

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**Evaluación de crecimiento de áreas construidas con
índices espectrales de teledetección en el distrito de
Ayacucho, 2025**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:
Bach. Eder Ivan CONISLLA CACERES

ASESOR:
MSc. Ing. Rocky Giban AYALA BIZARRO

**AYACUCHO - PERÚ
2025**

Resumen

La presente investigación evaluó la expansión urbana en los distritos de Ayacucho, Carmen Alto, Jesús de Nazareno, Andrés Avelino Cáceres Dorregaray y San Juan Bautista mediante el uso de índices espectrales de teledetección, específicamente el índice de construcción de diferencia normalizada (NDBI) y el análisis de cambios de uso y cobertura del suelo (LULC). El estudio abarcó el periodo comprendido entre 1990 y 2025, empleando imágenes satelitales Landsat y el dataset global GLC_FCS30D, procesadas en la plataforma Google Earth Engine bajo un enfoque cuantitativo, longitudinal y no experimental.

Los resultados obtenidos evidencian un crecimiento sostenido y acelerado de la superficie urbana en todos los distritos analizados. En el distrito de Ayacucho, el área construida aumentó de 4.035 km² en 1990 a 6.44 km² en 2025, lo que representa un incremento del 59.6 % en 35 años, con una tasa de urbanización que pasó del 4.9 % al 7.8 % del territorio. En el distrito de Carmen Alto, la expansión fue más pronunciada, creciendo de 0.742 km² a 2.492 km². San Juan Bautista presentó el mayor desarrollo urbano en términos absolutos, alcanzando 3.78 km² en 2025, mientras que Andrés Avelino Cáceres Dorregaray y Jesús de Nazareno también mostraron incrementos significativos del 90.5 % y 50.2 %, respectivamente.

El análisis de cambios de uso de suelo entre 1990 y 2022 reveló una disminución progresiva de las superficies de vegetación escasa, matorral y pastizal, acompañada de la consolidación de nuevas áreas urbanizadas hacia las periferias de los núcleos urbanos existentes. Las proyecciones lineales para 2025 indican la continuidad de esta tendencia, con una mancha urbana cada vez más extensa y patrones de crecimiento preferencial hacia el norte y sur del área metropolitana de Ayacucho. Se concluye que los índices espectrales de teledetección, particularmente el NDBI, constituyen una herramienta eficaz para el monitoreo y cuantificación de la expansión urbana, proporcionando información relevante para la planificación territorial sostenible y la gestión del crecimiento urbano en la región de Ayacucho.

Palabras clave: movimiento de tierra, deslizamiento, índices espectrales, resistencia de suelo , puntos de control.

Abstract

This research evaluated urban expansion in the districts of Ayacucho, Carmen Alto, Jesús de Nazareno, Andrés Avelino Cáceres Dorregaray, and San Juan Bautista using remote sensing spectral indices, specifically the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) and Land Use and Land Cover (LULC) change analysis. The study covered the period from 1990 to 2025, employing Landsat satellite imagery and the global GLC_FCS30D dataset, processed on the Google Earth Engine platform under a quantitative, longitudinal, and non-experimental approach.

The results obtained show sustained and accelerated growth of the urban surface in all analyzed districts. In the Ayacucho district, the built-up area increased from 4.035 km² in 1990 to 6.44 km² in 2025, representing a 59.6 % increase over 35 years, with an urbanization rate rising from 4.9 % to 7.8 % of the territory. In the Carmen Alto district, the expansion was more pronounced, growing from 0.742 km² to 2.492 km². San Juan Bautista presented the largest urban development in absolute terms, reaching 3.78 km² by 2025, while Andrés Avelino Cáceres Dorregaray and Jesús de Nazareno also showed significant increases of 90.5 % and 50.2 %, respectively.

The land use change analysis between 1990 and 2022 revealed a progressive decrease in sparse vegetation, shrubland, and grassland surfaces, accompanied by the consolidation of new urbanized areas towards the peripheries of existing urban centers. Linear projections for 2025 indicate the continuity of this trend, with an increasingly extensive urban footprint and preferential growth patterns towards the north and south of the Ayacucho metropolitan area.

It is concluded that remote sensing spectral indices, particularly NDBI, constitute an effective tool for monitoring and quantifying urban expansion, providing relevant information for sustainable territorial planning and urban growth management in the Ayacucho region.

Keywords: earth movement , landslide, spectral indices,soil resistance, checkpoints .

Introducción

En el presente trabajo se tiene lo siguiente:

- **Capítulo I: Planteamiento del problema.** Donde nos planteamos la siguiente pregunta: ¿En qué medida los índices espectrales pueden evaluar el crecimiento de áreas construidas en el distrito de Ayacucho, 2025?
- **Capítulo II: Marco teórico.** El marco teórico nos ayuda a desarrollar y comprender las variables de investigación, para evaluar y realizar la operacionalización de variables junto al marco conceptual.
- **Capítulo III: Metodología de la investigación.** La metodología de la investigación nos ayuda a comprender el enfoque y tipo de investigación. Para la presente investigación se utilizó un enfoque cuantitativo, ya que se emplearán cantidades para determinar los valores de los índices espectrales. El alcance o nivel de investigación es aplicativo, puesto que se aplicarán los índices espectrales NDBI para la evaluación de la expansión territorial o variación de áreas construidas. En cuanto al diseño de investigación, se tiene un diseño no experimental longitudinal porque los datos obtenidos son series de tiempo con las que se analizarán los índices espectrales.
- **Capítulo IV: Análisis de resultados de la investigación.** La presente investigación evaluó la expansión urbana en los distritos de Ayacucho, Carmen Alto, Jesús de Nazareno, Andrés Avelino Cáceres Dorregaray y San Juan Bautista mediante el uso de índices espectrales de teledetección, específicamente el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI) y el análisis de cambios de uso y cobertura del suelo (LULC). El estudio abarcó el periodo comprendido entre 1990 y 2025, empleando imágenes satelitales Landsat y el dataset global GLC_FCS30D, procesadas en la plataforma Google Earth Engine bajo un enfoque cuantitativo, longitudinal y no experimental.

Los resultados obtenidos evidencian un crecimiento sostenido y acelerado de la superficie urbana en todos los distritos analizados. En el distrito de Ayacucho, el área construida aumentó de 4.035 km² en 1990 a 6.44 km² en 2025, lo que representa un incremento del 59.6 % en 35 años, con una tasa de urbanización que pasó del 4.9 % al 7.8 % del territorio. En el distrito de Carmen Alto, la expansión fue más pronunciada, creciendo de 0.742 km² a 2.492 km² (235.8 %). San Juan Bautista presentó el mayor desarrollo urbano en términos absolutos, alcanzando 3.78 km² en 2025, mientras que Andrés Avelino Cáceres Dorregaray y Jesús de Nazareno también mostraron incrementos significativos del 90.5 % y 50.2 %, respectivamente. El análisis de cambios de uso de suelo entre 1990 y 2022 reveló una disminución progresiva de las superficies de vegetación escasa, matorral y pastizal, acompañada de la consolidación

de nuevas áreas urbanizadas hacia las periferias de los núcleos urbanos existentes. Las proyecciones lineales para 2025 indican la continuidad de esta tendencia, con una mancha urbana cada vez más extensa y patrones de crecimiento preferencial hacia el norte y sur del área metropolitana de Ayacucho.

Se concluye que los índices espectrales de teledetección, particularmente el NDBI, constituyen una herramienta eficaz para el monitoreo y cuantificación de la expansión urbana, proporcionando información relevante para la planificación territorial sostenible y la gestión del crecimiento urbano en la región de Ayacucho.

- **Conclusiones y recomendaciones.** Se concluye que con la presente investigación se puede controlar las áreas expandidas construidas para planificar los usos de suelo en determinada cuenca.
- **Referencias bibliográficas.** La investigación toma como cabecera los papers de investigación de países donde se busca desarrollar altamente la teledetección y aplicarlos a diferentes puntos del mundo con diferentes fines.
- **Anexos.** Para la presente investigación se obtuvo un panel fotográfico de campo.

Dedicatoria

*Agradezco a Dios por su guía constante, por ser mi
fortaleza en la adversidad, mi sabiduría para
perseverar y por concederme el privilegio de
alcanzar uno de mis sueños más anhelados.*

*A mi madre Emperatriz Cáceres Dueñas, a mi
padre Roger Alfredo Conislla y a mi esposa
Shyndya Landeo Palomino, a mis hijos Magnus y
Shelly Ann por su apoyo y amor incondicional, por
creer en mí incluso cuando dudaba, por su apoyo
constante, mi motor y motivo de seguir avanzando
en este mundo, y sus consejos y sacrificios hacia mi
persona. Sin ustedes, este logro no habría sido
posible.*

Agradecimientos

Agradezco sinceramente a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga por la oportunidad de mi formación profesional. Fue esta institución la que me proveyó no solo de conocimientos académicos, sino también de valores fundamentales, forjando en mí un compromiso con el progreso social.

Quiero expresar mi más sentido reconocimiento a los profesores de la UNSCH. Su incansable dedicación, su esfuerzo y su compromiso con la enseñanza fueron decisivos. Gracias a su orientación, paciencia y genuina vocación, pude aprender y crecer integralmente. Sus enseñanzas han marcado de forma indeleble mi perfil profesional y mi carácter.

A mis jurados el Msc. Ing. Angel Hugo Vilchez Peña y Msc. Ing. Saúl Retamozo Fernández y el Ing. Rocky Giban Ayala Bizarro, por el aporte en la mejora de la presente investigación con sus observaciones y mejoras.

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga
Ayacucho, 2025

Eder Iván Conislla Cáceres

Índice general

Resumen	i
Introducción	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xiii
Glosario	xiv
Acrónimos	xvi
Símbolos	xviii
1 Planteamiento del problema	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Delimitación del problema	1
1.2.1 Espacial	1
1.2.2 Temporal	3
1.2.3 Temática y unidad de análisis	3
1.3 Formulación del problema	3
1.3.1 Problema general	3
1.3.2 Problemas específicos	3
1.4 Justificación e importancia	3
1.5 Limitaciones o restricciones	3
1.6 Objetivos	4
1.6.1 Objetivo general	4
1.6.2 Objetivos específicos	4
2 Marco teórico	5
2.1 Antecedentes	5
2.1.1 Antecedentes Internacionales	5
2.1.2 Antecedentes Nacionales	6
2.2 Bases teóricas	7

2.2.1	Índices espectrales	7
2.2.1.1	Teledetección	7
2.2.1.2	Tipos de Teledetección	7
2.2.1.3	Plataformas y Sensores	8
2.2.1.4	Interacción de las radiaciones electromagnéticas con la materia	8
2.2.1.5	Reflexión de radiaciones electromagnéticas	11
2.2.1.6	Emisión de radiación electromagnética	13
2.2.1.7	Firmas espectrales	16
2.2.1.8	Espacio de firmas y características	23
2.2.1.9	Sensores de teledetección	24
2.2.1.10	Índices para clasificar imágenes satelitales	26
2.2.2	Áreas construidas	31
2.2.2.1	Importancia de las Áreas Construidas	31
2.2.2.2	Características de las Áreas Construidas	31
2.2.2.3	Clasificación de las Áreas Construidas	32
2.2.2.4	Métodos de Identificación y Análisis	32
2.2.2.5	Impactos de las Áreas Construidas	33
2.2.2.6	Relevancia en la Planificación Territorial	33
2.3	Marco conceptual	33
2.3.1	Expansión urbana	33
2.3.2	Teledetección	33
2.3.3	Índice espectral	34
2.3.4	NDBI (Normalized Difference Built-up Index)	34
2.3.5	LULC (Land Use and Land Cover)	34
2.3.6	Área construida	34
2.3.7	Serie temporal	34
2.3.8	Planificación territorial sostenible	34
3	Método de la investigación	35
3.1	Enfoque.	35
3.2	Alcance	35
3.3	Diseño de investigación	35
3.4	Población y muestra	35
3.4.1	Población	35
3.4.2	Muestra	35
3.5	Hipótesis	36
3.5.1	Hipótesis general	36

