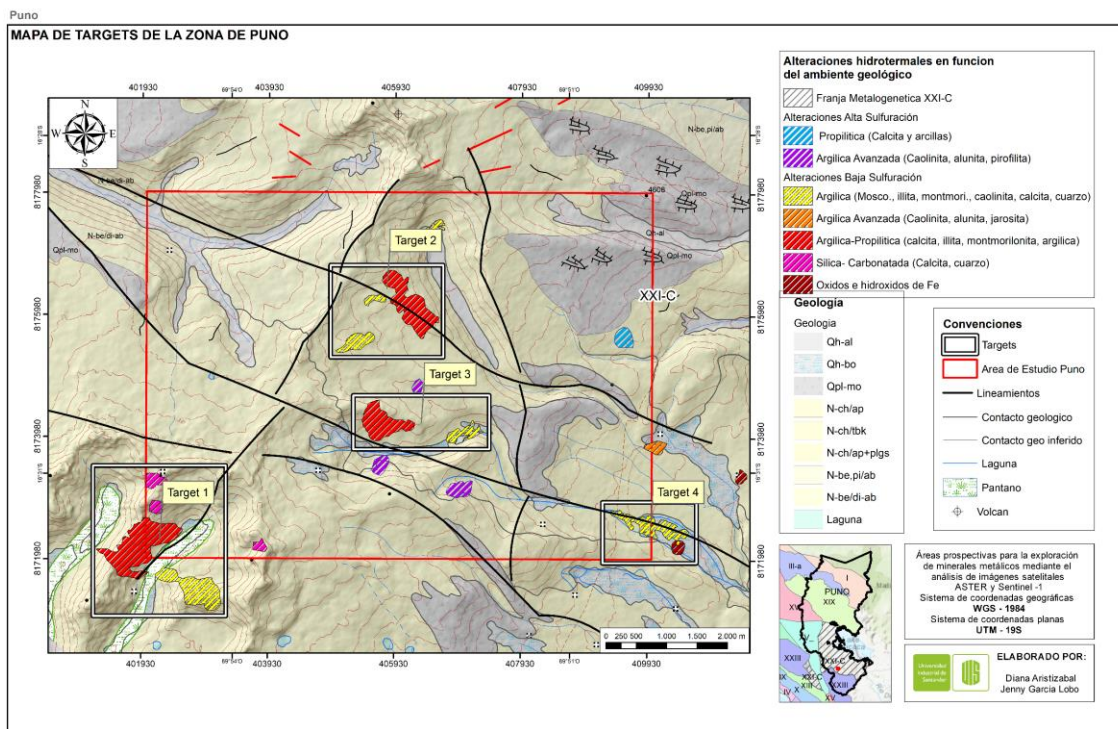


La zona se localiza al sur de la franja metalogénica XXI-C. Según Rivera *et al.* (2005), la franja presenta depósitos de tipo epitermal de alta, baja e intermedia sulfuración. Se presenta una tendencia de baja sulfuración hacia el sur de la franja (Acosta *et al.*, 2009). En la información geológica disponible se registran fallas aledañas a la zona, como el sistema de fallas Cusco, Lagunilla-Mañazo. Se encuentra en un marco tectónico compresivo dado por la subducción, el cual funciona como control de la mineralización (Silliotte & Perelló, 2005). Esto se denota en la

ubicación de las alteraciones hidrotermales, las cuales se encuentran superponiéndose o aledañas a los lineamientos obtenidos de la imagen satelital de Sentinel-1 (Figura 74). La geología aflorante en las áreas de alteración hidrotermal corresponde a rocas de origen volcánico del Plioceno, pertenecientes al Grupo Barroso (Palacios *et al.*, 1993).

**Figura 74.**

*Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio de Puno.*



Para los depósitos epitermales de alta sulfuración se demarcaron la alteración propilítica y argílica avanzada con ensambles mineralógicos de (Calcita + minerales de arcillas) y (Caolinita + alunita + pirofilita) respectivamente. Los ensambles mineralógicos de las alteraciones hidrotermales de los depósitos epitermales de baja sulfuración que se definieron son la alteración argílica con (Moscovita+ illita + montmorillonita + caolinita + calcita + cuarzo), argílica avanzada con (caolinita + alunita + jarosita), propilítica (Calcita + illita + montmorillonita) y silica -

carbonatada con (calcita + cuarzo), además de áreas con óxidos (óxidos de Fe + hidróxidos de Fe + alteración gossan) que se tuvieron en cuenta para mapear los targets. Se encontraron seis áreas de alteración argílica al SO, SE y zona central del área de estudio presentando concordancia con los lineamientos trazados (Figura 74); tres zonas de alteración propilítica que coinciden con sectores de alteración argílica dada por la similitud en los ensambles mineralógicos, debido a esto se mapearon en conjunto. Además, se reconoce un área de alteración argílica avanzada que se encuentra aislada, por lo que no se incluyó en los targets, asimismo sucede con las cuatro zonas de alteraciones hidrotermales de alta sulfuración. Teniendo en cuenta lo anterior, se definieron 4 posibles targets de exploración, sus características se reflejan en la Tabla 30.

**Tabla 30.**

*Targets de exploración en la franja metalogénica en la zona de estudio de Puno.*

Puno								
Targ et	Ubicaci ón	Coordenadas		Tipo de Alteraci ón	Ensamble Mineralógico	Geología y Edad	Estructur as Geológica s	Tipo de Target
		X	Y					
1	SO	40116 2	817350 6	Argílica	Moscovita, illita, montmorilloni ta, caolinita, calcita y cuarzo	Andesita s	Lineamien to NE-SE	Epiterma l de baja sulfuraci ón
		40326 1	817351 5	Argílica avanzada	Caolinita, alunita y jarosita	fanerítica s (N- ch/ap)		
		40327 2	817105 3	Propilític a	Calcita, illita, montmorilloni ta	del Plioceno		
		40117 3	817104 3	Silica- carbonata da	Calcita y cuarzo			
2	N	40491 2	817529 5	Argílica	Moscovita, illita,	Toba rica en	Lineamien to NO-SE	

		40490 5	817680 2		montmorilloni ta, caolinita, calcita y cuarzo	cristales y pómez con abundant es	
		40668 7	817681 0	Propilític a	Calcita, illita, montmorilloni ta	riolitas (N- ch/tbk) del Plioceno	
		40669 4	817530 3				
3	Central	40527 3	817467 0	Argílica	Moscovita, illita, montmorilloni ta, caolinita, calcita y cuarzo	Toba rica en cristales y pómez con abundant es	Lineamien to NO-SE
		40742 4	817468 0				
		40742 7	817379 9	Propilític a	Calcita, illita, montmorilloni ta	riolitas (N- ch/tbk) del Plioceno	
		40527 7	817378 9				
4	SE	40922 3	817293 6	Argílica	Moscovita, illita, montmorilloni ta, caolinita, calcita y cuarzo	Toba rica en cristales y pómez con abundant es	Lineamien to NO-SE
		41070 8	817294 2				
		41071 2	817194 5	Óxidos	Óxidos e hidróxidos de hierros, alt. Gossan	riolitas (N- ch/tbk) y Andesita s fanerítica s (N- ch/ap) del Plioceno	
		40922 7	817193 8				

