

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR
MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN
PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO
ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023**

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

AUTOR:

Bach. Valera Tejada Diego Kennet

ASESOR:

M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino

CAJAMARCA - PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** DIEGO KENNET VALERA TEJADA
DNI: 70199604
Escuela Profesional: ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
- Asesor:** M. Cs. Ing. Gonzales Yana Roberto Severino
Facultad: Ingeniería
- Grado académico o título profesional**
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
- Tipo de Investigación:**
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:**
ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA
TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN
EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023
Fecha de evaluación: 08/09/2025
- Software antiplagio:** **TURNITIN** **URKUND (OURIGINAL) (*)**
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 6%
- Código Documento:** Oide:3117: 494559498
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**
 APROBADO **PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO**

Fecha Emisión: 08/09/2025

	 <p>Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258801 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 08/09/2025 20:53:36-0500</p>
<hr/> FIRMA DEL ASESOR <i>Roberto Severino Gonzales Yana</i>	<hr/> UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA – CAJAMARCA 2023.

ASESOR : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0630-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 21 de setiembre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **veintiséis días del mes de setiembre de 2025**, siendo las nueve horas (09:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Vocal : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA – CAJAMARCA 2023**, presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica **DIEGO KENNET VALERA TEJADA**, asesorado por el M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y la evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 04 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 15 PTS QUINCE (En letras)

En consecuencia, se lo declara APROBADO con el calificativo de QUINCE acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 11.00 am horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Geológica: DIEGO KENNET VALERA TEJADA.

RUBRO	PUNTAJE
	Máximo/Calificación
2. DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	
2.1. Capacidad de síntesis	3
2.2. Dominio del tema	3
2.3. Consistencia de las alternativas presentadas	3
2.4. Precisión y seguridad en las respuestas	2
PUNTAJE TOTAL (MÁXIMO 12 PUNTOS)	11

Cajamarca, 26 de setiembre de 2025

Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130

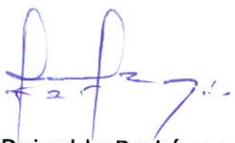


EVALUACIÓN FINAL DE LA SUSTENTACIÓN DE TESIS.

Bachiller en Ingeniería Geológica: DIEGO KENNET VALERA TEJADA.

RUBRO	PUNTAJE
A.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PRIVADA	04
B.- EVALUACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN PÚBLICA	11
EVALUACIÓN FINAL	
EN NÚMEROS (A + B)	15
EN LETRAS (A + B)	Quince
- Excelente 20 - 19	BUENO
- Muy Bueno 18 - 17	
- Bueno 16 - 14	
- Regular 13 a 11	
- Desaprobado 10 a menos	

Cajamarca, 26 de setiembre de 2025


Dr. Ing. Segundo Reinaldo Rodríguez Cruzado.
Presidente


Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal


M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario


M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A mis padres por el apoyo incondicional en mi formación personal e intelectual para lograr me como profesional de bien, ético y con valores. A mi alma máter la Universidad Nacional de Cajamarca, por brindarme el conocimiento y valores necesarios para ser un profesional competente y de alto grado académico. A mis docentes por compartir sus conocimientos y experiencias durante mi formación, es especial a mi asesor quien fue un constante apoyo y de gran ayuda en la elaboración de este trabajo y a todas aquellas personas que fueron parte importante en mi vida, a mis amigos, familia.

D.K.V.T.

DEDICATORIA

A mis padres por brindarme su apoyo en los momentos difíciles, así como sus consejos, por estar siempre a mi lado y formar parte de cada logro en mi vida, a las personas que, aunque no está presente la llevo dentro del corazón con un gran y alegre recuerdo.

D.K.V.T.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTO	I
DEDICATORIA	II
ÍNDICE	III
ÍNDICES DE TABLAS	VI
ÍNDICES DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICES DE FOTOS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS	XII
RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.

2.1.	ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1.1.	Internacionales	3
2.1.2.	Nacionales	4
2.1.3.	Locales	6
2.2.	BASES TEÓRICAS	7
2.2.1.	Teledetección.....	7
2.2.2.	Imágenes Satelitales	7
2.2.2.1.	<i>Imágenes pancromáticas</i>	8
2.2.2.2.	<i>Imágenes multiespectrales</i>	9
2.2.2.3.	<i>Imágenes hiperespectrales</i>	9
2.2.3.	Landsat.....	10
2.2.3.1.	<i>Componentes</i>	11
2.2.3.2.	<i>Descripción general del observatorio</i>	14

	Pág.
2.2.4. Espectro Electromagnético	19
2.2.5. Reflectancia	21
2.2.5.1. Ley de la reflexión	21
2.2.5.2. Reflexión espectral	22
2.2.5.3. Reflectancia de los carbonatos	26
2.2.6. Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI)	29
2.2.6.1. Inicio del NDVI	29
2.2.6.2. Relación del NDVI	30
2.2.6.3. NDVI en Landsat	32
2.2.6.4. Influencia litológica sobre la vegetación	32
2.2.7. Caliza	34
2.2.7.1. Composición de la caliza	34
2.2.7.2. Reflectancia de la caliza	35
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	35

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. UBICACIÓN	36
3.1.1. Geográfica	36
3.1.2. Política	37
3.1.3. Accesibilidad	38
3.2. PROCEDIMIENTOS	39
3.2.1. Metodología	39
3.1.3.1. Población de estudio	42
3.1.3.2. Muestra	42
3.1.3.3. Unidad de análisis	42
3.2.2. Identificación de Variables	42
3.2.3. Operacionalización de Variables	43
3.2.4. Técnicas	43
3.2.5. Instrumentos y Equipos	44
3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	45
3.4. GEOMORFOLOGÍA	48

	Pág.
3.4.1. Unidades Morfogenéticas	49
3.5. GEOLOGÍA LOCAL	50
3.5.1. Cretácico superior - Formación Cajamarca (Ks-Ca).....	50
3.6. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	54
3.6.1. Preprocesamiento de Imágenes.....	54
3.6.1.1. Corrección radiométrica	54
3.6.1.2. Corrección atmosférica.....	55
3.6.1.3. Recalibración de resolución	56
3.6.2. Procesamiento y Análisis de Imágenes Satelitales.....	57
3.6.2.1. Combinación de bandas.....	58
3.6.2.2. Las zonas de interés	60
3.6.2.3. Índice espectral	62
3.6.3. Ensayos de Determinación de Composición.....	68

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	71
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	73

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES.....	74
5.2. RECOMENDACIONES	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS	80
ANEXO 01: FORMATOS DE DESCRIPCIÓN PETROLÓGICA	80
ANEXO 02: PLANOS TEMÁTICOS	80
ANEXO 03: INFORMES DE ENSAYOS.....	80

ÍNDICES DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación de las bandas espectrales OLI y TIRS con las bandas ETM+.....	19
Tabla 2. Clasificación de la vegetación en base al NDVI	32
Tabla 3. Vértices que delimitan el área de investigación	36
Tabla 4. Metodología de la investigación.	41
Tabla 5. Cuadro de variables.	42
Tabla 6. Operacionalización de variables.	43
Tabla 7. Resultados del ensayo de la Muestra N°1	69
Tabla 8. Resultados del ensayo de la Muestra N°2	69
Tabla 9. Áreas que abarcan cada una de las zonas de interés.....	71
Tabla 10. Clasificación en porcentaje que abarca el NDVI en el rango de Poca vegetación (0 - 0.3) en las tres zonas de interés.....	72
Tabla 11. Resultados de los ensayos de composición de las distintas muestras y su ubicación con coordenadas UTM WGS 84 – 17S.	72
Tabla 12. Formato petrográfico de descripción macroscópica – Muestra 1	81
Tabla 13. Formato petrográfico de descripción macroscópica – Muestra 2	82

ÍNDICES DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1:	Imagen pancromática.....	8
Figura 2:	Imagen multiespectral.	9
Figura 3:	Cubo de datos hiperespectrales.....	10
Figura 4:	Continuidad de la cobertura de datos multiespectrales proporcionada por las misiones Landsat.....	13
Figura 5:	Comparación de las bandas en los satélites Landsat 7 y 8 con Sentinel-2.....	13
Figura 6:	Observatorio de Landsat 8.....	14
Figura 7:	Instrumento OLI.	16
Figura 8:	Disposición de bandas SCA pares / impares.	17
Figura 9:	Instrumento TIRS con escudo terrestre desplegado.	18
Figura 10:	Espectro Electromagnético (EM).....	20
Figura 11:	Reflexión especular.....	22
Figura 12:	Interacción de la radiación con una pintura blanca.	22
Figura 13:	Curva de reflectancia espectral de una pintura blanca.....	23
Figura 14:	Interacción de la radiación con una pintura negra.....	23
Figura 15:	Curva de reflectancia espectral de una pintura negra.....	24
Figura 16:	Interacción de la radiación con una pintura roja.....	24
Figura 17:	Curva de reflectancia espectral de una pintura roja.....	25
Figura 18:	Interacción de la radiación con una pintura azul claro.....	26
Figura 19:	Curva de reflectancia espectral de una pintura azul claro.....	26
Figura 20:	Muestra la firma espectral de algunos minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos Las bandas TM5 y TM7, pertenecen al sensor TM de Landsat; en el eje horizontal se encuentra la longitud de onda y el eje vertical el porcentaje de reflectancia en escala logarítmica.	27
Figura 21:	Espectros de los tres minerales carbonatos formadores de rocas más comunes. La flecha indica el mínimo local en la curva que ocurre en la misma región del espectro en los espectros de calcita, pero no en los espectros de aragonito, debido a una menor separación entre centros y un mayor grado de superposición entre las bandas 3 y 4 en los espectros de aragonito.	28

	Pág.
Figura 22: Firmas espectrales de minerales carbonatados (izq) de la biblioteca espectral del USGS.....	28
Figura 23: Gráfica de NDVI como función de ρ	30
Figura 24: Una ilustración de las curvas de respuesta espectral y sus intersecciones con las bandas de rojo (Landsat 8 Banda 4) e infrarrojo cercano (Landsat 8 Banda 5), así como la dispersión dependiente de la longitud de onda.	31
Figura 25: Una comparación de los valores de NDVI para tres tipos de cobertura terrestre y de cuatro fuentes de datos de satélites gratuitos y uno aéreo, adquiridos en otoño entre 2016 y 2019. NAIP es la fotografía aérea del Programa Nacional de Imágenes Agrícolas del USDA (tamaño de píxel de 0,6 m), Sentinel es datos de reflectancia superficial de nivel 2 (10 m), L8_SR es datos de reflectancia superficial del Landsat 8 (30 m), L8_DN es datos de números digitales del Landsat 8 (30 m), GF es datos de Gaofen-2 (3 m), P_SR es datos de reflectancia superficial de Planet (3 m), y P_DN es datos de números digitales de Planet (3 m). Los sitios de muestreo se encuentran en West Lafayette, Indiana, EE. UU.	31
Figura 26: Agrupación de variables biológicas según la temperatura media anual (T) y la precipitación media anual (P) para cada grupo litológico. Los contenedores están coloreados según su desviación respecto a la media del NDVI o la riqueza de especies de todo el contenedor T-P en diferentes litologías. Los colores rojos indican que la media de una unidad litológica está por debajo de la media del NDVI. El número de píxeles por contenedor se representa en el panel inferior derecho.	33
Figura 27: Comparación de las medias para el NDVI, en relación con el grupo de referencia (carbonatos puros). Los gráficos muestran la diferencia en las medias entre grupos con intervalos de confianza, la línea discontinua en cero corresponde a la respectiva media en áreas de carbonato puro.	34
Figura 28: Ubicación geográfica de los vértices que delimitan el área investigada.	37

	Pág.
Figura 29: Ubicación política del Centro Poblado de Otuzco Alto.	38
Figura 30: Accesibilidad al Centro Poblado de Otuzco Alto desde la ciudad de Cajamarca.	38
Figura 31: Estructuras realizadas de manera manual usando como filtro los distintos ángulos para visualizar, A: Filtro Este – Oeste, B: Filtro Norte – Sur, C: Filtro Noreste – Suroeste, D: Filtro Noroeste – Sureste.	46
Figura 32: Estructuras principales presentes en Otuzco.	47
Figura 33: Resultado de la compilación y ordenamiento de las estructuras con la clasificación de falla y falla inferida.	47
Figura 34: Vista de las geoformas presentes.	49
Figura 35: Plano de las unidades morfogénicas presentes, usando la clasificación propuesta por el Dr. Rodríguez en el 2018.	50
Figura 36: Plano geológico que comprende la Formación Cajamarca, con los puntos de estación y muestra.	53
Figura 37: Herramienta Radiometric Calibration para la corrección radiométrica.	54
Figura 38: Resultado de la corrección radiométrica, cambio de niveles digitales a radiancia.	55
Figura 39: Herramienta FLAASH para la corrección atmosférica.	56
Figura 40: Resultados de la corrección atmosférica.	56
Figura 41: Herramienta Pan Sharpening para la recalibración de la resolución.	57
Figura 42: Resultado de la nueva imagen con recalibración de resolución.	57
Figura 43: Resultado de la combinación de bandas 7 (Infrarrojo de onda corta 2), 5 (Infrarrojo cercano) y 3 (Verde) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).	58
Figura 44: Resultado de la combinación de bandas 4 (Rojo), 5 (Infrarrojo cercano) y 2 (Azul) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).	59
Figura 45: Resultado de la combinación de bandas 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Infrarrojo de onda corta 1) y 4 (Rojo) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).	60

	Pág.
Figura 46: Delimitación de las zonas de interés, cada una diferenciada por un color, la zona 1 (contorno verde) ubicada al norte, la zona 2 (contorno rojo) ubicada al centro de la figura.	61
Figura 47: Perfil espectral de las zonas de interés, siendo la zona 1 (color verde) y la zona 2 (color rojo).....	62
Figura 48: Vista de las zonas de interés en el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI), usando una escala de colores de rojo a verde para una mejor apreciación, siendo rojo para los valores más bajo, amarillo para intermedios y verde para los valores más altos	63
Figura 49: Valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en cada una de las zonas, viéndose que la zona 1 (contorno verde) con un valor bajo de 0.052689 y valor alto de 0.374085 , zona 2 (contorno rojo) con un valor bajo de 0.0673918 y valor alto de 0.444017.	64
Figura 50: Vista de las zonas de interés con la categorización del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI), donde puede observar que dichas zonas presentan casi por totalidad Poca Vegetación (MV), de color anaranjado, dicha clasificación según lo que presenta Laksono et at. (2020)	65
Figura 51: Intervalos de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en el rango (0 – 0.3 / Poca Vegetación), usando una escala de colores distinta para no causar confusión con los valores anteriores y viéndose espacios vacíos que representan los otros rangos.....	67
Figura 52: Intervalos de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en el rango (0 – 0.3 / Poca Vegetación) y sus porcentajes de extensión dentro de las zonas de interés.....	68

ÍNDICES DE FOTOS

	Pág.
Foto 1: Estratos de la roca caliza tipo wackestone, delimitados con líneas rojas, con un espesor variado, entre 15 a 60 cm. Este:782725 Norte: 9211847.	51
Foto 2: Estrato de roca caliza tipo packstone, delimitado por color rojo, con un espesor de 1.15m marcada con una línea verde. Este: 781702 Norte: 9211049	51
Foto 3: Afloramiento de la Formación Cajamarca con la presencia de lenares, mostrados por líneas rojas en la parte superior. Este: 781911 Norte: 9210985.	52
Foto 4: A la izquierda la Muestra N°1, muestra de mano de roca caliza tipo Wackestone (Revisar Anexos), perteneciente de la Formación Cajamarca , a la derecha vista de la muestra en un microscopio a 140x, los círculos rojos marcan los granos presentes en la roca. Este:782725 Norte: 9211847.	52
Foto 5: A la izquierda la Muestra N°2, muestra de mano de roca caliza tipo Packstone (Revisar Anexos), perteneciente a la Formación Cajamarca, a la derecha vista de la muestra en un microscopio a 140x, los círculos rojos marcan los granos presentes en la roca. Este: 781702 Norte: 9211049	53

LISTA DE ABREVIATURAS

GPS	:	Sistema de posicionamiento global
Fm./FM.	:	Formación
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú.
NDVI	:	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
NIR	:	Infrarrojo cercano
Pág.	:	Página.
OLI	:	Generador de imágenes terrestres operativas.
ROI	:	Región de interés.
RGB	:	Composición rojo, verde y azul.
SWIR	:	Infrarrojo de onda corta.
SASPlanet	:	SAS Planeta.
TIR	:	Infrarrojo Termal
USGS	:	Servicio Geológico de Estados Unidos.
UTM	:	Universal Transversal de Mercator.
WGS-84	:	Sistema Geodésico Mundial 1984

RESUMEN

La investigación se ha realiza en base al análisis de las imágenes satelitales, usando la litología, la vegetación y la reflectancia, todo esto enfocado a la roca caliza, una roca compuesta principalmente por carbonato de calcio CaCO_3 , perteneciente a la Formación Cajamarca y la cual aflora en el centro poblado de Otuzco Alto, la teledetección es un método indirecto y con lo cual se trata de visualizar las diferencias que esta caliza presenta con respecto a su ambiente usando su composición. Para esto se usaron las imágenes del satélite Landsat 8 debido a su fácil acceso y obtención, además de ser mundiales, el procesamiento se realiza en el software Envi 5.3, las correcciones, combinaciones de bandas y la generación del NDVI, además realizaron ensayos de composición a las muestras de la roca caliza extraídas de la Formación Cajamarca con el fin de comprobar los resultados obtenidos por las imágenes satelitales. Finalmente se usó el software ArcGIS 10.8 para la elaboración de los planos que permitan ver con facilidad los resultados obtenidos.

Palabras Claves: Caliza, imágenes satelitales, Formación Cajamarca, NDVI.

ABSTRACT

The research has been carried out based on the analysis of satellite images, using lithology, vegetation and reflectance, all of this focused on limestone, a rock composed mainly of calcium carbonate CaCO_3 , belonging to the Cajamarca Formation and which outcrops in the town of Otuzco Alto, remote sensing is an indirect method and which attempts to visualize the differences that this limestone presents with respect to its environment using its composition. For this, images from the Landsat 8 satellite were used due to their easy access and obtaining, in addition to being global, processing is done in Envi 5.3 software, corrections, band combinations and the generation of NDVI, in addition to composition tests were performed on limestone samples extracted from the Cajamarca Formation in order to verify the results obtained by satellite images. Finally, ArcGIS 10.8 software was used to prepare the plans that allow easy viewing of the results obtained.

Keywords: Limestone, satellite images, Formación Cajamarca, NDVI.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la región Cajamarca existe una gran variedad geológica, dicha variedad se debe a las distintos Grupos y Formaciones, estas abarcan desde el Precámbrico hasta el Cenozoico, pasando por el Mesozoico y como una de las principales rocas existentes, son las rocas sedimentarias del Cretácico, siendo la Formación Cajamarca una componente de dicho Sistema y de la cual uno de sus componentes es la roca caliza, siendo esta de interés debido a su contenido de carbonato de calcio (CaCO_3). Siendo esta Formación una de las aflora en el centro poblado de Otuzco Alto, por lo que, se realizará un análisis indirecto por medio de la teledetección con el fin de detectar la reflectividad que cuenta la roca caliza, usando para lograr este análisis el software Envi 5.3 para poder procesar las imágenes satelitales y posteriormente se hará uso del software ArcGIS 10.8, así como también se hará una toma de muestras de roca caliza de dicha Formación para realizar ensayos de composición y así poder comprobar los datos obtenido a través de la teledetección. Esto servirá para resolver la siguiente pregunta, ¿Qué resultados se obtienen del análisis de la roca caliza en la Formación Cajamarca por medio de la teledetección y ensayos químicos de composición para determinar su pureza en el centro poblado de Otuzco Alto, Baños del Inca – Cajamarca?

Con la hipótesis, la roca caliza en la Formación Cajamarca puede ser analizada mediante teledetección y ensayos químicos de composición, los cuales permiten determinar su pureza en el centro poblado de Otuzco Alto, Baños del Inca – Cajamarca.

En la actualidad no existe información del uso de la teledetección para la roca caliza en la Formación Cajamarca, por lo cual se realizará un análisis de dicha roca, haciendo uso de las imágenes satélites por medio de combinaciones de bandas y el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI), además de realizar ensayos de composición para las muestras de la roca caliza, con lo cual se podrá

comprobar los datos obtenidos por las imágenes, y de esta manera generando información para futuras investigaciones.

La investigación se compondrá, de dos partes la cual se inicia en gabinete donde se hace un análisis, interpretación y evaluación de datos obtenidos bibliográficamente, y otra etapa en campo, por medio de la extracción de muestras de caliza para los ensayos con lo que se determinará la pureza de estas.

Se plantea como objetivo general, analizar las calizas en las Formación Cajamarca por medio de la teledetección en el centro poblado de Otuzco Alto. Así como también, Describir macroscópicamente las calizas de la Formación Cajamarca, procesar las imágenes satelitales, realizar ensayos de composición de las calizas de la Formación Cajamarca y determinar cómo los datos de teledetección se relacionan con los resultados de los ensayos de composición.

La investigación comprende los siguientes capítulos: en el Capítulo I, se realiza una introducción a la investigación realizada, el planteamiento del problema, así como el planteo de la pregunta principal y la hipótesis, además de mencionar los alcances y objetivos del proyecto de investigación. El Capítulo II, se tienen los antecedentes de tipo internacional, nacional y local; además bases teóricas y la definición de términos básicos. El Capítulo III, corresponde a los materiales y métodos, en donde se tendrá la ubicación, procedimientos y metodología de la investigación. Capítulo IV, se presenta el análisis y discusión de resultados, donde se describe, discute y explica los resultados obtenidos. Y finalmente Capítulo V, corresponde a las conclusiones a las que se llegó teniendo en cuenta los objetivos; asimismo se presenta las recomendaciones a tener en cuenta y también se tienen las referencias bibliográficas y anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Internacionales

Payano (2017), “Identificación de litologías mediante imágenes Landsat-8 OLI en la Sierra de las Nieves (Málaga)”, en este trabajo fin de master tiene por objetivo la identificación de las principales Formaciones litológicas en la Sierra de las Nieves mediante imágenes satelitales, para este trabajo se usó distintas técnicas de análisis para identificar en las imágenes Landsat las Formaciones litológicas, calculándose el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (Normalized Differential Vegetation Index, NDVI) y con estos datos se realizaron análisis estadísticos para ver si era posible separar las Formaciones litológicas en distintas fechas y una vez elegida la mejor fecha, proceder a la clasificación.

Buzzi et al. (2018), “Cartografía de calizas con datos hiperespectrales AISA Eagle II en una zona montañosa con vegetación densa: cómo orientar geológicamente la corrección atmosférica”, en esta investigación, con ayuda de las diferencias espectrales que presentan las Formaciones litológicas con predominancia de carbonatos, determinaron un cartografiado utilizando datos hiperespectrales AISA Eagle II, donde en un principio se tuvieron que aislar las zonas rocosas y con suelo, de las cubiertas vegetales, luego, mejorar la expresión espectral de las imágenes para adaptarlas a las espectrotecas de referencia con correcciones atmosféricas basadas en espectros de campo. Debido a los rasgos espectrales de los carbonatos, donde, se presentan en intervalos de longitudes de onda del NIR (2000-2500 nm), que no son recogidas por las imágenes de AISA Eagle II (400-970 nm), se han realizado cartografías en las que se detectan rasgos espectrales relacionados indirectamente con el contenido en carbonatos en Formaciones calizas.

Avalos (2020), “Aplicación de la teledetección para la localización y caracterización de materias primas en la zona occidental de Aguascalientes”, este trabajo tuvo como objetivo ubicar zonas mineralizadas de óxidos de hierro, caolín, manganeso mediante un SIG (Sistema de Información Geográfica), se determinó una región de estudio que abarca la porción occidental del estado de Aguascalientes, en donde con el análisis de imágenes multiespectrales ASTER, Para este caso se utilizó el complemento The Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) en QGIS, composición de color 461 para zonas de alteración hidrotermal, y para la silicificación, se realizó la combinación de bandas 13 y 12 donde absorben los minerales de cuarzo, logrando marcar y verificar potenciales fuentes de materias primas para lítica, cerámica y pigmento. Obtuvieron un total de 11 áreas de materias primas dentro de la zona de estudio divididas en zona norte y zona sur, donde la primera abarca 4 lugares y la segunda 7, obteniendo un total de 38 puntos en el mapa, obteniendo, así como posibles usos 9 de lítica, 14 de cerámica, 12 de pintura rupestre, 10 de decoración corporal, 23 de colorante cerámico, teniendo así por lo que tenemos 68 posibles usos para los materiales.

2.1.2. Nacionales

Rubio (2018), “Análisis del cambio de cobertura y uso de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Lajas periodos 1987 – 2002 – 2016”, la presente investigación está enfocado en analizar los cambios de cobertura y uso de la tierra del distrito de Lajas, provincia de Chota, departamento de Cajamarca, durante tres años 1987, 2002 y 2016, en este proyecto las etapas de análisis se hacen en cinco etapas, siendo la tercera, cuarta y quinta etapa donde ocurre la aplicación de esta comenzando con una clasificación semiautomatizada, aplicando el random forest, para proceder a la evaluación de consistencia y culminar con la edición vectorial y la generalización, lográndose así poder identificar seis categorías: tejido urbano continuo, pastos, cultivos transitorios, herbazal, arbustal y vegetación arbustiva/herbácea.

Alarcón (2018), “Aplicación de las técnicas de teledetección pasiva para la determinación de aguas subterráneas en la Región Ica durante el periodo 2017 al 2018”, el objetivo de la investigación es identificar zonas potenciales de aguas

subterráneas utilizando técnicas de teledetección en la región de Ica durante el periodo 2017 al 2018. Para el desarrollo de la investigación se procesaron imágenes satelitales del sensor Operational Land Imager (OLI) por sus siglas en inglés del satélite Landsat 8/LCDM, además se realizaron trabajos de campo para la verificación de datos obtenidos y la adquisición de información de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), entregando este una base de datos de los pozos existentes de agua subterránea en explotación de la Provincia de Ica. Teniendo como resultados que las zonas de San Juan Bautista, la Tinguíña, Parcona, Pueblo Nuevo, Pachacutec presentan un 98% de aguas subterráneas, 95% de los Aquijes, 93% de Salas, 10% de Santiago, 10% de Ocucaje, 5% de Yauca del Rosario y solo el 3% de San José de los Molinos cuenta con zonas potenciales de agua subterráneas.

Soca (2015), “Identificación de Tierras Degradadas por Salinidad del Suelo en los Cultivos de Caña de Azúcar en Pomalca usando Imágenes de Satélite”, el objetivo del presente trabajo es identificar suelos degradados por salinidad, empleando imágenes de satélite de alta resolución espacial en cultivos de caña, se utilizó datos de imágenes del sensor HRG-2, TM y ETM+ que corresponden a los satélites Spot-5, Landsat-5 y Landsat-7, Se estimó la reflectancia de la superficie del suelo, Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) e Índice de Salinidad (IndSal), se analizaron el NDVI e IndSal del periodo 2007 - 2010 de las imágenes, logrando diferenciar suelos con baja calidad agrícola y suelos sin problemas de salinidad, además se hizo un análisis de regresión lineal múltiple entre los datos de campo de CE (dS/m), frente a los valores de reflectancia de superficie de las bandas B1, B2 y B3, teniendo un coeficiente de correlación de 0.73, para su análisis fue dividido en 5 clases, los cuales son suelos no salinos con 1631.16 hectáreas, 2179.71 hectáreas suelos ligeramente salinos, 1341.9 hectáreas suelos moderadamente salinos, 730.17 hectáreas suelos fuertemente salinos y 26.91 ha con suelos extremadamente salinos.

2.1.3. Locales

Vergara (2017), “Estimación de reservas probables de yacimientos no metálicos en arcillas del distrito de Llacanora Cajamarca, Perú – 2015”, El propósito de la investigación se basa en aprovechar la abundante cantidad de materiales arcillosos presentes en dicho distrito y cuya estimación de reservas probables es objeto de estudio, haciendo el análisis de la teledetección para la identificación de depósitos de arcillas, análisis de difracción de rayos x y así mismo se muestran los resultados de la composición mineralógico de las muestras de arcillas, dando así que solo tres muestras (M-01, M-04 y M-10) tuvieron el mejor rango de porcentaje para su clasificación industrial, clasificándolas como arcillas caoliníticas.

Castrejón & Díaz (2018), “Teledetección de minerales generadores de acidez y metales pesados, usando imágenes satelitales Áster en el distrito de Bambamarca, Cajamarca - 2018”, el objetivo principal de la investigación es detectar la ubicación de minerales generadores de acidez y metales pesados mediante el análisis multiespectral de imágenes satelitales lo cual permitirá conocer la ubicación de los principales focos de contaminación del ambiente y zonas afectadas por la contaminación de minerales generadores de acidez y metales pesados, de esta manera brindar un aporte a la resolución de la problemática del distrito de Bambamarca en el cual los pobladores, están siendo expuestos a elementos tóxicos, de riesgo a la salud, presentes en el suelo, agua y aire de la región, a causa de la erosión e intemperismo de minerales locales y antiguas labores mineras.

Gamboa (2015), “Caracterización mineralógica de la alteración en las calizas de la microcuenca del río Tres Ríos en el distrito de Cajamarca”, esta tesis tuvo como objetivo mediante imágenes satelitales y técnicas de tratamiento digital, se identificar la distribución espacial de las calizas de las Formaciones Chúlec, Pariatambo y Yumagual en la microcuenca, mediante imágenes satelitales y técnicas de tratamiento digital. Haciendo también un estudio micromorfológico a través de la microscopia de luz polarizada demostró una relación entre las respuestas espectrales y la composición mineralógica de las muestras. Utilizando el mapeo espectral se zonificó la distribución de las alteraciones y se determinó que

las calizas elásticas y las margas ferruginosas tienden a formar suelos tipo terra rosa mientras que las calizas no elásticas tienden a formar calcretas.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Teledetección

Se entiende a cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella. Sin embargo, de un modo más restringido, y en el ámbito de las ciencias de la Tierra, la teledetección es entendida como una técnica que se tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales. (Pérez & Muñoz, 2006)

La teledetección se lleva a cabo a través de los sensores, instrumentos susceptibles de detectar la señal electromagnética (radiación reflejada o emitida) que les llega de la Tierra y la atmósfera y convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada. Los sensores convierten la señal electromagnética en un formato analógico (fotografía) o digital (imagen). Para llevar a cabo la observación del terreno, los sensores se ubican en plataformas, fijas o móviles: mástiles, grúas, globos, aviones, cohetes o satélites. Las características de la imagen registrada dependen en gran medida de las propiedades del sensor utilizado y de la distancia al suelo desde la cual se realiza la adquisición. (Sobrino, 2001)

2.2.2. Imágenes Satelitales

Una imagen satelital es una matriz digital de puntos (igual a una fotografía digital) capturada por un sensor montado a bordo de un satélite que órbita alrededor de la Tierra. A medida que el satélite avanza en su órbita, “barre” la superficie con un conjunto de detectores que registran la energía reflejada.

La teledetección espacial hace uso de las imágenes satelitales como un insumo de datos para extraer información del medio geofísico y geográfico. El número de bandas, las regiones del espectro electromagnético en las cuales éstas se

encuentran localizadas, la resolución espacial y el tamaño de la imagen, producidas por los diferentes satélites es variado.