3.5.2	Hipótesis específicas	36
3.6	Operacionalización de variables, definición conceptual	36
3.6.1	Variables e indicadores	36
3.7	Técnicas e instrumentos	36
3.7.1	Técnicas	36
3.7.2	Instrumentos	37
3.8	Desarrollo de la investigación	37
3.8.1	Área de estudio	37
3.8.2	Mapa de ubicación del distrito de Ayacucho	37
3.8.3	Obtención de productos y dataset para el cálculo de índices espectrales	39
3.8.3.1	Recorte del área de interés	39
3.8.3.2	Características generales de los sensores Landsat empleados	40
3.8.3.3	Bandas espectrales de Landsat 4-5 TM (Collection 2 Level-2)	41
3.8.3.4	Bandas espectrales de Landsat 8-9 OLI/TIRS (Collection 2 Level-2)	42
3.8.3.5	Características del dataset GHSL Built-Up Surface (P2023A)	43
3.8.3.6	Métodología para la obtención de áreas en la expansión urbana	44
3.8.4	Diagrama de flujo para crear el algoritmo de expansión urbana	46
3.9	Memoria de cálculo	47
3.9.1	Objetivo del análisis	47
3.9.2	Área de estudio	47
3.9.3	Fuente de datos	47
3.9.4	Preprocesamiento de imágenes	47
3.9.5	Índices espectrales empleados	48
3.9.5.1	Índice Normalizado de Construcción (NDBI)	48
3.9.5.2	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	48
3.9.5.3	Índice de Agua Normalizado (NDWI)	48
3.9.6	Clasificación de áreas construidas	49
3.9.7	Cálculo del área construida	49
3.9.7.1	Área por píxel	49
3.9.7.2	Área total construida	49
3.9.7.3	Conversión a hectáreas	50
3.9.7.4	Conversión a kilómetros cuadrados	50
3.9.8	Cálculo del crecimiento urbano	50
3.9.9	Tasa de crecimiento porcentual	50
3.9.10	Tasa anual compuesta de crecimiento	50
3.9.11	Validación de resultados	51

3.9.11.1	Precisión global	51
3.9.11.2	Índice Kappa	51
3.9.12	Software utilizados	51
3.9.13	Mapas generadas con GEE para la expansión urbana de Ayacucho	52
4	Resultados	56
4.1	Análisis e interpretación	56
4.1.1	Expansión urbana para el distrito de Ayacucho	56
4.1.2	Interpretación de la evolución de área urbano de 1990 al 2025	56
4.1.3	Interpretación de la evolución de área urbano de 1990 al 2025	57
4.1.4	Interpretación de las mapas de área urbano de 1990 al 2025	58
4.1.5	Expansión urbana para el distrito de Carmen alto	61
4.1.6	Expansión urbana para el distrito de Jesús de Nazareno	65
4.1.7	Expansión urbana para el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray	69
4.1.8	Expansión urbana para el distrito de San Juan Bautista	73
4.1.9	Cambios de uso y coberturas de suelo (LULC)	77
4.1.10	Metodología para cambios de (LULC)	77
4.1.11	Diagrama de flujo para la metodología de LULC	78
4.1.12	Mapas de cambio y usos de suelos para Ayacucho	80
4.1.13	Tabla de valores de los cambios de LULC	83
5	Conclusiones	84
	Conclusiones	84
5.1	Conclusiones	84
	Conclusiones	84
5.1.1	Conclusión general	84
5.1.2	Conclusiones específicos	84
	Referencias Bibliográficas	86
A	Anexos	90
A.1	Ubicación distrito de Ayacucho	90
A.2	Código de procesamiento de imágenes en Java Script	91
A.2.1	Diagrama de flujo	93
A.3	Panel fotográfico	94
A.4	Matriz de consistencia	97

Índice de figuras

Figura 1	Área de estudio	2
Figura 2	La figura muestra la geometría en cada área infinitesimal que emite o recibe la radiación, localizada en el centro de la esfera de radio unitario	10
Figura 3	Transmisión, reflexión, dispersión y absorción	12
Figura 4	La relación entre la temperatura y el pico de potencia radiante se expresa mediante la Ley de Desplazamiento de Wien	14
Figura 5	Emitancia y radiancia espectral	16
Figura 6	Respuesta espectral de algunas características de la superficie terrestre	18
Figura 7	Espectros de bandas para vegetación	19
Figura 8	Espectros de bandas para Suelos	20
Figura 9	Espectros de bandas para Minerales	21
Figura 10	Espectros de bandas para nieve y nubes	23
Figura 11	Espacio de firmas espectrales	24
Figura 12	NDVI para la obtención y detección vegetal	29
Figura 13	Índice espectral para vegetación desde MODIS	29
Figura 14	Área de estudio	38
Figura 15	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	39
Figura 16	Expansión urbana de 1987 al 1988	52
Figura 17	Expansión urbana de 1990 a 1991	53
Figura 18	Expansión urbana de 2004 a 2016	54
Figura 19	Expansión urbana de 1987 a 2019	55
Figura 20	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	57
Figura 21	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	57
Figura 22	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	58
Figura 23	Área construida de 1990 a 2025	59
Figura 24	Expansión urbana del distrito de Ayacucho de 1990 a 2025	60

Figura 25	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	61
Figura 26	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	62
Figura 27	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	62
Figura 28	Área construida de 1990 a 2025	63
Figura 29	Área construida de 1990 a 2025	64
Figura 30	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	65
Figura 31	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	66
Figura 32	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	66
Figura 33	Área construida de 1990 a 2025	67
Figura 34	Área construida de 1990 a 2025	68
Figura 35	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	69
Figura 36	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	70
Figura 37	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	70
Figura 38	Área construida de 1990 a 2025	71
Figura 39	Área construida de 1990 a 2025	72
Figura 40	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	73
Figura 41	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	74
Figura 42	Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster	74
Figura 43	Área construida de 1990 a 2025	75
Figura 44	Área construida de 1990 a 2025	76
Figura 45	Cambios de usos de suelos	81
Figura 46	Evolución de Uso de Suelo en Cuenca (Ayacucho) - Área en km ²	82
Figura 47	Área de estudio	90
Figura 48	Vista Panorámica de la expansión urbana del mirador de Acuchimay	94
Figura 49	Vista Panorámica de la expansión urbana del mirador de Cabrapata	94
Figura 50	Vista Panorámica de la expansión urbana	95
Figura 51	Vista Panorámica de la expansión urbana	95
Figura 52	Vista Panorámica de la expansión urbana	96
Figura 53	Vista Panorámica de la expansión urbana	96

Índice de tablas

Tabla 1	Variables, Dimensiones, indicadores y unidades	36
Tabla 2	Características generales de los sensores Landsat empleados en la generación del dataset GHSL P2023A	40
Tabla 3	Bandas espectrales del sensor Landsat 4-5 TM en el producto Collection 2 Level-2 Surface Reflectance	41
Tabla 4	Bandas espectrales de los sensores Landsat 8-9 OLI/TIRS en el producto Collection 2 Level-2 Surface Reflectance	42
Tabla 5	Características técnicas del dataset GHSL Built-Up Surface Grid (P2023A)	43
Tabla 6	Índices espectrales utilizados para la detección de expansión urbana	45
Tabla 7	Evolución de áreas urbanas del Distrito de Ayacucho	56
Tabla 8	Evolución de áreas urbanas	61
Tabla 9	Evolución de áreas urbanas	65
Tabla 10	Evolución de áreas urbanas	69
Tabla 11	Evolución de áreas urbanas	73
Tabla 12	Cambios de LULC de 1990 al 2022	77
Tabla 13	Cambios de LULC de 1990 al 2022	83
Tabla 14	Matriz de consistencia	97
Tabla 15	Matriz de operacionalización de variables	98

Glosario

- NDBI:** Índice de Construcción de Diferencia Normalizada. Índice espectral utilizado para identificar y delimitar áreas urbanas o superficies construidas a partir de imágenes satelitales..
- NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. Índice espectral empleado para cuantificar la densidad y el estado de salud de la vegetación mediante bandas roja e infrarroja cercana..
- NDWI:** Índice de Agua de Diferencia Normalizada. Índice espectral utilizado para detectar cuerpos de agua y medir el contenido de humedad en la vegetación..
- MNDWI:** Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado. Índice que emplea bandas verde y SWIR para mejorar la extracción de cuerpos de agua en áreas urbanizadas..
- SAVI:** Índice de Vegetación Ajustado al Suelo. Índice que minimiza los efectos de la reflectancia del suelo en la estimación de la vegetación..
- EVI:** Índice de Vegetación Mejorado. Índice que incorpora correcciones atmosféricas y de fondo para reducir la saturación en zonas de alta biomasa..
- IBI:** Índice Construido Basado en Índices. Combina NDBI, SAVI y MNDWI para mejorar la extracción de áreas edificadas en entornos urbanos..
- BUI:** Índice de Área Construida. Resulta de la diferencia entre NDBI y NDVI ($BUI = NDBI - NDVI$), resaltando zonas urbanas al eliminar la influencia de la vegetación..
- UI:** Índice Urbano. Índice espectral que destaca superficies urbanas frente a suelo desnudo mediante bandas SWIR y roja..
- GEE:** Google Earth Engine. Plataforma basada en la nube para el procesamiento y análisis de imágenes satelitales a gran escala..
- REM:** Radiación Electromagnética. Forma de energía que se propaga en forma de ondas y que constituye la base de la teledetección..
- NIR:** Infrarrojo Cercano. Región del espectro electromagnético comprendida aproximadamente entre 0.7 y 1.3 μm , útil para el análisis de vegetación y superficies construidas..
- SWIR:** Infrarrojo de Onda Corta. Región espectral comprendida entre 1.3 y 3.0 μm , sensible al contenido de humedad y a materiales de construcción..
- TIR:** Infrarrojo Térmico. Región del espectro electromagnético (8-14 μm) utilizada para medir la temperatura superficial del terreno..
- SIG:** Sistema de Información Geográfica. Conjunto de herramientas informáticas para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos geoespaciales..
- USGS:** Servicio Geológico de los Estados Unidos. Institución que proporciona libre acceso a imágenes satelitales Landsat y otros productos geoespaciales..

ANA: Autoridad Nacional del Agua. Entidad estatal peruana encargada de la gestión y administración de los recursos hídricos en el Perú..

Expansión urbana: Proceso de crecimiento espacial de las áreas construidas sobre el territorio, generalmente asociado al aumento poblacional y al desarrollo económico..

Área construida: Superficie ocupada por infraestructura urbana (viviendas, vías, equipamientos) caracterizada por la presencia de materiales impermeables como concreto, asfalto y vidrio..

Clasificación digital: Proceso automático o semiautomático de asignación de categorías temáticas a cada píxel de una imagen satelital basado en su firma espectral..

Serie temporal: Conjunto de observaciones obtenidas de manera secuencial a lo largo de un período, permitiendo analizar tendencias y cambios multitemporales..

Shapefile: Formato de archivo vectorial utilizado en SIG para almacenar geometrías (puntos, líneas, polígonos) y sus respectivos atributos..

Píxel: Unidad mínima de información en una imagen digital raster. En teledetección, cada píxel representa un área específica del terreno con un valor numérico de reflectancia..

Reflectancia: Fracción de radiación electromagnética incidente que es reflejada por una superficie. Varía según el material y la longitud de onda..

Umbralización: Técnica de clasificación que separa píxeles en categorías (por ejemplo, urbano vs. no urbano) aplicando un valor límite a un índice espectral..

Landsat: Satélite Terrestre (Programa NASA/USGS). Serie de satélites dedicados a la observación de la superficie terrestre con resolución media..

Sentinel: Satélite del programa Copernicus (ESA). Proporciona imágenes de alta resolución temporal y espacial para monitoreo ambiental..

ASTER: Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión Térmica y Reflexión. Sensor a bordo del satélite Terra de la NASA..