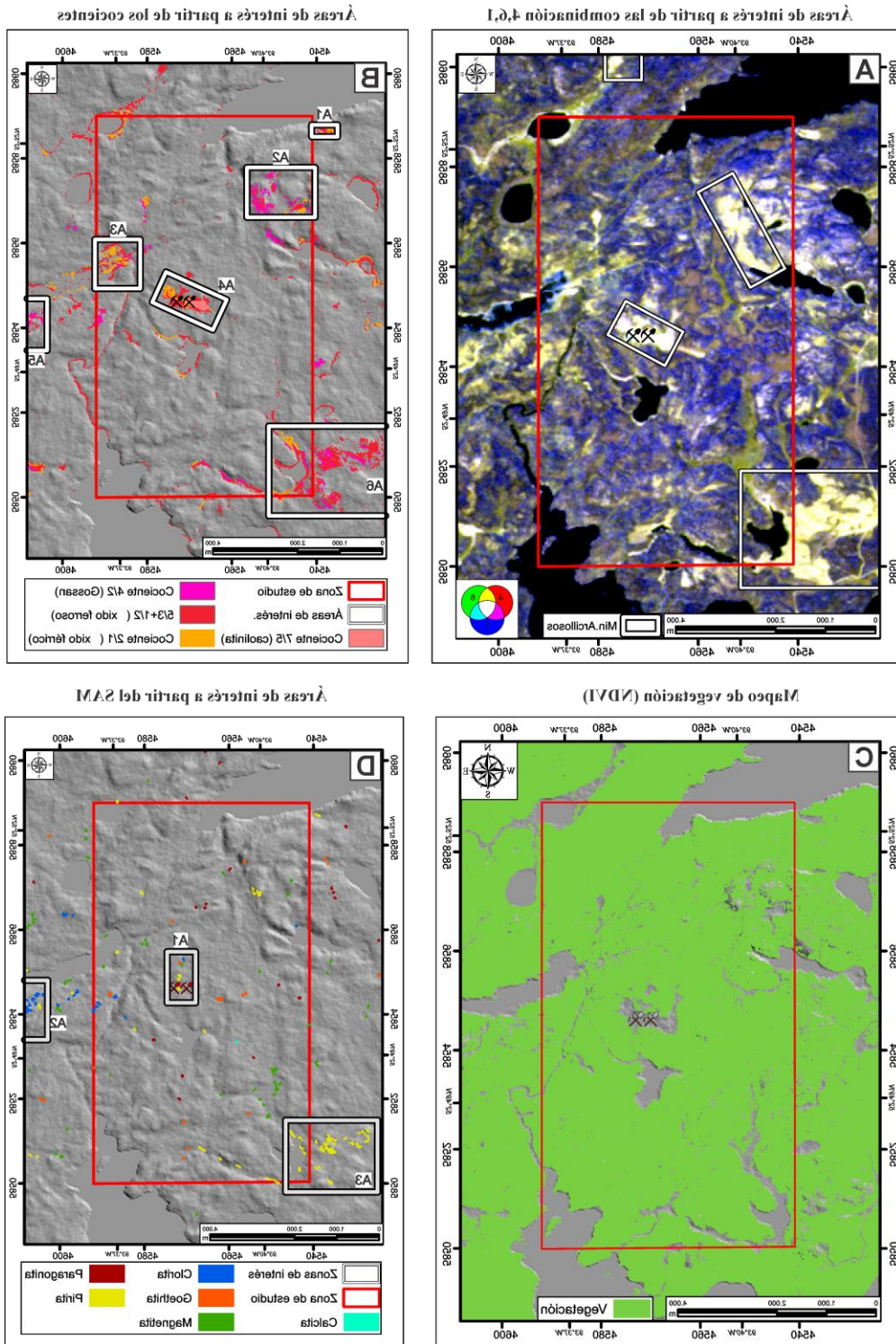
## 7.2 Canadá

### 7.2.1 Berens

En la Figura 75 se visualiza la ubicación de las áreas de interés definidas por las técnicas espectrales usadas en este estudio. La Figura 75A enseña las áreas identificadas a partir de la aplicación de las combinaciones de bandas, la Figura 75B las áreas identificadas a partir de los cocientes de bandas, la Figura 75D denota las áreas expuestas mediante la aplicación del método SAM, con los resultados obtenidos se reconocieron los ensambles mineralógicos de óxidos e hidróxidos de Fe (Goethita+magnetita+alteración gossan posiblemente relacionados genéticamente a depósitos tipo VMS. Además, en la zona se reportan formaciones de hierro bandeado que también pueden estar estrechamente relacionados. En la Figura 75C se observa la superficie correspondiente a la vegetación, esta fue tomada en cuenta para determinar los posibles targets.

#### **Figura 75.**

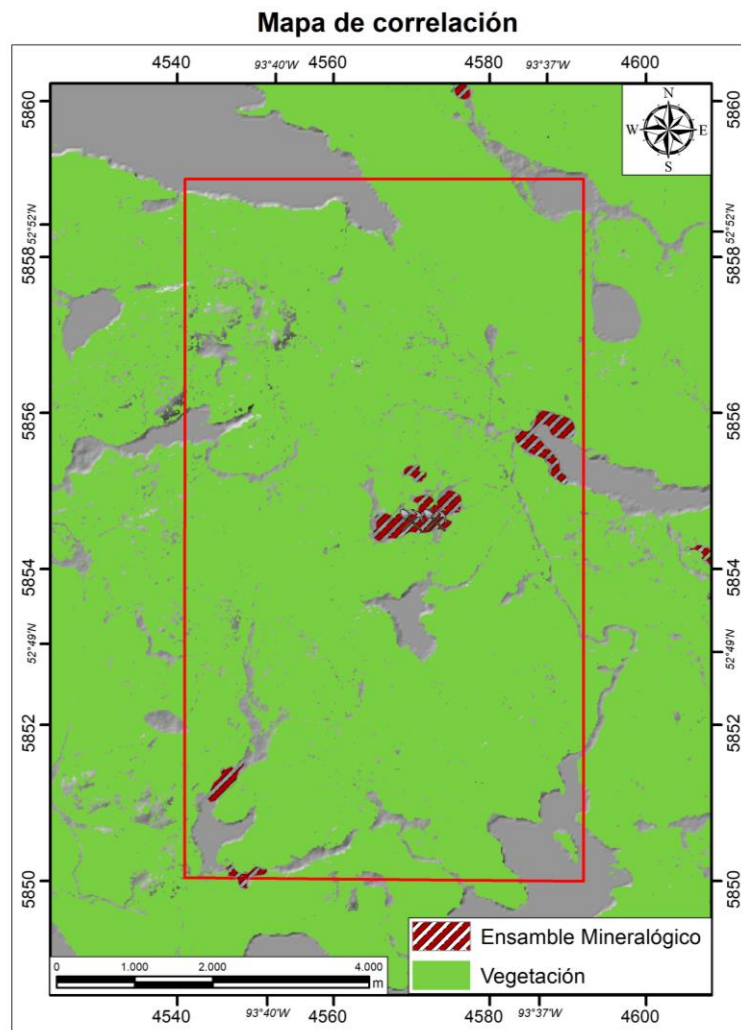
*Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) cartografía de vegetación y D) Cartografía Espectral SAM, aplicadas sobre la zona de estudio de Berens.*



Algunas áreas fueron discriminadas por sobreponerse con áreas vegetadas, ya que la presencia de esta altera los valores de reflectancia que componen las firmas espectrales (Figura 76).

**Figura 76.**

*Correlación de los ensambles mineralógicos con el mapa de vegetación.*

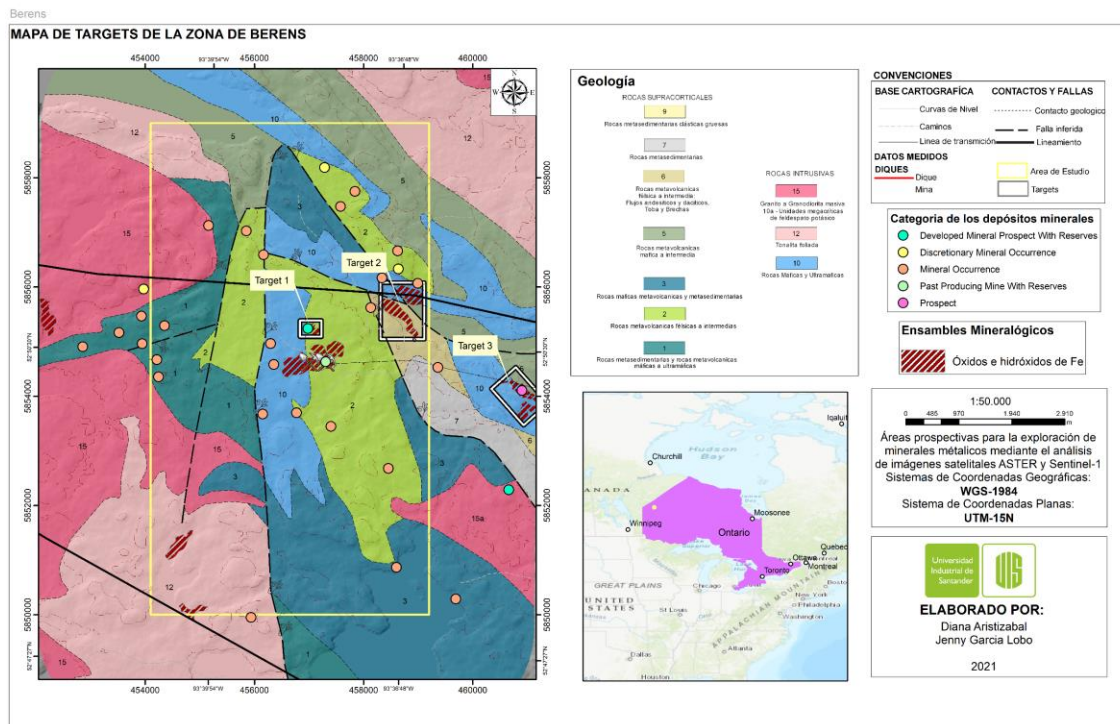


Al interponer todos los resultados obtenidos, tanto por el procesamiento de la imagen ASTER y la determinación de los lineamientos por Sentinel-1, la información geológica,

metalogénica, de minas y estructuras geológicas se establecieron zonas de posibles potenciales sistemas minerales hacia el área central y E del área de estudio (Figura 77).

**Figura 77.**

*Ubicación de targets o áreas de exploración en la zona de estudio de Berens*



La mineralización se encuentra hospedada en rocas metavolcánicas del Cinturón Verde de *Favourable Lake*, asociadas a la secuencia de Caldera descrita por Adams (1976), identificándose dos tipos de mineralizaciones: venas de sulfuros de cuarzo-actinolita y cuerpos estratiformes de pirrotina-pirita, reconocidas en la mina antigua de Berens River. Asimismo, el Servicio Geológico de Ontario (OGS) en su programa de reconocimiento del potencial minero reporta en la zona ocurrencias minerales de metales base (zinc, plomo, cobre, etc) y metales preciosos (oro y plata). Además, presenta un prospecto con reservas relacionado a metales base y molibdeno y un prospecto de oro y zinc. Para esta zona se determinaron tres targets de exploración, sus

características se encuentran definidas en la Tabla 31. El target 1 se correlaciona con el prospecto que cuenta con reservas calculadas y el target 3 al prospecto que todavía no cuenta con reservas.