Las imágenes de satélite, se encuentran en formato raster, el cual consiste en una matriz de miles de píxeles, en donde cada píxel tiene un valor digital o de reflectancia; ejemplificando, si la resolución de la imagen es de 30 metros, cada píxel muestra un área en la superficie terrestre de 30 x 30 metros (900m²), con esto, la firma espectral o reflectancia de todos los objetos existentes en una superficie de 900m² será promediada para darle su valor digital al píxel.

2.2.2.1. *Imágenes pancromáticas*

Son imágenes que se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia de energía en una amplia parte del espectro electromagnético (con frecuencia, tales porciones del espectro reciben el nombre de bandas). Para los sensores pancromáticos más modernos, esta única banda suele abarcar la parte visible y de infrarrojo cercano del espectro. Los datos pancromáticos se representan por medio de imágenes en escala de grises. (Cervantes, 2014)



Figura 1: Imagen pancromática.
Fuente: Adaptado de Gis&Beers (2018).

2.2.2.2. *Imágenes multiespectrales*

Se captan mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas, Los satélites de teledetección multiespectrales de hoy en día miden la reflectancia simultáneamente en un número de bandas distintas que pueden ir de tres a catorce. En la figura 2 tenemos una imagen multiespectral con cuatro bandas espectrales. (Cervantes, 2014)

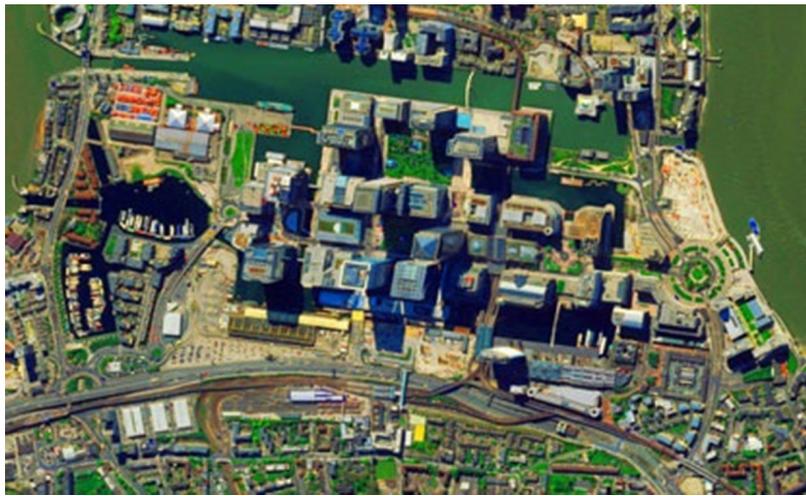


Figura 2: Imagen multiespectral.
Fuente: Adaptado de Gis&Beers (2018)

2.2.2.3. *Imágenes hiperespectrales*

Las imágenes hiperespectrales se obtienen mediante un sensor espectral que mide la reflectancia en muchas bandas, con frecuencia cientos. Los sensores hiperespectrales recopilan información como un conjunto de "imágenes". Cada imagen representa un rango del espectro electromagnético también conocido como banda espectral. Estas "imágenes" se combinan y forman una imagen tridimensional hiperespectral, un cubo de datos, para el procesamiento y análisis. (Cervantes, 2014)

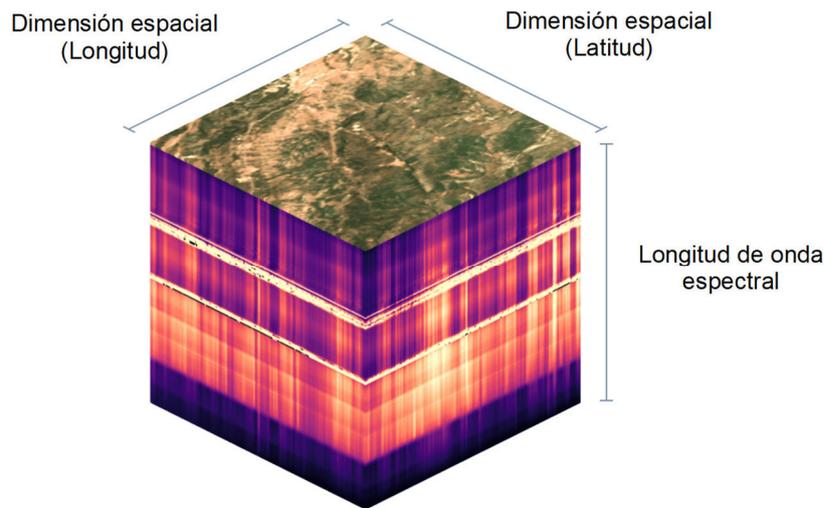


Figura 3: Cubo de datos hiperespectrales.
Fuente: Adaptado de Azavea (2022)

2.2.3. Landsat

El Proyecto Landsat ha proporcionado datos calibrados de resolución espacial moderada de alta calidad de la superficie de la Tierra a una amplia y variada comunidad de usuarios desde 1972. Las imágenes Landsat brindan información que satisface las amplias y diversas necesidades de la agroindustria, los investigadores del cambio global, la academia, el estado y el local. gobiernos, usuarios comerciales, agencias de seguridad nacional, la comunidad internacional, tomadores de decisiones y el público. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

La misión del Proyecto Landsat es proporcionar una adquisición repetitiva de datos multiespectrales de resolución moderada de la superficie de la Tierra a nivel mundial. Landsat representa la única fuente de mediciones globales, calibradas y de resolución espacial moderada de la superficie de la Tierra que se conservan en un archivo nacional y están disponibles gratuitamente para el público. Los datos de la nave espacial Landsat constituyen el registro más largo de las superficies continentales de la Tierra vistas desde el espacio. Es un récord incomparable en calidad, detalle, cobertura y valor. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

Lanzado en 2013, el satélite Landsat 8 ha contribuido a un registro multiespectral ininterrumpido de las superficies terrestres de la Tierra desde 1972. Landsat 8 orbita

en un desplazamiento de ocho días con Landsat 7, que se lanzó en 1999. La adquisición de datos espaciales del Landsat 8 combina con los sistemas de archivo y distribución del USGS, que incluye las técnicas de procesamiento de datos necesarias para convertir los datos de Landsat 8 en un formato científicamente utilizable. Con Landsat 8, se ha puesto especial énfasis en actualizar periódicamente el archivo de datos global, mantener una calibración precisa de los instrumentos, proporcionar datos de acuerdo con las directivas de políticas nacionales y garantizar que haya un sistema de procesamiento de datos que cree productos de calidad superior accesibles al público. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

2.2.3.1. Componentes

Los satélites Landsat llevan una variedad de componentes, incluidos sistemas de detección remota, sistemas de retransmisión de datos, subsistemas de control de actitud y ajuste de órbita, una fuente de alimentación y receptores y transmisores para las comunicaciones de la estación terrestre. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

El Observatorio Landsat 8 (L8) ofrece las siguientes características:

- **Continuidad de datos:** L8 es el último de una serie continua de satélites terrestres de teledetección que comenzó en 1972.
- **Misión de estudio global:** Los datos de L8 construyen y actualizan sistemáticamente un archivo global de imágenes de la masa terrestre sustancialmente libres de nubes e iluminadas por el sol.
- **Productos de datos estándar gratuitos:** Los productos de datos L8 están disponibles a través de USGS EROS sin cargo.
- **Calibración radiométrica y geométrica:** los datos de los dos sensores, el Generador de imágenes terrestres operativas (OLI) y el sensor térmico infrarrojo (TIRS), están calibrados para una incertidumbre mejor que el 5

por ciento en términos de reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) o radiancia espectral absoluta y tienen una precisión geodésica absoluta mejor que 65 metros (m) de error circular con un 90 por ciento de confianza (CE 90).

- **Entrega inmediata:** Productos disponibles para descargar inmediatamente; productos de nivel superior disponibles para descargar en 72 horas.

L8 es el último satélite de esta serie. El primero (Landsat 1, originalmente conocido como ERTS-1) se lanzó en 1972 con dos generadores de imágenes de observación de la Tierra: un Return Beam Vidicon (RBV) y un escáner multiespectral de 4 bandas (MSS) de 80 metros. Landsat 2 y Landsat 3, lanzados en 1975 y 1978 respectivamente, se configuraron de manera similar. En 1984, Landsat 4 se lanzó con el MSS y un nuevo instrumento llamado Thematic Mapper (TM). (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

Las actualizaciones de instrumentos incluyeron una resolución terrestre mejorada (30 m) y 3 nuevos canales / bandas. Además de utilizar un instrumento actualizado, Landsat 4 hizo uso de la Nave Espacial Modular Multimisión (MMS), que reemplazó el diseño de nave espacial basado en Nimbus empleado para Landsat 1 - Landsat 3. Landsat 5, un duplicado de Landsat 4, fue lanzado en 1984 y devolvió datos científicamente viables durante 28 años, 23 años más allá de su vida útil de diseño de 5 años. Landsat 6, equipado con una banda pancromática (Pan) adicional de 15 metros, no logró alcanzar la órbita en 1993. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

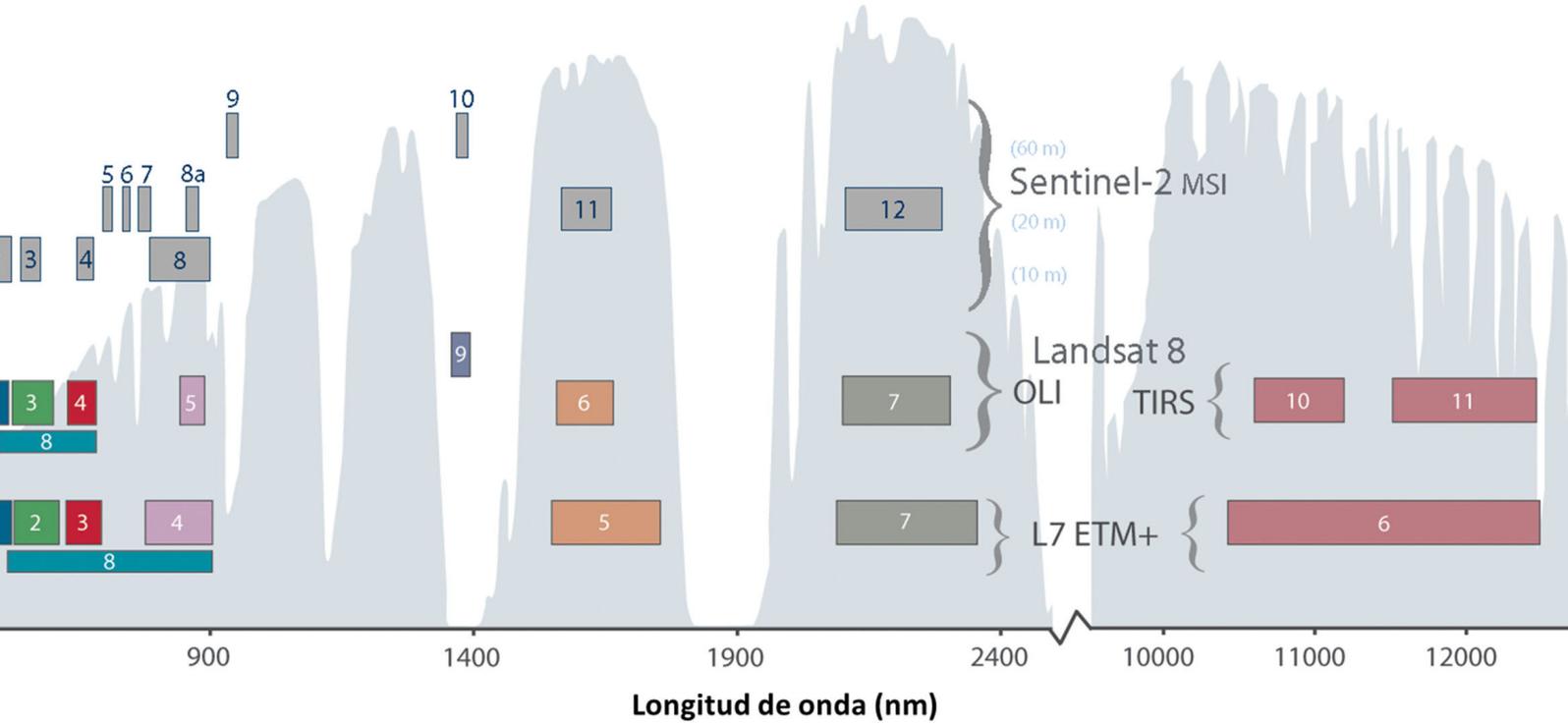


Figura 5: Comparación de las bandas en los satélites Landsat 7 y 8 con Sentinel-2
Fuente: Adaptado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2017).

2.2.3.2. Descripción general del observatorio

L8 lleva una carga útil de dos sensores: el OLI, construido por BATC, y el TIRS, construido por NASA GSFC. Tanto el sensor OLI como el TIRS toman imágenes de cada escena simultáneamente, pero pueden usarse de forma independiente si surge un problema en cualquiera de los sensores. En funcionamiento normal, los sensores ven la Tierra en el nadir en el sistema de coordenadas de trayectoria / fila orbital del Sistema de referencia mundial 2 (WRS-2) sincrónico con el sol, pero se pueden programar recolecciones especiales fuera del nadir. Ambos sensores ofrecen avances técnicos sobre los instrumentos Landsat anteriores. La nave espacial, con sus dos sensores integrados, se conoce como Observatorio L8. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

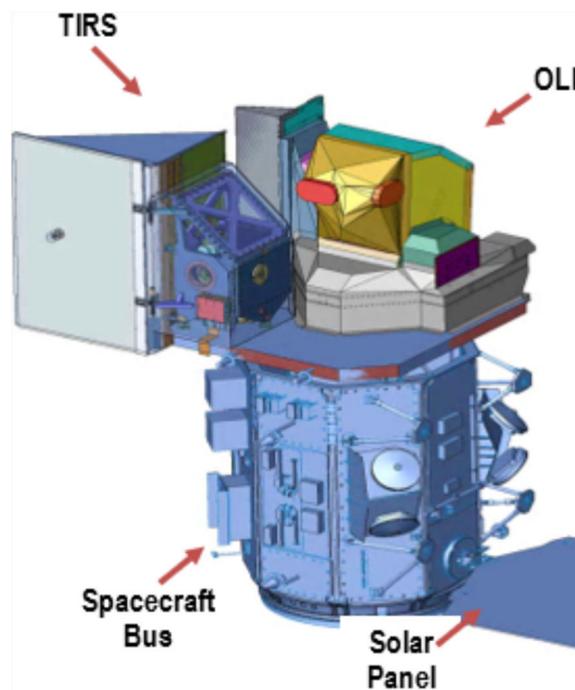


Figura 6: Observatorio de Landsat 8.

Fuente: Tomado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2019).

- **Sensor de imágenes operativa en tierra (OLI)**

El sensor OLI, que tiene una vida útil de cinco años, es similar en diseño al Advanced Land Imager (ALI) que se incluyó en Observación de la tierra 1 (EO-1) y representa un avance tecnológico significativo sobre el sensor ETM+ de L7. Los instrumentos de los satélites Landsat anteriores empleaban espejos oscilantes para

barrer el campo de visión (FOV) de los detectores a lo largo del ancho de la franja ("escoba"), pero OLI en su lugar utiliza conjuntos de detectores lineales largos con miles de detectores por banda espectral. Los detectores alineados a lo largo de los planos focales del instrumento recopilan imágenes en forma de "escoba", lo que resulta en un instrumento más sensible con menos partes móviles. OLI tiene un telescopio de 4 espejos y los datos generados por OLI se cuantifican a 12 bits, en comparación con los datos de 8 bits producidos por el sensor TM y ETM+. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

El sensor OLI recopila datos de imágenes para 9 bandas espectrales de onda corta a lo largo de un área de barrido de 190 km con una resolución espacial de 30 metros (m) para todas las bandas, excepto la banda Pan de 15 m. Las anchuras de varias bandas del OLI se han refinado para evitar características de absorción atmosférica presentes en las bandas del ETM+. El cambio más significativo ocurre en la Banda 5 del OLI (0,845-0,885 micrómetros (μm)) para excluir una característica de absorción de vapor de agua a 0,825 μm en el medio de la banda infrarroja cercana del ETM+ (Banda 4; 0,775-0,900 μm). (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

La banda Pan del OLI, Banda 8, también es más estrecha en comparación con la banda Pan del ETM+ para crear un mayor contraste entre las áreas vegetadas y las zonas sin cobertura vegetal. El OLI también cuenta con dos nuevas bandas además de las bandas heredadas de Landsat (1-5, 7 y Pan). La banda Costera/Aerosol (Banda 1; 0,435-0,451 μm), principalmente para observaciones del color del océano, es similar a la banda 1 del ALI, y la nueva banda Cirrus (Banda 9; 1,36-1,38 μm) ayuda en la detección de nubes delgadas compuestas de cristales de hielo (las nubes cirrus aparecen brillantes, mientras que la mayoría de las superficies terrestres aparecen oscuras a través de una atmósfera libre de nubes que contiene vapor de agua). (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

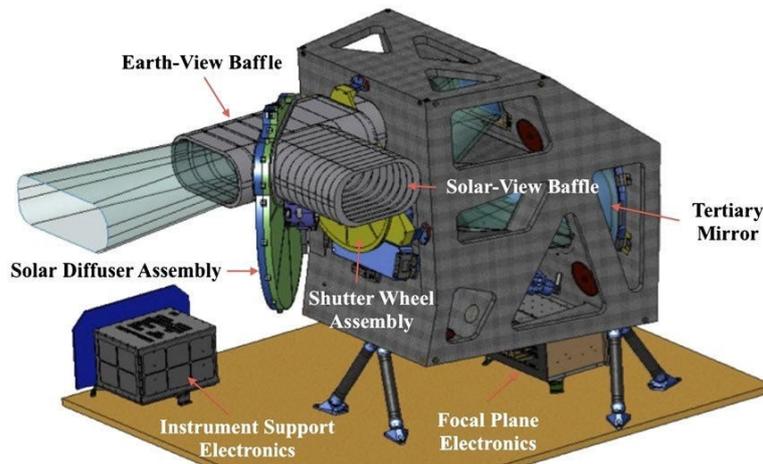


Figura 7: Instrumento OLI.

Fuente: Tomado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2019).

El OLI tiene requisitos estrictos de rendimiento radiométrico y se requiere que produzca datos calibrados con una incertidumbre de menos del cinco por ciento en términos de radiancia espectral absoluta en la apertura y con una incertidumbre de menos del tres por ciento en términos de reflectancia espectral TOA para cada una de las bandas espectrales en la tabla 1. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

El OLI es un sensor de tipo "escoba" que utiliza un telescopio anastigmático de cuatro espejos que enfoca la radiación incidente en el plano focal, al mismo tiempo que proporciona un campo de visión (FOV) de 15 grados que cubre el área terrestre de 190 km a lo ancho de la trayectoria nominal de la observación desde la altitud del Observatorio L8. El muestreo periódico de los detectores a lo ancho de la trayectoria a medida que el Observatorio avanza a lo largo de una pista terrestre forma las imágenes digitales multiespectrales. Los detectores están divididos en 14 conjuntos de chips de sensor (Sensor Chip Assemblies, SCAs) idénticos, dispuestos en un patrón alternante a lo largo de la línea central del plano focal. Los SCAs con números pares son iguales a los SCAs con números impares, solo que el orden de las matrices de detectores se invierte de arriba a abajo. Los detectores en los SCAs pares e impares están orientados de manera que miran ligeramente fuera del nadir en las direcciones de visualización hacia adelante y hacia atrás. Esta disposición permite obtener una franja continua de imágenes mientras el sensor "escoba" vuela sobre la Tierra, sin partes móviles. Hay un detector redundante por píxel en cada banda visible e infrarroja cercana (VNIR), y dos detectores

redundantes por píxel en cada banda infrarroja de onda corta (SWIR). La respuesta espectral de cada detector único corresponde a una columna individual de píxeles dentro del producto de Nivel 0. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

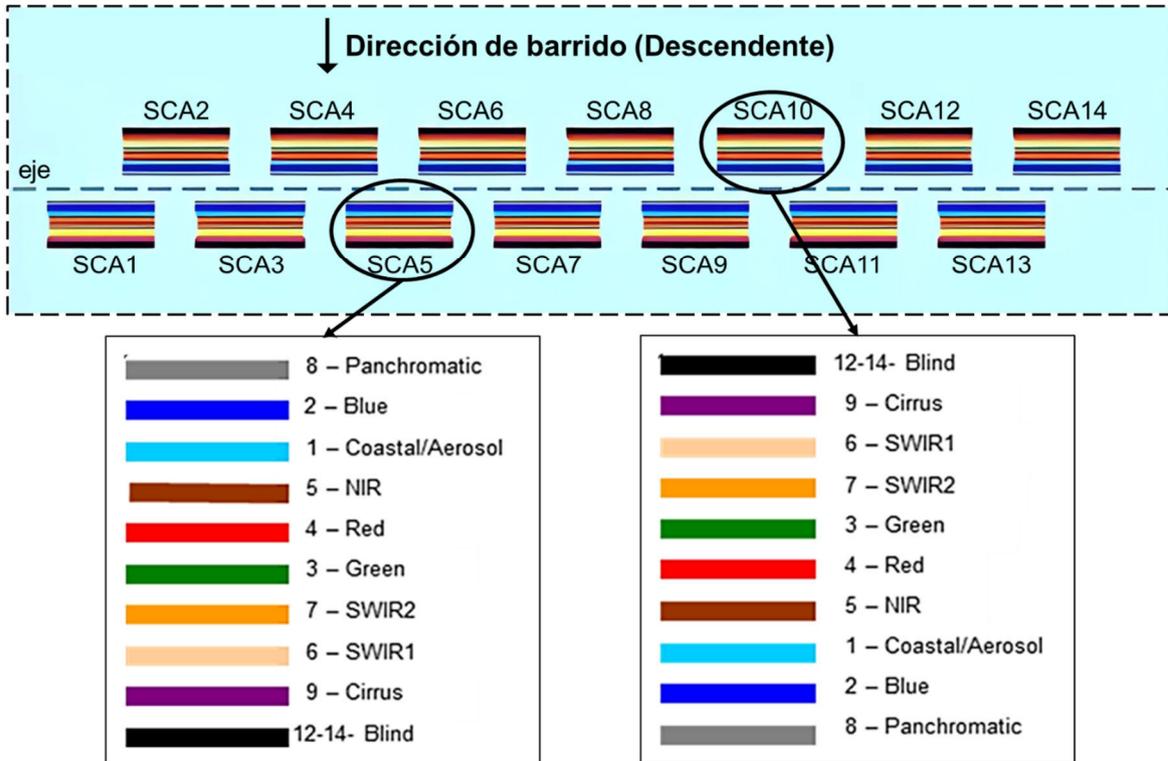


Figura 8: Disposición de bandas SCA pares / impares.
Fuente: Tomado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2019).

- **Sensor de Infrarrojo Térmico (TIRS)**

TIRS es un sensor de barrido que emplea un plano focal con largas series de detectores fotosensibles. TIRS utiliza fotodetectores infrarrojos de pozo cuántico (QWIP) para medir la energía infrarroja térmica de onda larga (TIR) emitida por la superficie de la Tierra, cuya intensidad es función de la temperatura de la superficie. Los TIRS QWIP son sensibles a dos bandas de longitud de onda infrarroja térmica, lo que permite la separación de la temperatura de la superficie de la Tierra de la de la atmósfera. El diseño de los QWIP se basa en los complejos principios de la mecánica cuántica. Los chips semiconductores de arseniuro de galio atrapan electrones en un estado de energía "bien" hasta que los electrones se elevan a un estado superior por la luz infrarroja térmica de una determinada longitud de onda. Los electrones elevados crean una señal eléctrica que puede leerse, registrarse,

traducirse a unidades físicas y usarse para crear una imagen digital. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

El sensor TIRS, que tiene una vida útil de tres años, recopila datos de imagen para dos bandas térmicas con una resolución espacial de 100 m en una franja de 190 km. Las dos bandas térmicas infrarrojas abarcan el rango de longitud de onda de las bandas térmicas TM y ETM + más amplias (10.0-12.5 μm) y representan un avance sobre los datos térmicos de una sola banda. Los datos generados por TIRS se cuantifican a 12 bits. Aunque TIRS tiene una resolución espacial más baja que la ETM + Banda 6 de 60 m, las bandas térmicas duales deberían permitir teóricamente la recuperación de la temperatura de la superficie, pero los problemas de luz parásita con la Banda 11 excluyen el uso de este enfoque. (Servicio Geológico de Estados Unidos, 2019)

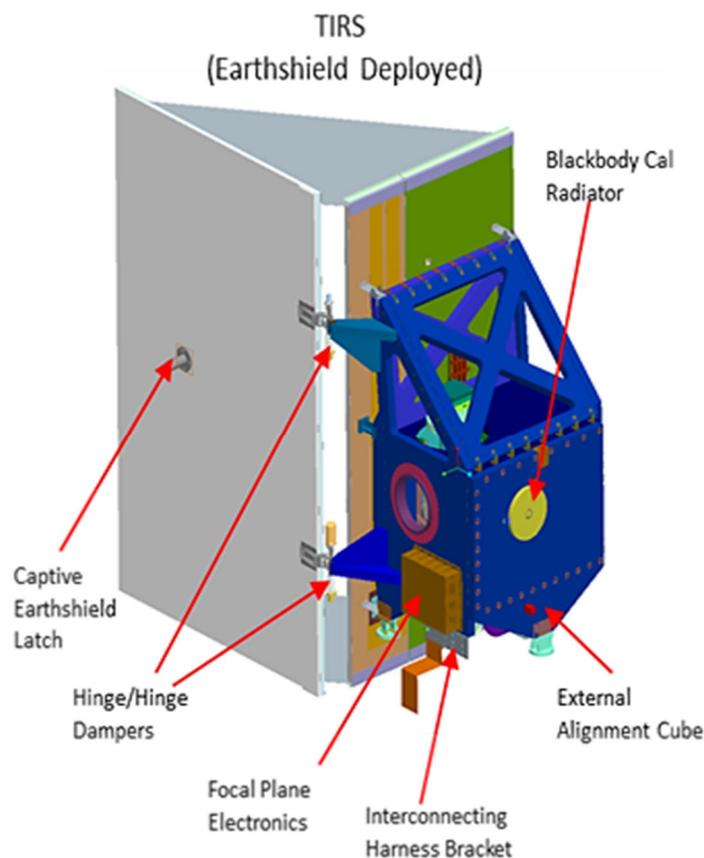


Figura 9: Instrumento TIRS con escudo terrestre desplegado.
Fuente: Tomado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2019).

Tabla 1.

Comparación de las bandas espectrales OLI y TIRS con las bandas ETM+

Landsat 7 ETM + Bandas (μm)			Landsat 8 OLI and TIRS (μm)		
Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
			Band 1 - Ultra Azul (Costera/Aerosoles)	0.435 – 0.451	30
Band 1 – Azul	0.45 – 0.52	30	Band 2 - Azul	0.452 – 0.512	30
Band 2 – Verde	0.52 – 0.60	30	Band 3 - Verde	0.533 – 0.590	30
Band 3 – Rojo	0.63 – 0.69	30	Band 4 – Rojo	0.636 – 0.673	30
Band 4 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.77 – 0.90	30	Band 5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.851 – 0.879	30
Band 5 – Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.55 – 1.75	30	Band 6 – Infrarrojo de onda corta 1 (SWIR 1)	1.566 – 1.651	30
Band 6 – Termal	10.40 – 12.50	60	Band 10 – Termal 1	10.60 – 11.19	100
			Band 11 – Termal 2	11.50 – 12.51	100
Band 7 – Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.09 – 2.35	30	Band 7 – Infrarrojo de onda corta 2 (SWIR 2)	2.107 – 2.294	30
Band 8 – Pancromática	0.52 – 0.90	15	Band 8 – Pancromática	0.503 – 0.676	15
			Band 9 – Cirrus	1.363 – 1.384	30

Fuente: Adaptado de Servicio Geológico de Estados Unidos (2019).

2.2.4. Espectro Electromagnético

El espectro incluye desde las longitudes de onda ínfimas (rayos X y Gamma), hasta aquellas usadas en telecomunicaciones, con longitudes de onda mucho mayores. Las unidades en que aparecen expresadas las distintas longitudes de onda, son variables de acuerdo con su tamaño: micras o micrómetros, o metros o centímetros para la más largas; por supuesto, todas ellas pueden expresarse en valores de frecuencia Hertzios o Gigahertzios. (Basterra, 2011)

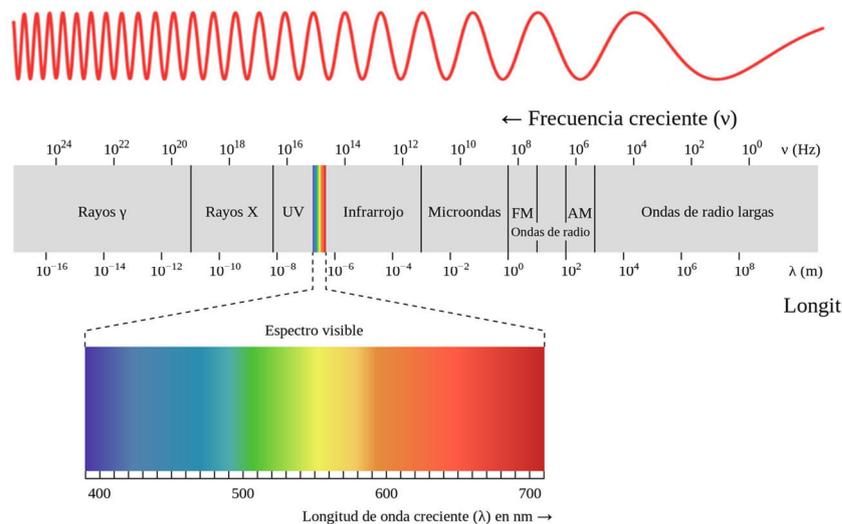


Figura 10: Espectro Electromagnético (EM).
Fuente: Tomado de Ronan (2008).

Entre las distintas bandas del espectro electromagnético, solo un restringido rango puede usarse en teledetección. Esto se debe principalmente al efecto absorbente de la atmósfera, que filtra cierto tipo de radiaciones. En consecuencia, únicamente en aquellas regiones del espectro donde la transmisividad de la atmósfera es alta, pueden abordarse procesos de teledetección (excepto, lo que se pretenda sea precisamente observar las condiciones de la atmósfera). (Basterra, 2011).

Según Basterra (2011), las regiones del espectro con alta transmisividad atmosférica, reciben el nombre de “ventanas atmosféricas”. Pueden resumirse en las siguientes:

- Espectro visible: ocupa la banda entre 0,4 y 0,7 micrones y su denominación se debe a que es la única radiación que puede captar el ojo humano. Dentro del visible podemos distinguir tres bandas espectrales correspondientes a los tres colores básicos: azul, verde y rojo.
- Infrarrojo próximo: se extiende desde 0,7 a 1,3 micrones. En teledetección se utiliza para la observación del estado de la vegetación y de concentraciones de humedad.
- Infrarrojo lejano o térmico: entre 10 y 12,5 micrones. Puede detectar procesos de transferencia de calor, ya que en esta banda se sitúa la máxima emitancia para las temperaturas habituales de la superficie

terrestre. En consecuencia, en esta banda se observa la energía que emiten los objetos, y no la que reflejan de la luz solar, por lo que es posible utilizar esta banda en observaciones nocturnas.