MODIS: Espectrorradiómetro para Imágenes de Resolución Moderada. Sensor a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA..

Acrónimos

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ANA	Autoridad Nacional del Agua (Perú)
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BSI	Bare Soil Index
BUI	Built-up Index
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CSV	Comma-Separated Values
ENVISAT	Environmental Satellite
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EVI	Enhanced Vegetation Index
GEE	Google Earth Engine
GeoTIFF	Georeferenced Tagged Image File Format
GIS	Geographic Information System
GNDVI	Green Normalized Difference Vegetation Index
IA	Inteligencia Artificial
IBI	Index-based Built-up Index
LANDSAT	Land Satellite
LST	Land Surface Temperature
LUCC	Land Use and Land Cover Change
LULC	Land Use and Land Cover
ML	Machine Learning
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NBR	Normalized Burn Ratio
NDBI	Normalized Difference Built-up Index
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
NDSI	Normalized Difference Snow Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near Infrared
OLI	Operational Land Imager
REM	Radiación Electromagnética
RF	Random Forest
RMSE	Root Mean Square Error
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SENTINEL	Satélite del Programa Copernicus (ESA)
SHP	Shapefile
SIG	Sistema de Información Geográfica
SVM	Support Vector Machine
SWIR	Short-Wave Infrared
TDR	Teledetección
TIR	Thermal Infrared
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
UGL	Modelo de Elevación Digital
UI	Urban Index
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator

Símbolos

<i>AOD</i>	Profundidad óptica de aerosoles
<i>A</i>	Área superficial
<i>A_u</i>	Área urbana construida
<i>B</i>	Banda Azul (Blue)
<i>BSI</i>	Índice de Suelo Desnudo
<i>BUI</i>	Índice de Área Construida
<i>c</i>	Velocidad de la luz
<i>CAGR</i>	Tasa de Crecimiento Anual Compuesta
<i>D_u</i>	Densidad urbana
<i>E</i>	Irradiancia
<i>EVI</i>	Índice de Vegetación Mejorado
<i>E_u</i>	Tasa de expansión urbana
<i>G</i>	Banda Verde (Green)
<i>h</i>	Constante de Planck
<i>H</i>	Altura media de irregularidades superficiales
<i>I</i>	Intensidad radiante
<i>IBI</i>	Índice Construido Basado en Índices
<i>k</i>	Constante de Boltzmann
<i>L</i>	Radiancia
λ	Longitud de onda
<i>LST</i>	Temperatura Superficial del Terreno
<i>M</i>	Exitancia radiante
<i>MNDWI</i>	Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado
<i>n</i>	Porosidad
<i>NBR</i>	Relación Normalizada de Quemadura

<i>NDBI</i>	Índice de Construcción de Diferencia Normalizada
<i>NDMI</i>	Índice de Humedad de Diferencia Normalizada
<i>NDSI</i>	Índice de Nieve de Diferencia Normalizada
<i>NDVI</i>	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
<i>NDWI</i>	Índice de Agua de Diferencia Normalizada
<i>NIR</i>	Infrarrojo Cercano (Near Infrared)
ν	Frecuencia de radiación
Ω	Ángulo sólido
P_u	Porcentaje de urbanización
Q	Energía del fotón
R	Banda Roja (Red)
<i>REM</i>	Radiación Electromagnética
ρ	Reflectancia espectral
S	Grado de saturación
<i>SAVI</i>	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
<i>SWIR</i>	Infrarrojo de Onda Corta (Short-Wave Infrared)
T	Temperatura absoluta
θ	Ángulo cenital
T_h	Umbral de clasificación
<i>TIR</i>	Infrarrojo Térmico (Thermal Infrared)
<i>UI</i>	Índice Urbano
<i>UV</i>	Ultravioleta
ε	Emisividad
<i>VIS</i>	Espectro Visible
w	Contenido de agua
Z	Profundidad

“Empieza por el principio,” – dijo el Rey con gravedad – “y sigue hasta llegar al final; allí te paras.”

– Lewis Carroll, *Alice in Wonderland*

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

El crecimiento acelerado de las áreas construidas en el distrito de Ayacucho ha generado una serie de problemas urbanos, ambientales y sociales. La expansión urbana, muchas veces desordenada y sin una adecuada planificación, ha favorecido la ocupación de zonas agrícolas, áreas naturales y terrenos no aptos para el desarrollo urbano, ocasionando pérdida de suelos fértiles y degradación ambiental. La impermeabilización del suelo ha incrementado la escorrentía superficial, elevando el riesgo de inundaciones, mientras que la deforestación y la contaminación de ríos y quebradas deterioran la calidad ambiental.

En el ámbito social, la migración campo-ciudad ha incrementado la demanda de vivienda y servicios básicos, propiciando la formación de asentamientos informales sin acceso a agua potable, alcantarillado o electricidad. Asimismo, el patrimonio arquitectónico y cultural se ve amenazado por edificaciones modernas sin criterios de conservación. La infraestructura de transporte, salud y educación resulta insuficiente para atender el crecimiento poblacional, generando congestión, deficiencias en atención médica y sobrecarga escolar.

Además, se incrementa la vulnerabilidad frente a desastres, ya que muchas construcciones se ubican en zonas de riesgo sísmico o de deslizamientos, sin cumplir estándares técnicos. Estos problemas requieren una gestión urbana integral que combine planificación territorial, protección ambiental y fortalecimiento de los servicios públicos..

1.2 Delimitación del problema

1.2.1 Espacial

El trabajo se llevará a cabo en la siguiente región:

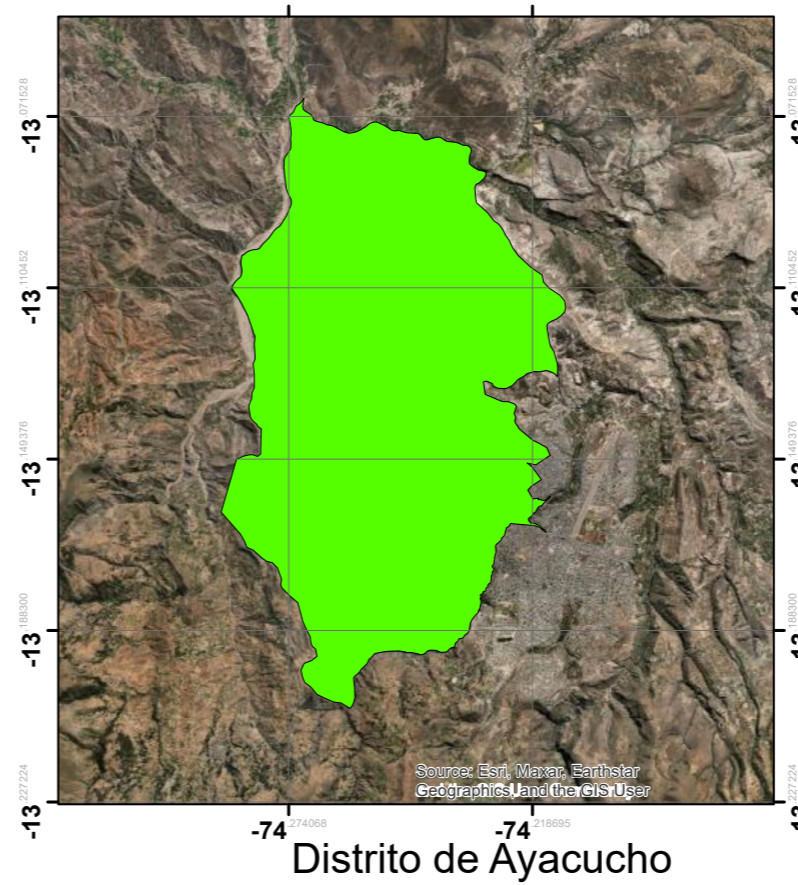
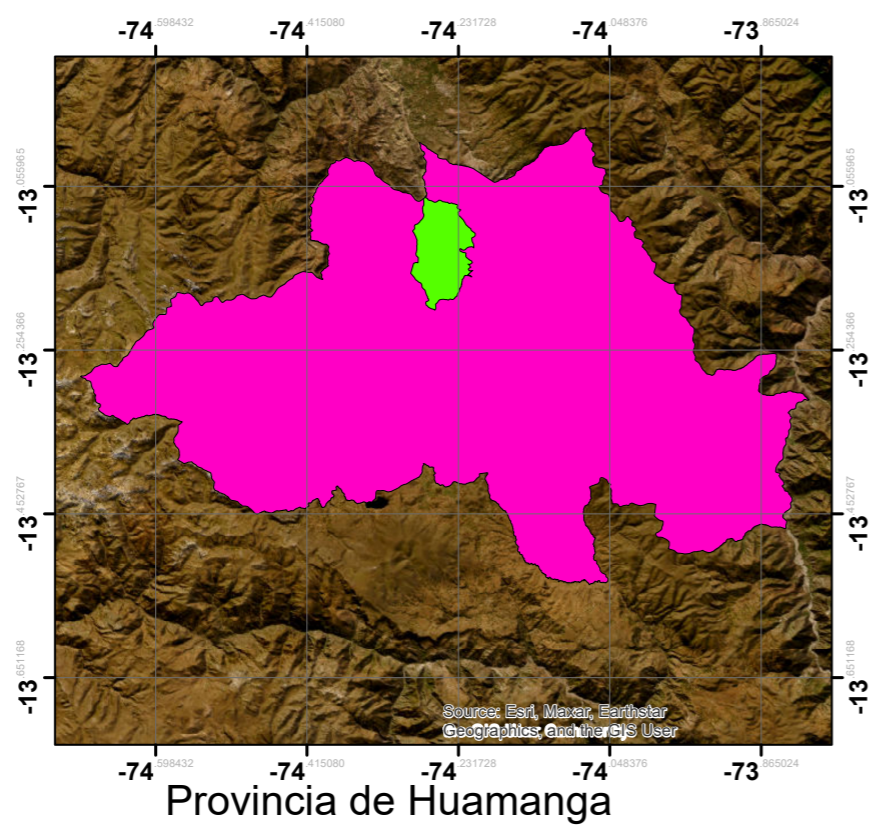
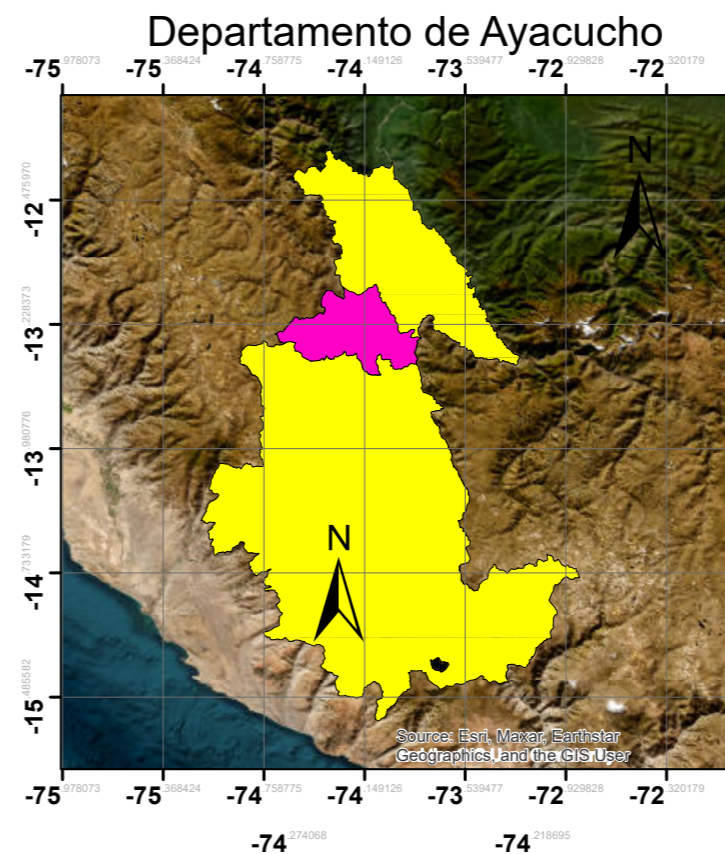
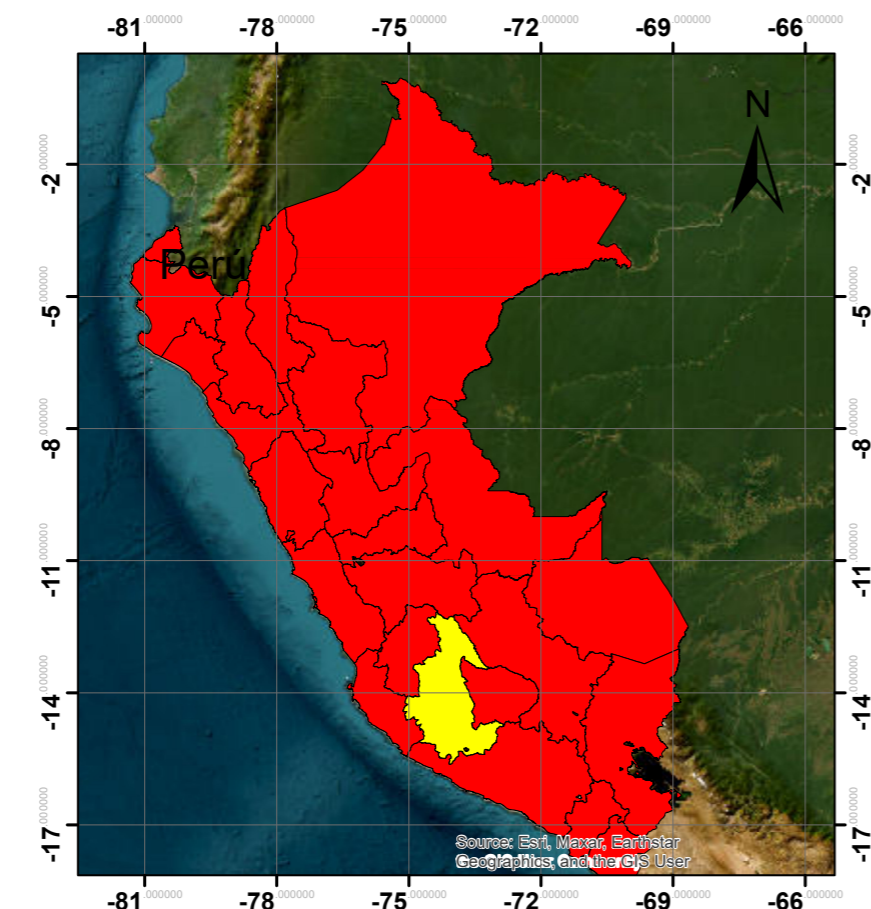
Departamentos: Ayacucho