Berens								
Targ et	Ubicaci ón	Coordenadas		Tipo de Alteraci ón	Ensamble Mineralogi co	Geología y Edad	Estructur as Geologica s	Tipo de Target
		X	Y					
1	Centro de la zona de estudio	45683	58553	Óxidos	Óxidos, hidróxidos de Fe y alt. Gossan	Rocas metavolcáni cas félsicas a intermedias y rocas máficas y ultamáficas del Mesoarcaico	No se encuentra asociado a ninguna estructura	
		3	89					
		45722	58553					
		7	89					
		45722	45722					
7	7							
2	NE de la zona de estudio	45683	58550	Óxidos	Óxidos, hidróxidos de Fe y alt. Gossan	Rocas metavolcáni cas máficas a intermedias y rocas máficas y ultamáficas del Mesoarcaico , también en metavolcáni cas félsicas a intermedias del Neoarcaico. Presencia de dique de orientación NE-SO.	Asociado a dos fallas inferidas NO-SE (contactos geológico s fallados), también al lineamient o O-E.	Formacio nes de hierro bandedo, VMS?
		3	91					
		45830	58560					
		8	79					
		45910	58560					
8	79							
3	Al E de la zona	45910	58550	Óxidos	Óxidos, hidróxidos de Fe y alt. Gossan	Rocas metavolcáni cas máficas a intermedias y rocas máficas y ultamáficas del Mesoarcaico , también en metavolcáni cas félsicas a intermedias del Neoarcaico. Presencia de dique de orientación NE-SO.	Asociado a dos fallas inferidas NO-SE (contactos geológico s fallados), también al lineamient o O-E.	Formacio nes de hierro bandedo, VMS?
		8	46					
		45830	58550					
8	46							
46033	58541	Óxidos	Óxidos, hidróxidos	Rocas metavolcáni	No se encuentra			
8	35							

de estudio	46078 6	58545 32		de Fe y alt. Gossan	cas y rocas máficas y	asociado a ninguna
	46137 6	58538 67	Alteración	Pirita, cuarzo,	ultramáficas del	estructura
	46092 9	58534 70		óxidos de hierro	Mesoarcaico .	

**Tabla 31.**

*Targets de exploración en la zona de estudio de Berens.*

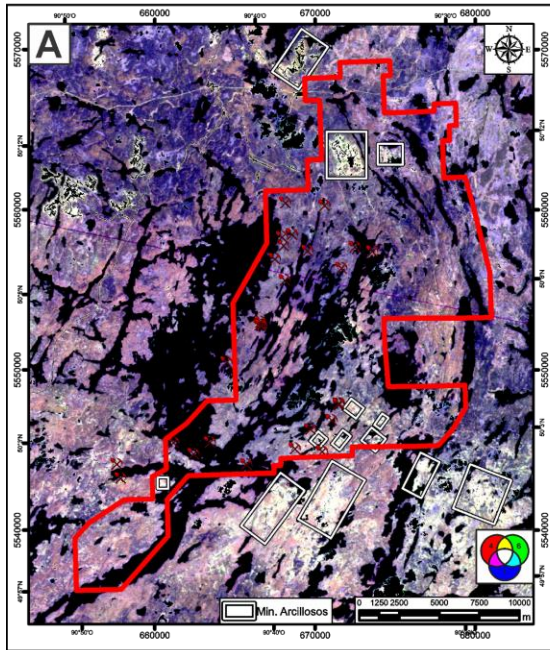
### 7.2.2 Sturgeon

La Figura 78 representa las áreas de interés de las técnicas aplicadas, la Figura 78A muestra la cartografía por combinación de bandas, en la Figura 78B las áreas de interés de la unión de los cocientes de bandas, la Figura 78C la cartografía por clasificación supervisada SAM y la Figura 78D la cartografía de la vegetación mediante el NDVI.

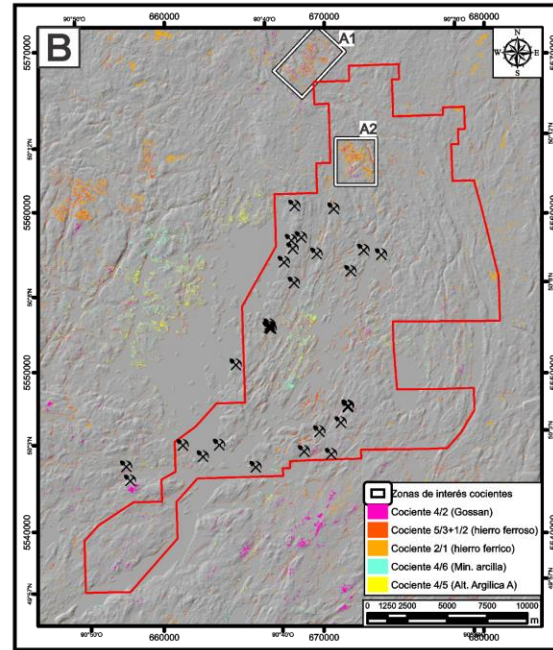
### Figura 78.

*Comparación entre las técnicas espectrales A) Combinaciones de bandas, B) Cocientes de bandas, C) Cartografía Espectral SAM y D) Cartografía de vegetación, aplicadas sobre la zona de estudio de Sturgeon.*

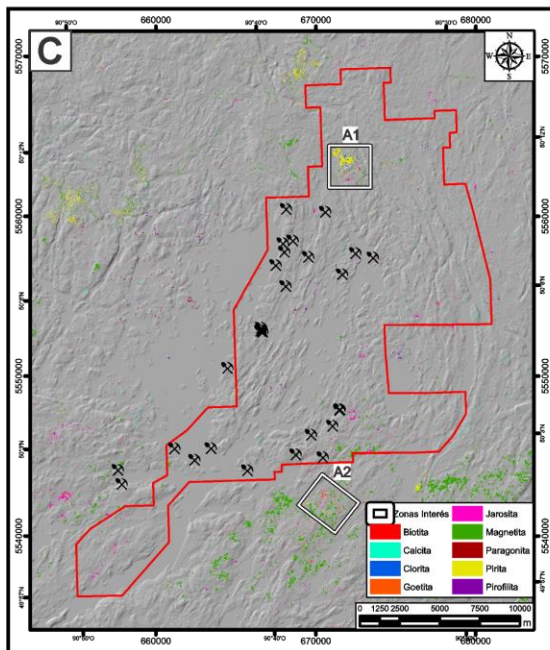
Áreas de interés a partir de la combinación 4,6,1



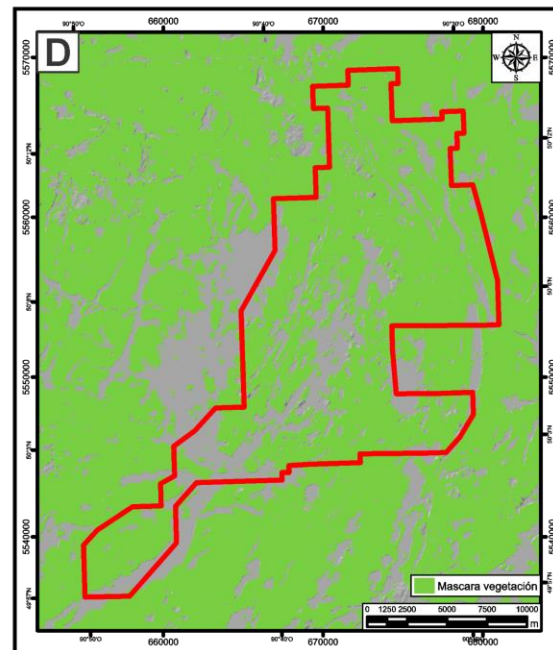
Áreas de interés a partir de los cocientes