- Microondas: comprende las longitudes de onda mayores de 1mm. El interés de esta banda es que resulta prácticamente transparente a la cubierta nubosa, lo que la hace idónea para el estudio donde las nubes se dan de manera casi permanente (por ejemplo, las zonas tropicales). Esta región del espectro puede utilizarse también sin luz solar.

2.2.5. Reflectancia

El espectro incluye desde las longitudes de onda ínfimas (rayos X y Gamma), hasta aquellas usadas en telecomunicaciones, con longitudes de onda mucho mayores. Las unidades en que aparecen expresadas las distintas longitudes de onda, son variables de acuerdo con su tamaño: micras o micrómetros, o metros o centímetros para la más largas; por supuesto, todas ellas pueden expresarse en valores de frecuencia Hertzios o Gigahertzios (Basterra, 2011).

Entre las distintas bandas del espectro electromagnético, solo un restringido rango puede usarse en teledetección. Esto se debe principalmente al efecto absorbente de la atmosfera, que filtra cierto tipo de radiaciones. En consecuencia, únicamente en aquellas regiones del espectro donde la transmisividad de la atmosfera es alta, pueden abordarse procesos de teledetección (salvo que lo que se pretenda sea precisamente observar las condiciones de la atmosfera).

2.2.5.1. Ley de la reflexión

El fenómeno de la reflexión especular presenta dos características esenciales que son las dos leyes que la rigen.

- El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal, se encuentran en el mismo plano.
- El ángulo de incidencia (θ_1) es igual al ángulo de reflexión (θ_2)

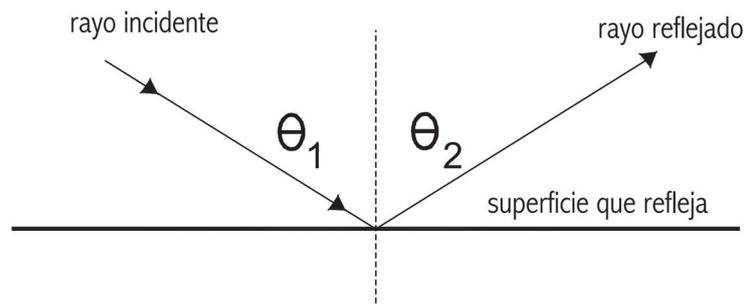


Figura 11: Reflexión especular.
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

2.2.5.2. Reflexión espectral

En las siguientes figuras se muestran las curvas de reflectancia espectral de 4 pinturas de color distinto: blanca, negra, roja y azul claro. La figura 12 muestra un ejemplo de pintura blanca que, en este caso, no refleja nada del espectro ultravioleta (UV); es decir, que toda es absorbida por la pintura. En cuanto a la radiación visible (V), la pintura blanca refleja la mayoría del espectro, en donde todos los colores se reflejan más o menos con la misma intensidad. La combinación de todos los colores reflejados a la misma intensidad es percibida como luz blanca. El 10% restante, es absorbido por centros de absorción presentes en la pintura. En cuanto a la radiación infrarroja (IR), este ejemplo de pintura blanca refleja muy poco, y, por tanto, esta pintura no se calienta mucho. (Lira & Guevara, 2018)

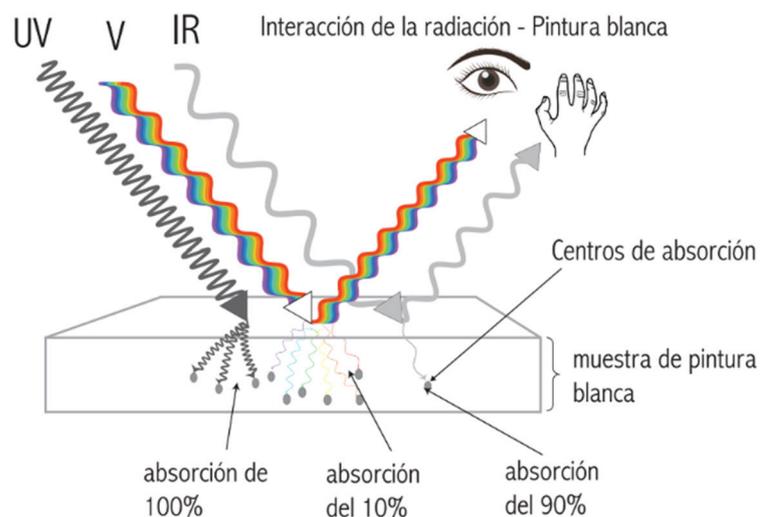


Figura 12: Interacción de la radiación con una pintura blanca.
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

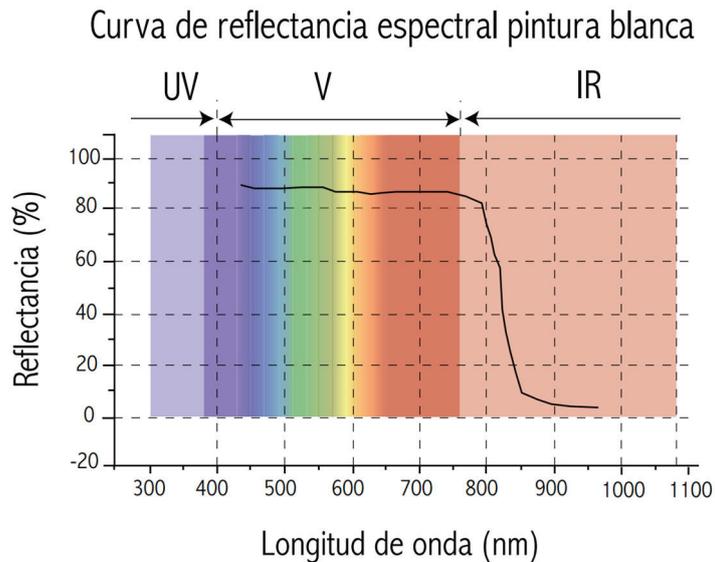


Figura 13: Curva de reflectancia espectral de una pintura blanca
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

La figura 14 muestra la curva de reflectancia espectral de un ejemplo de pintura negra que no refleja nada del espectro ultravioleta (UV); es decir, que toda es absorbida por la pintura. En cuanto a la radiación visible (V), la pintura negra refleja todos los colores, pero con muy poca intensidad; es decir, que absorbe todos los colores en aproximadamente un 90%. La combinación de todos los colores reflejados a la misma intensidad, pero de forma muy baja es percibida como “luz” negra, o lo que es más correcto, ausencia de luz y, por tanto, el color aparente es negro. En cuanto a la radiación infrarroja (IR), este ejemplo de pintura negra refleja bastante, por tanto, esta pintura si se calienta mucho. (Lira & Guevara, 2018)

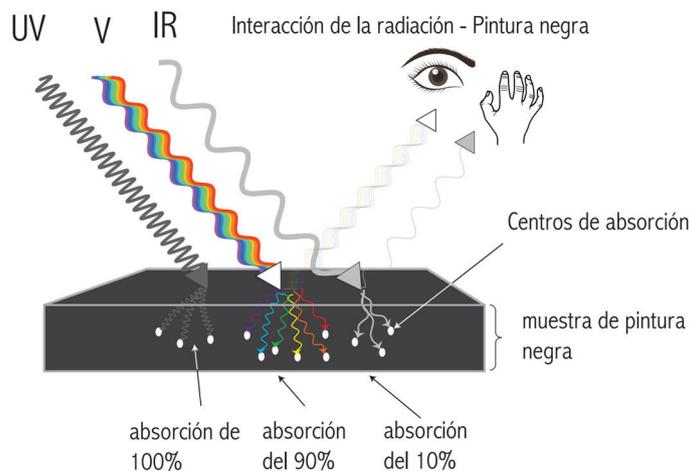


Figura 14: Interacción de la radiación con una pintura negra.
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

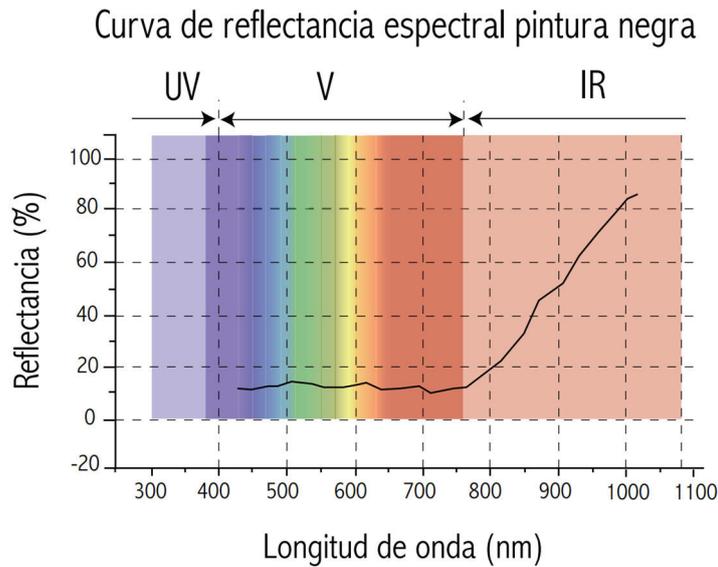


Figura 15: Curva de reflectancia espectral de una pintura negra
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

A continuación, la figura 16 muestra la curva de reflectancia espectral de un ejemplo de pintura roja que, en este caso, no refleja nada del espectro ultravioleta (UV); es decir, que toda es absorbida por la pintura. En cuanto a la radiación visible (V), la pintura roja refleja con mayor intensidad los colores naranjas y rojos; el resto de los colores los refleja con muy baja intensidad. Por esta razón la pintura tiene un color aparente rojo. En cuanto a la radiación infrarroja (IR), este ejemplo de pintura roja refleja bastante, por tanto, esta pintura si se calienta mucho. (Lira & Guevara, 2018)

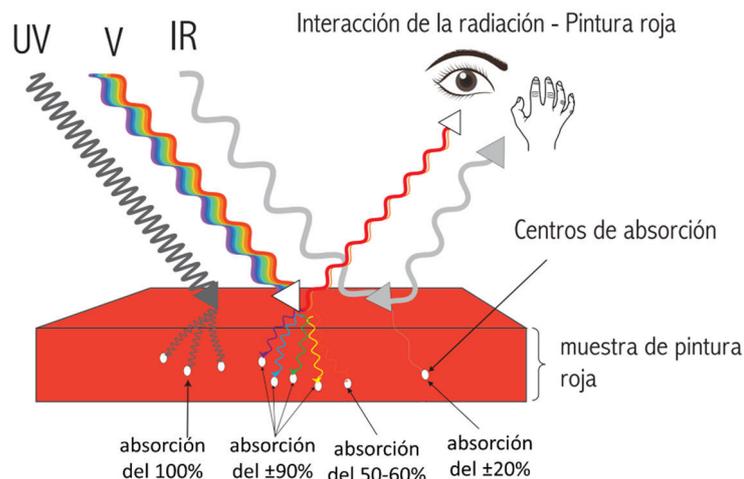


Figura 16: Interacción de la radiación con una pintura roja.
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

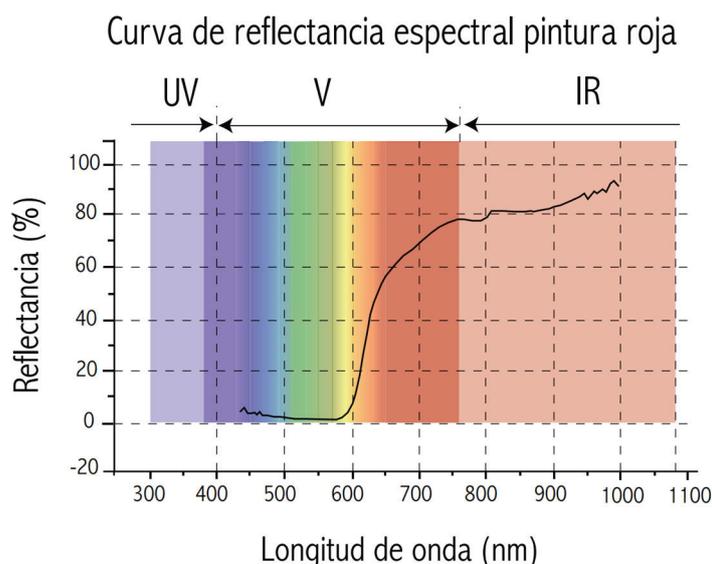


Figura 17: Curva de reflectancia espectral de una pintura roja
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

La figura 18 muestra la curva de reflectancia espectral de un ejemplo de pintura azul claro que, en este caso, no refleja nada del espectro ultravioleta (UV); es decir que, toda es absorbida por la pintura. En cuanto a la radiación visible (V), la pintura azul claro refleja la mayoría del espectro, en donde todos los colores se reflejan más o menos con una intensidad alta, aunque los colores naranjas y rojos son reflejados en un porcentaje ligeramente menor que los violetas, azules y verdes. El que todos los colores se reflejen con una intensidad alta, da al material una apariencia de color claro, ya que la luz reflejada tiende a verse blanca. Si a esto se le suma que los colores violetas, azules y verdes se reflejan en un porcentaje ligeramente mayor, el color resultante será un azul claro. En cuanto a la radiación infrarroja (IR), este ejemplo de pintura roja refleja bastante, y, por tanto, esta pintura si se calienta mucho. (Lira & Guevara, 2018)

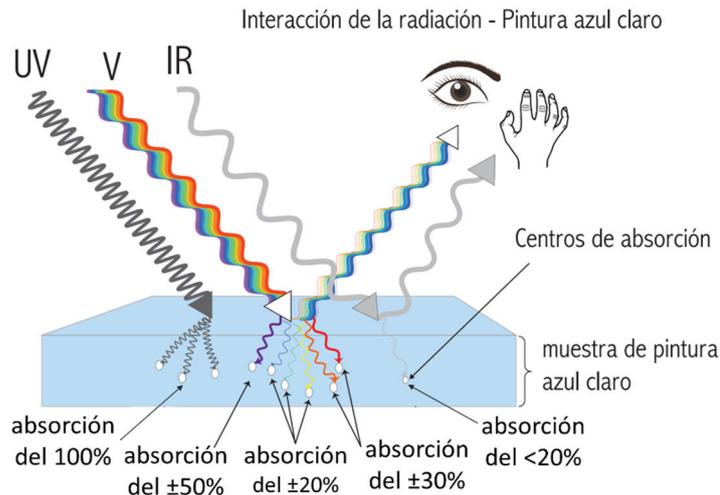


Figura 18: Interacción de la radiación con una pintura azul claro.
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

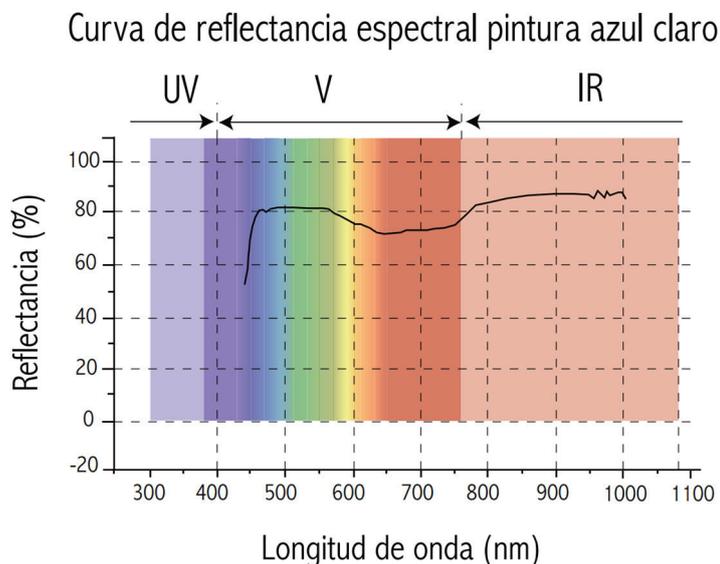


Figura 19: Curva de reflectancia espectral de una pintura azul claro
Fuente: Tomado de Lira & Guevara (2018).

2.2.5.3. Reflectancia de los carbonatos

Como se menciona en Rajendran & Nasir (2014a), la sensibilidad espectral de los minerales de carbonato depende de la composición de estos minerales en la superficie de exposición del afloramiento. Y según Clark et al.,(2007). cómo se expone en la biblioteca espectral del USGS se muestra que los minerales de carbonato tienen un significativo rango estrecho de reflectancia (2.295–2.365 μm), atribuido a la presencia del enlace C–O en su estructura cristalina.

Al considerar la sensibilidad espectral de las características objetivo, se basa en el enlace geométrico específico, disposición estructural y propiedades de

composición química exhibidas por los minerales de CO₃. Las características de absorción en las bandas VNIR, SWIR y TIR pueden discriminar de manera efectiva los minerales de carbonato (calcita y dolomita), debido a procesos vibratorios y electrónicos que ocurren en los minerales de CO₃. (Muhammad et al., 2023)

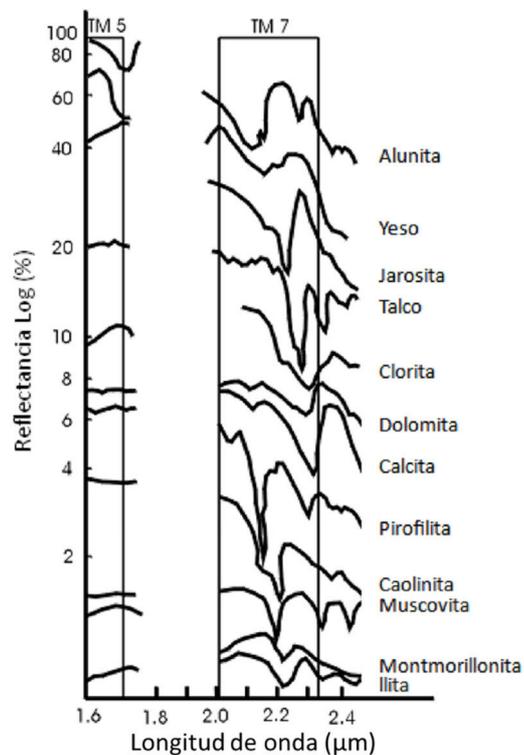


Figura 20: Muestra la firma espectral de algunos minerales arcillosos, filosilicatos, carbonatos y sulfatos Las bandas TM5 y TM7, pertenecen al sensor TM de Landsat; en el eje horizontal se encuentra la longitud de onda y el eje vertical el porcentaje de reflectancia en escala logarítmica.

Fuente: Adaptado de Hunt & Ashley (1979).

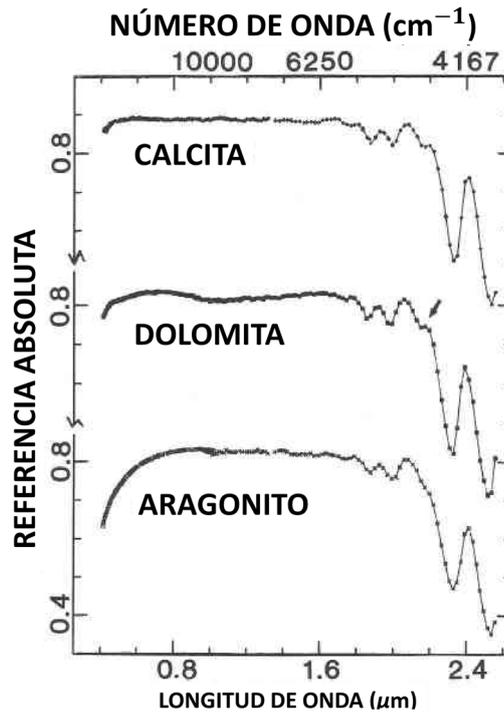


Figura 21: Espectros de los tres minerales carbonatos formadores de rocas más comunes. La flecha indica el mínimo local en la curva que ocurre en la misma región del espectro en los espectros de calcita, pero no en los espectros de aragonito, debido a una menor separación entre centros y un mayor grado de superposición entre las bandas 3 y 4 en los espectros de aragonito.

Fuente: Tomado y traducido de Gaffey (1986).

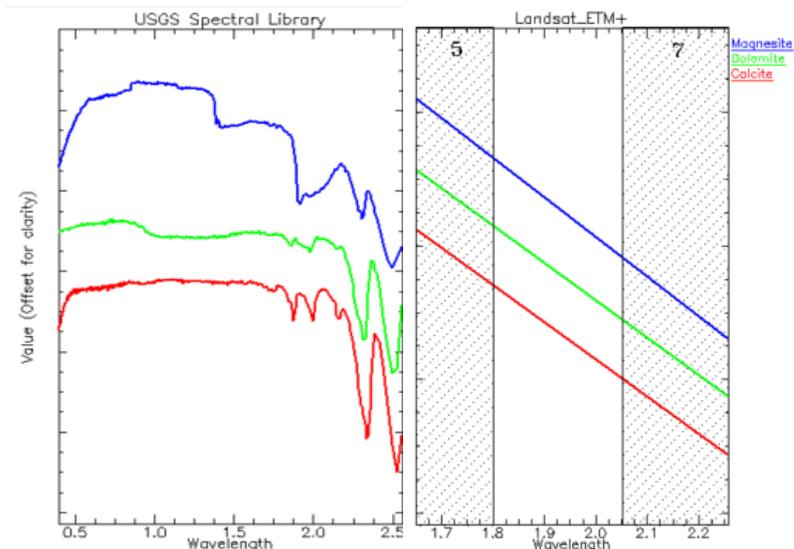


Figura 22: Firmas espectrales de minerales carbonatados (izq) de la biblioteca espectral del USGS

Fuente: Adaptado de Fatima et al. (2017)

2.2.6. Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI)

2.2.6.1. Inicio del NDVI

En el trabajo realizado por Kriegler et al. (1969), propusieron una transformación de bandas simple: radiación del infrarrojo cercano (NIR) menos radiación roja (RED) dividida por radiación del infrarrojo cercano más radiación roja, lo que resulta en una imagen recién simplificada llamada Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (Huang, et al., 2020).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

El NDVI es una de las primeras propuestas de análisis de percepción remota multiespectral y actualmente es uno de los más populares. Dada la simpleza en la definición del NDVI y su capacidad para distinguir la presencia de vegetación, así como la salud de esta. El NDVI ha sido utilizado en una gran cantidad de investigaciones científicas. La utilidad del índice ha propiciado que desde la década de 1970 diversos satélites y otros vehículos estén equipados con sensores adecuados para captar la información que requiere su cálculo. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022)

Otra manera de expresar la ecuación es considerando $\rho = \frac{NIR}{RED}$, se puede ver que

$$NDVI = \frac{\rho - 1}{\rho + 1}$$

Esta manera de expresar el índice hace que sea más fácil interpretar sus valores. Por un lado, hace explícito que el valor del NDVI solo depende del valor ρ ; es decir, de la razón entre las bandas NIR y RED. En la siguiente gráfica podemos observar la variación del NDVI en función de ρ :

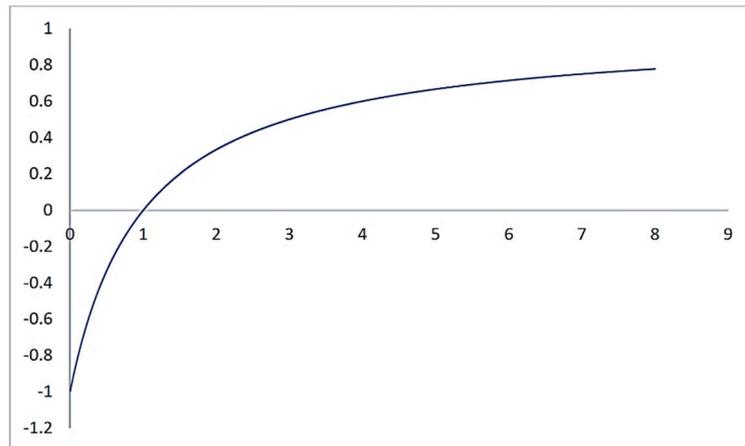


Figura 23: Gráfica de NDVI como función de ρ .

Fuente: Tomado de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2022).

- Dado que los valores NIR y R siempre son positivos, el valor ρ siempre es positivo
- El valor del cociente siempre es menor que 1 ya que $\rho + 1 > \rho - 1$. Además, se puede demostrar que $\lim_{\rho \rightarrow \infty} NDVI = 1$
- De manera que el NDVI es un índice que toma valores en el intervalo $[-1, 1]$ que permite observar diferencias entre las frecuencias visibles (R) y frecuencias no visibles (NIR). (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022)

2.2.6.2. Relación del NDVI

Los sensores desde el espacio y desde el aire mezclan las radiaciones dispersadas por la atmósfera y las reflejadas por la superficie en las grabaciones de datos. Debido a la dispersión de Rayleigh, la radiancia en la región roja es mucho mayor que en la región del NIR. Los valores de longitud de onda media de la banda 4 y 5 del Landsat 8 tienen longitudes de onda de 655 nm y 865 nm, respectivamente. Por lo tanto, la dispersión en la región roja es tres veces mayor que en la región del NIR. En otras palabras, la radiancia registrada en la región roja contiene una proporción mucho mayor de dispersión que en la región del NIR. (Huang, et al., 2020).

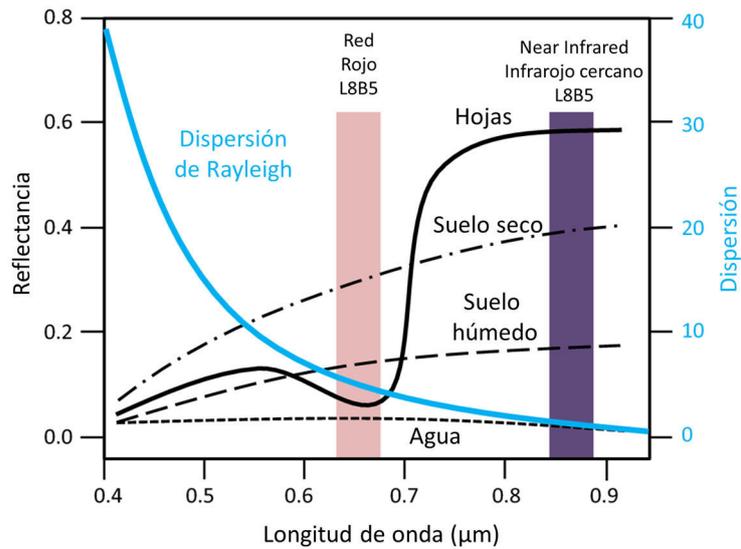


Figura 24: Una ilustración de las curvas de respuesta espectral y sus intersecciones con las bandas de rojo (Landsat 8 Banda 4) e infrarrojo cercano (Landsat 8 Banda 5), así como la dispersión dependiente de la longitud de onda.

Fuente: Tomado y traducido de Huang, et al. (2020).

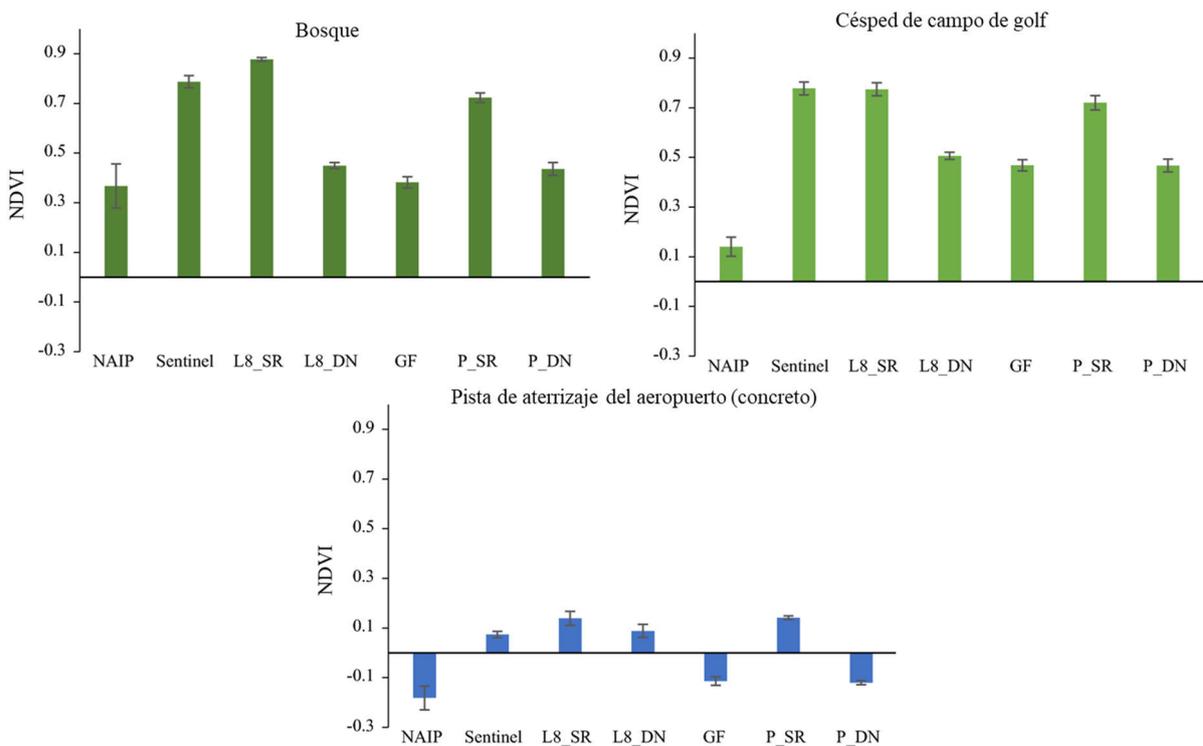


Figura 25: Una comparación de los valores de NDVI para tres tipos de cobertura terrestre y de cuatro fuentes de datos de satélites gratuitos y uno aéreo, adquiridos en otoño entre 2016 y 2019. NAIP es la fotografía aérea del Programa Nacional de Imágenes Agrícolas del USDA (tamaño de píxel de 0,6 m), Sentinel es datos de reflectancia superficial de nivel 2 (10 m), L8_SR es datos de reflectancia superficial del Landsat 8 (30 m), L8_DN es datos de números digitales del Landsat 8 (30 m), GF es datos de Gaofen-2 (3 m), P_SR es datos de reflectancia superficial de Planet (3 m), y P_DN es datos de números digitales de Planet (3 m). Los sitios de muestreo se encuentran en West Lafayette, Indiana, EE. UU.

Fuente: Tomado y traducido de Huang, et al. (2020).

2.2.6.3. NDVI en Landsat

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (2019), los productos del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) derivados de la Reflectancia Superficial (SR) de Landsat se generan a partir de escenas de Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS) Collection 1 y Collection 2, que han sido procesadas para obtener productos de Reflectancia Superficial de Nivel 2 de Landsat.

El NDVI se utiliza para cuantificar el verdor de la vegetación y es útil para comprender la densidad vegetal y evaluar cambios en la salud de las plantas. El NDVI se calcula como una relación entre los valores de rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) de manera tradicional:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

- En Landsat 4-7, $\text{NDVI} = (\text{Banda 4} - \text{Banda 3}) / (\text{Banda 4} + \text{Banda 3})$.
- En Landsat 8-9, $\text{NDVI} = (\text{Banda 5} - \text{Banda 4}) / (\text{Banda 5} + \text{Banda 4})$.

Tabla 2.
Clasificación de la vegetación en base al NDVI

Valor de NDVI	Clasificación de Vegetación
-1.00 - 0.00	Sin vegetación (SV)
0.01 – 0.30	Poca vegetación (PV)
0.31 - 0.60	Moderada vegetación (MV)
0.61 - 1.00	Alta vegetación (AV)

Fuente: Adaptado de Laksono et al. (2020).