Provincias: Huamanga

Distrito: Ayacucho, San Juan Bautista, Carmen Alto, Jesús de Nazareno y Andrés Avelino Cáceres .

Figura 1

Área de estudio



Fuente: Elaboracion propia con Arcmap

1.2.2 Temporal

La investigación se desarrollará sobre la expansión urbana del año 1990 al 2025, a partir de registros históricos de imágenes satelitales, para una mejor evaluación a través de los cambios de usos y coberturas de suelos, utilizando clasificación de imágenes y utilización de índices espectrales.

1.2.3 Temática y unidad de análisis

La temática es la evaluación de las áreas construidas en la localidad de Ayacucho en los diferentes distritos y la unidad de análisis son los índices espectrales de áreas construidas generados por fórmulas matemáticas a través de la bandas espectrales.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿ En qué medida los índices espectrales pueden evaluar el crecimiento de áreas construidas en el distrito de Ayacucho, 2025 ?

1.3.2 Problemas específicos

- ① ¿ En qué medida la variación temporal del área urbana en Ayacucho con índices espectrales nos ayudan entender el crecimiento urbano ?
- ② ¿ En qué medida los cambios de usos de suelos relacionan a la expansión urbana del Distrito de Ayacucho ?
- ③ ¿ En qué medida las mapas telemáticos nos muestran la dinámica de ampliación de zonas construidas ?

1.4 Justificación e importancia

Es justificable porque se evaluará el crecimiento de áreas construidas de los diferentes distritos de Ayacucho a través de registros históricos de imágenes satelitales, de los últimos 35 años hasta la actualidad para cumplir con los objetivos de la presente investigación.

1.5 Limitaciones o restricciones

Una de las limitaciones y restricciones de la investigación son la obtención de las imágenes satelitales de los servidores USGS, GOOGLE EARTH ENGINE, etc. donde las imágenes de altas resoluciones espaciales y espectrales y de mayor precisión no están a la disposición de la descarga en el repositorio por lo que para la presente investigación se utilizarán imágenes satelitales con resoluciones de

30m lógicamente no tienen la misma precisión que una imagen de menos resolución pero sí tiene confiabilidad para la realización de investigaciones.

1.6 **Objetivos**

1.6.1 **Objetivo general**

Aplicar la teledetección satelital para evaluar el crecimiento de las áreas construídas en el distrito de Ayacucho durante el año 2025 mediante índices espectrales y análisis multitemporal.

1.6.2 **Objetivos específicos**

- ① Determinar la variación temporal del área urbana en Ayacucho a través de imágenes satelitales y el cálculo de índices espectrales adecuados como NDBI y UI.
- ② Analizar la relación de los cambios de usos de suelos y la expansión urbana del Distrito de Ayacucho.
- ③ Elaborar mapas temáticos que muestren la dinámica reciente de ampliación de zonas construídas.

“El aspecto más triste de la vida actual es que la ciencia gana en conocimiento más rápidamente que la sociedad en sabiduría.”

— Isaac Asimov

2 Marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

De acuerdo con lo expuesto por [Yousif et al. \(2023\)](#), investigadores adscritos al departamento de recreación y ecoturismo de la Facultad de Agricultura y Ciencias de la Ingeniería de la Universidad de Duhok, en la región del Kurdistán iraquí, en su artículo científico titulado "Relationship of LST, NDVI, and NDBI using Landsat-8 data in Duhok city in 2019-2022", se reporta la existencia de una correlación significativa entre los índices espectrales NDBI y NDVI, reconociéndose que el índice NDBI resulta útil para la delimitación de zonas edificadas en dicha área de estudio.

Por otro lado, [Hasan \(2024\)](#) señala que Bangladesh, país en vías de desarrollo con alta densidad poblacional, enfrenta serios desafíos ambientales agravados por el acelerado incremento demográfico y el crecimiento económico. La investigación se centra en el distrito de Cox's Bazar, caracterizado por sus dinámicas cambiantes de uso del suelo y su vulnerabilidad al fenómeno de isla de calor urbana (UHI). Empleando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección (RS), los autores evaluaron la evolución del uso y cobertura del suelo (LULC), la temperatura superficial del terreno (LST), el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI) en el periodo comprendido entre 1990 y 2020.

Los hallazgos evidencian transformaciones sustanciales en el LULC, con implicancias para la degradación ambiental y la gestión sostenible. Se observó una reducción de la superficie boscosa, lo cual subraya la urgencia de implementar medidas de conservación. Asimismo, el análisis del LST, NDVI y NDBI pone de manifiesto los efectos de la urbanización y la expansión de superficies impermeables sobre la regulación térmica y el estado de la vegetación.

[Muhaimin et al. \(2022\)](#) sostiene que la densidad edificatoria y el suelo no urbanizado pueden ser identificados mediante transformación digital de datos provenientes de teledetección. El objetivo de dicha investigación fue cartografiar la distribución de densidades de edificación empleando el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI) y el Índice Urbano (UI), comparar ambos métodos y analizar su relación con las densidades edificatorias en la ciudad de Banjarmasin.

Los datos utilizados para generar la imagen de densidad de edificaciones proceden del satélite Landsat 8 OLI TIRS. El método implementado para separar el área construida de la no construida

se fundamenta en una clasificación digital. Dicha área se derivó a partir de los resultados de la clasificación multispectral, filtrada mediante la transformación NDBI y UI, para clasificar los niveles de densidad edificatoria.

Los resultados indican que la densidad de edificaciones presenta una relación positiva con las transformaciones del NDBI y del UI, pues una alta densidad edificatoria se asocia con valores elevados en dichas transformaciones. La precisión en la diferenciación entre área no construida y superficie construida alcanzó el 91,4505 % con el NDBI y el 92,5359 % con el UI, existiendo una diferencia del 1,0854 % favorable al UI. Una precisión global superior al 80 % evidencia una exactitud muy alta en la cartografía de densidades edificatorias.

De acuerdo con [Yasin et al. \(2022\)](#), las observaciones Landsat representan un enfoque cuantitativo de gran potencial para el monitoreo regional del crecimiento urbano y el cambio ambiental. Con ese fin, se adquirieron, clasificaron y evaluaron tres imágenes Landsat correspondientes a los años 1991 (TM), 2005 (ETM+) y 2019 (OLI-TIRS). La investigación analiza el crecimiento urbano espacio-temporal, sus patrones y las modificaciones en el uso y cobertura del suelo (LULC) mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI).

El NDVI se aplicó para el seguimiento de la vegetación, especialmente en la pérdida de terrenos vegetados, mientras que el NDBI se empleó para identificar zonas urbanas densas y edificadas. Los resultados de densidad del NDVI y NDBI revelan una disminución significativa de las áreas con vegetación y un notable incremento de los terrenos urbanos y construidos. Ello evidencia un rápido desarrollo urbano y una extensa conversión de tierras agrícolas y forestales en desarrollos de baja densidad.

El acelerado crecimiento urbano en los corredores de desarrollo regional influye de manera importante en los cambios ambientales, particularmente en sus periferias. El uso combinado del NDVI y el NDBI como indicadores indirectos permite obtener una visión dinámica y mejorar la precisión en el análisis de los cambios de uso y cobertura del suelo. El estudio demostró que el crecimiento urbano se cuadruplicó entre 1991 y 2019, siendo el periodo más acelerado el comprendido entre 1991 y 2005, debido al predominio de desarrollos de baja densidad y patrones de crecimiento disperso, en contraste con un desarrollo más sostenible y de mayor densidad en los años recientes.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Según los investigadores [Singgalen \(2024\)](#), pertenecientes a la facultad de comunicación y turismo, en el artículo científico "Spatio-temporal Analysis through NDVI, NDBI, and SAVI Using Landsat 8/9 OLI", señalan que la evaluación de los índices espectrales NDBI permite ajustar la expansión de

áreas, con valores para los años 2013, 2018 y 2024 de -0,8837, -0,88675 y -0,7182 respectivamente, lo cual indica la variabilidad en la expansión de las superficies construidas.

Por su parte, Suparta (2024) sostiene que, para determinar las áreas edificadas dentro de una región o ciudad con fines de planificación territorial, la interpretación de mapas constituye una de las técnicas más eficaces. Dicho artículo emplea el método del Índice de Construcción de Diferencia Normalizada (NDBI) para analizar el área urbana de la ciudad de Surabaya, Indonesia, como caso de estudio.

El análisis de los parámetros del NDBI a partir de datos ópticos Landsat revela que la ciudad de Surabaya experimentó un incremento del 21 % en suelo edificado entre 2002 y 2022. Estos resultados evidencian un desarrollo urbano significativo durante ese periodo y aportan elementos valiosos para la planificación espacial futura y la formulación de políticas de uso del suelo.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Índices espectrales

Un índice espectral constituye una combinación matemática de las reflectancias correspondientes a distintas bandas espectrales de un objeto o superficie. Dichos índices son empleados frecuentemente en teledetección para analizar y cuantificar propiedades biofísicas de la vegetación, el suelo, el agua o la nieve. La premisa fundamental es que diferentes materiales y sus distintos estados reflejan la luz de manera diferencial en diversas longitudes de onda del espectro electromagnético. Al combinar estas longitudes de onda, es posible realzar la señal de un elemento de interés y suprimir la de otros.