Áreas de interés a partir del SAM



Máscara de vegetación

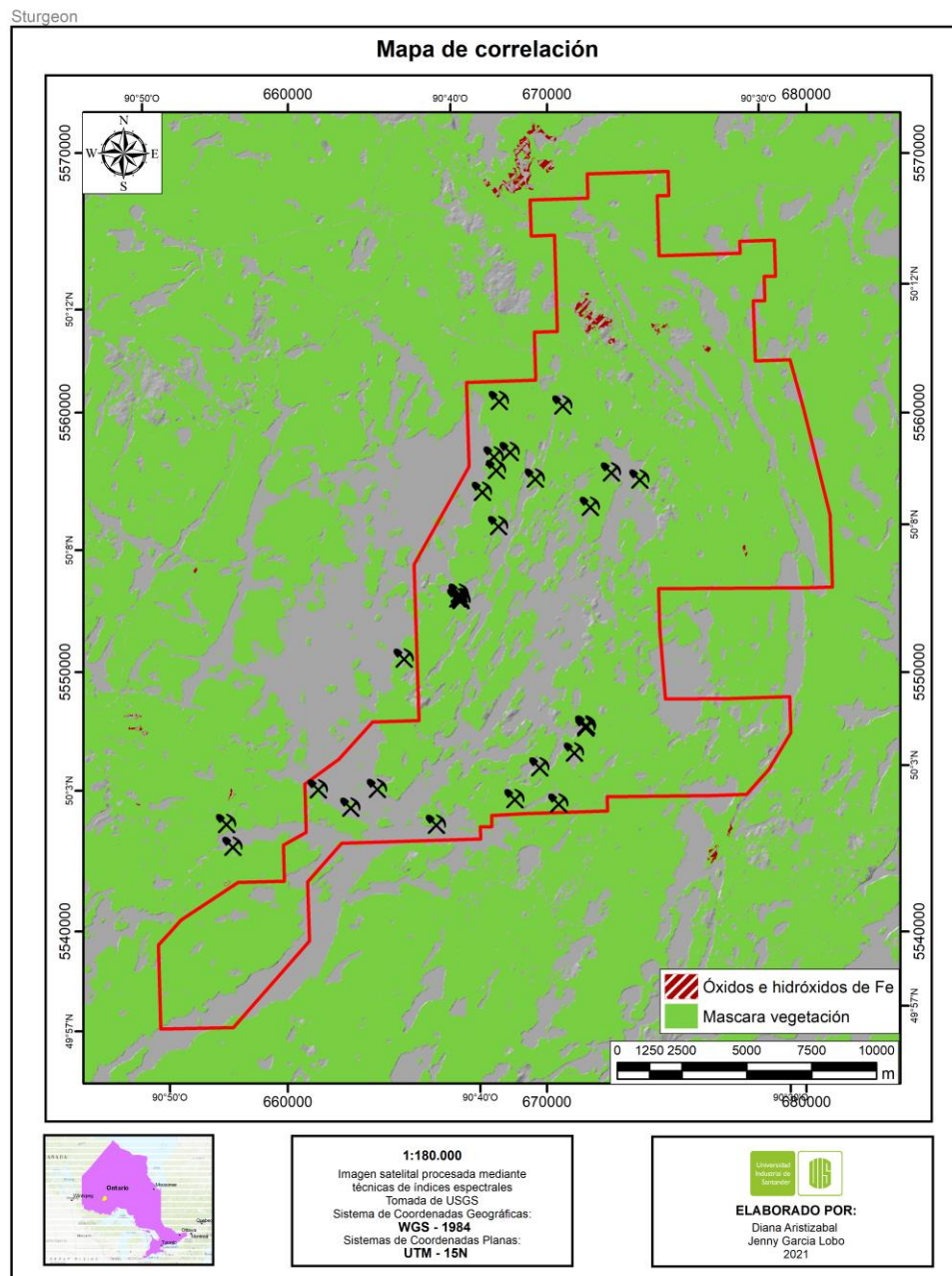


Esta zona se caracteriza por contener depósitos de tipo VMS del Arcaico con diferentes etapas de metasomatismo hidrotermal según (Holk *et al.*, 2008). Teniendo en cuenta el tipo de depósito y los ensambles mineralógicos propuestos por Thompson & Thompson (1996), se utilizó

un ensamble mineralógico para las dos zonas de Canadá, este incluye alteración gossan, óxidos e hidróxidos de hierro, su distribución se observa en la Figura 79.

**Figura 79.**

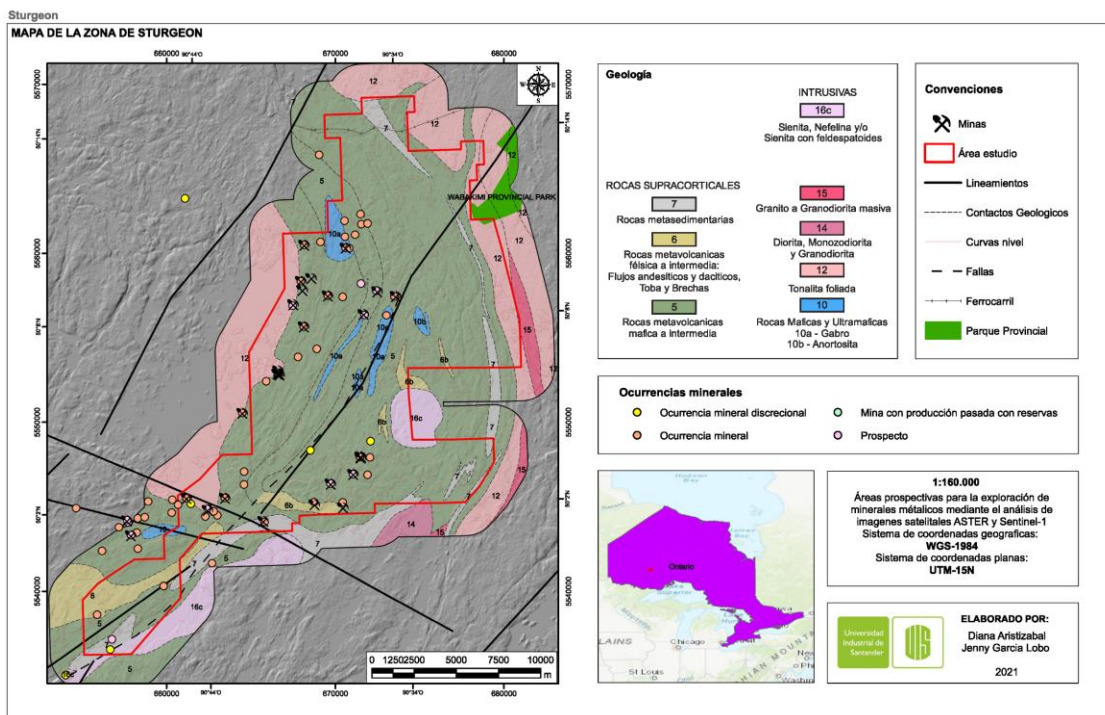
*Correlación de los ensambles mineralógicos con el mapa de vegetación.*



Al hacer la correlación de las áreas marcadas con el ensamble mineralógico en base a las técnicas de cartografía espectral con la superficie cubierta por vegetación en la zona, estas se relacionan como se ve en la Figura 79. Como la vegetación predomina en la zona el sensor va a captar la radiación reflejada por esta, generando que los minerales que se están mapeando como óxidos e hidróxidos de hierro no correspondan a estos minerales, sin embargo, las plantas absorben nutrientes del sustrato, incluidos metales del suelo (Hede *et al.*, 2017); lo cual podría explicar que este resaltando en estos minerales. Por otra parte, la vegetación también presenta características similares a los óxidos de hierro, debido a que los presentan picos de reflectancia en la banda 3 de ASTER, lo cual podría explicar que estén resaltando en estas zonas. Por lo consiguiente, no se determinaron áreas prospectivas.

**Figura 80.**

*Mapa geológico de la zona de Sturgeon con los lineamientos determinados a partir de la imagen de radar Sentinel-1 y las ocurrencias minerales.*



Por otra parte, también se comparó las áreas marcadas como alteraciones, con los lineamientos obtenidos de la imagen de radar y la base de datos del inventario de depósitos minerales del OGS (2018), en donde reportan principalmente oro y de manera secundaria plata, cobre, molibdeno y zinc como ocurrencia mineral y prospectos en las rocas metavolcánicas supracorticales que corresponde a la geología predominante en el área. Sin embargo, no coinciden con los lineamientos, ni con las ocurrencias minerales determinadas por el OSG (Figura 80).

## **8 Discusión**

Las imágenes satelitales son una herramienta muy útil como primera fase de un programa prospectivo, debido a que permiten mapear la zona regionalmente a bajos costos. Se caracterizan por presentar sus mejores resultados en zonas áridas a semiáridas en donde la cobertura superficial o roca se encuentra expuesta y el satélite puede captar la radiación directa del objeto, no obstante, se deben hacer correcciones a la imagen antes de hacer el procesamiento, tanto radiométrica, geométrica y atmosféricamente según el nivel de los datos del satélite a usar.

### **8.1 Perú**

Las zonas de Perú se caracterizan por ubicarse en un ambiente tectónico activo compresivo que favorece procesos de ruptura para el ascenso de fluidos, por lo cual se encuentran asociados diversos tipos de depósitos minerales. Además, se localiza en regiones semiáridas, permitiendo el uso de imágenes satelitales ASTER para el reconocimiento de alteraciones hidrotermales, sin embargo, las imágenes deben ser corregidas atmosféricamente para pasar los valores de radiancia a reflectancia. Para el caso de Puno, al estar a una altura de 4750 m.s.n.m, la incidencia atmosférica es menor, por lo tanto, no fue necesaria la aplicación de máscara de nubosidad, a diferencia de la zona de Tacna en la que al estar a una altura de aproximadamente 250 m.s.n.m fue necesaria la aplicación de máscara de nubes para no obtener análisis erróneos, haciendo uso de la banda 1 para

el enmascaramiento con un umbral de 1.1474 – 1,8395  $\mu\text{m}$ . Además, al localizarse el área de Tacna en la Cordillera de la Costa también presenta influencia marina que genera condiciones atmosféricas no ideales en la calidad de la imagen, ya que materiales atmosféricos no condensados no se resaltan en la generación de las máscaras, también fue necesario enmascarar el agua con un umbral de 0.0769 – 0,7644  $\mu\text{m}$ . Las dos zonas presentan vegetación, las cuales fueron enmascaradas con un umbral de 0.0401 – 0.3825  $\mu\text{m}$  en la zona de Tacna y de 0.1493 – 0.5038  $\mu\text{m}$  en la de Puno.