2.2.6.4. Influencia litológica sobre la vegetación

Como menciona Ott (2020), la litología es un control importante en el suministro de nutrientes para las plantas porque determina parcialmente los productos de meteorización, el pH del suelo y las condiciones hidrológicas (Formación de arcilla,

densidad de fracturas e infiltración). Las concentraciones de fósforo, que limitan el crecimiento de las plantas en algunos ambientes, son altas en rocas silicoclásticas y bajas en rocas carbonatadas. Los terrenos carbonatados a menudo presentan condiciones desafiantes para el crecimiento de la vegetación debido al bajo contenido de nutrientes, bajo contenido de arcilla en el suelo y una alta susceptibilidad a la infiltración de agua en el sistema de aguas subterráneas.

La relación que indica un NDVI es particularmente alto en áreas plutónicas y silicoclásticas en comparación con las regiones carbonatadas, esto probablemente esté relacionado con su mayor contenido promedio de nutrientes y mayor contenido de arcilla, lo que facilita la retención de agua disponible para las plantas, a diferencia del menor contenido de arcilla en áreas carbonatadas lo cual disminuye la capacidad del regolito para retener agua para el crecimiento de las plantas, facilita la infiltración de agua hacia el agua subterránea y puede reducir la productividad primaria. (Ott, 2020)

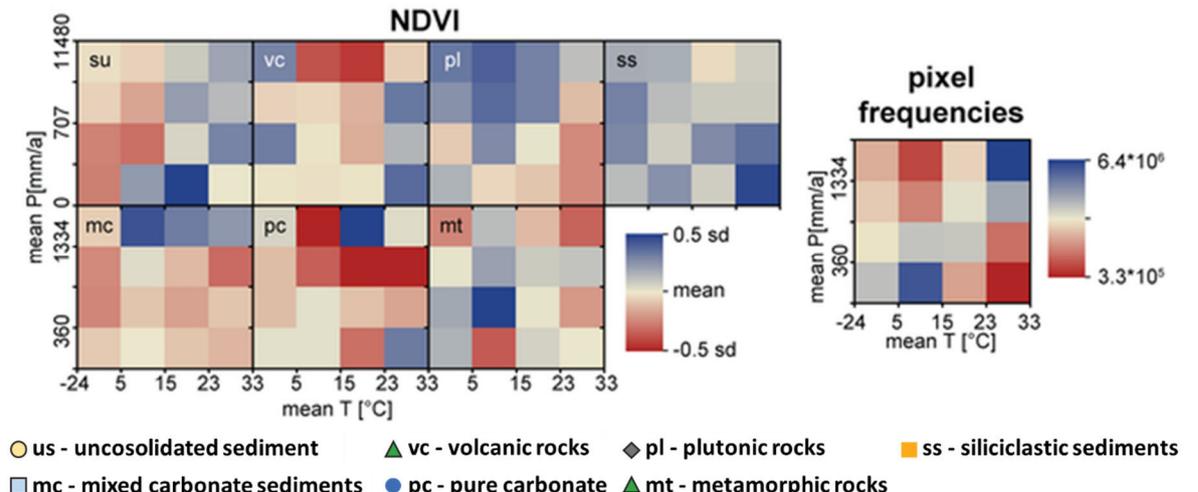


Figura 26: Agrupación de variables biológicas según la temperatura media anual (T) y la precipitación media anual (P) para cada grupo litológico. Los contenedores están coloreados según su desviación respecto a la media del NDVI o la riqueza de especies de todo el contenedor T-P en diferentes litologías. Los colores rojos indican que la media de una unidad litológica está por debajo de la media del NDVI. El número de píxeles por contenedor se representa en el panel inferior derecho.

Fuente: Adaptado de Ott (2020).

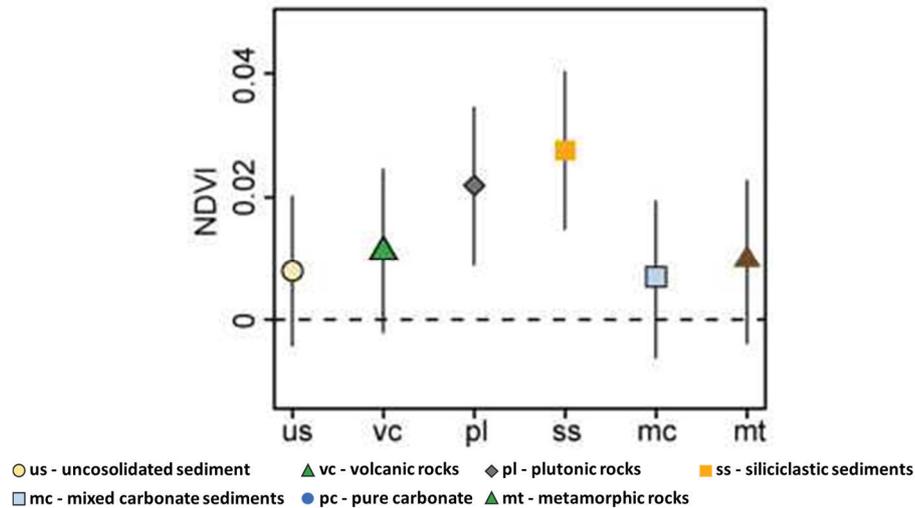


Figura 27: Comparación de las medias para el NDVI, en relación con el grupo de referencia (carbonatos puros). Los gráficos muestran la diferencia en las medias entre grupos con intervalos de confianza, la línea discontinua en cero corresponde a la respectiva media en áreas de carbonato puro.

Fuente: Adaptado de Ott (2020).

2.2.7. Caliza

La caliza, la roca sedimentaria química más común, está compuesta principalmente por la mineral calcita (carbonato de calcio, CaCO_3). Existen muchas variedades de caliza. Los tipos más abundantes tienen un origen bioquímico, lo que significa que los organismos que viven en el agua extraen la materia mineral disuelta y crean partes duras, como los caparzones. Después, estas partes duras se acumulan como sedimento. (Tarbuck & Lutgens, 2005)

2.2.7.1. Composición de la caliza

Las calizas son rocas sedimentarias compuestas en su mayoría del mineral conocido como calcita (CaCO_3). Calentando la caliza en condiciones controladas, se obtiene lo que se denomina como cal. El término cal tiene un significado muy amplio e incluye cal viva, la cal hidratada y la cal hidráulica. Generalmente, la cal se obtiene al incinerar las rocas a una temperatura entre los 900 y 1200°C (por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio) durante varios días, dependiendo del tipo de piedra caliza, en un horno rotario o tradicional. (Ávila, 2010)

2.2.7.2. *Reflectancia de la caliza*

Las características de absorción de calcita, dolomita y aragonito en el rango de longitud de onda entre visible y SWIR. (De Gaffey, 1986). La muestra el espectro de absorción de la calcita y la dolomita en la región TIR (Clark, 1999) indicando que la calcita y dolomita tienen una fuerte absorción en el TIR en 11.40 y 11.35 μm respectivamente. Además, se puede ver las diferencias exactas entre las firmas espectrales de la calcita y la dolomita. (Rajendran & Nasir, 2014b)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Banda espectral: Es cada imagen que contiene información espectral en una longitud de onda determinada. (Camacho et al., 2015)

Correcciones de la imagen: Indica aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización o píxeles que la componen, existen de dos formas radiométrica y atmosférica. (Chuvienco, 1995)

Firma espectral: La firma espectral no es más que la cualidad de los objetos de absorber, reflejar o emitir la energía electromagnética la misma que es distinta y única para cada elemento de la naturaleza. (Córdova, 2018)

Radiometría: Es un sistema de lenguaje, matemáticas e instrumentación que se utiliza para describir y medir la propagación de la radiación electromagnética, incluidos los efectos sobre esa radiación de reflexión. (Ross, 2014)

Textura: Conjunto de las relaciones intergranulares de tamaño y forma de los cristales o clastos que forman una roca determinada. Las denominaciones texturales y los criterios utilizados varían según el tipo de roca considerada. (Castro, 1989)

CAPÍTULO III MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN

3.1.1. Geográfica

La investigación geográficamente se ubica en el Centro Poblado de Otuzco Alto, específicamente en los afloramientos de roca sedimentaria caliza de la Formación Cajamarca, los cuales se encuentran dentro de los siguientes vértices en el sistema UTM, DATUM WGS-84. Los 4 vértices son representados en la tabla 4.

Tabla 3.
Vértices que delimitan el área de investigación

Vértices	Longitud	Latitud
V1	787000	9213000
V2	787000	9207000
V3	781000	9207000
V4	781000	9213000



Figura 28: Ubicación geográfica de los vértices que delimitan el área investigada.

Fuente: Adaptado de Google Earth Pro (2023).

3.1.2. Política

Las Formaciones a investigar se encuentran ubicadas en el continente sudamericano; País Perú, en la cordillera de los Andes, se encuentra dentro de la carta Nacional de Cajamarca 15-g. en el Departamento, Región, Provincia de Cajamarca, en el Baños del Inca, en el Centro Poblado de Otuzco Alto.

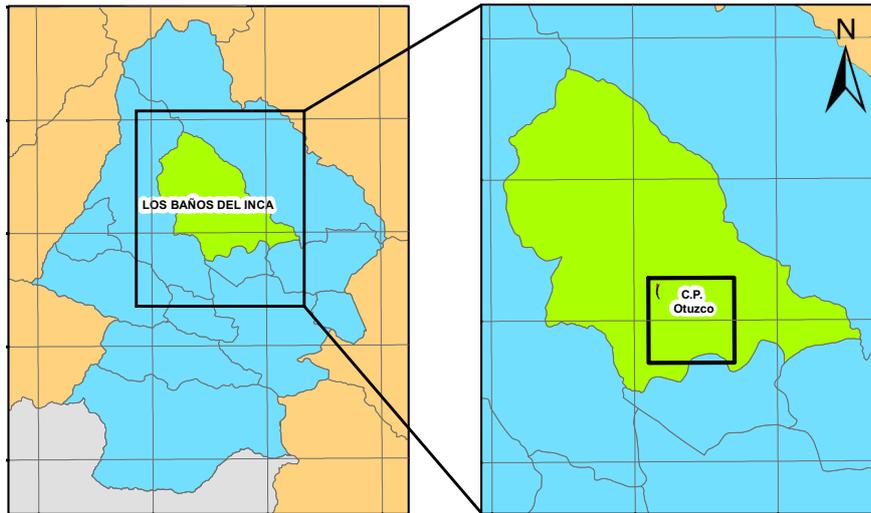


Figura 29: Ubicación política del Centro Poblado de Otuzco Alto.

3.1.3. Accesibilidad

Con respecto a la accesibilidad, el Centro Poblado de Otuzco Alto está ubicado a 10.8 Km. al NE. de la ciudad de Cajamarca, al cual se tiene dos accesos, la primera por la carretera a Baños del Inca y la segunda usando la vía de Hoyos Rubio, ambas tienen una carretera asfaltada que conecta ambas ciudades, con un tiempo aproximado de 24 y 27 minutos de viaje en transporte público respectivamente. Como se puede ver en la figura 30

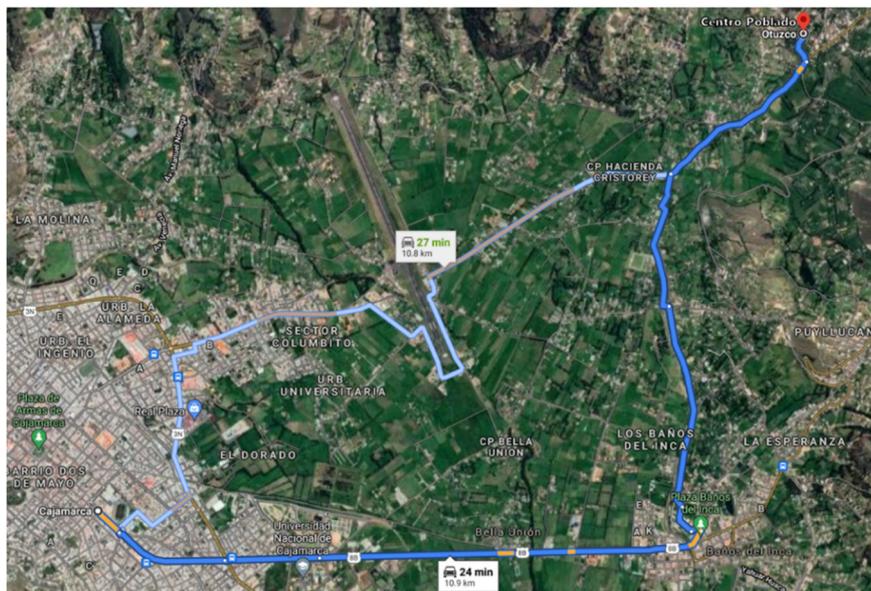


Figura 30: Accesibilidad al Centro Poblado de Otuzco Alto desde la ciudad de Cajamarca.

Fuente: Adaptado de Google Maps (2023).

3.2. PROCEDIMIENTOS

- **Etapa de Gabinete**

La primera etapa está conformada por una planificación de tareas a realizar anexo a una recopilación de información teórica y antecedentes, además de análisis de imágenes satelitales para determinar la extensión del área de estudio.

- **Etapa de Campo**

Esa etapa está conformada por campañas de campo, en las cuales se obtendrá información in situ con el fin de tomar muestras para el análisis correspondiente que son necesarias para el análisis textural de las calizas en la Formación mencionada, logrando una investigación aplicada – tecnológica, permitiendo definir la composición litológica, composición química y textural, Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada y reflectancia.

- **Etapa Final**

La información obtenida en las etapas anteriores, se procesa e interpreta a través del uso de software Envi 5.3 y ArcGIS.10.8 Con los cuales se logra realizar el análisis adecuado en base a la composición textural corroborando datos obtenidos mediante la teledetección y los datos obtenidos acerca de la composición química de las por medio de los ensayos. También se realizarán los planos finales correspondientes.

3.2.1. Metodología

- **Aplicada**

La metodología de investigación tiene una finalidad aplicada que se enfoca en la búsqueda y consolidación de la información según los objetivos.

- **Descriptiva – Correlacional – Explicativa**

La investigación describe como los datos de las imágenes satelitales se relaciona con la composición química de las calizas de la Formación Cajamarca ubicadas en el Centro Poblado de Otuzco Alto, para luego realizar una comprobación con los datos de los ensayos químicos, finalmente explicando las relaciones que existen entre estos.

- **No experimental – Transversal**

El desarrollo de la investigación considera un periodo único de tiempo y como se muestran en su estado natural.

- **Cuantitativa**

Se toma datos mediante el análisis de imágenes Landsat considerando parámetros cuantitativos, además de los datos obtenidos con ensayos de composición.

- **Gabinete y campo**

Parte del trabajo se realiza de manera in situ en descripción en campo con la toma de muestras y también se compone de parte gabinete por la obtención de las imágenes satelitales y el tratamiento de éstas.

- **Primarias y secundarias**

Como parte de la investigación se requiere la obtención de datos directos como son las muestras de la caliza y también los datos de las imágenes Landsat.

Tabla 4.
Metodología de la investigación.

Clasificación	Tipo de investigación
Por el propósito	<p>Aplicada</p> <p>Aplicada porque se basa en los hallazgos y descubrimientos que se planteó en los objetivos</p>
Por el alcance de la investigación	<p>Descriptiva – Correlacional - Explicativa</p> <p>Descriptiva porque se detallan las propiedades litológicas, espectrales (NDVI, reflectancia) y químicas de las calizas.</p> <p>Correlacional porque se relacionan variables espectrales con resultados de laboratorio para encontrar patrones útiles en la exploración.</p> <p>Explicativa porque se aclara como es que suceden las relaciones entre las variables.</p>
Por el diseño	<p>No experimental – Transversal</p> <p>Es no experimental porque no manipula variables, solo las observa en su estado natural.</p> <p>Es transversal porque los datos se recogen y analizan en un único periodo de tiempo.</p>
Por el enfoque o tipo de datos	<p>Cuantitativa</p> <p>Se recolectan y analizan datos numéricos: valores de reflectancia, índices NDVI y resultados de laboratorio, lo que permite un análisis medible.</p>
Por el lugar donde se realiza	<p>Gabinete y campo</p> <p>Parte del trabajo se realiza en campo (toma de muestras geológicas) y otra parte en gabinete (procesamiento de imágenes en ENVI 5.3 y ArcGIS 10.8, análisis de laboratorio).</p>
Por las fuentes de información	<p>Primarias y secundarias</p> <p>Se obtienen datos primarios (muestras de caliza recolectadas y analizadas) y secundarios (imágenes Landsat 8 y literatura científica).</p>

Fuente: Adaptado de Hernández-Sampieri & Mendoza (2018).

3.1.3.1. Población de estudio

La población de estudio es la Formación Cajamarca que se encuentra dentro de los 36 kilómetros cuadrados ubicados en el Centro Poblado de Otuzco Alto.

3.1.3.2. Muestra

Litología, composición química, Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada y reflectancia.

3.1.3.3. Unidad de análisis

La roca caliza de la Formación Cajamarca, los porcentajes de su composición química, el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada e índice de reflectancia

3.2.2. Identificación de Variables

Para la investigación se ha determinado las siguientes variables, como variable independiente: litología y como dependiente: Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada , pureza y reflectancia. (Ver tabla 6, cuadro de variables):

Tabla 5.
Cuadro de variables.

Variable Independiente (Causa)	Variables Dependientes (Efecto)
Litología	Pureza
	Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada
	Reflectancia

3.2.3. Operacionalización de Variables

Tabla 6.
Operacionalización de variables.

Variables	Definición conceptual	Indicador
Independientes		
Litología	Composición de los suelos a partir de la evaluación de las propiedades químicas y físicas.	Tipo de roca
Dependientes		
Pureza	La pureza en química es el grado de concentración de átomos del mismo elemento.	%
Índice de diferencia de vegetación normalizado	Indicador que se calcula a partir de imágenes satelitales para medir la cantidad y el estado de la vegetación en una superficie.	Rango de valores (-1 a 1)
Reflectancia	La reflectancia es la proporción de luz reflejada por una superficie que se ve reflejada en cada banda espectral.	μm

3.2.4. Técnicas

- **Observación**

Se realizó una primera revisión de antecedentes, con los cuales se determinó el área a investigar, se realizó visita a campo dónde se observó de forma general y se seleccionó las calizas de la Formación Cajamarca debido a las características que estas presentan.

- **Documentales**

Para poder tener una base sobre la cual desarrollar el proyecto, se recurrió a la recopilación de información previa del lugar de estudio o trabajos aledaños. La fuente principal para la recopilación fue el repositorio institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca, dónde se buscó información sobre tesis con aplicaciones de la teledetección.

- **Etapas de campo y laboratorio**

Luego se procede una visita a campo para la obtención de información, además de realizar el muestreo de las calizas de la Formación Cajamarca, dichas muestras serán necesarias para los ensayos. luego de obtener las muestras representativas en campo, se procederá a la realización de los ensayos los cuales se efectuarán en el laboratorio, siendo este el ensayo de determinación de composición.

- **Obtención, procesamiento y análisis de la información**

Se hace una búsqueda y recolección de información donde los datos que se usarán para la teledetección serán imágenes Landsat las cuáles serán extraídas de <https://search.earthdata.nasa.gov>, para su posterior procesamiento en los software Envi 5.3 y ArcGIS 10.8, haciendo uso de las bandas espectrales y el NDVI, para posteriormente relacionarlo con los resultado que se obtengan de los ensayos de composición, también se extrae imágenes satelitales de SASPlanet y del software Global Mapper se extrae el DEM para la generación de las pendientes

- **Elaboración de la Tesis de Investigación**

Esta etapa ocurre a lo largo de todo el proceso y no solamente al final, ya que reúne todo lo obtenido en las anteriores etapas, desde los antecedentes, bases teóricas y demás apartados, para finalmente presentar el análisis hecho con la teledetección y los ensayos de composición de forma concisa y visible gracias a las distintas imágenes y planos generados.

3.2.5. Instrumentos y Equipos

Dentro de los instrumentos de medición y equipos utilizados tenemos:

- **Martillo de geólogo:** Utilizada para la toma de muestras.
- **Rayador:** Utilizado para la identificación de tipo de rocas.

- **Lupa de 20x:** También es utilizada en la identificación de un tipo de roca a través de sus granos.
- **Brújula Brunton:** Utilizada en campo para tomar datos de azimut y buzamiento.
- **Cámara fotográfica Cannon de 10 Mpx:** Para la toma de fotografías de las muestras y estaciones.
- **Fichas y formatos de investigación:** Estas fichas servirán para la toma de datos en las distintas estaciones, así como en la descripción de estas.
- **Laptop HP Corei7:** Equipo que servirá para el procesamiento de los datos analizado con los softwares correspondientes.
- **Libreta de campo:** Para anotar todos los datos tomados en las salidas de campo.
- **Plano geológico:** Para identificar las Formaciones geológicas.
- **Plano satelital:** Para la ubicación y delimitación del área de estudio.

3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La determinación de la estructura para el área de estudio se hizo de forma manual y usando las imágenes de Landsat 8, además de tomar como referencia el plano geológico estructural del INGEMMET y la foto interpretación de la imagen descargada de SASPlanet, el procesamiento de las imágenes se realizó en el software Envi 5.3. y posterior montaje con el software ArcGIS 10.8 para la elaboración del plano.

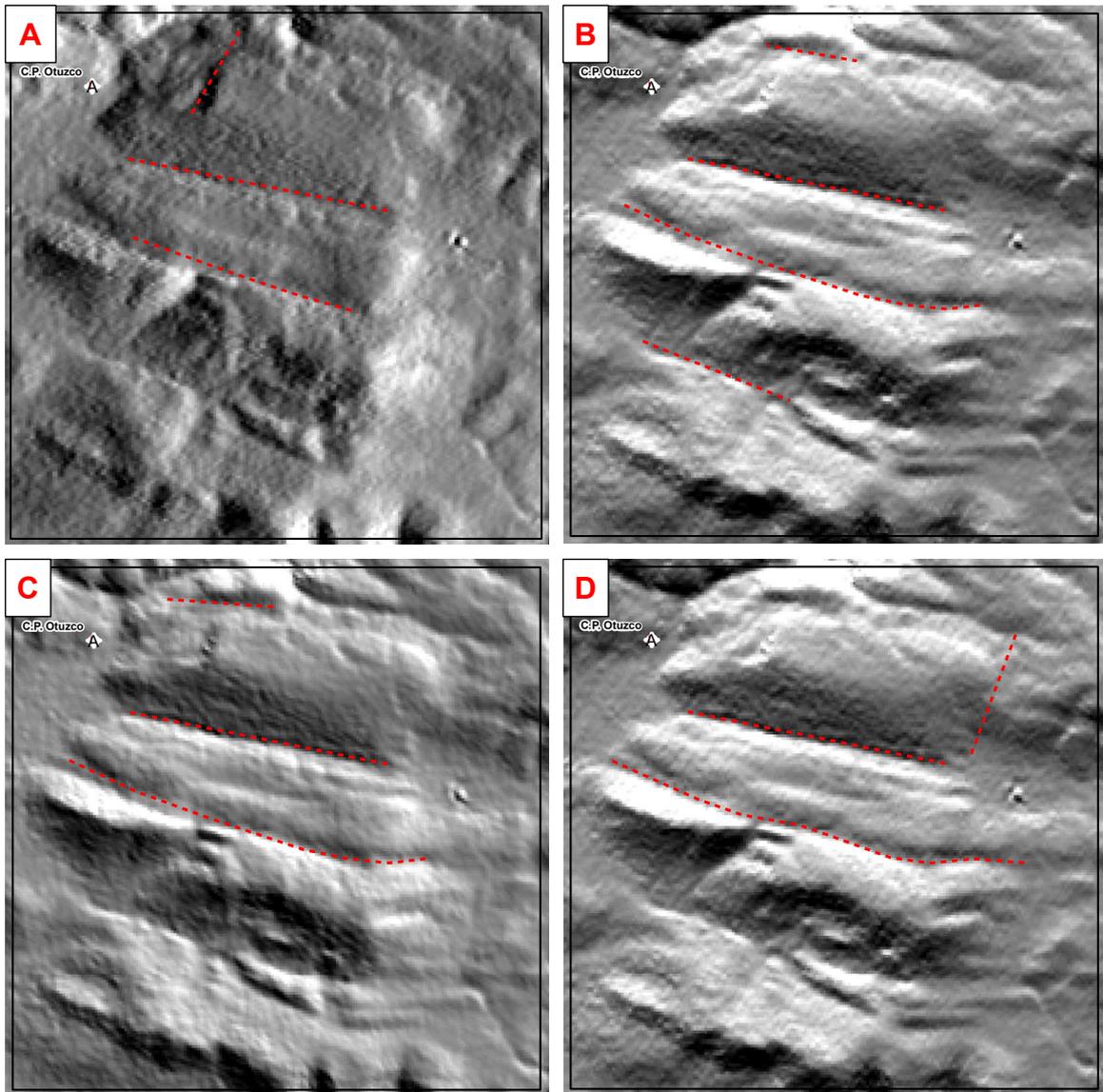


Figura 31: Estructuras realizadas de manera manual usando como filtro los distintos ángulos para visualizar, A: Filtro Este – Oeste, B: Filtro Norte – Sur, C: Filtro Noreste – Suroeste, D: Filtro Noroeste – Sureste.

Con la información de las estructuras, y con base en lo que muestra Cerdán (2018), esto se puede ver en la figura 32, se hace la modificación y unión de las estructuras, generado también la unificación de las imágenes anteriores, para las estructuras se hace un ordenamiento debido a que hay varias repetidas debido a que se aprecian en las distintas vistas, para así finalmente obtener las estructuras, clasificadas como falla y falla inferida, visibles en la figura 33.

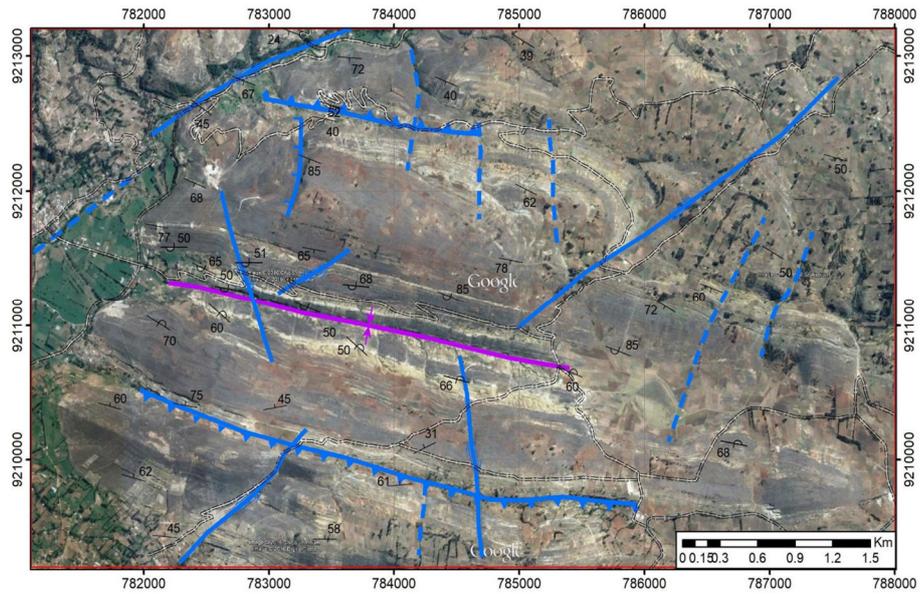


Figura 32: Estructuras principales presentes en Otuzco
Fuente: Adaptado de Cerdán (2018).

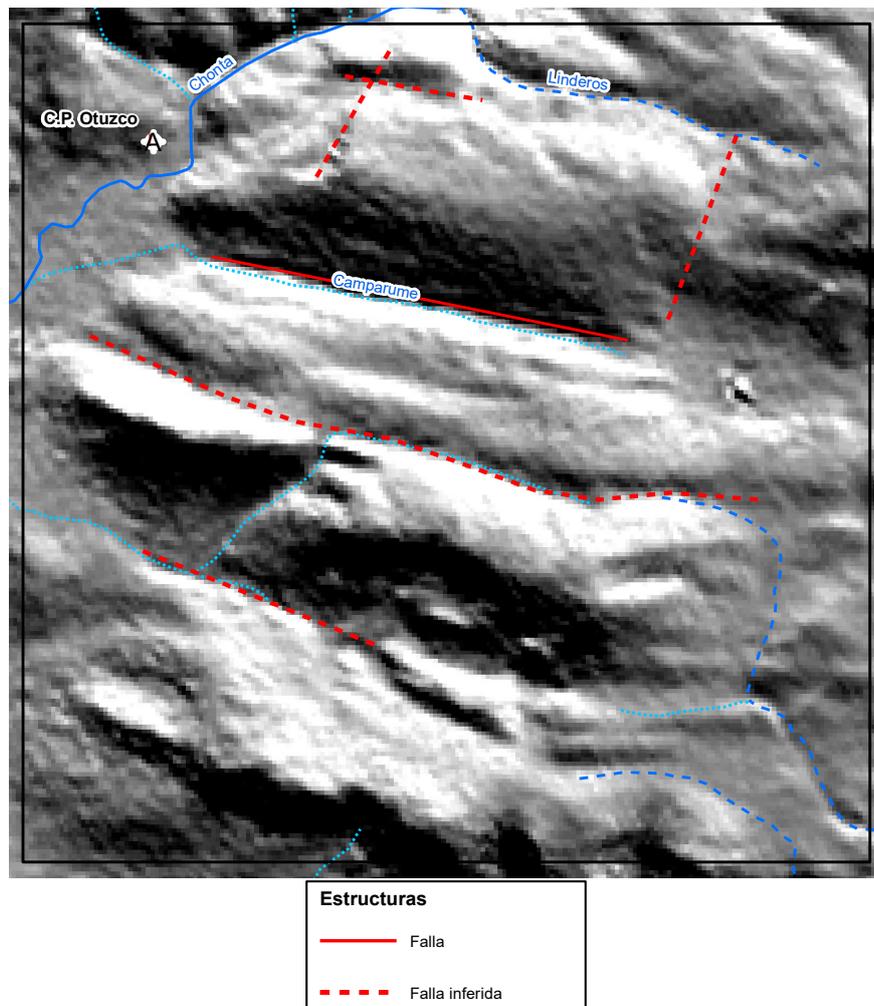


Figura 33: Resultado de la compilación y ordenamiento de las estructuras con la clasificación de falla y falla inferida.

3.4. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología del área explica la transformación del terreno a partir de los elementos y procesos que modelan la superficie.

El estudio y la caracterización de los tipos de terreno superficial presentes en el estudio se realizan basándose en la evolución geológica, donde procesos endógenos como la orogénesis, la deriva continental (tectónica de placas), la expansión del suelo oceánico, el vulcanismo y los sucesos sísmicos, y procesos exógenos como el agua, termoclastia, viento, gravedad, actividad biológica y antrópica, son los agentes modeladores más relevantes.

Para la determinación de las unidades geomorfológicas a gran escala se usa la información brindada por el Ingemmet en su portal de Geocatmin, donde tomando la información presente ahí se procede a procesarla en el software ArcGIS 10.8, caracterizando las unidades geomorfológicas presentes en la zona son, RMC-rv (Montañas y colinas en roca volcánica), RMCE-rs (Montañas y colinas estructurales en roca sedimentaria), Ab (Abanico de piedemonte) y P-al (Vertiente o piedemonte aluvio-lacustre).