2.2.1.1 Teledetección

La base de la teledetección reside en la interacción entre la radiación electromagnética (REM) y los objetos. La energía solar constituye la fuente principal de radiación utilizada en teledetección pasiva, mientras que en sistemas activos, como el radar o el LiDAR, la energía es emitida por el propio sensor. El espectro electromagnético abarca rangos como el visible, el infrarrojo cercano, el infrarrojo térmico y las microondas, cada uno con aplicaciones específicas.

2.2.1.2 Tipos de Teledetección

Pasiva

La teledetección pasiva es aquella en la cual el sensor no emite energía propia, sino que registra la radiación natural proveniente de una fuente externa (generalmente el Sol) o la emitida por la superficie terrestre (por ejemplo, en el infrarrojo térmico).

Activa

La teledetección activa es aquella en la que el sensor emite su propia energía hacia la superficie terrestre y luego registra la radiación reflejada o retrodispersada por los objetos. Esto permite obtener datos incluso durante la noche o en condiciones de nubosidad, ya que no depende de la radiación solar.

2.2.1.3 Plataformas y Sensores

Las plataformas pueden ser:

Aéreas (aviones, drones)

Las plataformas aéreas en teledetección son medios de transporte situados en la atmósfera, como aviones tripulados, helicópteros, drones (UAV) o globos aerostáticos, que llevan a bordo sensores ópticos, térmicos, de microondas o LiDAR para la adquisición de información de la superficie terrestre sin contacto físico directo. Estas plataformas operan a altitudes bajas o medias, lo que permite obtener imágenes de alta resolución espacial y temporal, adecuadas para estudios detallados de cobertura y uso del suelo, monitoreo ambiental, cartografía y evaluación de desastres.

Espaciales (satélites)

Las plataformas espaciales en teledetección son vehículos situados fuera de la atmósfera terrestre, principalmente satélites artificiales, que portan sensores capaces de captar radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Operan a altitudes orbitales variables (baja, media o geostacionaria) y permiten la adquisición sistemática y repetitiva de información a gran escala, facilitando el monitoreo global y multitemporal de fenómenos naturales y antrópicos, tales como cambios en el uso del suelo, variaciones climáticas, gestión de recursos naturales y respuesta ante desastres.

2.2.1.4 Interacción de las radiaciones electromagnéticas con la materia

Cuando la radiación electromagnética incide sobre la materia, la energía se transfiere únicamente a esta. La energía inducida en la materia puede reemitirse por la misma trayectoria de llegada, dispersarse en una dirección diferente o transmitirse hacia adelante dentro del material. Durante el proceso de reflexión y transmisión de la radiación electromagnética, las ondas magnéticas transfieren energía a los electrones del material, lo que provoca la vibración de dichos electrones. Si el material es transparente, las vibraciones de los electrones se transmiten a los átomos vecinos a través de la masa del material y se reemiten en el lado opuesto del objeto. Si el material es opaco, las vibraciones de los electrones no se transmiten de un átomo a otro a través de la masa del material, sino que vibran durante breves periodos y luego se reemiten desde la superficie del material a una longitud de onda diferente, lo que cambiaría su color.

Albert Einstein obtuvo el premio Nobel de Física por explicar el efecto fotoeléctrico basado en la propiedad cuántica de la radiación electromagnética: la radiación electromagnética transporta energía. Cuando la energía electromagnética es absorbida por cualquier sustancia, la radiación absorbida entrega su energía en haces discretos e indivisibles llamados cuantos o fotones; cada fotón transporta energía igual al producto de la frecuencia y la constante de Planck (Sahu, 2008).

$$Q = h\nu \quad (2.1)$$

Donde:

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

ν = Frecuencia de radiación

La frecuencia de la onda electromagnética está dada por:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

Donde c = velocidad de la luz.

En teledetección, la intensidad de la radiación electromagnética se denomina contraste; la intensidad electromagnética se relaciona con el número de fotones pasivos (o cuantos) por unidad de área en el espacio por unidad de tiempo, o equivalentemente, con el número de fotones incidentes por unidad de área (superficie) por unidad de tiempo. A continuación se describen algunas magnitudes radiométricas para comprender los principios de forma más clara (Sahu, 2008).

Flujo radiante

Tasa de transferencia de energía por radiación electromagnética. Unidades: joules por segundo o vatios. Por ejemplo, el flujo radiante del sol es $3.9 \times 10^{26} \text{ W}$.

Irradiancia (E)

$E = (\lambda)$ = irradiancia que cubre un intervalo de longitud de onda infinitesimal del espectro electromagnético. Unidades: $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$, definida por:

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda \quad (2.3)$$

A veces, cuando se hace referencia a la función de Planck, se puede utilizar $B(\lambda, T)$ en lugar de $E(\lambda)$; en general, la irradiancia sobre un elemento de superficie puede consistir en contribuciones que provienen de una infinidad de direcciones diferentes. Identificar la parte de la irradiancia

que proviene de un arco infinitesimal específico de ángulo sólido $d(\Omega)$ permite una definición de radiancia (Sahu, 2008).

Radiancia

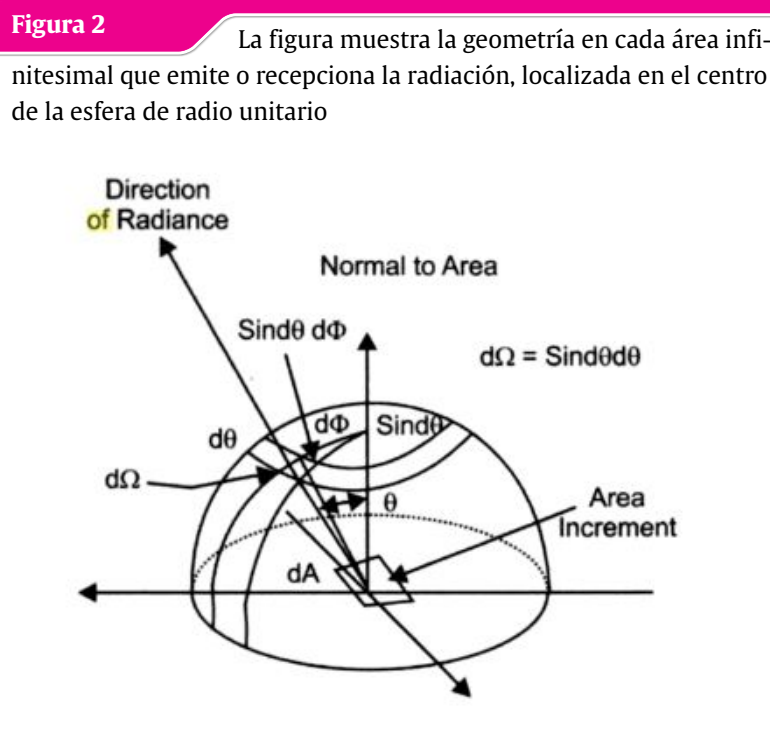
Radiancia L = Irradiancia por unidad de ángulo sólido. Las unidades son: Wm^{-2} , ster^{-1} . L también se denomina a menudo intensidad (o B cuando se hace referencia a la función de Planck).

L es la cantidad medida por un sensor pasivo a bordo de una nave espacial. Para expresar la relación entre la irradiancia y la radiancia es necesario definir el ángulo cenital θ , que es el ángulo entre la dirección de la radiación y la normal a la superficie en cuestión. La componente de la radiancia normal a la superficie viene dada por $L\cos\theta$.

La irradiancia representa entonces los efectos combinados de la componente normal de la radiación que proviene de todo el hemisferio:

$$E = \int_{\Omega} L\cos\theta d\theta \quad (2.4)$$

Para la radiación emitida uniformemente en todas las direcciones, llamada radiación isótropa, entonces $E = \pi L$.



Fuente: (Sahu, 2008)

Cabe señalar aquí que la longitud de onda o frecuencia de la radiación electromagnética es independiente de la penetración de la onda EM; es la interacción de la REM con la materia lo que

determina la penetración. Por ejemplo, las microondas penetran el vidrio muy fácilmente, pero son fuertemente absorbidas por el agua; cuando pasamos a una frecuencia ligeramente superior, el infrarrojo es fuertemente absorbido tanto por el vidrio como por el agua, pero ambas sustancias transmiten luz visible. El ultravioleta es detenido por el vidrio, pero no tan fácilmente por el agua; por lo tanto, la interacción es relevante, pero no la frecuencia o longitud de onda de la radiación electromagnética (Sahu, 2008).

Las técnicas de teledetección se ocupan, por tanto, de la detección y medición de la reflectancia y/o la emitancia de los objetos de interés. La reflectancia se debe principalmente a la radiación solar incidente (excepto en el caso de sensores activos). La emitancia medida es característica de la temperatura y la estructura molecular del objeto (Sahu, 2008).

2.2.1.5 Reflexión de radiaciones electromagnéticas

La radiación electromagnética que incide sobre cualquier objeto de la superficie terrestre puede reflejarse en la superficie sobre la que incide o penetrar (transmitirse) a través del objeto. En general, una superficie reflectante es el límite entre dos materiales con diferentes propiedades electromagnéticas, como el límite entre el aire y el vidrio, el aire y el agua, o el aire y el metal. Todos los materiales de la superficie terrestre difieren principalmente en sus características superficiales y su composición y, por lo tanto, se comportan de manera diferente ante la radiación solar incidente (Sahu, 2008).

Las variaciones en la reflectancia total de la cubierta terrestre dependen de:

- Composición superficial y propiedades físicas del medio.
- Longitud de onda o frecuencia de la radiación incidente.
- Tipo de superficie (lisa, rugosa, etc.).
- Ángulo de incidencia.

Cuando la radiación electromagnética incide sobre la materia, se producen tres tipos de interacción: transmisión, reflexión y absorción.

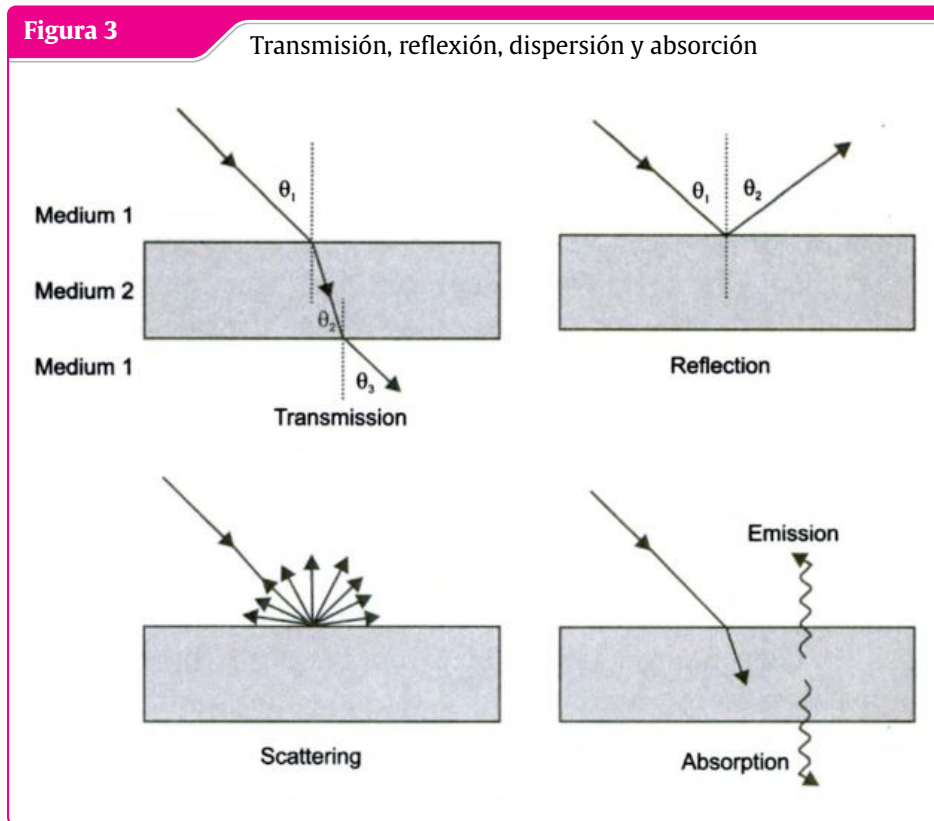
Transmisión

Es un proceso de interacción por el cual la radiación solar incidente penetra a través de la materia; la energía atenuada no provoca cambios en la velocidad ni en la longitud de onda, pero sí en la frecuencia (Sahu, 2008).