Las técnicas espectrales presentaron buenos resultados en las áreas de Perú, las combinaciones de bandas (468; 5/6,7/6,7/5; 461; 531; 321 y 4/5,4/6,4/7) permitieron mapear óxidos de Fe, alteraciones hidrotermales y grupos mineralógicos, siendo las combinaciones de bandas (461; 468 5/6,7/6,7/5) las mejores para el reconocimiento de estos. Los cocientes de banda relacionan las bandas en donde los minerales presentan sus picos de absorción y reflectancia permitiendo obtener los mejores resultados en comparación con las otras técnicas, los índices de Ninomiya manejan el principio de matemática de bandas, la misma metodología de los cocientes, esto denota su utilidad para la caracterización de minerales de alteración que presentan sus características espectrales en la región del SWIR por la presencia de los enlaces iónicos OH, H<sub>2</sub>O, AlOH, FeOH, CO<sub>3</sub> y MgOH que son asociados a cada banda. Mientras, la técnica de cartografía espectral SAM, al ser una técnica de clasificación supervisada, necesita valores teóricos de entrada para poder generar la clasificación, esta técnica puede presentar resultados con alto porcentaje de error cuando no se trabaja con la firma espectral de la roca tomada en campo, sino con la firma espectral de una biblioteca espectral (ej:USGS), debido a que estas firmas son teóricas e ideales, lo cual muy pocas veces sucede en campo por los factores físicos, químicos y biológicos que pueden meteorizar la roca. Teniendo esto en cuenta, la respuesta de esta técnica fue baja en las

zonas de estudio y con margen de error, debido a que el ángulo ideal para mapear es de 0.1 radianes, y en algunos casos fue modificado para una mejor respuesta. Por lo tanto, la técnica no puede validar las áreas obtenidas por las otras técnicas, ni ensambles mineralógicos cuando se usan firmas espectrales de bibliotecas espectrales. Además, los picos de absorción no siempre coincidieron en toda la firma espectral, pero si mantiene la tendencia.

No obstante, al correlacionarse los resultados de todas las técnicas se establecieron áreas de ensambles mineralógicos asociados al modelo genético de los depósitos minerales correspondiente en cada zona, IOCG para Tacna y Epitermales de baja sulfuración en Puno. Los resultados se dieron con mayor certeza en la zona de Puno debido a sus condiciones geográficas y tipo de depósito mineral, ya que las técnicas utilizadas son enfocadas a estos.

Las bandas perteneciente al infrarrojo termal adquieren datos de emisividad, es decir la energía infrarroja emitida directamente de la superficie terrestre, teniendo en cuenta los rasgos de absorción y los picos de emisividad en esta región del espectro se aplicaron los índices de Guha & Kumar (2016), para la cartografía del carácter litológico de la superficie terrestre, el alto contenido de sílice o su ausencia asociada a rocas con carácter máfico, estos índices fueron de utilidad, sin embargo la información es de carácter general debido a la resolución espacial (90m) de esta paquete de bandas, además que no se realizó cartografía de minerales o grupos mineralógicos específicos.

La caracterización de los lineamientos se hizo en base a las imágenes de radar procesadas del satélite Sentinel-1, estas adquieren datos directos de la superficie por lo que son de utilidad para estudios geomorfológicos debido a que resaltan diferentes características del terreno al recibir radiación polarizada plana en distintas direcciones. Para la cartografía de los lineamientos se tuvo en cuenta la información geomorfológica aportada por la imagen (sierras alineadas, lineamientos,

cambios abruptos en la red de drenajes y geoformas asociadas fallas) y la información geológica e hidrogeológica, permitiendo definir lineamientos en dos tendencias principales NE-SO y NO-SE.

Todos los resultados obtenidos por medio del procesamiento de las imágenes satelitales ASTER y Sentinel-1 se correlacionaron con el objetivo de identificar los targets o posibles áreas de exploración mineral, teniendo en cuenta también la información metalogenética de las franjas, encontrándose 6 targets para la zona de Tacna asociadas posiblemente a depósitos tipo IOCG y 4 targets para la zona de Puno en un ambiente epitermal de baja sulfuración.

## **8.2 Canadá**

Las áreas de Canadá al localizarse en el Escudo Canadiense presentan una mayor complejidad por los diversos procesos que ha sufrido, por lo que en una zona se pueden encontrar diversos tipos de depósitos minerales. Además, de que al ubicarse al norte presenta vegetación de tipo boreal (coníferas, pinos, abetos y alerces) los cuales no permiten realizar una identificación directa de la cobertera superficial, a menos de que las zonas se encuentren destapadas como los bordes de los lagos, carreteras, etc. En las zonas de Canadá fue necesario realizar enmascaramientos de los cuerpos de agua con un umbral de 0,1471 – 0,8465 en la zona de Berens y 0.1504 – 0,7932 en la zona de Sturgeon para evitar mezcla de pixeles y datos erróneos. Además del enmascaramiento de nubes con un umbral de 1.3444 – 6,2547.

La aplicación de las técnicas espectrales presentan una baja respuestas en las zonas vegetadas, y solo se tendrán valores sin mezcla de pixel en las áreas descubiertas se observó que los minerales que presentan sus características espectrales en las bandas del subsistema del SWIR (Al(OH), Fe(OH), Mg(OH) y CO<sub>3</sub>) presentan una respuesta casi nula a nula mediante estas técnicas. Mientras, el subsistema del VNIR presenta una mejor respuesta, esto se debe a que en la región del VNIR, específicamente en la banda del infrarrojo (banda 3 de ASTER) la vegetación

presenta una alta reflectancia debido a la presencia de la clorofila. Por consiguientes, las mejores combinaciones de banda son las que utilizan los canales del VNIR (banda 1,2 y 3) para la identificación de óxidos de hierro, de igual forma con los cocientes de banda ( $5/3+1/2$ ,  $2/1$  y  $4/2$ ) que resaltan los óxidos de hierro y alteración gossan son los que mejor respuesta obtuvieron. Los índices de Ninomiya no permitieron su reconocimiento debido a la dispersión de los datos. Los minerales utilizados para la técnica SAM se escogieron teniendo en cuenta el tipo de depósito reportado en las zonas, al igual que en las áreas de Perú se utilizó la firma espectral del USGS para la comparación de firmas. La pirita y la magnetita fueron los minerales con mejor respuesta en estas áreas, resaltándose principalmente en áreas sin vegetación, como bordes de lagos y carreteras.

Los Índices de Guha & Kumar (2016), que se aplicaron en las bandas del subsistema del infrarrojo termal no mostraron una respuesta clara en las áreas de Canadá, ya que presentaron dispersión en los datos que componen la imagen resultante, creando un efecto de textura salpimentada, dada por la presencia de vegetación que altera los valores de emisividad debido a las propiedades térmicas de estas que re-emiten la energía captada.

Los lineamientos regionales obtenidos por las imágenes de radar en Berens muestran una tendencia EO. En Sturgeon se reconocen dos direcciones, una NE-SO y NO-SE, la información tenida en cuenta es la misma que en Perú; sin embargo, se hizo énfasis en la dirección marcada de los lagos que cubren el área.

Para la corroboración de las zonas en donde se ubicaron el ensamble mineralógico propuesto en las zonas (óxidos e hidróxidos de Fe), se generó un mapa de vegetación mediante el NDVI, con un umbral de 0.00170 a 0.3493 en la zona de Berens y de 0.0014 a 0.4278 en la zona de Sturgeon, denotando una vegetación sana en las áreas, el NDVI permite determinar el estado

de la vegetación y que tan vigorosa es (Chuvieco, 2008). Además, a partir de 1.4 micrómetros el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el SWIR (Chuvieco, 2008); explicando la baja respuesta de las zonas en este subsistema. Para la determinación de la afectación que puede presentar la vegetación a la presencia de metales es necesario hacerse estudios de geobotánica.

Posterior a la revisión de la correlación con el índice de vegetación, las áreas de ensambles mineralógicos que se correlacionaban con la vegetación no fueron tenidos en cuenta en la cartografía de targets, ya que la presencia de la vegetación altera el resultado de las técnicas aplicadas, por lo consiguiente, en la zona de Sturgeon no se mapearon targets. En la zona de Berens se determinaron tres targets para zonas prospectivas los cuales presentan concordancia con la información expuesta por el Servicio Geológico de Ontario para la categoría de depósitos minerales.

En las zonas de Canadá los datos del inventario de depósitos minerales son bastante completos a diferencia de los encontrados para las áreas de Perú, enmarcando la diferencia entre zonas de proyectos greenfield y brownfield.