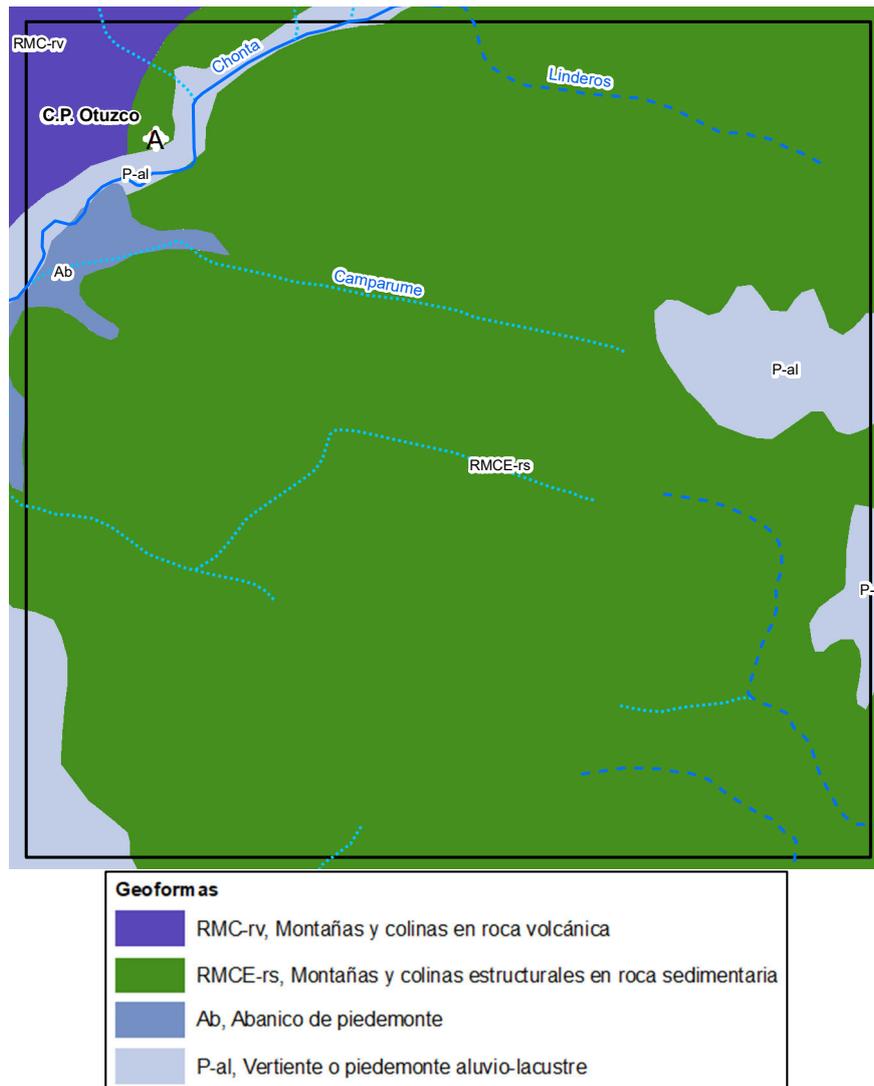


Figura 34: Vista de las geofomas presentes.

3.4.1. Unidades Morfogénicas

Para la determinación de las unidades morfogeneticas se hará el análisis del modelo digital de Elevación (MDE) cuya data es obtenida del software Global Mapper y la cual fue procesada en el software ArcGIS 10.8.

La visualización de unidades morfogenéticas se lleva a cabo desde la perspectiva de la Esquematización 3D de la imagen ráster, que se muestra en la parte baja del esquema en tonalidad gris, luego se presentará en un plano de pendientes, elaborado de acuerdo al modelo expuesto por el Dr. Reinaldo Rodríguez en 2018. Este modelo categoriza a estas unidades según el ángulo de su pendiente: planicies (0°-8°, tonalidad verde), lomadas (8°-20°, tonalidad amarillenta), laderas (20°-50°, tonalidad naranja).

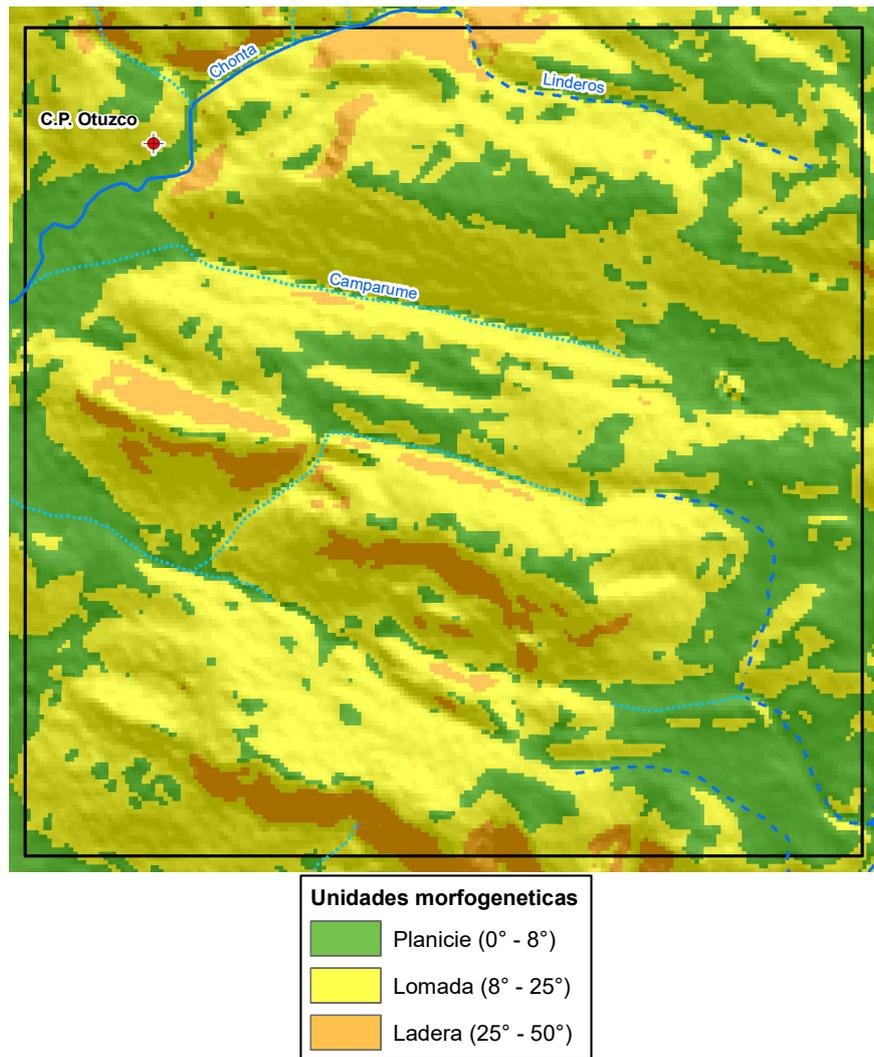


Figura 35: Plano de las unidades morfofenéticas presentes, usando la clasificación propuesta por el Dr. Rodríguez en el 2018.

3.5. GEOLOGÍA LOCAL

3.5.1. Cretácico superior - Formación Cajamarca (Ks-Ca)

La composición litológica se caracteriza por calizas, tipo wackestone y packstone, en bancos erosionados grosor y las cuales presentan una coloración gris, en los afloramientos se pueden distinguir lenares, siendo proceso inicial que dan origen a la karstificación.

- **Estación 1 / E1**



Foto 1: Estratos de la roca caliza tipo wackestone, delimitados con líneas rojas, con un espesor variado, entre 15 a 60 cm. Este:782725 Norte: 9211847.

- **Estación 2 / E2**

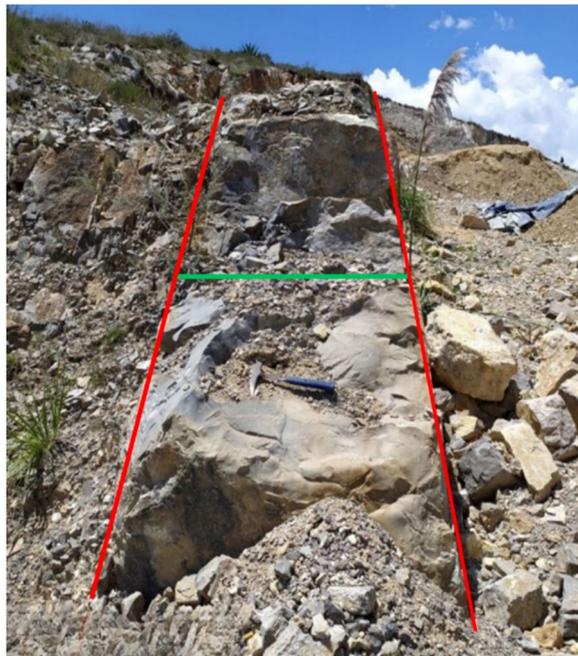


Foto 2: Estrato de roca caliza tipo packstone, delimitado por color rojo, con un espesor de 1.15m marcada con una línea verde. Este: 781702 Norte: 9211049

- **Estación 3 / E3**



Foto 3: Afloramiento de la Formación Cajamarca con la presencia de lenares, mostrados por líneas rojas en la parte superior. Este: 781911 Norte: 9210985.

- **Muestra 1 / M1**



Foto 4: A la izquierda la Muestra N°1, muestra de mano de roca caliza tipo Wackestone (Revisar Anexos), perteneciente de la Formación Cajamarca , a la derecha vista de la muestra en un microscopio a 140x, los círculos rojos marcan los granos presentes en la roca. Este:782725 Norte: 9211847.

- **Muestra 2 / M2**



Foto 5: A la izquierda la Muestra N°2, muestra de mano de roca caliza tipo Packstone (Revisar Anexos), perteneciente a la Formación Cajamarca, a la derecha vista de la muestra en un microscopio a 140x, los círculos rojos marcan los granos presentes en la roca. Este: 781702 Norte: 9211049

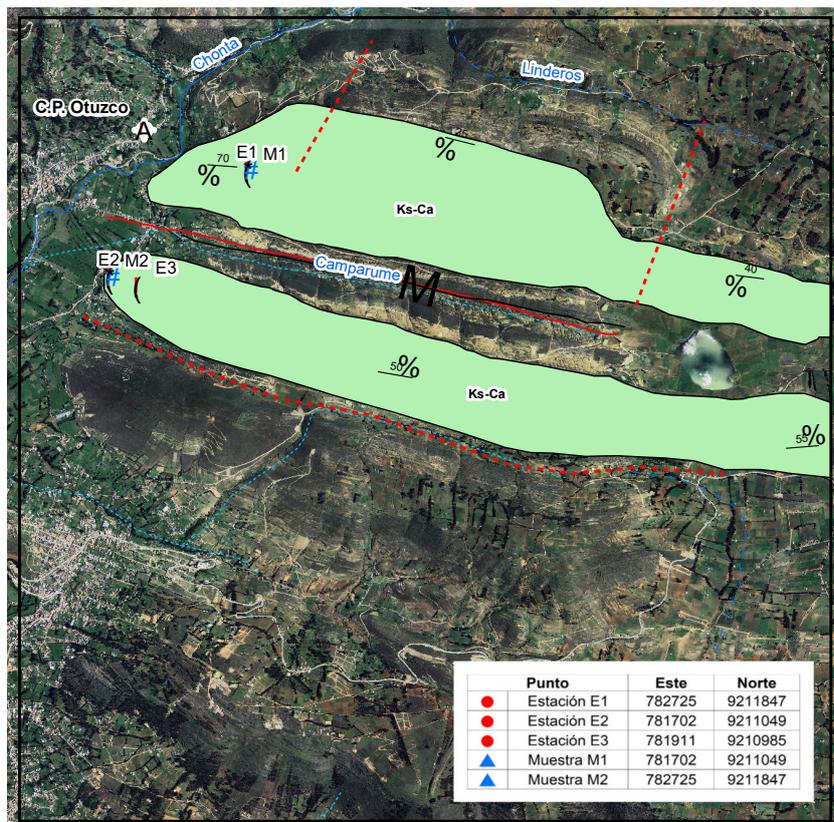


Figura 36: Plano geológico que comprende la Formación Cajamarca, con los puntos de estación y muestra.

3.6. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.6.1. Preprocesamiento de Imágenes

Como parte del preprocesamiento de las imágenes se dividió en etapas, debido a que como primer paso se tiene que realizar la corrección de la imagen descargada para luego recalibrada y ser analizada, este proceso se realizó en el Software Envi 5.3.

3.6.1.1. Corrección radiométrica

Este proceso se realiza con el fin de corregir los efectos de la atmosfera en la radiación visible e infrarrojo y la presencia de las partículas del mismo tamaño, las cuales son onda conocidas como aerosoles, para ello se transformó los niveles digitales a radiancia.

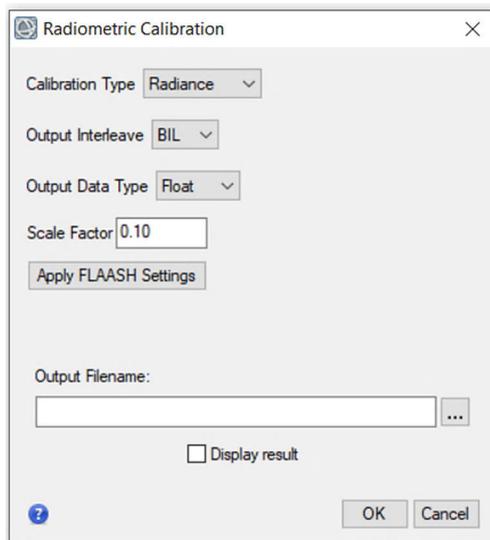


Figura 37: Herramienta Radiometric Calibration para la corrección radiométrica.

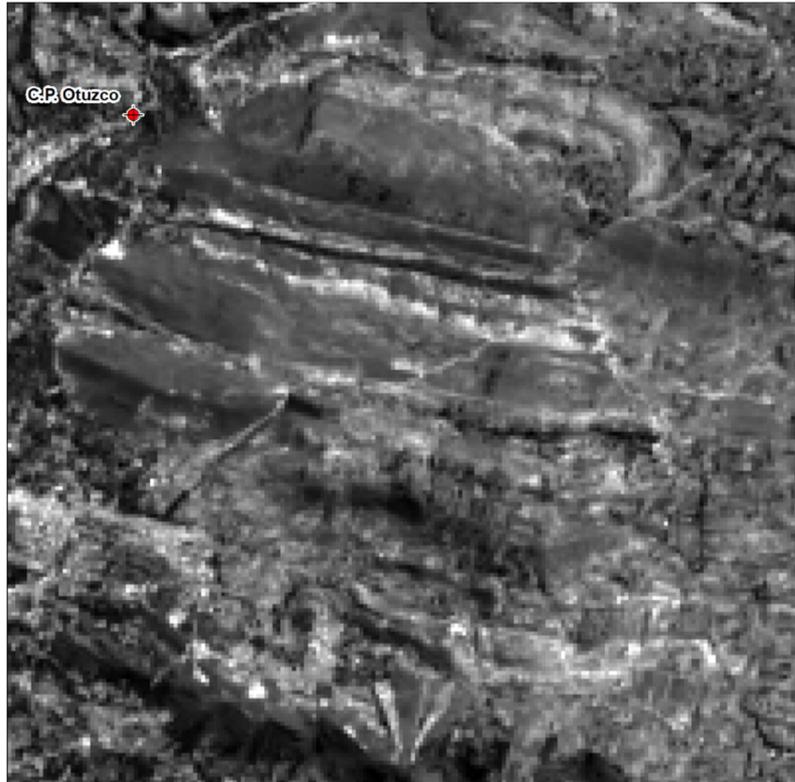


Figura 38: Resultado de la corrección radiométrica, cambio de niveles digitales a radiancia

3.6.1.2. *Corrección atmosférica*

Después de realizar la calibración radiométrica, es necesario transformar la radiancia a reflectancia para llevar a cabo un análisis preciso. Como se mencionó anteriormente, la base de este análisis son las firmas espectrales, las cuales se generan mediante la comparación entre reflectancia y longitud de onda.

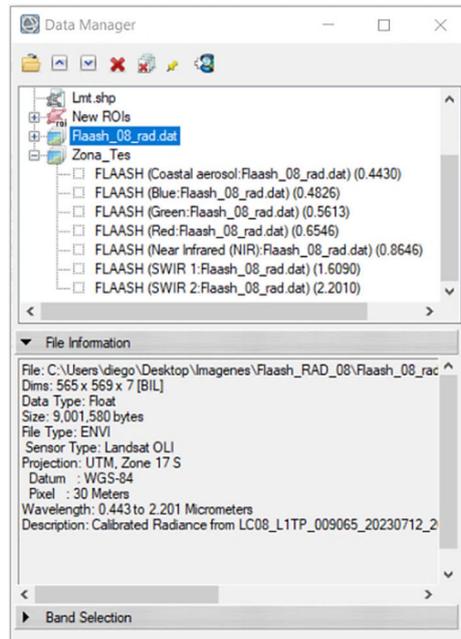


Figura 39: Herramienta FLAASH para la corrección atmosférica.

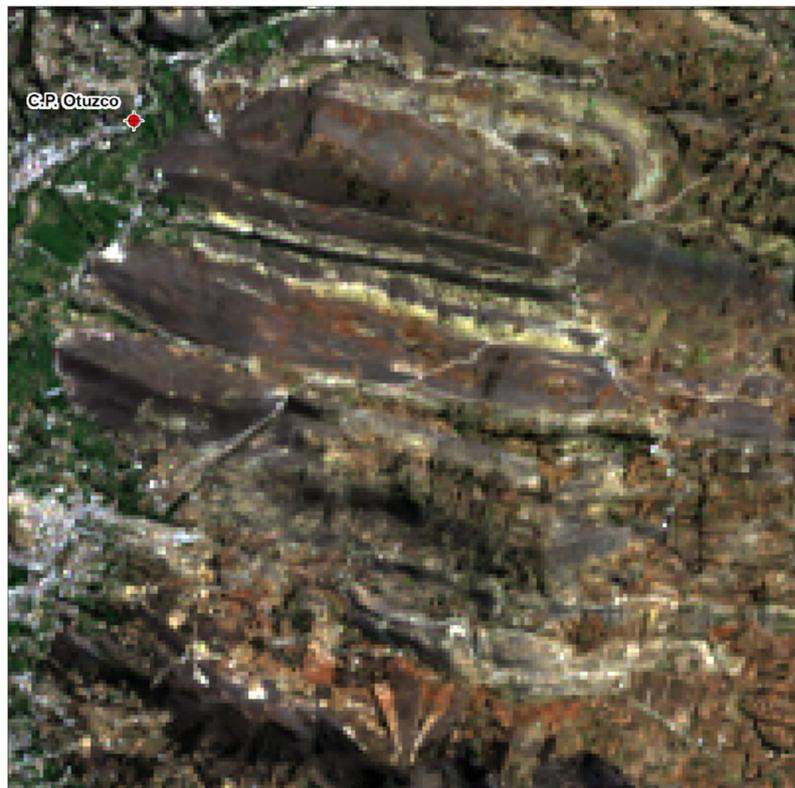


Figura 40: Resultados de la corrección atmosférica.

3.6.1.3. Recalibración de resolución

Este proceso consiste en el uso de una banda de alta resolución para recalibrar las bandas de baja resolución, haciendo uso de la herramienta Gram-Schmidt Pan Sharpening, generando imágenes de mayor resolución.

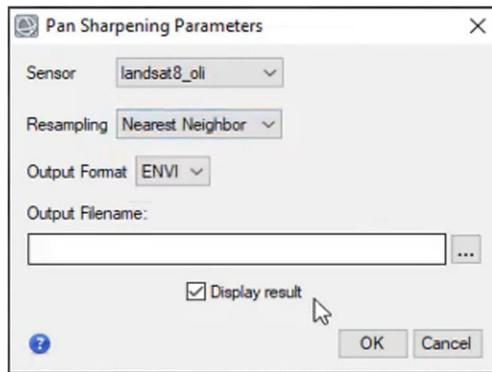


Figura 41: Herramienta Pan Sharpening para la recalibración de la resolución



Figura 42: Resultado de la nueva imagen con recalibración de resolución.

3.6.2. Procesamiento y Análisis de Imágenes Satelitales

Luego de realizado el preprocesamiento de imágenes satelitales, se obtiene como resultado una imagen con 7 bandas integradas, firmas espectrales medidas en reflectancia y longitud de onda, la cuales servirán para el análisis posterior de las distintas combinaciones de banda e índices espectrales, estas imágenes son trabajadas en el software Envi 5.3 y posteriormente se usa el software ArcGIS 10.8 para la elaboración de los planos temáticos.

3.6.2.1. *Combinación de bandas*

- **Combinación de bandas 7 (Infrarrojo de onda corta 2), 5 (Infrarrojo cercano) y 3 (Verde).**

Esta combinación de bandas permite la visualización de la geología, diferenciando las zonas de rocas con alta presencia de carbonatos con tonalidad rojiza oscura de las zonas con rocas con menor contenido en tonos rosados, así como también destacar la zona de vegetación con un tono verde brillante cuando es una vegetación abundante y verde oscuro la vegetación baja. Además, se pueden visualizar zonas con tonos violáceos siendo estos las áreas urbanas.

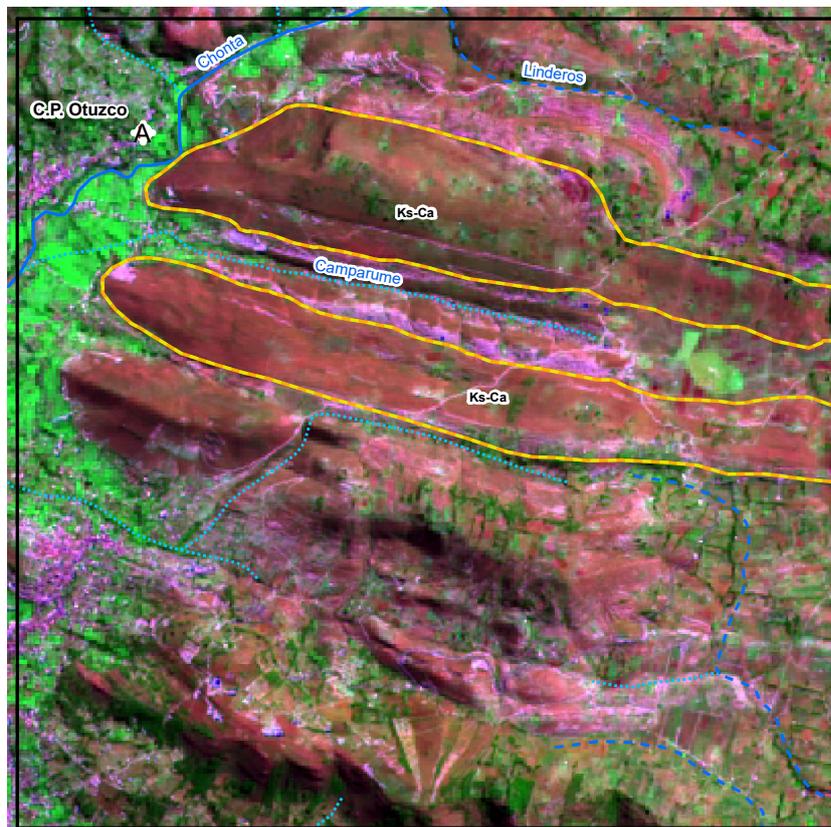


Figura 43: Resultado de la combinación de bandas 7 (Infrarrojo de onda corta 2), 5 (Infrarrojo cercano) y 3 (Verde) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).

- **Combinación de bandas 4 (Rojo), 5 (Infrarrojo cercano) y 2 (Azul).**

Esta combinación resalta las zonas de macizos viéndose en tonos grises, y las zonas con presencia de depósitos se visualizan en tonalidades rosados violáceos,

además permite la visualización de la vegetación abundante en tonos verdes brillantes y la vegetación baja en verde oscuro.

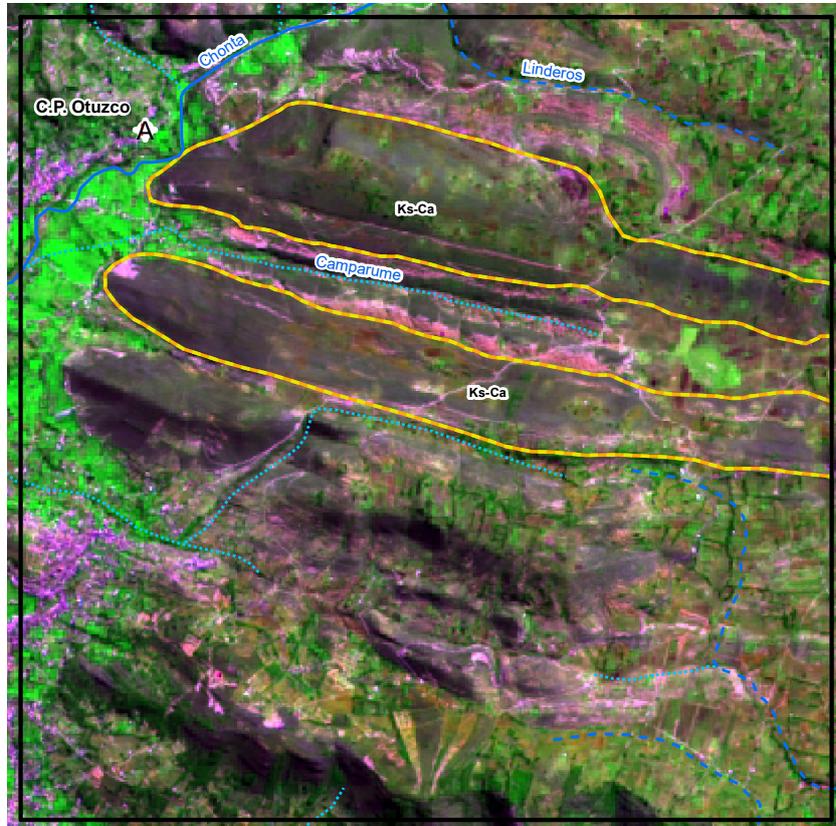


Figura 44: Resultado de la combinación de bandas 4 (Rojo), 5 (Infrarrojo cercano) y 2 (Azul) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).

- **Combinación de bandas 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Infrarrojo de onda corta 1) y 4 (Rojo).**

Esta combinación sirve para la vista y diferenciación de los depósitos cuaternarios con presencia de vegetación y los que no cuentan con ella, de color anaranjado se puede apreciar todo depósito con presencia de vegetación mientras de color gris y marrón claro se aprecian depósitos que no cuentan con vegetación o es muy escasa, pudiéndose observar así zonas de afloramientos rocosos que no cuentan con vegetación.

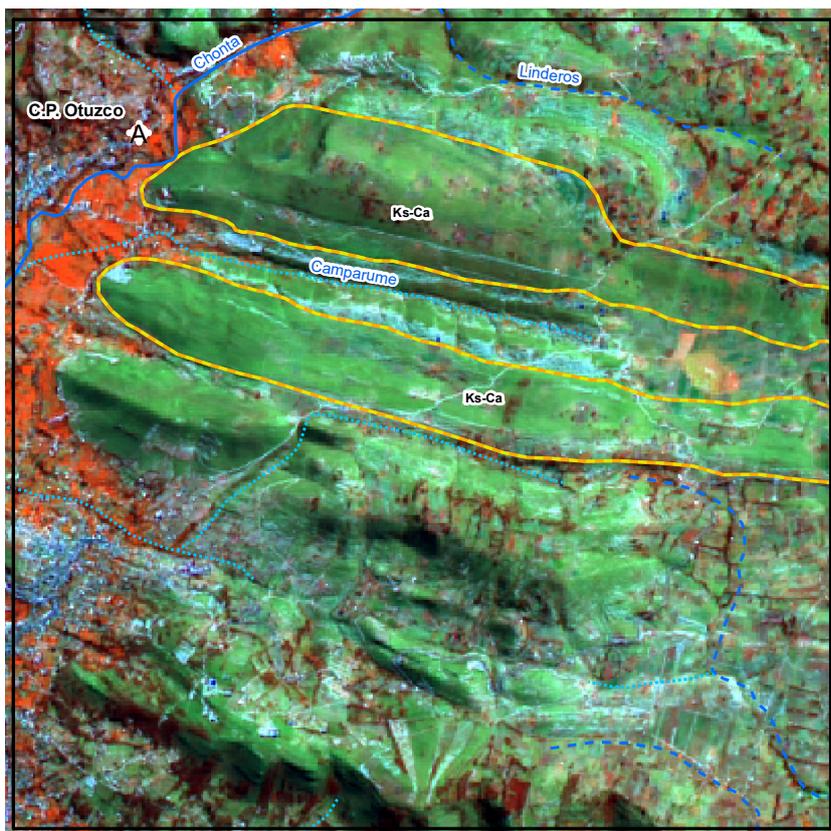


Figura 45: Resultado de la combinación de bandas 5 (Infrarrojo cercano), 6 (Infrarrojo de onda corta 1) y 4 (Rojo) y la Formación Cajamarca (contorno amarillo).

3.6.2.2. *Las zonas de interés*

Como se puede ver en la figura 36, en el área de investigación se encuentra la Formación Cajamarca la cual presenta dos áreas, dichas áreas a partir de ahora y para el siguiente proceso se les llamará zonas de interés, siendo estas la zona 1, delimitada con contorno verde, se encuentra ubicada al norte del área de investigación y tiene un área de 3.729 Km², mientras que la zona 2, delimitada con contorno rojo, se ubica cercana al centro y cuenta con un área de 3.183 Km².

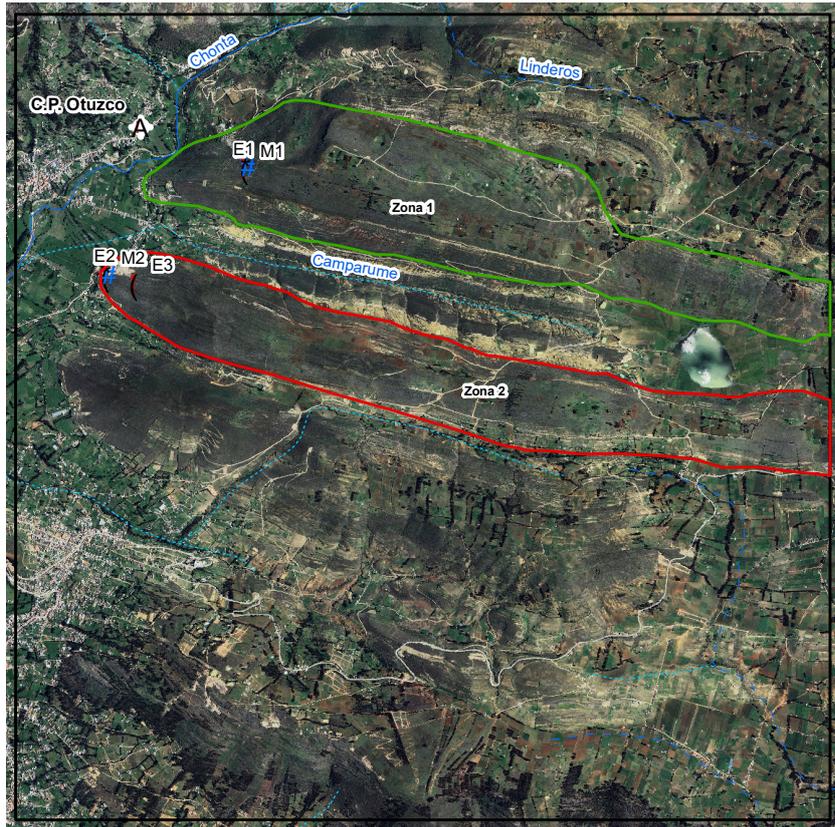


Figura 46: Delimitación de las zonas de interés, cada una diferenciada por un color, la zona 1 (contorno verde) ubicada al norte, la zona 2 (contorno rojo) ubicada al centro de la figura.