Reflexión especular

Proceso por el cual la radiación incidente rebota en la superficie de una sustancia en una única dirección predecible. Es causado por superficies lisas; la energía reflejada no provoca cambios en la velocidad o la longitud de onda. Cuando una superficie es lisa, obtenemos una reflexión especular o

similar a un espejo, donde toda (o casi toda) la energía se dirige lejos de la superficie en una única dirección (Sahu, 2008).



Fuente: (Sahu, 2008)

Dispersión (reflexión difusa)

Este fenómeno tiene lugar cuando la radiación incidente se desvía o propaga de forma aleatoria en múltiples direcciones, siendo provocado por superficies irregulares o rugosas. La energía dispersada no modifica ni la velocidad ni la longitud de onda. La reflexión de tipo difuso se presenta cuando la superficie es rugosa, reflejando la energía de manera casi uniforme hacia todas las direcciones.

Las leyes de la reflexión, que involucran los rayos incidente y reflejado junto con la normal a la superficie reflectante, establecen que dichos elementos se hallan en un mismo plano y que el ángulo de incidencia equivale al ángulo de reflexión. El grado de suavidad de la superficie del material influye en la reflexión, afectando tanto la dirección relativa como la coherencia de fase de la onda reflejada. En consecuencia, esta propiedad determina la cantidad de radiación que retorna al primer medio y la fidelidad de la información conservada en la onda reflejada. Existen dos clases de reflexión: (i) especular y (ii) difusa. Cuando una onda reflejada conserva la disposición geométrica de la radiación incidente y genera una imagen especular, se denomina reflexión especular. Por el contrario, si el proceso reflectivo no tiene éxito, el medio reflectante no retiene la información necesaria para formar una imagen, sino que dispersa la radiación en todas

las direcciones, destruyendo la imagen; al atravesar el medio, la radiación pierde coherencia debido a la dispersión, y un medio reflectante que no produce imagen se califica como difuso (Sahu, 2008).

La mayoría de los elementos de la superficie terrestre se ubican en un punto intermedio entre reflectores puramente especulares y totalmente difusos. El carácter perfectamente difuso o intermedio de un objetivo particular depende de la rugosidad de su superficie en comparación con la longitud de onda de la radiación incidente. El criterio de Rayleigh para evaluar la rugosidad superficial frente a una radiación incidente de longitud de onda λ se expresa como:

$$H \leq \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (2.5)$$

donde H representa la altura promedio de las irregularidades respecto del nivel medio del mar y θ es el ángulo de incidencia medido desde la normal a la superficie. Cuando $\lambda < h$, la superficie se comporta como un reflector difuso; en cambio, si $\lambda > h$, se considera lisa o especular. Por ejemplo, la arena de grano fino resultaría bastante lisa para las microondas de longitud de onda larga, pero se mostraría muy rugosa para la longitud de onda visible. Así, una superficie puede ser considerada lisa siempre que su rugosidad sea del orden de una fracción de la longitud de onda de la radiación incidente. En la reflexión especular, el ángulo de incidencia es igual al de reflexión y casi toda la radiación que incide con ángulos inferiores a 90° se refleja. En la reflectancia difusa, propia de superficies no lisas, el ángulo de reflexión difiere del de incidencia; las radiaciones se dispersan al azar en todas las direcciones posibles, e incluso algunas se dispersan a lo largo de la trayectoria de la radiación incidente. La contribución relativa de la reflexión especular y la difusa dependerá de la rugosidad superficial; la reflexión procedente de una superficie sumamente rugosa será prácticamente totalmente difusa. La reflectancia queda confinada a la región reflectante ($0,3 - 3 \mu\text{m}$), y el sensor que opere en esta región registrará esencialmente las radiaciones reflejadas (Sahu, 2008).

2.2.1.6 Emisión de radiación electromagnética

Todos los cuerpos presentes en la superficie terrestre que se encuentren a una temperatura superior al cero absoluto ($-273,15^\circ\text{C}$) irradian energía electromagnética hacia su entorno como resultado de sus vibraciones atómicas o moleculares. Dicha energía o radiación se emite en forma de ondas electromagnéticas que se desplazan a la velocidad de la luz. En cierto sentido, toda materia constituye una fuente de radiación. Las leyes de la radiación son aplicables cuando el cuerpo radiante se comporta como un cuerpo negro; en general, las condiciones de cuerpo negro se cumplen cuando el radiador interactúa débilmente con su entorno y puede considerarse en equilibrio. La emitancia radiante espectral W del cuerpo negro se rige por la ley de distribución de Planck, tal como se detalla a continuación (Sahu, 2008).

Ley de radiación de Planck

La ley de Planck para la radiación del cuerpo negro permite predecir la intensidad espectral de la radiación electromagnética para todas las longitudes de onda emitidas por un cuerpo negro a una temperatura T determinada. La expresión conocida es la siguiente:

$$W_{\lambda} = a\lambda^{-5}(e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad \text{wm}^{-2} \quad \mu\text{m}^{-2} \quad (2.6)$$

Donde:

h = Constante de Planck

c = Velocidad de la luz

k = Constante de Boltzmann

T = Temperatura absoluta en grados Kelvin (K)

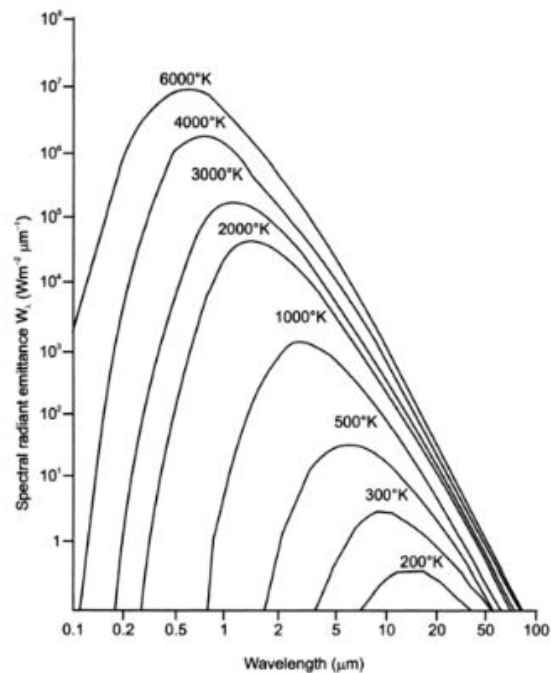
λ = Longitud de onda en metros (m)

ν = Frecuencia

Los términos empleados en distintas leyes de radiación incluyen: I = radiancia espectral = energía por unidad de superficie, por unidad de ángulo sólido y por unidad de frecuencia ($J s^{-1} . m^{-2} . sr^{-1} . Hz^{-1}$).

Figura 4

La relación entre la temperatura y el pico de potencia radiante se expresa mediante la Ley de Desplazamiento de Wien



Fuente: (Sahu, 2008)

Ley de Stefan-Boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann debe su nombre a los físicos austríacos Josef Stefan y Ludwig Boltzmann. Esta ley vincula la cantidad de radiación emitida por un objeto con la temperatura del mismo. La energía total irradiada en todas las longitudes de onda por un cuerpo negro (equivalente al área bajo la curva de la ley de Planck) es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (Sahu, 2008).

$$W = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

Donde:

$$\sigma = 5.66961 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

Esta expresión puede derivarse integrando la ecuación de la ley de Planck entre 0 e infinito. No obstante, no es aplicable en la región de microondas, dado que $h\nu \ll kT$ y W se torna proporcional a T (ley de Rayleigh-Jeans). La materia física emite radiación según la ley del cuerpo negro, salvo por un factor de proporcionalidad denominado emisividad, cuyo valor es siempre inferior a 1. En ocasiones, la materia física se describe como un cuerpo gris: un cuerpo gris es aquel cuya emitancia radiante espectral tiene la misma forma funcional que la de un cuerpo negro ideal, pero con una intensidad que es una fracción constante de la curva ideal para cada longitud de onda. Las curvas del cuerpo negro se utilizan para ilustrar las leyes de Stefan-Boltzmann y de Wien: un objeto caliente presenta una curva elevada que alcanza su máximo en una longitud de onda corta; un objeto más frío muestra una curva baja cuyo pico se ubica en una longitud de onda más larga. Por consiguiente, la ley de Stefan-Boltzmann para un caso general se expresa como:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.8)$$

Para un cuerpo negro $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$.

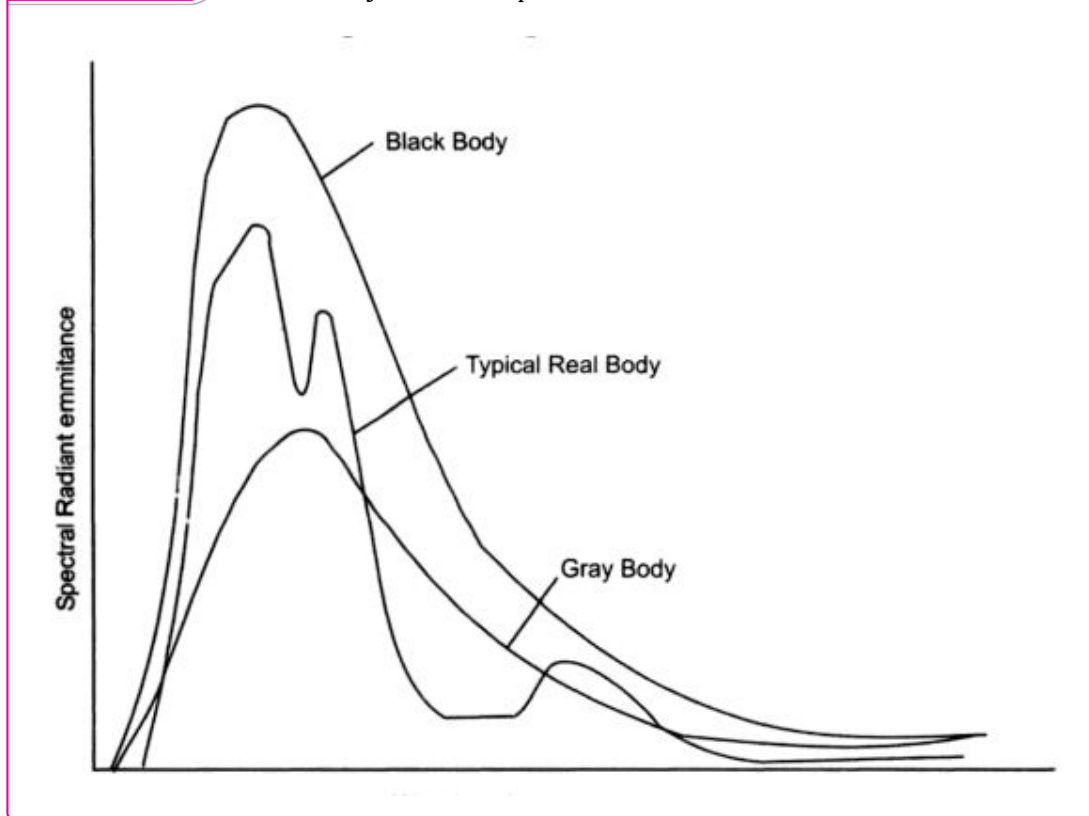
Para un cuerpo gris $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{constante}$, pero $0 < \varepsilon < 1$.

La ley de Stefan-Boltzmann explica el incremento en la altura de la curva a medida que la temperatura aumenta. En el caso de un radiador o reflector perfecto, $\varepsilon = 0$.