## **9 Conclusiones**

La aplicación de las técnicas espectrales de composiciones de falso color RGB, matemáticas de banda, índices de Ninomiya y la cartografía espectral SAM, permitieron identificar áreas, con potencial para exploración de depósitos metálicos. En las zonas de estudio de Tacna se reconocieron seis targets para la exploración de posibles depósitos IOCG, la zona de Puno, cuatro targets para depósitos epitermales de baja sulfuración, presentando correlación con el ambiente metalogénico expuesto en las franjas metalogénicas del INGEMMET. En las zonas de Canadá se resaltan tres áreas prospectivas para Berens, para depósitos tipo VMS, estas presentan

correlación con los datos de minas conocidas y prospectos minerales del inventario de depósitos minerales del OGS en áreas sin cubierta vegetal y a las orillas de los lagos. En Sturgeon no se delimitaron targets asociados a las alteraciones, debido que estas coinciden con zonas vegetadas, además, no se correlacionan con lineamientos y ocurrencias minerales (Tabla 32).

**Tabla 32.**

*Tabla de resumen de los posibles targets en las zonas de estudio.*

Área	Número de Targets Identificados	Tipos de Depósitos Potenciales	Correspondencia
Tacna	6	IOCG	Con el ambiente metalogenético de la franja VIII
Puno	4	Epitermales de baja Sulfuración	Con el ambiente metalogenético de la franja XXI-C
Berens	3	VMS	Datos de minas y prospectos del OGS
Sturgeon	No se delimitaron targets, zonas con alta vegetación y sin correlación con los lineamientos		

La utilización de imágenes multiespectrales ASTER permitió el reconocimiento de alteraciones hidrotermales, presentando sus mejores resultados en las combinaciones de bandas 4,6,8; 4,6,1 y 5/6,7/6,7/5; mientras los cocientes de banda y los índices de Ninomiya al relacionar los picos de absorción y reflectancia, permitieron el reconocimiento de grupos mineralógicos asociados a alteraciones hidrotermales, presentando mejor respuesta en el subsistema SWIR, cuando es usado en áreas con poca presencia de vegetación como las zonas de Perú, contrario a las zonas de Canadá en donde la mayor respuesta está en las bandas del subsistema VNIR en los que se resalta óxidos de Fe, esto se correlaciona a la presencia de la vegetación que de igual forma tiene su pico de reflectancia característico en la banda del infrarrojo (banda 3 de ASTER). Los

cocientes de banda que utilizan las bandas del SWIR (4 a 9 de ASTER) y los índices de Ninomiya no tuvieron una respuesta favorable en Canadá, por lo consiguiente no fueron una técnica determinativa en la cartografía de alteraciones hidrotermales.

La clasificación supervisada SAM permitió la identificación de minerales mediante la comparación de la firma espectral de la imagen y la de la biblioteca espectral de la USGS, sin embargo, al no utilizarse una firma espectral tomada de muestras de roca de las zonas, se tiene un mayor margen de error en el ángulo espectral, debido a que las firmas de los minerales de la USGS son ideales, y no representan las condiciones espectrales de las rocas de las zonas.

Las zonas de Canadá presentaron respuesta a las técnicas espectrales principalmente en las áreas descubiertas, como los bordes de lagos, carretera y caminos, resaltando mejor las bandas del VNIR para la cartografía de óxidos debido a que la vegetación muestra fuerte absorción en la banda del rojo (banda 2 de ASTER) y alta reflectancia en la banda del infrarrojo cercano (banda 3 de ASTER), por la presencia de la clorofila.

Los índices de Guha & Kumar utilizados para la caracterización litológica de rocas con alto contenido de sílice presentan en la región del TIR alta emisividad en la banda 13 y 14 de ASTER y baja emisividad en la banda 10 y 12, mientras la tendencia máfica es el inverso a este, denotando una mejor respuesta en las áreas no vegetadas de Perú, debido que en las zonas de Canadá la cobertura vegetal altera los datos de emisividad que permiten diferenciar el carácter de las rocas, presentando dispersión en los resultados.

Por medio de imágenes de Radar se trazaron lineamientos regionales producto de las estructuras. En la zona de Tacna se reconocieron lineamientos con una dirección principal paralela a la línea de costa marcada por la zona de subducción (NO-SE) y otros perpendiculares a los anteriores (NE-SO). Mientras, en la zona de Puno las direcciones de los lineamientos siguen la

misma tendencia principal, además de lineamientos NS. En el área de Berens se distinguieron dos direcciones de lineamientos EO y NO-SE, mientras en el área de Sturgeon lineamientos principales NE-SO y secundarios NOO-SEE. Los lineamientos se correlacionaron con los resultados obtenidos del tratamiento espectral para la demarcación de las áreas prospectivas para posibles sistemas mineralizantes.

**Tabla 33.**

*Tabla resumen de los lineamientos determinados en las zonas de estudio.*

Área	Orientación de los Lineamientos Principales	Orientación de los Lineamientos Secundarios
Tacna	NO-SE	NE-SO
Puno	NO-SE	N-S
Berens	NO-SE	E-O
Sturgeon	NE-SO	NOO-SEE

El índice de vegetación NDVI fue utilizado como método de discriminación para la cartografía de targets en las dos áreas de estudio de Canadá. En Berens algunas de las alteraciones mapeadas por medio de las técnicas espectrales ya mencionadas, se encontraron en los bordes de los ríos y zonas sin vegetación, presentando relación con los lineamientos y ocurrencias minerales, prospectos o antiguas minas, por lo que se clasificaron como targets. A diferencia de Sturgeon, en donde las alteraciones mapeadas se encontraron sobre áreas vegetadas y no se relacionan con los lineamientos, ni con los datos del inventario mineral del OGS (2018).

La información geológica presentó relación con los minerales y las alteraciones mapeadas por las diferentes técnicas, asimismo, con la información metalogénica de las franjas (Perú) y la base de datos del inventario de depósitos minerales (Canadá), los cuales permitieron correlacionar la información obtenida y determinar las posibles áreas de potenciales sistemas minerales. No

obstante, en la zona de Sturgeon las alteraciones no presentaron correlación con las ocurrencias mineralógicas y prospectos.

## 10 Recomendaciones

Este método de reconocimiento de zonas con minerales de alteración hidrotermal partir de imágenes satelitales ASTER, es cualitativo, por lo tanto, no invalida ni reemplaza el trabajo de campo, por lo que se recomienda verificar las áreas determinadas como posibles sistemas mineralizantes mediante la cartografía de las alteraciones hidrotermales y la toma de varias firmas espectrales en rocas de afloramientos con un espectrómetro de reflectancia (ej: Terraspec).

Validar las anomalías espectrales determinadas en cada zona con análisis geoquímico como muestreo de sedimentos activos, suelo y roca; también estudios geofísicos de acuerdo al tipo de depósito mineral asociado en cada zona, para los depósitos epitermales se utilizan polarización inducida, resistividad y electromagnetismo, para tipo IOCG, gravimetría y magnetometría, estos mismo funcionan para depósitos VMS.

Realizar estudios geobotánicos para determinar si la vegetación refleja o presenta anomalías correlacionables a los targets determinados en este estudio para la zona de Berens, Canadá.

Para la validación de la técnica espectral SAM (Spectral Angle Mapper) se recomienda la recopilación de firma espectrales de rocas de afloramiento mediante un Terraspec para la creación de bibliotecas espectrales de cada zona. Asimismo, verificarla mediante otros métodos de clasificación supervisada para cartografía espectral como el SID (Spectral Information Divergence), LSU (Linear Spectral Unmixing) o el MTFM (Mixture Tuned Matched Filtering) con el objetivo de corroborar los resultados obtenidos.

**Referencias Bibliográficas**

- Abrams, M., Hook, S.J. (1995). Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33, 692–699.
- Acosta Ale, Quispe C., Santisteban A., Acosta P. (2008). Épocas metalogenéticas y tipos de yacimientos metálicos en la margen occidental del sur del Perú: Latitudes 14°S-18°S. Congreso Peruano de Geología N14, Congreso Latinoamericas de Geología N13.
- Acosta Ale, J. G., Rivera Cornejo, R., Valencia Muñoz, M. M., Chirif Rivera, L. H., Huanacuni Mamani, D., Rodríguez Morante, I., & Santisteban Angeldonis, A. (2009). Mapa Metalogenético del Perú 2009: Memoria.
- Acosta, J., Rodríguez, I., Valencia, M., & Flores, A. (2011). Memoria sobre la geología económica de la Región Puno.
- Acosta, H.; Mamani, M.; Alván, A.; Rodríguez, J. & Cutipa, M. (2012). Geología de los cuadrángulos de La Yarada (37-u), Tacna (37-v) y Huaylillas (37-x). INGEMMET. Boletín, Serie A: Carta Geológica Nacional, 145, 112p.
- Acosta J. y Rivera R. et. al (2020) Memoria del mapa metalogénico del Perú. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).
- Adams, G.D. (1976). Precious metal veins of the Berens River Mine, northwestern Ontario; unpublished MSc thesis, University of Western Ontario, London, Ontario, 114p.
- Alejandro, V.; Sempere, T. & Jacay, J. (2006). Aspectos estratigráficos y petrográficos del volcanismo jurásico de la costa sur peruana (departamentos de Moquegua y Tacna). *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 9(18): 44-63.