Las zonas de interés, al ser parte de la misma Formación se espera que cuenten con una firma espectral muy similar, aunque esto se puede ver afectado por factores como presencia de vegetación y depósitos.

Como se puede apreciar en la figura 47, ambos perfiles son similares y presentan coincidencias a lo largo de su gráfica, viéndose que estas tienen los aumentos y reducciones en las mismas intervalos, estos perfiles espectrales muestran una reflectancia moderada en el rango visible, la cual se compone de las bandas 2 (azul), banda 3 (verde) y banda 4 (rojo), naturalmente los carbonatos presentan una baja reflectancia para estas bandas y debido a que al abarca zonas de depósitos y vegetación estas pueden tener una reflectancia menor, mientras que en la banda 5 (NIR), se aprecia un aumento de la reflectancia, esto debido a la propia roca ya que están compuestas por carbonatos, para luego descender en las bandas 6 y 7 (SWIR1 y SWIR2 correspondientemente), esto debido a la posible presencia de arcillas y la absorción natural de esta banda para los carbonatos.

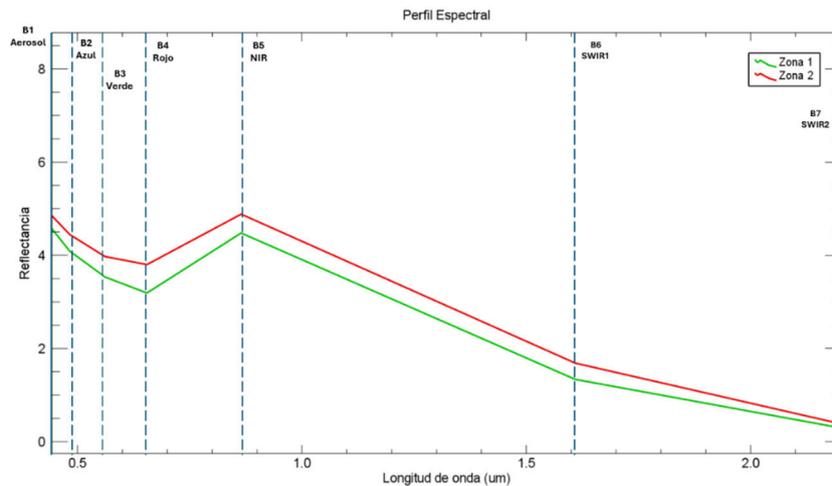


Figura 47: Perfil espectral de las zonas de interés, siendo la zona 1 (color verde) y la zona 2 (color rojo).

3.6.2.3. Índice espectral

- **Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI)**

Para la determinación del índice NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) hacemos uso de la herramienta Band Algebra en Envi, y como resultado del procesamiento es una imagen en escala de grises, donde la vegetación corresponde a los tonos más claros, mientras que los tonos oscuros se ven relacionados con ausencia de vegetación.

Como parte de los resultados obtenidos de este índice, en la zona de investigación los valores van desde -0.121674 hasta 0.603192, siendo que entre menor sea el valor menor será la vegetación presente y en cambio entre más alto sea el valor mayor será la presencia de vegetación y para su mejor apreciación se aplica una gradiente de colores siendo el color rojo para el valor más bajo, pasando a amarillo para valores intermedios y verde para los valores más altos.

Dentro de la zona de investigación podemos apreciar grandes áreas verdes que representan la vegetación fuerte existente, además de zonas de color rojo brillante que son las zonas donde no hay presencia de vegetación como son las áreas urbanas.

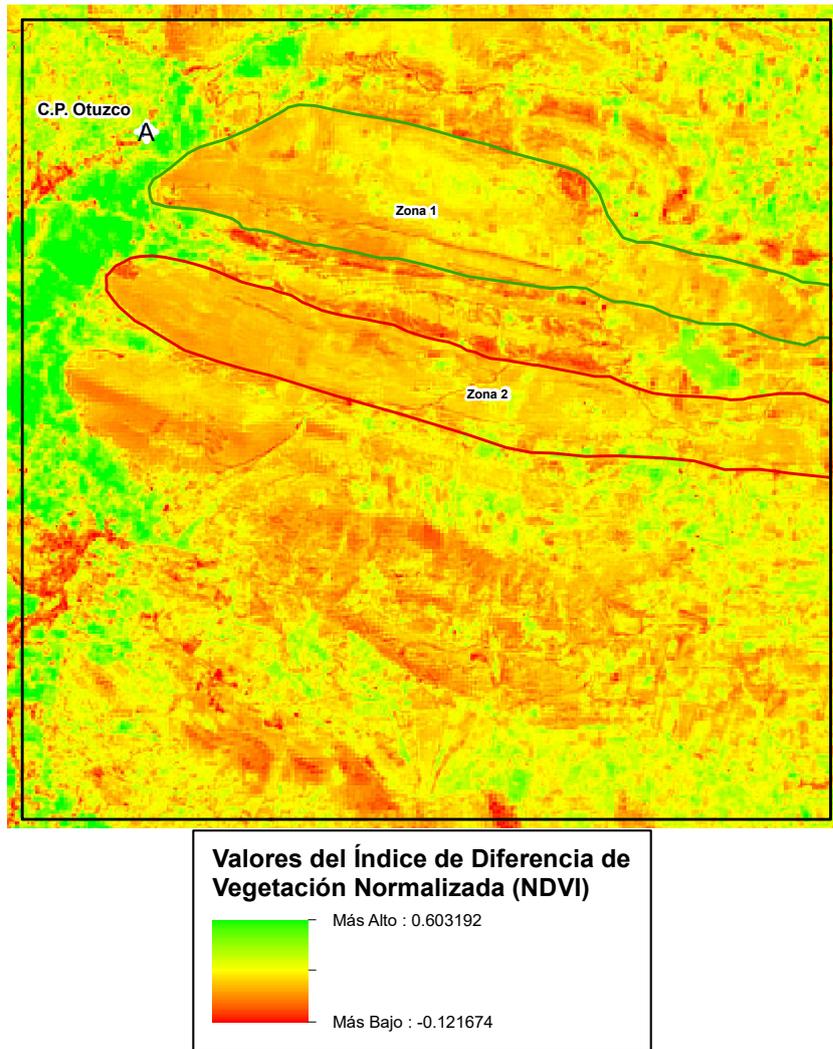


Figura 48: Vista de las zonas de interés en el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI), usando una escala de colores de rojo a verde para una mejor apreciación, siendo rojo para los valores más bajo, amarillo para intermedios y verde para los valores más altos

Como se puede apreciar en la figura 48, las zonas de interés presentan tonalidades distintas a la zona de investigación, por lo tanto, distintos valores siendo de 0.052689 hasta 0.374085 en la zona 1, delimitada por un contorno de color verde y desde 0.0673918 hasta 0.444017 en la zona 2, delimitada por un contorno rojo.

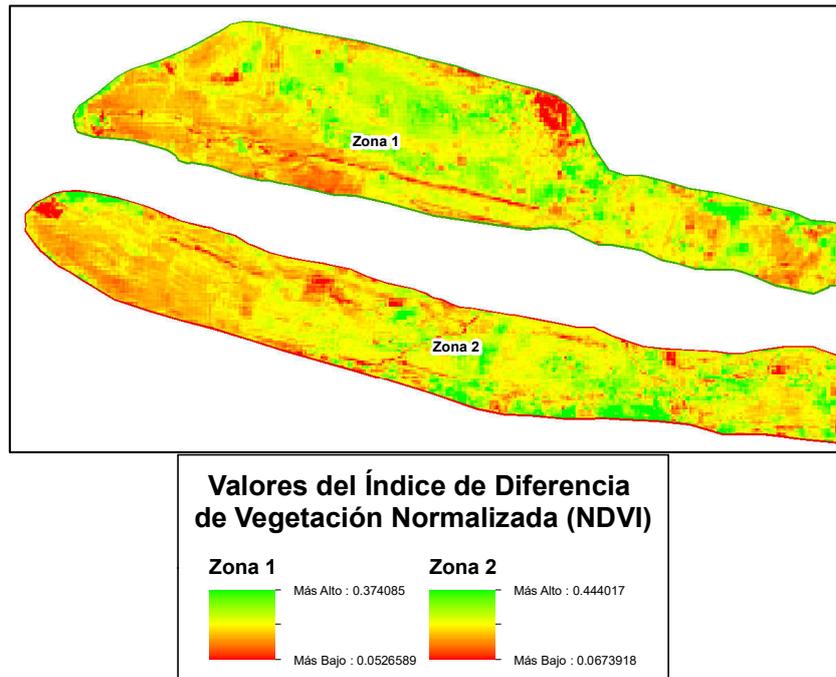


Figura 49: Valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en cada una de las zonas, viéndose que la zona 1 (contorno verde) con un valor bajo de 0.052689 y valor alto de 0.374085 , zona 2 (contorno rojo) con un valor bajo de 0.0673918 y valor alto de 0.444017.

- **Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) - Categorización.**

Para poder apreciar mejor los resultados se hace una clasificación, y usando como modelo la clasificación que presenta Laksono et al. en el 2020, se establece el nivel de vegetación que existe, y como se puede apreciar en las zonas de interés estas corresponden a zonas de Poca Vegetación (PV) la cual se ubica entre el rango de 0 – 0.3, mostrando que se encuentran casi por completo dentro de esta, solo existiendo pequeñas ubicaciones en las zonas 1 y 2 que pertenecen a Moderada Vegetación (MV) que abarca desde 0.301 hasta los 0.6.

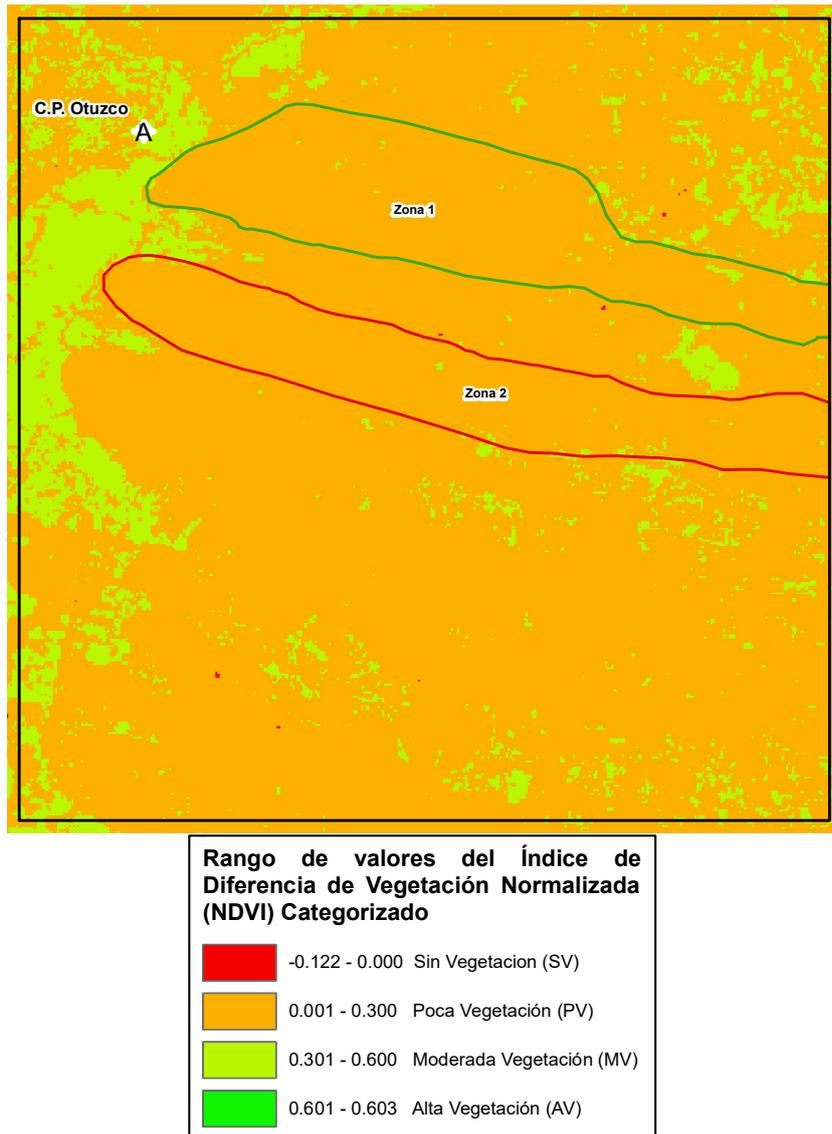


Figura 50: Vista de las zonas de interés con la categorización del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI), donde puede observar que dichas zonas presentan casi por totalidad Poca Vegetación (MV), de color anaranjado, dicha clasificación según lo que presenta Laksono et al. (2020)

- **Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) Rango (0 – 0.3 / Poca Vegetación).**

Por lo apreciado en la figura 50, el rango de 0 – 0.3 (Poca Vegetación), abarca una gran extensión en la zona de investigación, debido a esto y para una mejor visualización de los valores, se hace una reclasificación de manera arbitraria solamente a este rango, obteniendo así valores que nos permitirán la diferenciación tanto visual como representativa de este rango.

Tras la clasificación del rango Poca Vegetación, se ve que los valores de los puntos más bajos con mayor diferencia entre los nuevos intervalos (0.01 – 0.15) son las zonas con menor presencia en la nueva clasificación y representan la mitad del valor del rango, el siguiente intervalo (0.151 – 0.175) se muestra una presencia considerable y nos indica las zonas que superan por poco el valor medio del rango, para el siguiente intervalo (0.176 – 0.2) se mantienen una constante la diferencia.

Además en este intervalo nos muestra los valores de vegetación que llegan a los dos tercios del rango del valor superando el valor medio pero aun alejado del rango superior diferenciándose de los siguientes intervalos que también conservan la misma diferencia de valor entre ellos (0.201 – 0.25) siendo este el más área presenta y siendo el punto medio entre valor más alto del intervalo anterior con la del rango superior y por último el intervalo (0.251 – 0.3), cuenta con poca presencia en la imagen, este intervalo es el que está más cerca de rango de Moderada Vegetación, todo este es apreciable en la figura 51.

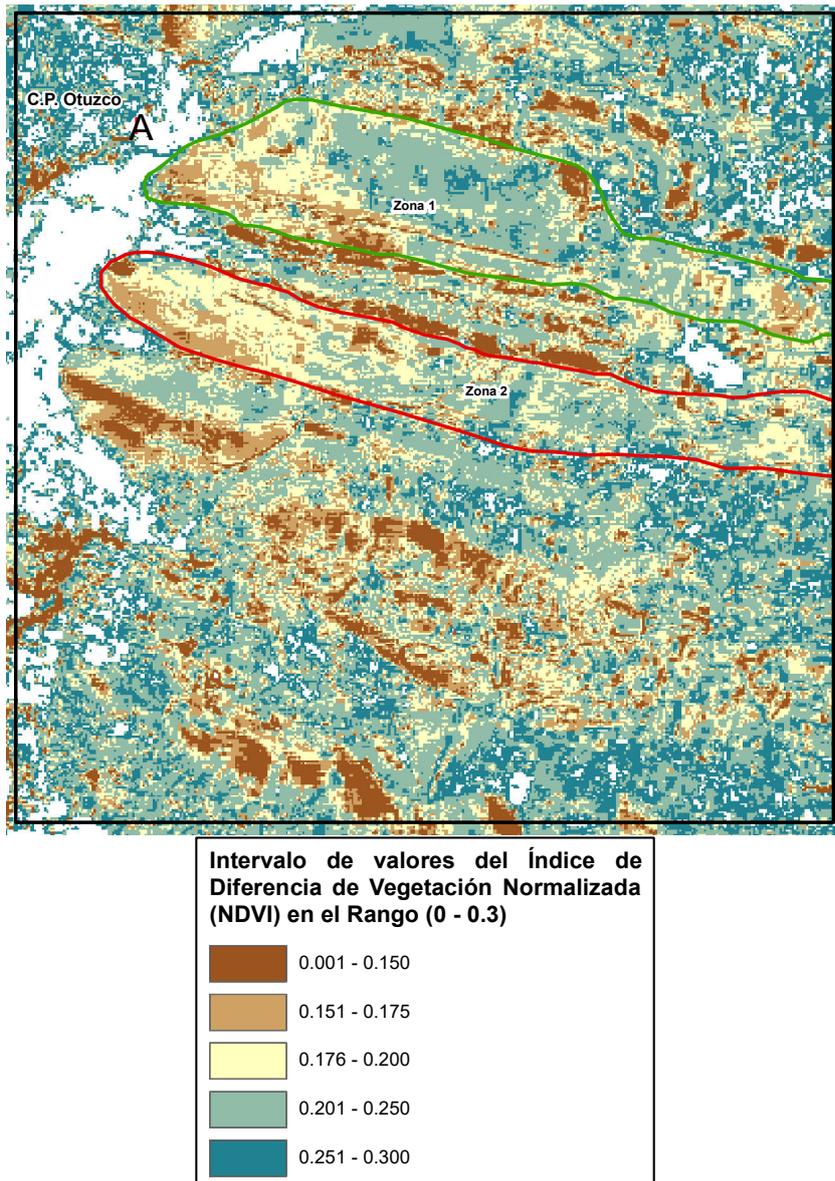
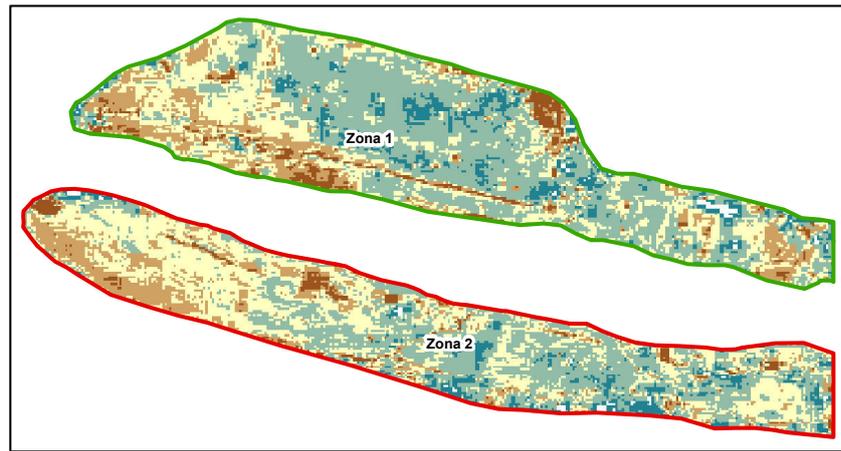


Figura 51: Intervalos de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en el rango (0 – 0.3 / Poca Vegetación), usando una escala de colores distinta para no causar confusión con los valores anteriores y viéndose espacios vacíos que representan los otros rangos.

Las zonas de interés se encontraban casi por completo dentro del rango de Poca Vegetación, siendo este del 96.88% en la zona 1 y de 98.31% en la zona 2, por lo que luego de la clasificación los nuevos valores se tiene que en la zona 1 el 43.4% se encuentra entre los valores 0.201 a 0.25 y el siguiente valor más abundantes se encuentran entre 0.176 a 0.2 con un 27.9%, mientras que en la zona 2 sus valores más abundante se encuentran entre 0.176 a 0.2 con un 38.7%, siguiendo a estos los valores entre 0.201 a 0.25 con 35.1%.



Porcentaje de extensión del NDVI en el Rango (0 - 0.3 / Poca Vegetación) en las zonas de interés					
Intervalo	Zona 1		Zona 2		Área Km ²
	%	Área Km ²	%	Área Km ²	
0.001 - 0.150	5.1%	0.191	3.6%	0.116	
0.151 - 0.175	15.1%	0.562	15.4%	0.491	
0.176 - 0.200	43.4%	1.040	38.7%	1.233	
0.021 - 0.250	27.9%	1.620	35.1%	1.116	
0.251 - 0.300	7.3%	0.273	6.0%	0.191	

Figura 52: Intervalos de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en el rango (0 – 0.3 / Poca Vegetación) y sus porcentajes de extensión dentro de las zonas de interés.

3.6.3. Ensayos de Determinación de Composición

Como parte de la investigación se hicieron análisis de roca caliza extraída de la zona, esto debido a que el análisis de teledetección se remite a solo métodos indirectos.

Las muestras fueron extraídas de manera aleatoria, pero considerando que sean muestra significativa, las muestras extraídas fueron 2, los resultados de dichas muestras se sintetizan en las tablas 7 y 8.

- **Muestra N°1**

Tabla 7.
Resultados del ensayo de la Muestra N°1

Muestra 1 / M1	Norte	9211847	Este	782725
Compuesto	Unidad		Resultado	
Carbonato de Calcio CaCO ₃	%		94.01	
Carbonato de Magnesio MgCO ₃	%		5.63	
Óxido de Silicio, SiO ₂	%		0.25	
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	%		0.04	
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%		0.07	

- **Muestra N°2**

Tabla 8.
Resultados del ensayo de la Muestra N°2

Muestra 2 / M2	Norte	9211049	Este	781702
Compuesto	Unidad		Resultado	
Carbonato de Calcio CaCO ₃	%		93.23	
Carbonato de Magnesio MgCO ₃	%		4.14	
Óxido de Silicio, SiO ₂	%		1.65	
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	%		0.11	
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%		0.87	

Estas muestras se usan como método de corroborar los datos que se obtienen de las combinaciones de bandas y el NDVI, de manera que, lo que sea vea en las imágenes se refleje en la composición de la muestra.

La relación de las zonas de interés con las muestras radica en el contenido de carbonatos, esto debido a la reflectividad que esta conlleva, pudiéndose observar en las distintas combinaciones de bandas, como se muestra en la figura 43, donde se puede visualizar la presencia de rocas con alto contenido de carbonatos, mostrándose en tonos rojizos oscuro, la cuales se encuentra dentro de la delimitación de la Formación Cajamarca, esto se corrobora con la pureza de las muestras que como se ve en la tabla 7 y 8, las muestras cuentan con un alta pureza en carbonatos, siendo este de 99.64% para la Muestra 1 y 97.37% para la Muestra 2, ambos siendo principalmente de carbonato de calcio (CaCO₃), con un porcentaje de 94.01% y 93.23% respectivamente.

Con relación a lo visto en las figuras 44 y 45 se aprecian zonas de macizos con poca o nula presencia de vegetación abundante, representados en las figuras con tonalidades verdes brillantes o anaranjados respectivamente, esto también se logra ver en el NDVI pero en este caso es por medio de valores, siendo que este índice también se encuentra relacionado con los carbonatos que una roca contenga, donde los valores que este pueda tener son inversamente proporcionales al contenido de carbonatos que exista, siendo que entre mayor sea el contenido del carbonato menor será el valor del NDVI, y como se aprecia en los ensayos de composición el contenido de carbonatos en las muestras verifican los resultados obtenidos como nivel de Poca Vegetación (PV) el cual se ubica en el rango de valores de 0 a 0.3, pero como se observa en la figura 52 estas zonas tienen como mayor área presente en el intervalo de 0.201 - 0.250 para la zona 1 y 0.176 - 0.200 para la zona 2, pero ambos presentando valores cercanos al 0.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Las zonas de interés, como se mencionó en capítulos pasados, son las áreas que tiene la Formación Cajamarca, y cada una de las zonas fue delimitada en los resultados de la combinación de bandas y se encuentra diferenciada por un color, la zona 1, delimitada en las figuras con contorno verde, ubicada al norte del área de investigación, teniendo un área de 3.729Km² y la zona 2, delimitada en las figuras con contorno rojo, ubicada al centro del área de investigación cuenta con un área de 3.183 Km²

Tabla 9.
Áreas que abarcan cada una de las zonas de interés.

Zonas de interés	Área (Kilómetros cuadrados)	Área (Hectáreas)
Zona 1	3.729	372
Zona 2	3.183	318

Las distintas imágenes generadas con las combinaciones de banda nos muestran cómo se puede apreciar la reflectividad de los distintos elementos, pudiendo así distinguir las calizas, además se puede observar si la roca es resistente a la erosión, así como la presencia de los distintos depósitos existentes y la relación con la vegetación que se encuentra en dichas zonas, pudiendo diferenciar entre si la vegetación es baja o alta debido al contenido de carbonatos en las calizas.

Como se pudo visualizar en el apartado del NDVI, gran parte de la zona de investigación se encuentra en el rango de Poca Vegetación (0-0.3), y las zonas de interés abarcan casi por completo dicho rango, además se puede observar en la reclasificación de dicho rango como es que estas se encuentran repartidas en las

distintas zonas, pudiendo observarse en la tabla 10 todos los porcentajes que ocupan en cada una de las zonas de interés.

Tabla 10.
Clasificación en porcentaje que abarca el NDVI en el rango de Poca vegetación (0 - 0.3) en las tres zonas de interés.

Intervalo	Zona 1		Zona 2	
	%	Área Km2	%	Área Km2
0.001 - 0.150	5.36%	0.203	5.08%	0.168
0.151 - 0.175	13.76%	0.521	14.53%	0.479
0.176 - 0.200	25.88%	0.979	37.30%	1.230
0.021 - 0.250	41.28%	1.562	34.79%	1.148
0.251 - 0.300	10.60%	0.401	6.61%	0.218

Los resultados que se obtuvieron de los ensayos composición de las muestras que se obtuvieron de la Formación Cajamarca son:

Tabla 11.
Resultados de los ensayos de composición de las distintas muestras y su ubicación con coordenadas UTM WGS 84 – 17S.

Determinación de composición		Formación Cajamarca			
Compuesto	Unidad	Este	Norte	Este	Norte
		782725	9211847	781702	9211049
		Muestra 1		Muestra 2	
Carbonato de Calcio CaCO ₃	%	94.01		93.23	
Carbonato de Magnesio MgCO ₃	%	5.63		4.14	
Óxido de Silicio, SiO ₂	%	0.25		1.65	
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	%	0.04		0.11	
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%	0.07		0.87	

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La firma que se obtiene del satélite muestra a una roca que tiene calcita por composición como es la roca caliza de la Formación Cajamarca, y como se puede ver en la figura 22 donde la caída que se aprecia en los valores de 1.7 en adelante, se presenta igual al resultado obtenido del satélite, además, la firma también presenta similitud con la firma que se obtiene del banco de la .USGS.

Los resultados indican que la pureza de carbonato de calcio (CaCO_3) presente en las muestras afecta en que el NDVI sea tan bajo, siendo de 0 – 0.3 en las zonas de interés y como menciona Ott (2020) “Las áreas carbonatadas a menudo presentan condiciones desafiantes para el crecimiento de la vegetación y entre mayor sea la pureza de carbonatos menor será el valor de NDVI”, esto indicaría que los datos obtenidos son consecuentes con lo observado por otros autores, así como también hace mención Kruckenger (2004) “los terrenos carbonatados suelen presentar condiciones difíciles para el crecimiento de la vegetación debido al bajo contenido de nutrientes y una alta susceptibilidad a la infiltración de agua en el sistema freático”

Por lo que anterior detallado se puede asegurar que existe una relación entre lo visto en la investigación con lo observado por otros autores, donde se queda que la relación entre los carbonatos afecta a la vegetación y su visualización por medio del NDVI.

4.3. CONTRASTACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Luego de la investigación se determina que, si se puede analizar por medio de la teledetección y con ensayos de composición, la roca caliza en la Formación Cajamarca, donde se puede ver que haciendo uso de la teledetección se podría diferenciar a las calizas de la Formación Cajamarca debido a su composición textural y química, donde se tuvo que hacer las distintas combinaciones de bandas, NDVI y ensayos de composición, logrando resultados que confirman la hipótesis, ya que todos los resultados que brindan las imágenes generadas por medio de la teledetección dan datos de una caliza de alta pureza en carbonato de calcio (CaCO_3), que presenta una baja vegetación producto de la misma y la cual se corrobora con los ensayos de composición.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Del análisis que se realizó a las calizas de la Formación Cajamarca ubicadas en el centro poblado de Otuzco Alto, en las cuales haciendo uso de la teledetección y posteriormente con los ensayos de composición, se logran reconocer rocas con alta pureza de carbonato, siendo estas las rocas calizas, de esta manera se logra una forma indirecta de reconocer otras Formaciones que contengan rocas carbonatadas y así saber si estas rocas presentan un contenido de carbonatos similar a la roca caliza de la Formación Cajamarca.

La Formación Cajamarca se compone de estratos de roca calizas de tipo wackestone y packstone, estas rocas presentan tonalidades grises las cuales tienen un brillo mate, cuentan una dureza de 3, porosidad secundaria, fractura irregular y reaccionan al ácido clorhídrico.

El procesamiento de las imágenes espectrales brinda información de que las calizas de la Formación Cajamarca tienen un alto contenido de carbonatos y esto se relaciona con la vegetación que esta presenta, ya que debido a la pureza de la roca caliza existe poca presencia de vegetación, solo pudiendo observarse vegetación baja, según el NDVI en el rango de Poca Vegetación (0 – 0.3), y más específicamente en los niveles de (0 - 0.25).

Los resultados obtenidos de los ensayos de determinación de composición de la Muestra 1 y Muestra 2 dieron los valores similares entre estas, teniendo ambas un alto contenido de carbonato, específicamente carbonato de calcio (CaCO_3), siendo de 94.01% y 93.23% respectivamente, además de que significa que los valores de que se obtuvieron de los ensayos son correctos.

La relación que existe entre la teledetección, que hace uso de combinaciones de bandas y NDVI, la cual brinda datos de una roca con alto nivel de pureza de carbonatos, el cual corresponde a la roca caliza de la Formación Cajamarca, con los ensayos de composición de las muestras obtenidas en campo, es directa ya que, lo que se puede apreciar con la teledetección se ve reflejado en los resultados de los ensayos.

5.2. RECOMENDACIONES

Para la obtención de datos más certeros se debe realizar un estudio más a detalle, el instrumento a utilizar sería el espectrómetro TERRASPEC, el cual permite obtener firma espectral in situ y esta poder compararla con la firma espectral de una imagen satelital

Se recomienda tener en cuenta al momento de la búsqueda de las imágenes satelitales, el tiempo en la obtención de la imagen, ya que esta puede contar con nubosidad, estar en temporada sequia o lluvias y estos valores afecta a los resultados obtenidos del NDVI.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arapa, V. 2022.** Formato de clasificación de rocas no clásticas.
- Avalos, G. 2020.** Aplicación de la teledetección para la localización y caracterización de materias primas en la zona occidental de Aguascalientes. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí .
- Ávila, T. 2010.** Evaluación de las propiedades de la cal como material estabilizante de suelos plásticos para carreteras y su efecto en las características del material a estabilizar. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio: Universidad de Costa Rica.
- Azavea. 6 de octubre de 2022.** Hyperspectral satellite imagery for Earth observation. Obtenido de Three-dimensional projection of a hyperspectral image cube: <https://hyperspectral.azavea.com/>
- Basterra, I. 2011.** Teledeteccion-imágenes satelitales-procesamiento digital de imagenes. Argentina: Catedra de fotointerpretación Departamento de geociencias Facultad de ingeniería.
- Camacho, A., Vargas, C. A., Rojas, F. A., Castillo, S. F., & Arguello, H. 2015.** Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana. Tunja: Facultad de Ingeniería.
- Castro, A. 1989.** Petrografía Básica: Texturas, clasificación y nomenclatura de rocas. Madrid: Paraninfo S.A. .
- Cerdán, J. 2018.** Modelamiento geoestructural del Sinclinal Otuzco basado en análisis tenso - deformacional de rocas calcáreas del Cretáceo Superior. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Cervantes, E. 2014.** Clasificación de imágenes satelitales mediante el uso de Memorias Asociativas. México D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Chuvienco, E. 1995.** Fundamentos de teledeteccion espacial (2da ed.). Madrid: Ediciones RIALP.
- Clark, R. 1999.** Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing

for the Earth Sciences. New York: (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons.