Por lo tanto, la temperatura de un objeto medida mediante un sensor remoto corresponde a su temperatura de cuerpo negro reducida por un factor ε propio de dicho objeto. La temperatura observada se denomina temperatura aparente, radiométrica o de brillo (Sahu, 2008).

Figura 5

Emitancia y radiancia espectral



Fuente: (Sahu, 2008)

2.2.1.7 Firmas espectrales

Cuando la radiación solar alcanza una superficie objetivo, puede ser transmitida, absorbida o reflejada; los distintos materiales presentan comportamientos diferenciados de reflexión y absorción según la longitud de onda. El espectro de reflectancia de un material es una representación gráfica de la fracción de radiación reflejada en función de la longitud de onda incidente, actuando como una firma característica del material. En principio, resulta factible identificar un material a partir de su firma de reflectancia espectral si el sistema detector dispone de una resolución espectral suficiente para distinguir su espectro del correspondiente a otros materiales. Esta premisa fundamenta la teledetección multispectral.

Los sensores recolectan y almacenan información sobre la reflectancia espectral de rasgos y objetos naturales, los cuales reflejan la radiación; dicha radiación puede ser cuantificada en el espectro electromagnético (Sahu, 2008).

Las técnicas de teledetección aplicadas al estudio de los recursos terrestres persiguen reconocer y clasificar objetos y/o sus firmas electromagnéticas características. Todo el sistema de técnicas de teledetección descansa en la premisa de que todos los objetos de la superficie terrestre poseen firmas espectrales propias. Para cualquier material dado, la proporción de radiación solar reflejada

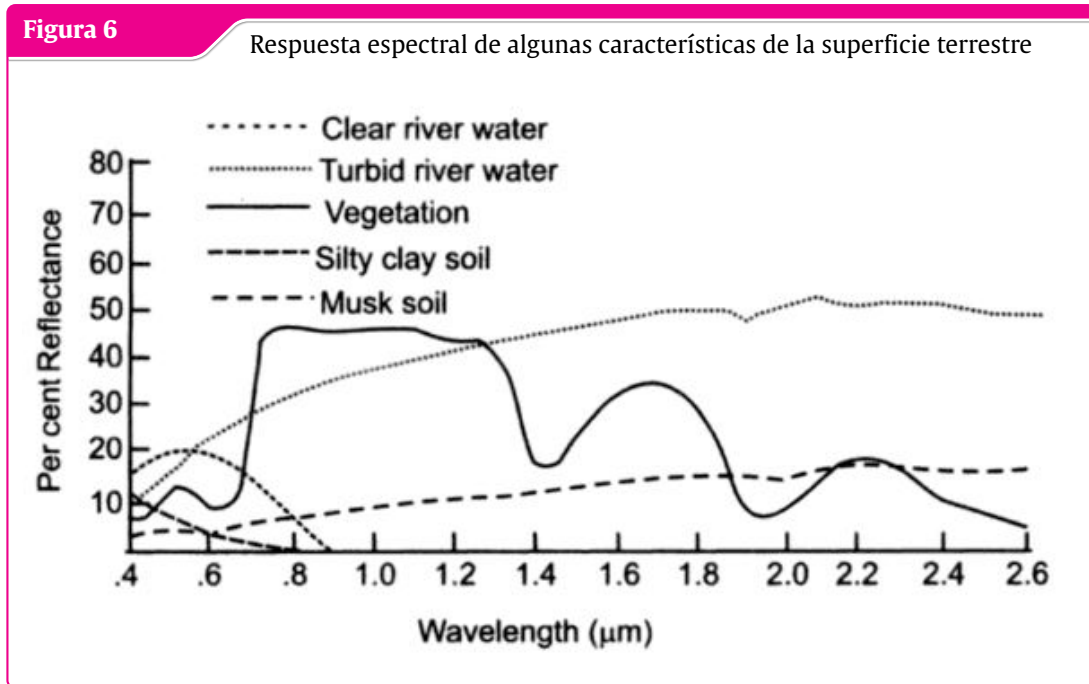
(absorbida o transmitida) variará con la longitud de onda; esta importante propiedad de la materia permite separar distintos tipos de cobertura en función de sus valores de respuesta para una longitud de onda determinada. La respuesta de los materiales de la superficie terrestre a la radiación incidente y/o la energía emitida por todos los objetos en función de su temperatura y estructura molecular determina esencialmente las firmas. En términos generales, la determinación de firmas implica establecer una relación entre el patrón de respuesta espectral y las características inherentes de un objeto. Una definición más formal señala que una firma espectral de un rasgo de la superficie terrestre es un conjunto de valores de reflectancia o radiancia promediados en un intervalo de longitud de onda claramente definido. Por lo general, el conjunto de valores de reflectancia o radiancia es característico de la irradiancia y la geometría de observación presentes en el momento de la detección del área. Las firmas espectrales constituyen la combinación específica de radiación electromagnética reflejada y absorbida en distintas longitudes de onda que puede identificar de manera única un objeto. Cada material en la naturaleza posee una firma espectral, la cual es función de (i) la longitud de onda electromagnética incidente y (ii) la interacción de la materia con esa porción del espectro electromagnético. Una firma espectral es un valor de reflectancia singular en una parte concreta del espectro. Las firmas espectrales (patrones de respuesta espectral) varían tanto en el tiempo como en el espacio (Sahu, 2008).

No obstante, debe quedar claro que las firmas, si bien suelen ser distintivas, no son absolutas ni exclusivas en el mundo real. Lo que se observa en la realidad es el patrón de respuesta espectral más que la firma propiamente dicha; los patrones de respuesta espectral captados por los sensores remotos pueden ser cuantitativos, pero no absolutos; pueden ser característicos, pero no necesariamente únicos. El grado en que un objeto refleja el espectro electromagnético incidente se denomina patrón de respuesta espectral.

Los objetos en la superficie terrestre emiten y reflejan múltiples longitudes de onda de radiación; en principio, cada objeto posee una firma espectral única que podría emplearse para identificarlo. De manera análoga a una huella dactilar, las firmas espectrales detectadas remotamente podrían utilizarse para reconocer y cartografiar todo tipo de rasgos (Sahu, 2008).

Respuesta espectral de algunas características de la superficie terrestre

La manera en que los materiales típicos de la superficie terrestre responden a la radiación electromagnética incidente puede comprenderse examinando detenidamente el gráfico de curvas de reflectancia y ejemplos de curvas espectrales de materiales representativos como la vegetación, el suelo y el agua (Sahu, 2008).

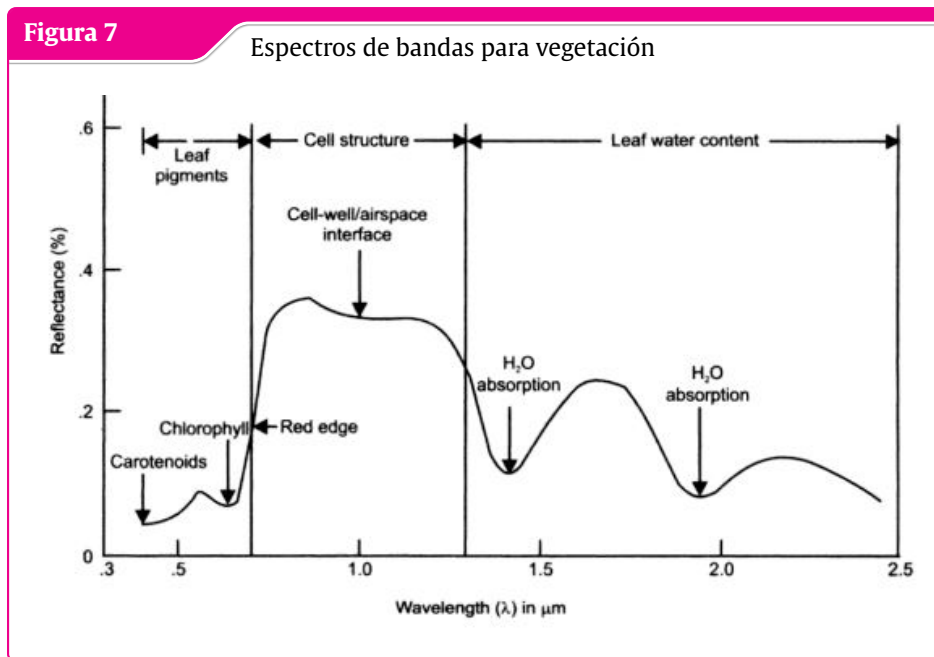


Fuente: (Sahu, 2008)

Vegetación

La información obtenida mediante sensores remotos ha evidenciado su eficacia para el reconocimiento, diferenciación, categorización y evaluación del desarrollo de diversas clases de cobertura vegetal en distintos niveles. El comportamiento espectral de la vegetación resulta notablemente diferente al de otros materiales, caracterizándose por pronunciadas bandas de absorción en las longitudes de onda azul y roja, una elevada reflectancia en la banda verde y una reflectancia extremadamente alta en la porción del infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Su curva espectral presenta una morfología de alternancia entre picos y valles; cuando el contenido de clorofila es máximo, la vegetación exhibe tonalidades rojizas o amarillentas como consecuencia de una absorción reducida y una reflexión proporcionalmente mayor en las longitudes de onda rojas. Los pigmentos foliares, la arquitectura de la hoja y el contenido hídrico total constituyen los tres elementos determinantes que inciden en el espectro en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio, respectivamente. La huella espectral característica presente en dichas longitudes de onda facilita su diferenciación respecto de otras clases de cobertura terrestre; asimismo, es posible distinguir distintos tipos de vegetación en las regiones visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio. Al examinar el patrón de respuesta espectral de la vegetación típica, se identifican valores mínimos aproximadamente en 0,45 y 0,65 μm . Estos mínimos en las zonas azul y roja corresponden a dos bandas de absorción asociadas a la clorofila. El primer pico de reflectancia, junto con la escasa absorción observada a 0,55 μm , representa el conocido máximo verde. En la región del infrarrojo cercano, la reflectancia alcanza valores notablemente altos, próximos al 45 %, con una transmitancia de magnitud semejante y una absorbancia de apenas el 5 %, presentando únicamente bandas de

absorción menores en $0,97 \mu\text{m}$ y $1,21 \mu\text{m}$. El intervalo comprendido entre $0,7$ y $1,3 \mu\text{m}$, cuya porción superior es casi plana, resulta de gran relevancia para las ciencias biológicas. El infrarrojo medio exhibe bandas de absorción intensas de vapor de agua localizadas inmediatamente antes de $1,6$ y $2,0 \mu\text{m}$. Se ha comprobado que la radiación solar incidente total absorbida en esta franja es directamente proporcional al contenido hídrico total de la hoja. La reflectancia máxima en el infrarrojo medio se presenta a $1,6$ y $2,2 \mu\text{m}$. De este modo, las mediciones obtenidas mediante teledetección en los rangos de $1,55$ - $1,75 \mu\text{m}$ y $2,08$ - $2,35 \mu\text{m}$ pueden suministrar información relevante acerca del grado de humedad de la cubierta vegetal (Sahu, 2008).