- Aminov Javhar *et al.* (2019). Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and Radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir, *Remote Sensing*, 11, 778.
- Ayers, L.D. (1970). Setting Net Area, District of Kenora (Patricia Portion), Ontario Department of Mines, Preliminary Geological Map No. P.538 (revised), Scale 1 inch to 1<sup>a</sup> mile. *Geology* 1968 and 1969. Re-issued 1970 with additional geology.
- Ayers, L.D. (1977). Importance of stratigraphy in early Precambrian volcanic terranes: cyclic volcanism at Setting Net Lake, northwestern Ontario; in *Volcanic regimes in Canada*, Geological Association of Canada, Special Paper 16, p.243-264.
- Azcurra, D., Castro, S., Kaku, M. A. N. A. B. U., Kohno, I., & Marin, G. R. A. C. I. E. L. A. (2003). Procesamiento y productos ASTER del área de sierra de Famatina, Provincia de la Rioja, República Argentina. *Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil. INPE*, 815-822.
- Bateman, J.D. (1939). Recent developments in the Favourable Lake Area; Ontario Department of Mines, Annual Report 1938, v.47, p.7, p.72-92.
- Bellido, E. & Guevara, C. (1963) - Geología de los cuadrángulos de Punta de Bombón y Clemesí, Hojas 35-s, 35-t. Comisión Carta Geológica Nacional, 5, 92 p.
- Box, K. (2013, October). Using multispectral data to target potentially gold-bearing conglomerates in the marble bar basin, western Australia. In 2013 GSA Annual Meeting in Denver.
- Braun A., (2020) SAR- based landcover classification with Sentinel-1 GRD products, Sentinel-1 Toolbox.
- Bravo, Nino. (2017). Teledetección Espacial Lansat, Sentinel2, Aster L1T y Modis. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

- Brown, P.A.R. (1988). Noramco Explorations Inc., Zahavy Project, Exploration Summary, 1987/88, Surface and Underground Programs, 29p.
- Caiza E. (2018). Estimación de zonas de alteración hidrotermal mediante interpretación de imágenes satelitales tipo ASTER y uso del equipo Terraspec en la zona oriental de cerro de pasco, Perú. Universidad central del Ecuador.
- Carlotto, V., Jaillard, E., Carlier, G., Cárdenas, J., Cerpa, L., Flores, T., Latorre, O. & Ibarra, I. (2005). Las cuencas terciarias sinorogénicas en el Altiplano y la Cordillera Occidental del sur del Perú. In: Arce, J., ed. Alberto Giesecke Matto, Soc. Geol. Perú, Lima, Vol. Especial 6, 103-126.
- Carlotto V. et. al (2009). Dominios geotectónicos y metalogénesis del Peru. Bol. Soc. Geol. Peru 103: 1-89.
- Carranza, E. J. M., & Hale, M. (2002). Mineral imaging with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrane. International journal of remote sensing, 23(22), 4827-4852.
- Cerrón Z. y Valdivia F. (2001) Memoria explicativa del cuadrángulo de Mazo Cruz 34-x. Instituto geológico Minero y Metalúrgico INGEMMET, Dirección de geología regional.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial (No. 526.982 C564 1996). Ediciones Rialp.
- Chuvieco S. E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (No. 528.8 CHU).
- Coates M. E. (1967) Black Sturgeon are, District of Thunder Bay. Temporary staff geologist, Ontario Department of Mines.

- Crósta, A. P., Ducart, D. F., Souza Filho, C. R., Azevedo, F., & Brodie, C. (2009). Mineral exploration for epithermal gold in Northern Patagonia, Argentina; From Regional-to deposit-scale prospecting using Landsat TM and Terra ASTER. *Reviews in Economic Geology*, 16, 97-108.
- Cruz, E. (2008). Espectrometría de reflectancia (SWIR), aplicada para mapeo de alteración, Proyecto La India. Distrito minero Mulatos. p: 42-43.
- Dong, P., & Chen, Q. (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. CRC Press.
- Dube B, Koopman ER, Franklin JM, Poulsen KH, Patterson MR (1989) Preliminary study of the stratigraphic and structural controls of the Lyon Lake massive sulphide deposit, Wabigoon Subprovince, northwestern Ontario. Current research, part C, paper 89–1C. Geological Survey of Canada, Canada, pp 275–284
- Düzgün, H. S., & Demirel, N. (2011). *Remote sensing of the mine environment*. CRC Press.
- El Atillah,A.,El Morjani,Z. & Souhassou,M. (2019). Use of the Sentinel-2A Multispectral Image for Litho-Structural and Alteration Mapping in Al Glo'a Map Sheet (1/50,000) (Bou Azzer–El Graara Inlier, Central Anti-Atlas, Morocco). *Artificial Satellites*,54(3) 73-96. <https://doi.org/10.2478/arsa-2019-0007>
- European Space Agency- ESA, (2016). User guides – Sentinel-1 SAR – Sentinel online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- Exelis Visual Information Solutions, ENVI, (2004). ENVI User's Guide Version 4.1; Exelis Visual Information Solutions: Porter, CO, USA.
- Exelis Visual Information Solutions, ENVI, (2009). Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide; Exelis Visual Information Solutions: Porter, CO, USA.

- Filipponi, F. (2019). Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, Vol. 18, No. 1, p. 11.
- Foumelis, M., *et al.* (2018). ESA SNAP-StaMPS integrated processing for Sentinel-1 persistent scatterer interferometry. In *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364-1367). IEEE.
- Gabr, S., Ghulam, A., & Kusky, T. (2010). Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 38(1-2), 59-69.
- Galley, A., Breemen, O. V., & Franklin, J. (2000). The relationship between intrusion-hosted Cu-Mo mineralization and the VMS deposits of the Archean Sturgeon Lake mining camp, northwestern Ontario. *Economic Geology*, 95(7), 1543-1550.
- Galley, A., Breemen, O. V., & Franklin, J. (2000). The relationship between intrusion-hosted Cu-Mo mineralization and the VMS deposits of the Archean Sturgeon Lake mining camp, northwestern Ontario. *Economic Geology*, 95(7), 1543-1550.
- Gonzales, C. V., & SAC, R. S. G. (2015). Caracterización Espectral de tipos de Alunita y Silice en Depósitos Epitermales de Alta Sulfuración utilizando imágenes ASTER. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, 547.
- Guha, A., & Kumar, V. (2016). New ASTER derived thermal indices to delineate mineralogy of different granitoids of an Archaean Craton and analysis of their potentials with reference to Ninomiya's indices for delineating quartz and mafic minerals of granitoids—An analysis in Dharwar Craton, India. *Ore Geology Reviews*, 74, 76-87.
- Gupta, R. P. (2018). *Remote sensing geology*. Springer.
- Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. *Spectral International Inc*, 80001, 303-403.

- Hede, A. N. H., K. Koike, K. Kashiwaya, S. Sakurai, R. Yamada, and D. A. Singer (2017). How can satellite imagery be used for mineral exploration in thick vegetation areas? *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 584–596, doi:10.1002/2016GC006501.
- Hernandez, G. A. R. (2018). Análisis Morfo-estructural para determinar la posible presencia de una caldera en el campo volcánico rio Santa María, como fuente de emisión de la ignimbritas Santa María- El órgano mediante el uso de técnicas geomáticas (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Hewson, R., Mshiu, E., Hecker, C., van der Werff, H., van Ruitenbeek, F., Alkema, D., & van der Meer, F. (2020). The application of day and night time ASTER satellite imagery for geothermal and mineral mapping in East Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101991.
- Hillmer, N., & Bothwell, R., *Geography of Ontario* (2020). In *The Canadian Encyclopedia*. Retrieved from <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/geography-of-ontario>
- Holk, G. J., Taylor, B. E., & Galley, A. G. (2008). Oxygen isotope mapping of the Archean Sturgeon Lake caldera complex and VMS-related hydrothermal system, Northwestern Ontario, Canada. *Mineralium Deposita*, 43(6), 623–640. doi:10.1007/s00126-008-0185-3.
- Hunt, G. R. (1979). Near-infrared (1.3–2.4)  $\mu\text{m}$  spectra of alteration minerals—Potential for use in remote sensing. *Geophysics*, 44(12), 1974-1986.
- Huss, L., & Geo, P. (2010). Report on the 2010 Exploration Program, on the Berens River Property, Red Lake Mining Division, Ontario.
- Huss, L., & Geo, P. (2014). Technical Report on the 2013 Drilling Program, Berens River Project.
- Jaén La Torre, H., & Ortiz, G. (1963). Geología de los cuadrángulos de La Yarada y Tacna (Hojas 37-uy 37-v). [Boletín A 6].

- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, INGEMMET. (2020). Mapa de ocurrencias minerales metálicos a escala 1:500.000- Mapa N° 1.
- Khorram, S., Van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A., & Potts, M. D. (2016). Principles of applied remote sensing. Springer.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.B., Heidebreicht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., y Goetz, A.F.H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS)- interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- Künzer, Claudia. (s.a) Physical principles and methods of remote sensing, methods of image classification. German remote sensing data center, DFD.
- Mamani, D. H., & Malpartida, J. C. (2014) Reconocimiento De Zonas De Alteración Hidrotermal En Depósitos Epitermales Con Imágenes Aster-Sur Del Peru.
- Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural. *Geoacta*, 39.
- Marquetti, C., Becchio, R., Seggiaro R. y Nakashima, K. (2004). Aplicación de datos Aster para la cartografía de la hoja geológica Andalgalá, Catamarca, Argentina. I Simposio ASTER-GEOSAT, Buenos Aires, p: 1-12.
- Martínez, W. & Cervantes, J. (2003). Rocas ígneas en el sur del Perú: Nuevos datos geocronométricos, geoquímicos y estructurales entre los paralelos 16° y 18°30' Latitud Sur. INGEMMET, Boletín, Serie D: Estudios Regionales, 26, 140 p.
- Martínez, W.; Otero, J.; León W. & Marchena, A. (2020). Magmatismo Jurásico – Cretáceo y su relación con los yacimientos tipo IOCG y pórfidos entre Ica y Tacna. Bloque Sur. INGEMMET, Boletín, Serie B: Geología Económica, 67, 367 p., 7 mapas.

- Masuoka, P. M., Harris, J., Lowman Jr, P. D., & Blodget, H. W. (1988). Digital processing of orbital radar data to enhance geologic structure-Examples from the Canadian Shield. *PgERS*, 54, 621-632.
- Mazurki, A. (1982). Work Summary Report On The Zahavy Oex (Outside Exploration) Property For Getty Canadian Metals, Limited (Claims Krl 526196 To Krl 526228). Getty Mines, Limited. Suite 600, 10 King Street East, Toronto, Ontario M5C 1C3 \* (416) 863-0487.
- Mustard, J. F., & Sunshine, J. M. (1999). Spectral analysis for earth science: investigations using remote sensing data. *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing*, 3, 251-307.
- Newell, N. (1949). *Geology of the Titicaca Region, Peru and Bolivia*. Geological Society of America memoir, 36, 111 p. Boulder, Colorado.
- Ninomiya, Y., & Fu, B. (2002). Quartz index, carbonate index and SiO<sub>2</sub> content index defined for ASTER TIR data. *Journal of The Remote Sensing Society of Japan*, 22(1), 50-61.
- Ninomiya, Y. (2004). Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. In *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII* (Vol. 5234, pp. 180-190). International Society for Optics and Photonics.
- Okyay, Ü. (2012). *Lithologic discrimination and mapping by aster thermal infrared imagery* (Master's thesis).
- Ontario Ministry of Natural Resources, OMNR. (1998). *A silvicultural guide for the Great Lakes-St. Lawrence conifer forest in Ontario*. Ont. Min. Nat. Resour. Queen's Printer for Ontario. Toronto. 424p.
- Ontario Geology Survey, OGS. (2011). *1:250.000 scale bedrock geology of Ontario*; Ontario Geology Survey, Miscellaneous Release.

- Ontario Geology Survey, OGS. (2018). Mineral deposit category definitions, Mineral deposit inventory; Ontario Geology Survey.
- Origel, G., Sanchez, C. E. (2010) Guía metodológica para la detección de áreas de alteración minera con imágenes ASTER. XIV Symposium of the Latin American Society of Remote Sensing.
- Pérez, D. J., Azcurra, D., DODorico, P., & Sequeira, N. (2007). Mapeo de Alteración Hidrotermal con datos ASTER, en la región de La Coipa, Cordillera Frontal (31°45S), Provincia de San Juan, Argentina. Proceedings of the Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brazil, 21-26.
- Pérez, D. J., Benites, P. E. O., & Godeas, M. C. (2010). 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 Geológica Argentina, 66(4), 623-633.
- Palacios y B. A. Klinck et. al (1993). Geología de la cordillera occidental y altiplano al oeste del lago Titicaca – Sur del Peru, Proyecto integrado del sur, Hojas: 31-t, 31-u, 31-v, 31-x, 31-y, 32-s, 32-t, 32-u, 32-v, 32-x, 32-y, 33-v, 33-x, 33-y y 33-z. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, Boletín N° 42, Serie A: carta geológica nacional.
- Pospiech, Matthias (2012). Stack overflow: <https://stackoverflow.com/questions/9869167/generate-color-triangle>.
- Pour, A. B., Hashim, M., & Marghany, M. (2010). Characterization of ASTER Data for Mineral Exploration. In MRSS 6th international remote sensing & gis conference and exhibition (p. 6).
- Pour, B.A., Hashim, M., Marghany, M. (2011). Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. International Journal of the Physical Sciences 6 (4), 917– 929.

- Pour, A. B., & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 19. doi:10.1016/j.oregeorev.2011.09.009
- Raab *et al.*, (2020). Target-oriented habitat and wildlife management: estimating forage quantity and quality of seminatural grassland with Sentinel-1 and Sentinel-2 data.
- Ramos J. (2019) Potencial exploratorio en los volcánicos Cenozoico e intrusivos Paleógenos por depósitos de Au, Ag, Cu y Mo asociados al sistema de fallas Cuzco-Lagunillas-Mañazo en la región de Puno. Tesis de título profesional de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de Ingeniería.
- Rashmi S., Addamani S., Venkat S. (2014). Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification, *IJISSET–International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 50(4): 201-205.
- Rivera, M., Monge, R., Navarro, P. (2005). Nuevos datos sobre el volcanismo Cenozoico (Grupo Calipuy) en el norte del Perú: departamentos de La Libertad y Ancash. *Bol. Soc. Geol. Perú*, 99, 7-21.
- Roonwal, G. S. (2017). Remote Sensing in Mineral Exploration. *Springer Geology*, 119–153. doi:10.1007/978-981-10-5604-8\_4
- Rowan, L. C., Schmidt, R. G., & Mars, J. C. (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote sensing of Environment*, 104(1), 74-87.
- Rodríguez, F. (2008). Determinación de zonas de alteración hidrotermal mediante imágenes ASTER (Tesis de pregrado), Oeste de Cajamarca. Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Cusco-Perú, 107p.

- Sabins, F.F., 1983. Remote Sensing — Laboratory Manual, 2nd edn., Kendall Hunt Pub Co., 240 pp.
- Sabins, F.F., (1997). Remote Sensing — Principles and Interpretation, 3rd edn., W.H. Freeman, New York, NY., 494 pp.
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14 (3-4) 157-183. Doi: 10.1016/s0169-1368(99)00007-4.
- Sabins, F.F., Miller, R.M. (1994). Resource assessment - Salar de Uyuni and vicinity. Proceedings of Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I92–I103.
- Sillitoe RH, Perelló J. (2005) Andean copper province: Tectonomagmatic settings, deposit types, metallogeny, exploration, and discovery. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb R, Richards J (eds) *Economic Geology 100th Anniversary Volume (19052005)*. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, pp 845-890.
- Stone, D. (1998). Precambrian geology of the Berens River area, northwest Ontario. Ontario Geological Survey. US Geological Survey, Open file Report, 5963, 93.
- Testa, F., Villanueva, C., Cooke, D., & Zhang, L. (2018). Lithological and Hydrothermal Alteration Mapping of Epithermal, Porphyry and Tourmaline Breccia Districts in the Argentine Andes Using ASTER Imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 203. doi:10.3390/rs10020203.
- Thompson, B. & Thompson, H. (1996) Atlas of alteration, A field and petrographic guide to hydrothermal alteration minerals. Geological association of Canada mineral deposits division.

- Thompson, A. J. B. (1999). Alteration mapping in exploration: Application of short wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Econ. Geol. Newsl.* 30, 13.
- Torres *et al.*, (2012), GMES Sentinel-1 mission, *Remote Sensing of Environment* 120 (2012) p. 9-24.
- Trowell, N. F. (1983). *Geology of the Sturgeon Lake area, districts of Thunder Bay and Kenora* (Vol. 221). Ontario Ministry of Natural Resources.
- Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A., Hecker C. A., Bakker W. H., Noomen, M. F., van der Meijde M., Carranza E. J. M., Smeth J. B., Woldai T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review, *International Jou. of Applied Earth Observation and Geoinformation* 14, 2012, p. 112-128.
- Velosky, J.C., Stern, R.J., Johnson, P.R., 2003. Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies. *Precambrian Research* 123 (2–4), 235–247.
- Whittaker, P. J. (1989). *Zahavy Project, Diamond Drilling Report, October 1988 – January 1989, Borthwick Lake Area for Noramco Explorations Inc.*, 46 p.
- Wilson, J.J. & García, W. (1962). *Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca*. Comisión Carta Geológica Nacional, Boletín 4, 81 p.
- Xu, Y.; Lin, Q.; Shao, Y.; Wang, L. (2004). Extraction Mechanism of Alteration Zones using ASTER Imagery. In *Proceedings of the IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium, Anchorage, AK, USA, 20–24 September 2004; Volume 6, pp. 4174–4175.*

Zhang, Panzer and Duke, (2007). Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California), ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing 62, p. 271-282.

Zoheir B., El-Wahed M. A., Pour A. B., Abdelnasser A. (2019). Orogenic gold in transpression and transtension zones: Field and remote sensing studies of the Barramiya-Muelha sector, Egypt. Remote Sensing. 2019, 11, 2122.