- Clark, R., Swayze, G., Wise, R., Livo, K., Hoefen, T., Kokaly, R., & Sutley, S. 2007.** USGS digital spectral library splib06a (Digital Data Series, 231(2007) ed.). US Geological Survey.
- Córdova, M. D. 2018.** Determinación de la firma espectral del estrato herbazal-arbustal del páramo en la subcuenca del Río Chambo, Provincia de Chimborazo. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Fatima, K., Umar, M., Bakhsh, A., Toqeer, M., Haider, N., & Ur-Rehman, A. 2017.** Minerals identification and mapping using ASTER satellite image. Journal of Applied Remote Sensing.
- Gaffey, S. 1986.** Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite (Vol. 71). Honolulu: American Mineralogist, .
- Gamboa, L. E. 2015.** Caracterización mineralógica de la alteración en las calizas de la microcuenca del río Tres Ríos en el distrito de Cajamarca. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Gis&Beers. 18 de febrero de 2018.** Pansharpening: mejorando la resolución de imágenes satélite. Obtenido de Gis & Beers: <https://www.gisandbeers.com/pansharpening-mejorando-la-resolucion-de-imagenes-satelite/>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. 2018.** Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (1.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. 2020.** A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. Journal of Forestry Research.
- Hunt, G., & Ashley, R. 1979.** Spectra of Altered Rocks in the Visible and Near Infrared (Vol. 74). Economic Geology.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2022.** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Kruckeberg, A. 2004.** Geology and plant life: The effects of landforms and rock types on plants. Seattle: University of Washington Press.

- Laksono, A., Saputri, A., Pratiwi, I., Arkan, M., & Putri, F. 2020.** Vegetation covers change and its impact on Barchan Dunemorphology in Parangtritis Coast, Indonesia (Vol. 200). Indonesia: E3S Web of Conferences.
- Lira, A., & Guevara, A. 2018.** Reflectancia de la radiación electromagnética en materiales opacos. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mejía, W. 2012.** Estudio Sedimentológico y Estratigráfico del Caserío de Puyllucana – Otuzco Cajamarca. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Muhammad, S., Muhammad, A., & Shah, F. 2023.** Lithological mapping of northern Kohat Plateau’s limestone outcrops using integrated remote sensing and reflectance spectroscopy techniques. *Geology, Ecology, and Landscapes*.
- Ott, R. 2020.** How Lithology Impacts Global Topography, Vegetation, and Animal Biodiversity: A Global-Scale Analysis of Mountainous Regions (Vol. 47). *Geophysical Research Letters*.
- Pérez, C., & Muñoz, Á. L. 2006.** Teledetección Nociones y Aplicaciones. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Rajendran, S., & Nasir, S. 2014a.** ASTER mapping of lime-stone formations and study of caves, springs and depres-sions in parts of sultanate of Oman. *Environmental Earth Sciences*.
- Rajendran, S., & Nasir, S. 2014b.** ASTER spectral sensitivity of carbonate rocks – Study in Sultanate of Oman. *Advances in Space Resear.*
- Rodríguez, R. 2018.** Impactos geotécnico-ambientales en cabeceras de subcuencas por implantación de Minas Conga Cajamarca-Perú. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca - Escuela de Posgrado.
- Ronan, P. 2008.** Espectro de las ondas electromagnéticas. Obtenido de https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_spectrum_es.svg
- Ross, W. 2014.** Introduction to Radiometry and Photometry. Massachusetts: Artech House.
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). 15 de mayo de 2017.** Comparison of Landsat 7 and 8 bands with Sentinel-2. Obtenido de <https://www.usgs.gov/media/images/comparison-landsat-7-and-8-bands-sentinel-2>

Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). 26 de mayo de 2019. Landsat Missions. (Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS)) Obtenido de Landsat Normalized Difference Vegetation Index: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-difference-vegetation-index>

Servicio Geológico de Estados Unidos. 2019. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook Version 5.0. Sioux Falls: EROS.

Sobрино, J. 2001. Teledetección. Valencia: Universidad de Valencia.

Soca, R. 2015. Identificación de Tierras Degradadas por Salinidad del Suelo en los Cultivos de Caña de Azúcar en Pomalca usando Imágenes de Satélite. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. 2005. Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física. Madrid: Pearson Educación S.A.

ANEXOS

ANEXO 01: FORMATOS DE DESCRIPCIÓN PETROLÓGICA

- Formato petrográfico de descripción macroscópica - Muestra 1
- Formato petrográfico de descripción macroscópica - Muestra 2

ANEXO 02: PLANOS TEMÁTICOS

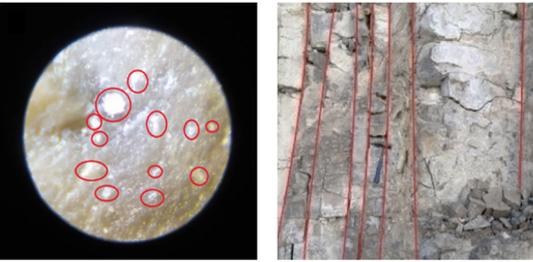
- Plano de ubicación
- Plano geológico
- Plano de unidades morfogenéticas
- Plano de estructuras
- Plano de combinación de bandas composición 753
- Plano de combinación de bandas composición 452
- Plano de combinación de bandas composición 564
- Plano geológico con las zonas de interés
- Plano del índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) con las zonas de interés
- Plano del índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) categorización con las zonas de interés
- Plano del índice de diferencia de vegetación normalizada (NDVI) rango (0 – 0.3 / poca vegetación) con las zonas de interés

ANEXO 03: INFORMES DE ENSAYOS

- Informe de ensayo IE-040222-04-01 (Muestra 1)
- Informe de ensayo IE-040222-04-02 (Muestra 2)

Tabla 12.

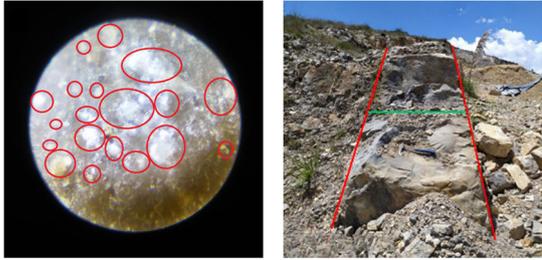
Formato petrográfico de descripción macroscópica – Muestra 1

FORMATO PETROGRÁFICO DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA								
ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA								
I. LOCALIZACIÓN Y CÓDIGO DE LA MUESTRA								
Código		Ubicación				Coordenadas UTM		
Muestra 1 M1	País	Región	Provincia	Distrito	CC.PP.	Este	Norte	
	Perú	Cajamarca	Cajamarca	Los Baños del Inca	Otuzco Alto	782725	9211847	
II. ASPECTOS GENERALES								
Color de sup. Intemperizada:		Gris amarillento						
Color de sup. Fresca:		Gris						
Brillo:		Mate						
Dureza:		3						
Porosidad:		Secundaria						
Raya:		Gris						
Fractura:		Irregular						
Reacción con HCl:		Si						
Tenacidad:		Frágil						
Grado de consolidación:		Consolidado						
III. ELEMENTOS TEXTURALES Y ESTRUCTURALES								
Madurez textural:		Supermadura						
Cemento y/o matriz:		Matriz calcárea						
Textura:		Micrítica						
Fábrica:		Lodo-soportada						
Interpretación	Agente:		Agua					
	Genética: Medio sed:		Marino					
Sistema - Serie:		Cretáceo - Superior						
Unidad Geológica		Formación Cajamarca						
IV. COMPOSICIÓN								
Componentes esqueléticos :		-		Qz:		-		
Granos cubiertos:		7%		Feldespatos:		-		
Granos Compuesto:		2%		Pirita:		-		
Matriz:		90%		Óxidos:		1%		
Cemento:		-		Otros:		-		
NOMBRE DE LA ROCA SEGÚN (DUNHAM, 1962)				Caliza Wackestone				

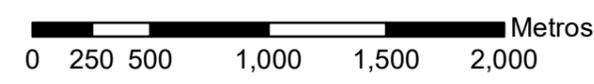
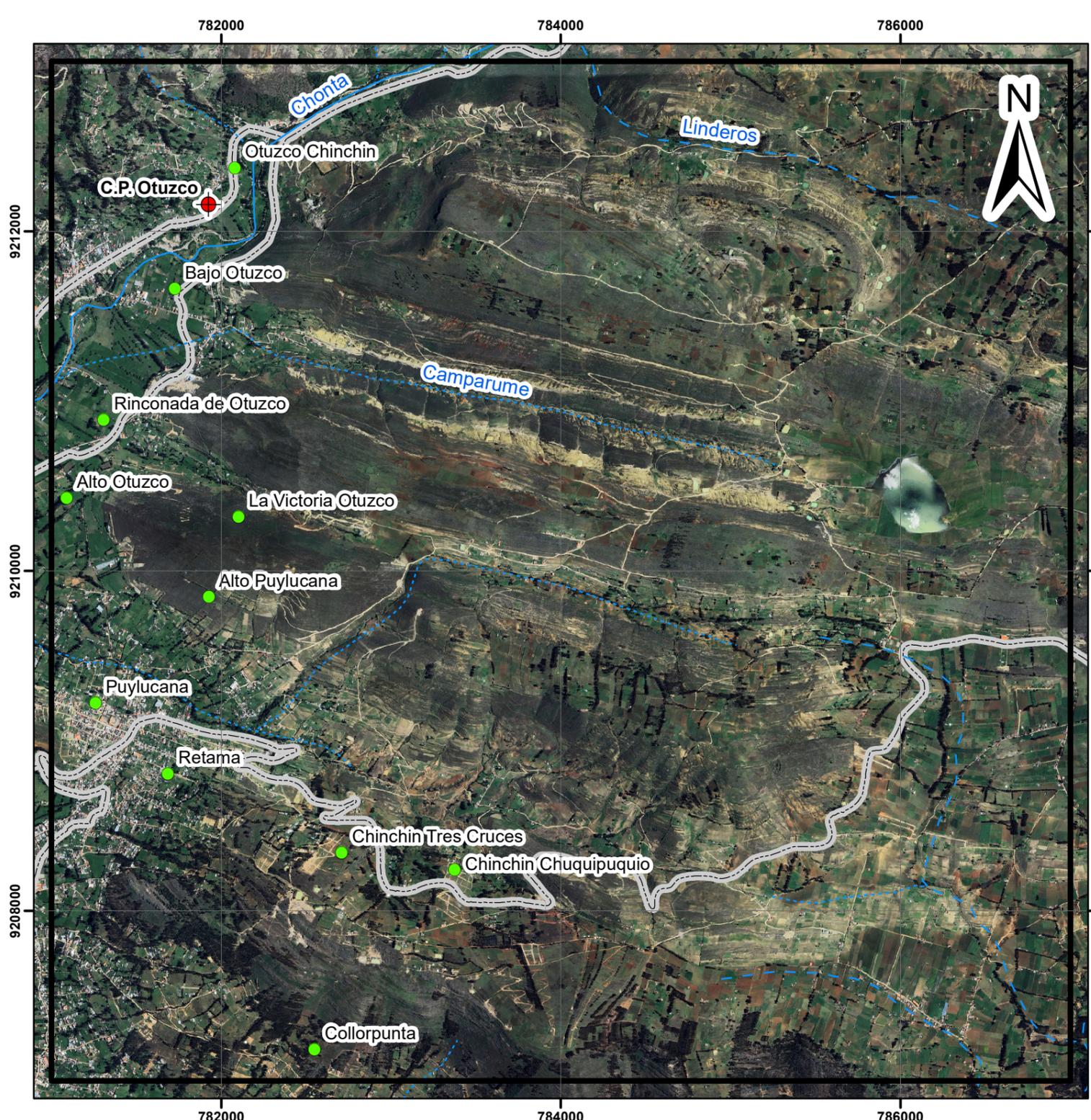
Fuente: Adaptado de Arapa (2022).

Tabla 13.

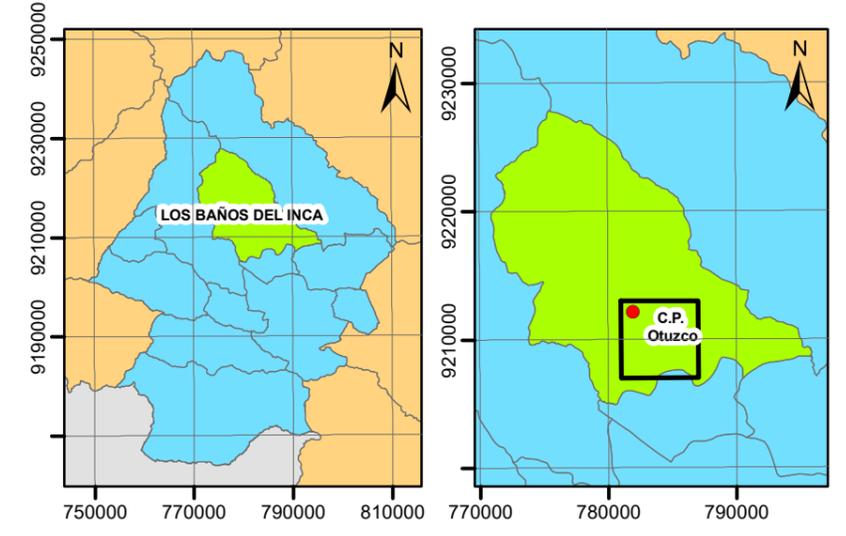
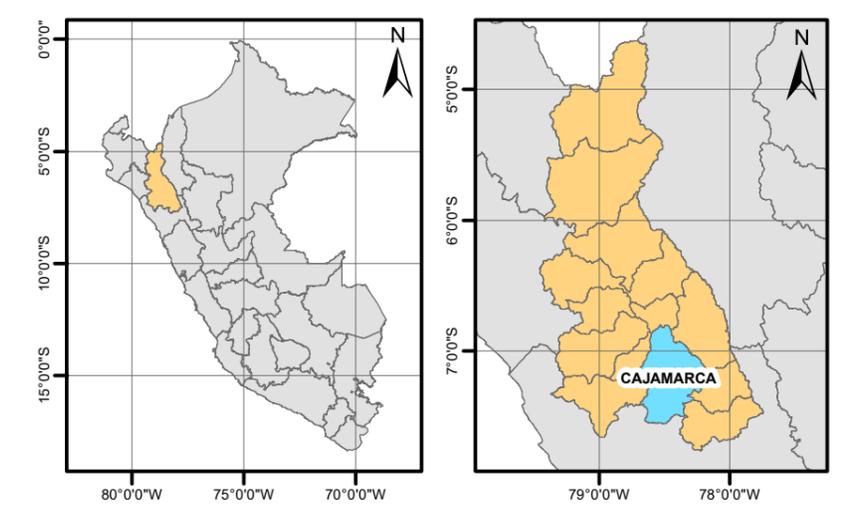
Formato petrográfico de descripción macroscópica – Muestra 2

FORMATO PETROGRÁFICO DE DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA								
ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA								
I. LOCALIZACIÓN Y CÓDIGO DE LA MUESTRA								
Código	Ubicación					Coordenadas UTM		
	País	Región	Provincia	Distrito	CC.PP.	Este	Norte	
Muestra 2 M2	Perú	Cajamarca	Cajamarca	Los Baños del Inca	Otuzco Alto	781702	9211049	
II. ASPECTOS GENERALES								
Color de sup. Intemperizada:		Gris amarillento						
Color de sup. Fresca:		Gris						
Brillo:		Mate						
Dureza:		3						
Porosidad:		Secundaria						
Raya:		Gris						
Fractura:		Irregular						
Reacción con HCl:		Si						
Tenacidad:		Frágil						
Grado de consolidación:		Consolidado						
III. ELEMENTOS TEXTURALES Y ESTRUCTURALES								
Madurez textural:		Supermadura						
Cemento y/o matriz:		Matriz calcárea						
Textura:		Micrítica						
Fábrica:		Grano-soportada						
Interpretación	Agente:		Agua					
	Genética: Medio sed:		Marino					
Sistema - Serie:		Cretáceo - Superior						
Unidad Geológica		Formación Cajamarca						
IV. COMPOSICIÓN								
Componentes esqueléticos :		-		Qz:		-		
Granos cubiertos:		11%		Feldespato:		-		
Granos Compuesto:		3%		Pirita:		-		
Matriz:		85%		Óxidos:		1%		
Cemento:		-		Otros:		-		
NOMBRE DE LA ROCA SEGÚN (DUNHAM, 1962)				Caliza Packstone				

Fuente: Adaptado de Arapa (2022).

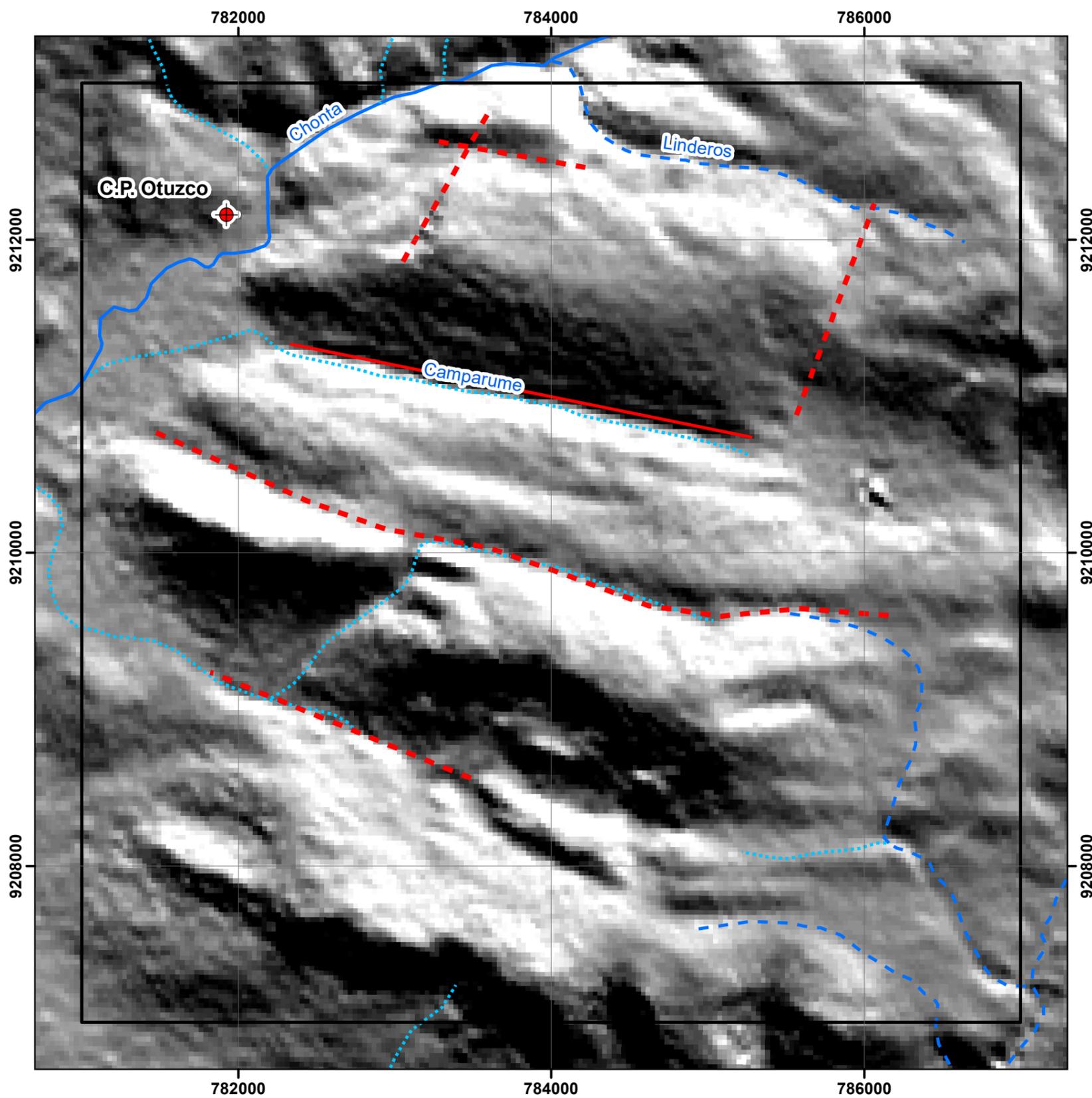


Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984



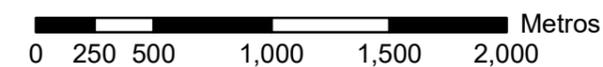
LEYENDA	
	C.P. Otuzco
	Pueblos
	Vías de acceso
	Área de estudio
	Quebrada Estacionaria
	Quebrada
	Río

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		 PLANO N° 01
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA		
TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA, 2023		ESCALA: 1:30,000
PLANO: PLANO DE UBICACIÓN		
TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET		
ASESOR: M.CS. ING. GONZÁLES YANA ROBERTO SEVERINO		
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S	FECHA: AGOSTO 2025	



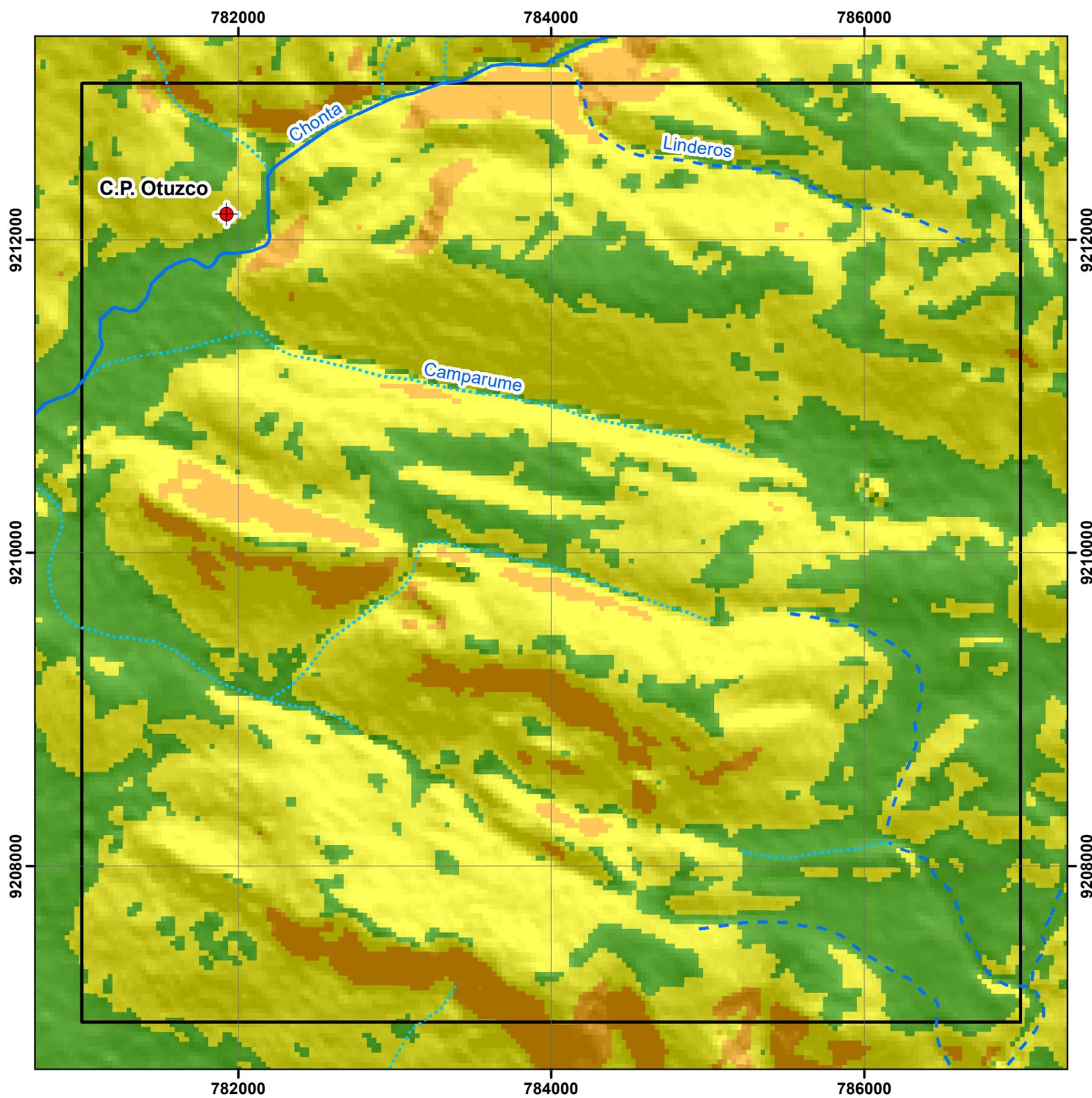
SIMBOLOGÍA

- C.P. Otuzco
- Estructuras**
- Falla
- Falla inferida
- Drenajes**
- Quebrada Estacionaria
- Quebrada
- Río
- Área de estudio



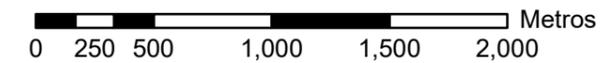
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023	PLANO N° 02
	PLANO: PLANO DE ESTRUCTURAS	
	TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET	
	ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S	FECHA: AGOSTO 2025	ESCALA: 1 : 30,000



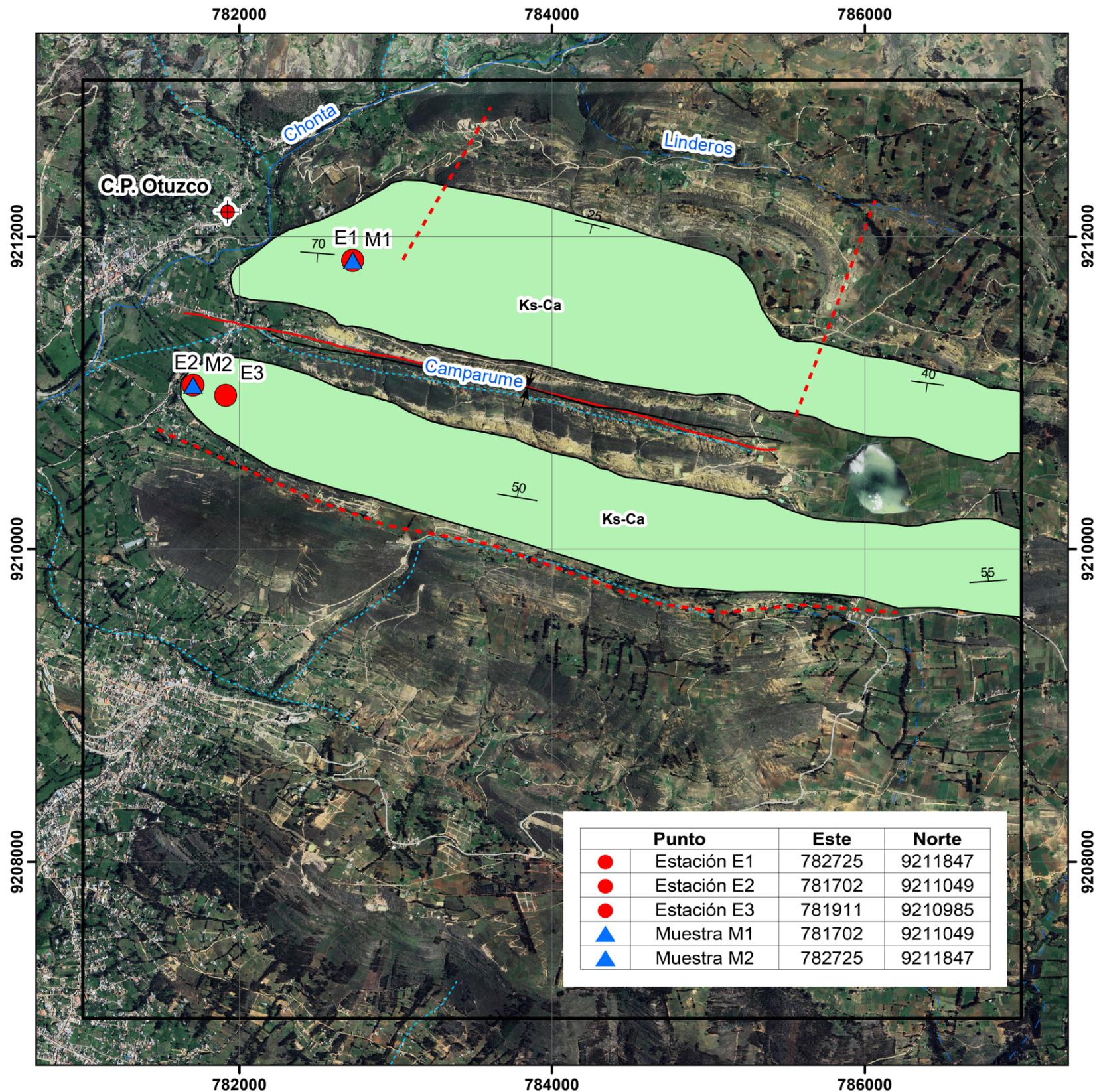
SIMBOLOGÍA

- C.P. Otuzco
- Drenajes**
- Quebrada Estacionaria
- Quebrada
- Río
- Área de estudio
- Unidades morfo genéticas**
- Planicie (0° - 8°)
- Lomada (8° - 25°)
- Ladera (25° - 50°)



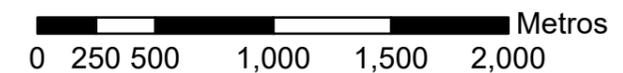
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023	PLANO N°
	PLANO: PLANO DE UNIDADES MORFOGENÉTICAS	03
	TESISISTA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET	ESCALA:
	ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	1 : 30,000
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S	FECHA: AGOSTO 2025	



SIMBOLOGÍA

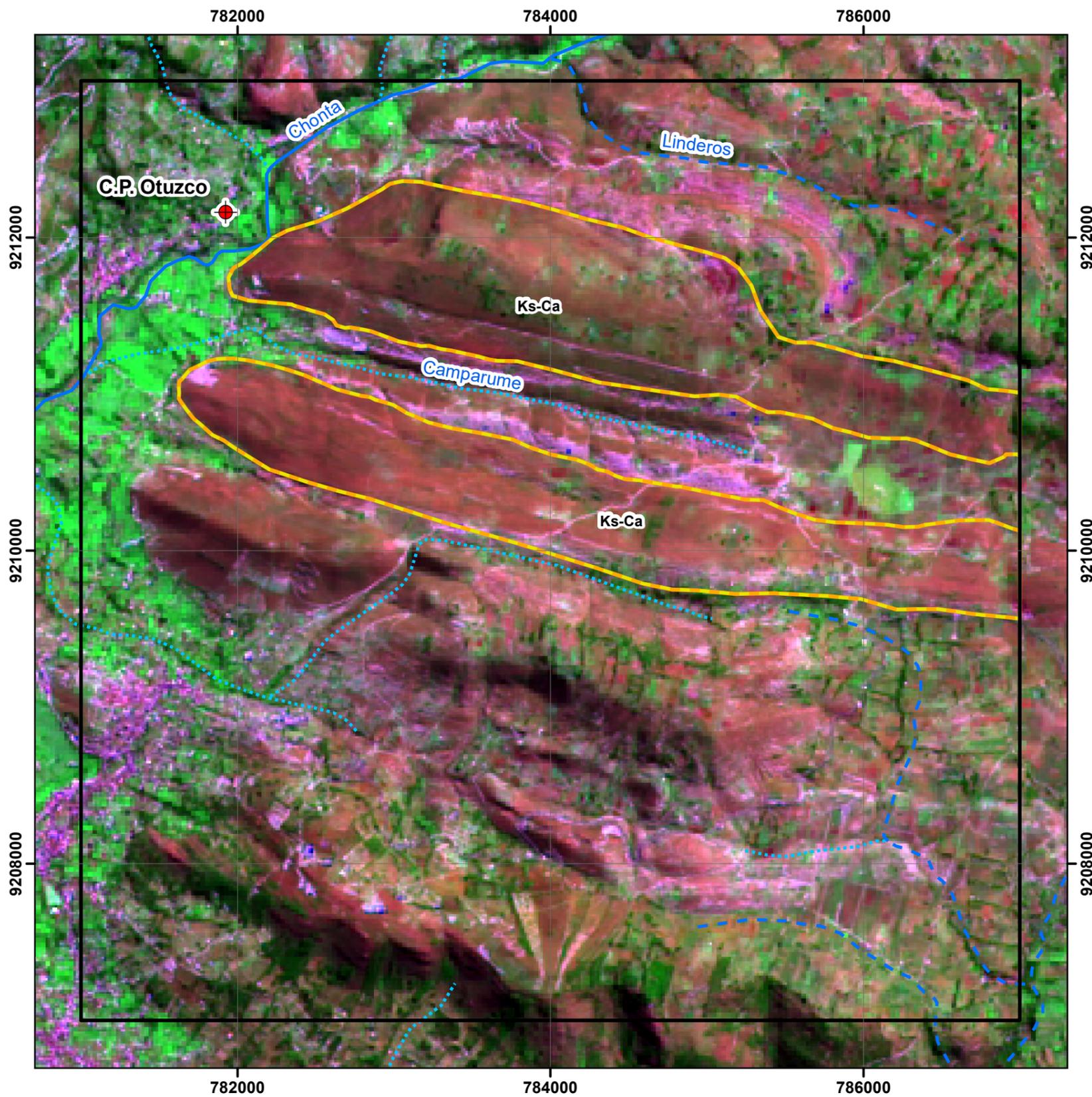
<p> C.P. Otuzco</p> <p>Puntos</p> <p> Estación</p> <p> Muestra</p> <p>Estructura</p> <p> Falla inferida</p> <p> Falla normal</p> <p> Sinclinal</p>	<p> Buzamiento</p> <p>Drenajes</p> <p> Quebrada Estacionaria</p> <p> Quebrada</p> <p> Río</p> <p> Área de estudio</p> <p>Geología</p> <p> Formación Cajamarca (Ks-Ca)</p>
--	---



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

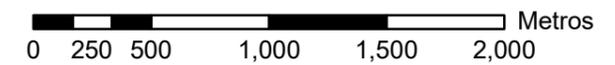
	Punto	Este	Norte
	Estación E1	782725	9211847
	Estación E2	781702	9211049
	Estación E3	781911	9210985
	Muestra M1	781702	9211049
	Muestra M2	782725	9211847

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA, 2023	PLANO N° 04
	PLANO: PLANO GEOLÓGICO	
	TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET	
	ASESOR: M.CS. ING. GONZÁLES YANA ROBERTO SEVERINO	
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S	FECHA: AGOSTO 2025	ESCALA: 1 : 30,000



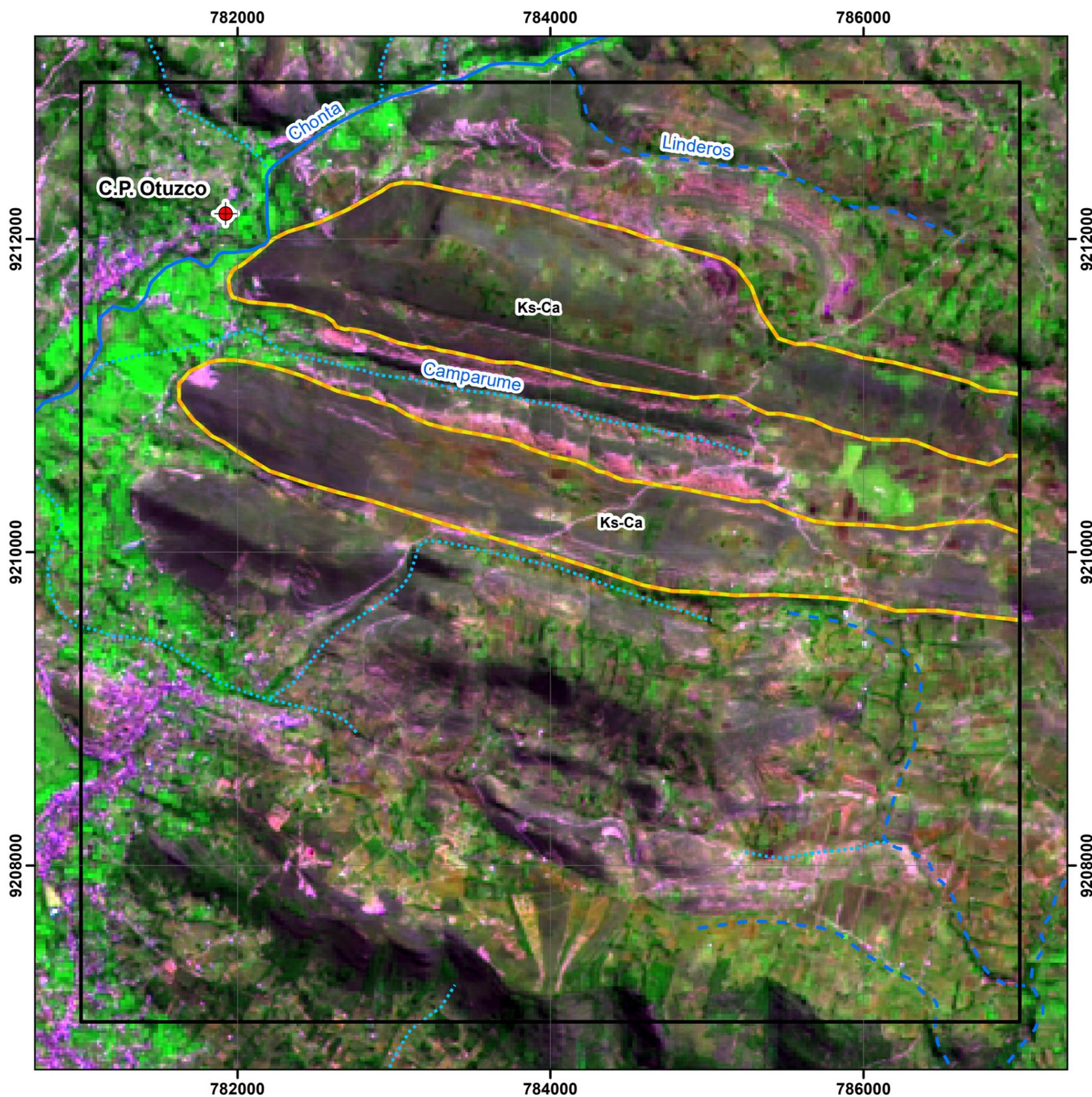
SIMBOLOGÍA

-  C.P. Otuzco
- Drenajes**
-  Quebrada Estacionaria
-  Quebrada
-  Río
-  Área de estudio
-  Formación Cajamarca (Ks-Ca)
- Combinación de bandas**
-  Rojo: Banda 7
-  Verde: Banda 5
-  Azul: Banda 3



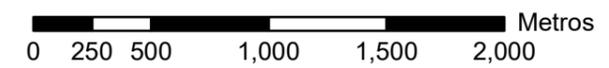
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA		
FACULTAD DE INGENIERIA		
Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		PLANO N°
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023 PLANO: PLANO DE COMBINACIÓN DE BANDAS COMPOSICIÓN RGB 753 TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO DATUM: WGS 84 / ZONA 17S FECHA: AGOSTO 2025	05
		ESCALA: 1 : 30,000



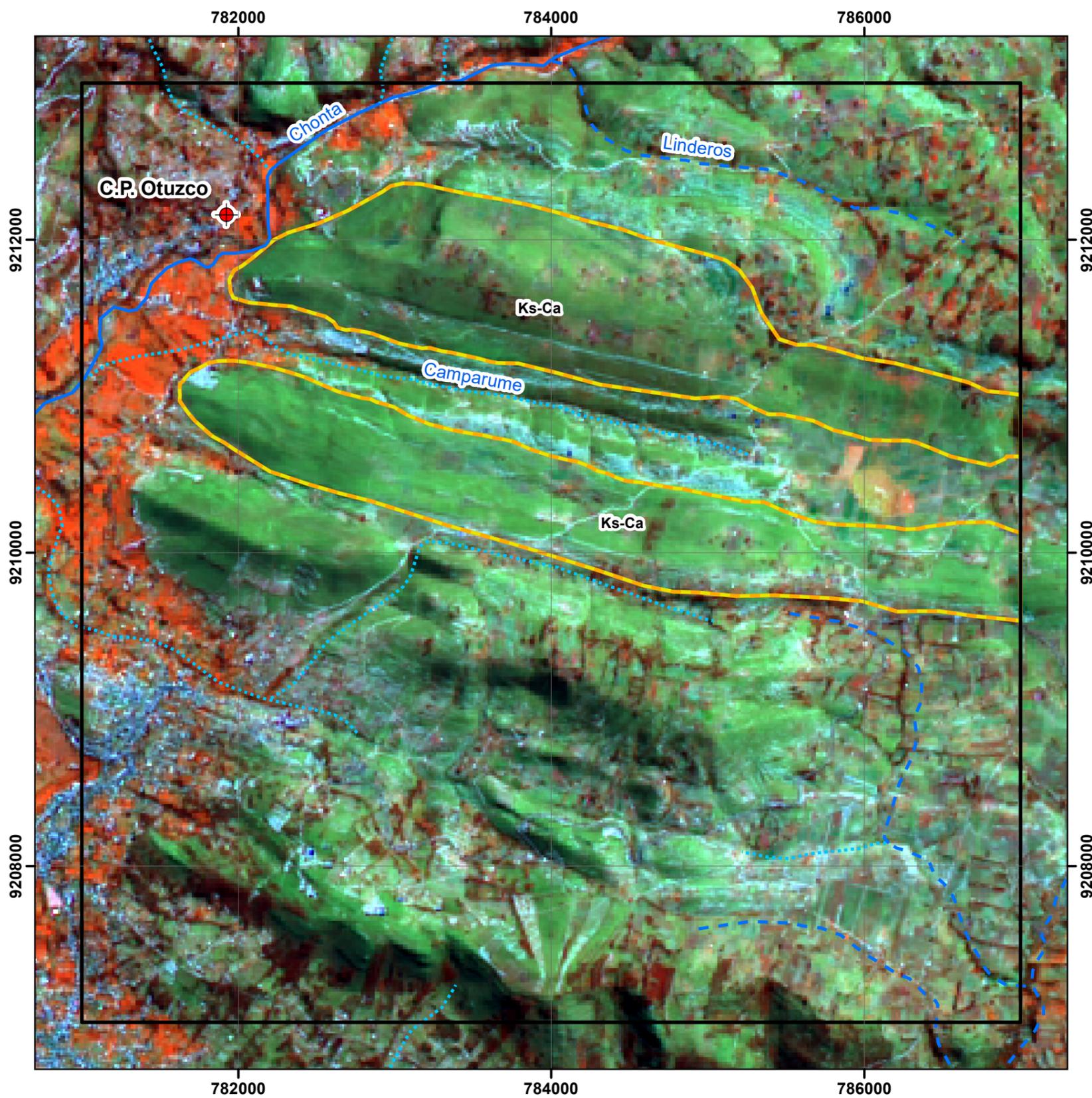
SIMBOLOGÍA

-  C.P. Otuzco
- Drenajes**
-  Quebrada Estacionaria
-  Quebrada
-  Río
-  Formación Cajamarca (Ks-Ca)
-  Área de estudio
- Combinación de bandas**
-  Rojo: Banda 4
-  Verde: Banda 5
-  Azul: Banda 2



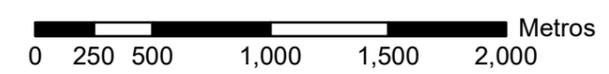
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023 PLANO: PLANO DE COMBINACIÓN DE BANDAS COMPOSICIÓN RGB 452 TESISISTA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	PLANO N° 06
	DATUM: WGS 84 / ZONA 17S FECHA: AGOSTO 2025	ESCALA: 1 : 30,000



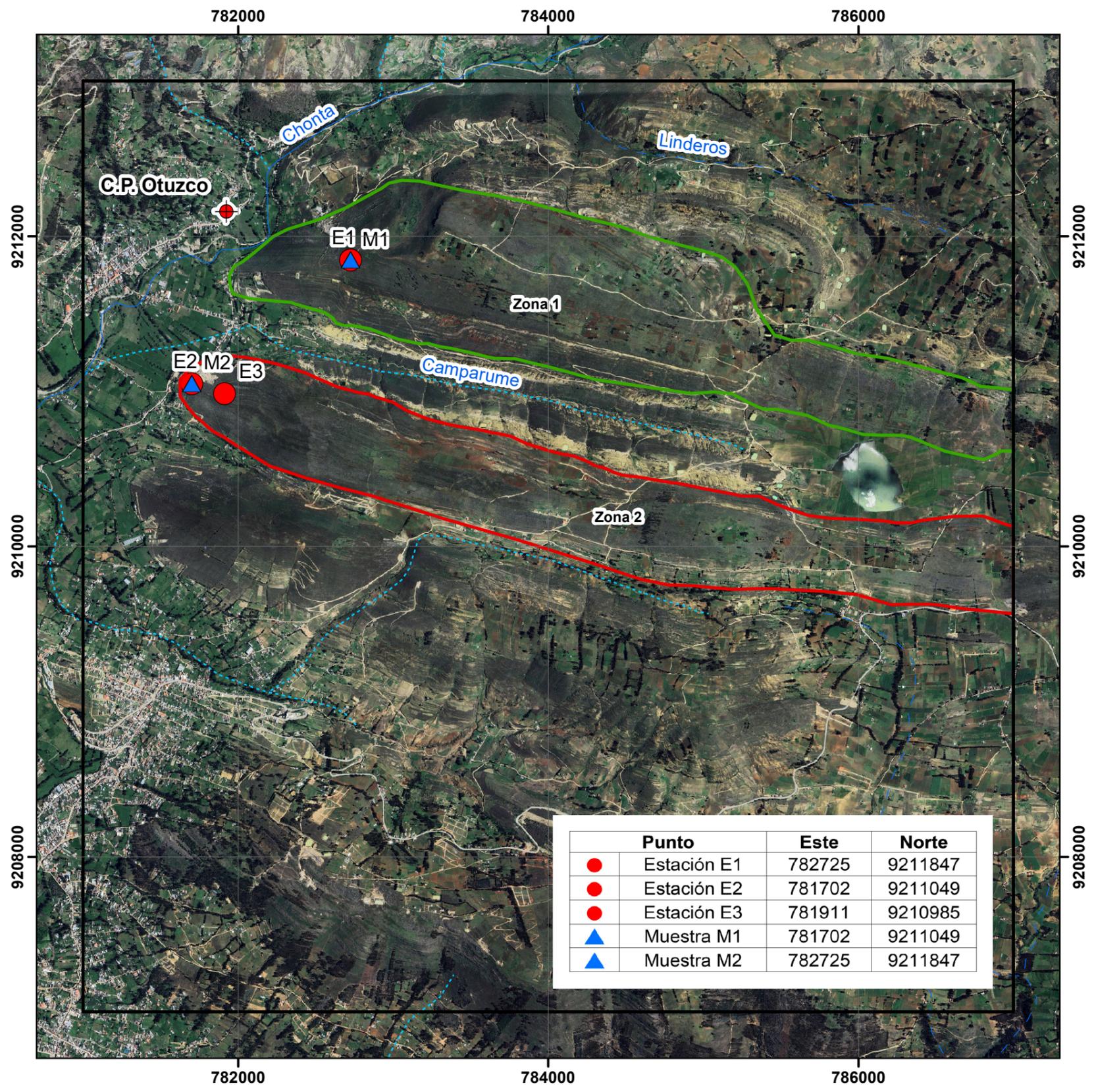
SIMBOLOGÍA

-  C.P. Otuzco
- Drenajes**
-  Quebrada Estacionaria
-  Quebrada
-  Río
-  Área de estudio
-  Formación Cajamarca (Ks-Ca)
- Composición de bandas**
-  Rojo: Banda 5
-  Verde: Banda 6
-  Azul: Banda 4



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023	PLANO N°
	PLANO: PLANO DE COMBINACIÓN DE BANDAS COMPOSICIÓN RGB 564	07
	TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET	ESCALA:
	ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	1 : 30,000
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S	FECHA: AGOSTO 2025	

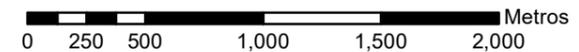


Punto	Este	Norte
● Estación E1	782725	9211847
● Estación E2	781702	9211049
● Estación E3	781911	9210985
▲ Muestra M1	781702	9211049
▲ Muestra M2	782725	9211847



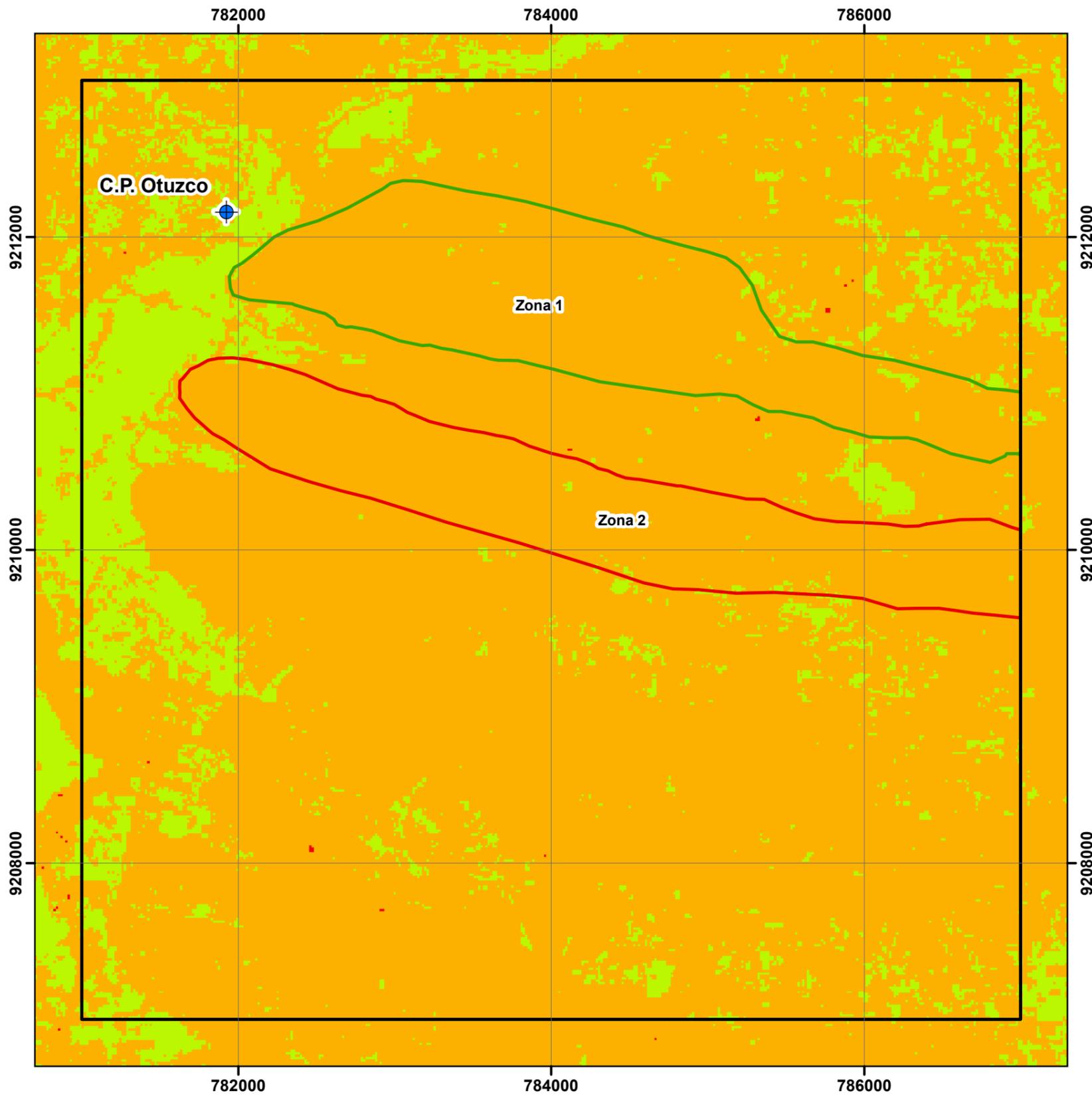
SIMBOLOGÍA

- C.P. Otuzco
- Puntos**
 - Estación
 - Muestra
- Drenajes**
 - Quebrada Estacionaria
 - Quebrada
 - Río
- Área de estudio
- Zonas de interés**
 - Zona 1
 - Zona 2



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		
	PLANO N° 08	
<small>TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023</small>		ESCALA: 1 : 30,000
<small>PLANO: PLANO DE ZONAS DE INTERÉS</small>		
<small>TESISTA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET</small> <small>ASESOR: M. CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO</small>		
<small>DATUM: WGS 84 / ZONA 17S</small>	<small>FECHA: AGOSTO 2025</small>	



SIMBOLOGÍA

 C.P. Otuzco

Zonas de interés

 Zona 1

 Zona 2

 Área de estudio

Rango de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) Categorizado

 -0.122 - 0.000 Sin Vegetación (SV)

 0.001 - 0.300 Poca Vegetación (PV)

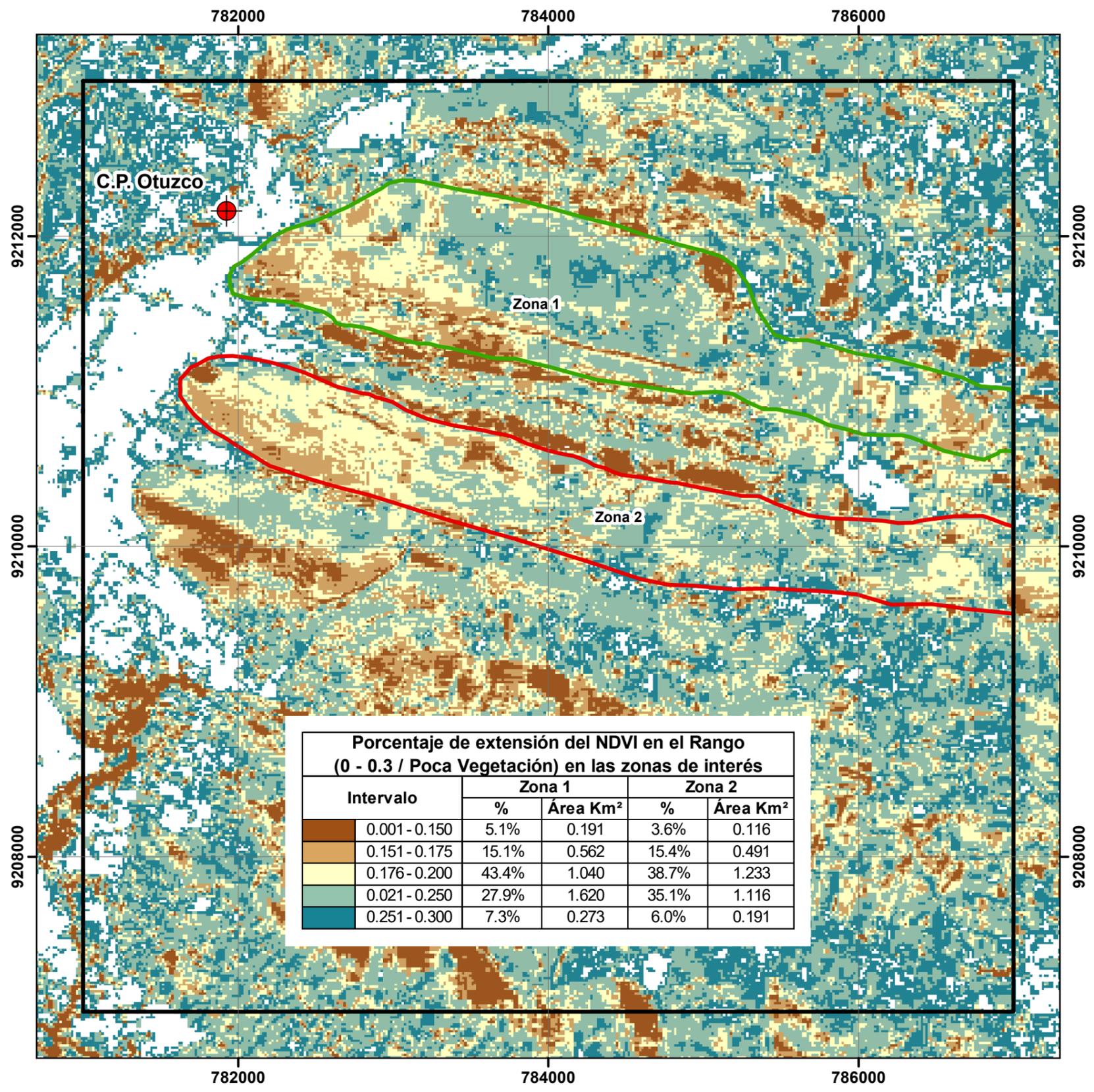
 0.301 - 0.600 Moderada Vegetación (MV)

 0.601 - 0.603 Alta Vegetación (AV)



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		 PLANO N° 10
	TESIS: ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA 2023 PLANO: PLANO DEL INDICE DE DIFERENCIA DE VEGETACIÓN NORMALIZADA (NDVI) CATEGORIZACIÓN CON LAS ZONAS DE INTERÉS TESISITA: BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET ASESOR: M.CS. ING. GONZALES YANA ROBERTO SEVERINO	
DATUM: WGS 84 / ZONA 17S		FECHA: AGOSTO 2025 ESCALA: 1 : 30,000



Porcentaje de extensión del NDVI en el Rango (0 - 0.3 / Poca Vegetación) en las zonas de interés

Intervalo	Zona 1		Zona 2	
	%	Área Km ²	%	Área Km ²
0.001 - 0.150	5.1%	0.191	3.6%	0.116
0.151 - 0.175	15.1%	0.562	15.4%	0.491
0.176 - 0.200	43.4%	1.040	38.7%	1.233
0.201 - 0.250	27.9%	1.620	35.1%	1.116
0.251 - 0.300	7.3%	0.273	6.0%	0.191



SIMBOLOGÍA

- C.P. Otuzco
- Área de estudio
- Zonas de interés**
- Zona 1
- Zona 2

- Intervalo de valores del Índice de Diferencia de Vegetación Normalizada (NDVI) en el Rango (0 - 0.3)**
- 0.001 - 0.150
 - 0.151 - 0.175
 - 0.176 - 0.200
 - 0.201 - 0.250
 - 0.251 - 0.300



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERIA Escuela Profesional de Ingeniería Geológica		PLANO N° <h1 style="font-size: 2em;">11</h1>
<p> <small>TESIS:</small> ANÁLISIS DE LA ROCA CALIZA EN LA FORMACIÓN CAJAMARCA POR MEDIO DE LA TELEDETECCIÓN Y ENSAYOS QUÍMICOS DE COMPOSICIÓN PARA DETERMINAR SU PUREZA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO ALTO, BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA, 2023 <small>PLANO:</small> PLANO DEL ÍNDICE DE DIFERENCIA DE VEGETACIÓN NORMALIZADA (NDVI) RANGO (0 - 0.3) POCA VEGETACIÓN CON LAS ZONAS DE INTERÉS <small>TESISTA:</small> BACH. VALERA TEJADA DIEGO KENNET <small>ASESOR:</small> M.CS. ING. GONZÁLES YANA ROBERTO SEVERINO <small>DATUM:</small> WGS 84 / ZONA 17S <small>FECHA:</small> AGOSTO 2025 </p>		
		ESCALA: 1 : 30,000

INFORME DE ENSAYO IE-040222-04-01

1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1 Cliente : Persona Natural
1.2 RUC/DNI : 70199604

2. FECHAS

- 2.1 Inicio : 05 de febrero de 2023
2.2 Fin : 10 de febrero de 2023
2.3 Emisión de informe : 11 de febrero de 2023

3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

- 3.1 Temperatura : 20.1 °C
3.2 Humedad Relativa : 54 %

4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

- 4.1 Ensayo solicitado/ : Determinación de composición
Técnica utilizada

5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Tabla N°1: Datos de la muestra

Cód. de Laboratorio	Producto	Descripción del Cliente
S-3261	Muestra de Caliza	Muestra: 1 Este: 782527 Norte: 9211830

6. RESULTADO

6.1. Resultados

Tabla N°2: Resultados de Ensayo

Compuesto	Unidad	Resultado
Carbonato de Calcio CaCO ₃	%	94.01
Carbonato de Magnesio MgCO ₃	%	5.63
Óxido de Silicio, SiO ₂	%	0.25
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	%	0.04
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%	0.07

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio.
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

FIN DE DOCUMENTO



DIEGO ROMKNO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337

INFORME DE ENSAYO IE-040222-04-02

1. DATOS DEL CLIENTE

- 1.1 Cliente : Persona Natural
1.2 RUC/DNI : 70199604

2. FECHAS

- 2.1 Inicio : 05 de febrero de 2023
2.2 Fin : 10 de febrero de 2023
2.3 Emisión de informe : 11 de febrero de 2023

3. CONDICIONES AMBIENTALES DE ENSAYO

- 3.1 Temperatura : 20.1 °C
3.2 Humedad Relativa : 54 %

4. ENSAYO SOLICITADO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

- 4.1 Ensayo solicitado/ : Determinación de composición
Técnica utilizada

5. DATOS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Tabla N°1: Datos de la muestra

Cód. de Laboratorio	Producto	Descripción del Cliente
S-3262	Muestra de Caliza	Muestra: 2 Este: 781885 Norte: 9211001

6. RESULTADO

6.1. Resultados

Tabla N°2: Resultados de Ensayo

Compuesto	Unidad	Resultado
Carbonato de Calcio CaCO ₃	%	93.23
Carbonato de Magnesio MgCO ₃	%	4.14
Óxido de Silicio, SiO ₂	%	1.65
Oxido de Aluminio, Al ₂ O ₃	%	0.11
Óxido de Hierro, Fe ₂ O ₃	%	0.87

- Los Resultados pertenecen a las muestras entregadas al laboratorio.
- Queda prohibida la copia parcial de este informe sin el consentimiento por escrito de SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS SAC.

FIN DE DOCUMENTO



DIEGO ROMKNO VERGARAY D'ARRIGO
QUÍMICO
CQP. 1337