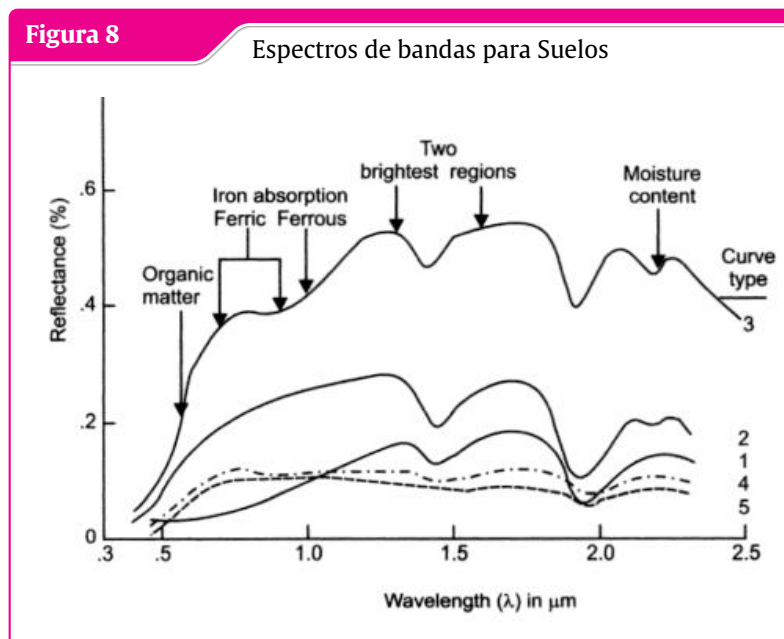
Fuente: (Sahu, 2008)

Suelo

La curva característica de reflectancia del suelo evidencia un incremento monótono aproximado de la reflectancia a medida que aumenta la longitud de onda, tanto en la región visible como en el infrarrojo cercano. Las imágenes satelitales de alta resolución disponibles actualmente permiten delimitar los límites visibles de las distintas clases de suelo; los equipos de verificación en campo, como los radiómetros, facilitan la recolección de firmas espectrales de las superficies edáficas, tras lo cual se procede a la clasificación posible del suelo mediante la interpretación de las imágenes de teledetección apoyada en dichas firmas espectrales. Como es sabido, la reflectancia y la emitancia de un objeto dependen de su estado físico y molecular. La reflectancia espectral del suelo se halla regulada por seis parámetros: contenido de humedad, contenido de materia orgánica, distribución granulométrica, concentración de óxidos de hierro, mineralogía del suelo y estructura edáfica. La rugosidad superficial también influye en el espectro de reflectancia; el porcentaje de reflectancia en función de la longitud de onda se incrementa desde la banda visible más corta hacia la banda

infrarroja de onda corta. En el espectro visible, el suelo generalmente muestra una reflectancia elevada en comparación con la vegetación; sin embargo, ocurre lo contrario en la banda del infrarrojo cercano, donde la vegetación presenta una reflectancia superior a la del suelo. La teledetección posibilita la clasificación de los suelos al proporcionar información acerca de la productividad forestal, la calidad de pastizales, las condiciones del hábitat de fauna silvestre, el uso del territorio y la aptitud recreativa (Sahu, 2008).

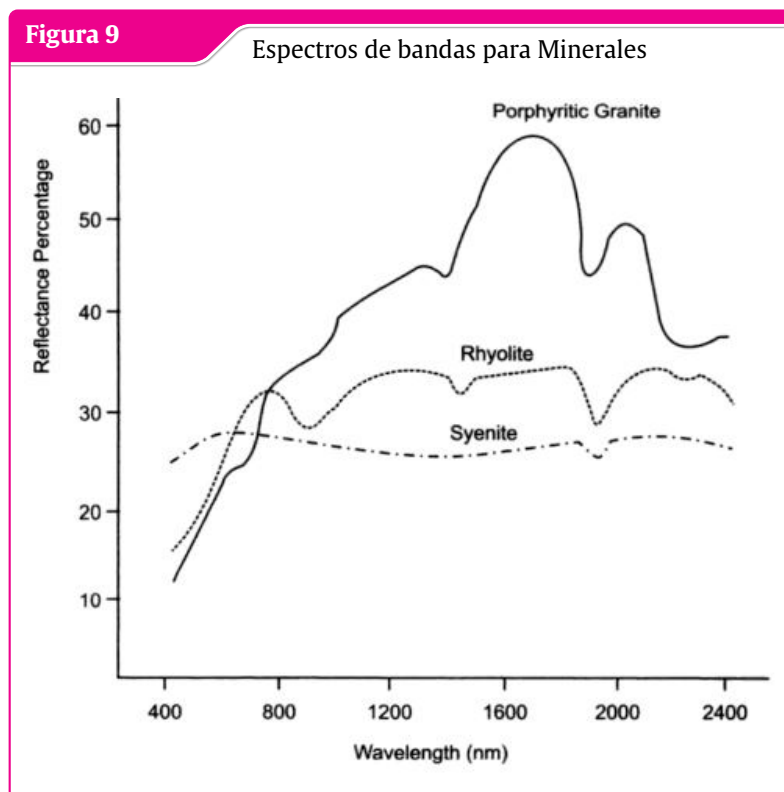
El agua actúa como un absorbente relativamente eficaz en todas las longitudes de onda, especialmente en aquellas superiores a la porción roja del espectro visible. A medida que se incrementa el contenido de humedad del suelo, la reflectancia global del suelo tiende a disminuir; en consecuencia, se observan dos bandas de absorción de agua significativas alrededor de $1,4 \mu\text{m}$ y $1,9 \mu\text{m}$. La región comprendida entre $0,4$ y $1,0 \mu\text{m}$ no resulta útil para el seguimiento del contenido de humedad edáfico, aunque la curva completa de reflectancia generalmente se atenúa con el aumento de la humedad. La zona centrada en $2,2 \mu\text{m}$ presenta la correlación más elevada con la humedad del suelo, resultando igualmente importante para la vegetación. Las ondas de radar podrían no ser capaces de penetrar el suelo húmedo. En los espectros de reflectancia del suelo, dicho contenido de humedad genera curvas paralelas. Las bandas espectrales roja e infrarroja cercana son independientes de la humedad del suelo; además, se ha demostrado que el grado de polarización es más acentuado en suelos con mayor contenido de humedad. En una imagen infrarroja térmica, los suelos húmedos aparecen más oscuros en comparación con los suelos secos. Considerando las grandes diferencias en la constante dieléctrica del agua y del suelo en frecuencias de microondas, resulta posible cuantificar la humedad del suelo (Sahu, 2008).



Fuente: (Sahu, 2008)

Minerales

El intervalo espectral solar, comprendido entre 0,4 y 2,5 micrómetros, aporta una gran cantidad de información sobre numerosos minerales relevantes de la superficie terrestre. Las investigaciones han demostrado la capacidad de los sistemas hiperespectrales para identificar y cartografiar de manera singular muchos de estos minerales. Las propiedades de reflectancia de los minerales varían significativamente en función de la composición química, el grado de meteorización, los tipos de roca y los afloramientos rocosos. Las superficies naturales rara vez están compuestas por minerales puros; por el contrario, suelen estar formadas por múltiples minerales junto con productos de meteorización. Las rocas meteorizadas generalmente presentan baja reflectancia. Los tipos de rocas homogéneas ofrecen espectros similares en distintos puntos de la superficie de la muestra, mientras que las rocas heterogéneas exhiben variaciones notables. El espectro real de un mineral se ve atenuado debido a la interferencia espectral del agua y del material orgánico presente en la cubierta vegetal del suelo. Los componentes principales de la mayoría de los minerales —silicio, aluminio, magnesio y oxígeno— no proporcionan características de absorción en el rango visible e infrarrojo cercano. La característica de absorción más frecuente en la región VNIR se atribuye a la presencia de óxido de hierro, agua o grupos OH. Los minerales formadores de rocas muestran líneas de absorción en el rango de 7 a 12 μm (Sahu, 2008).



Fuente: (Sahu, 2008)

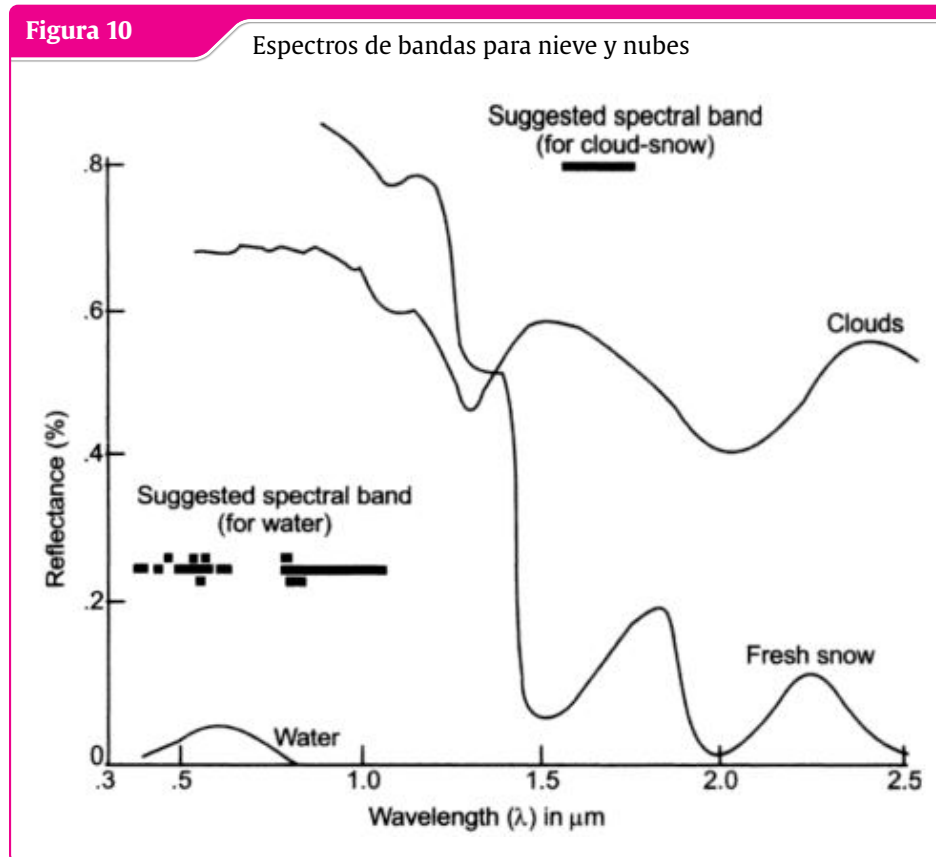
Agua

Cuando la luz penetra en el agua, su intensidad decrece de manera exponencial a medida que aumenta la profundidad; este fenómeno se denomina atenuación. La magnitud de esta disminución de intensidad varía según la longitud de onda de la radiación electromagnética. La irradiancia incidente sobre las superficies acuáticas es principalmente absorbida o transmitida, más que reflejada. La absorción ocurre fundamentalmente en las longitudes de onda visibles más largas, así como en las regiones del infrarrojo cercano e infrarrojo medio, en comparación con las longitudes de onda visibles más cortas. Por ello, el agua generalmente se percibe de color azul o azul verdoso debido a una reflectancia más intensa en estas longitudes de onda cortas, y se torna más oscura cuando se observa en longitudes de onda rojas o infrarrojas cercanas. Esta propiedad facilita la delimitación incluso de cuerpos de agua de reducidas dimensiones. La fuerte absorción de energía en el infrarrojo cercano, en contraste con la elevada reflectancia del suelo y la vegetación en esta misma longitud de onda, define claramente los límites entre tierra y agua. Las variaciones en la reflectancia de las superficies acuáticas pueden obedecer a cambios en la profundidad del agua, la turbidez, el tipo de sustrato, el color del agua y/o la textura superficial. Generalmente, la reflectancia aumenta al disminuir la profundidad del agua o al incrementarse el contenido de partículas. El color del agua puede deberse a partículas en suspensión, materiales orgánicos como clorofila o materia orgánica disuelta coloreada (CDOM). La turbidez en el agua tiende a mejorar la reflectividad y a conferir una apariencia más brillante; el color aparente del agua debido a la turbidez muestra un ligero desplazamiento del pico de reflectancia hacia longitudes de onda más largas. El sedimento en suspensión puede confundirse fácilmente con agua poco profunda (pero clara), ya que ambos fenómenos presentan una apariencia muy similar. El aumento de la concentración de clorofila produce una mayor absorción en las regiones azul y roja y una mayor reflexión en la banda verde, lo que hace que el agua adquiera una tonalidad más verdosa. Los gases disueltos y muchas sales inorgánicas no manifiestan ningún cambio en la respuesta espectral del agua; sin embargo, la rugosidad de la superficie del agua y la reflectancia del fondo plantean problemas complejos al realizar interpretaciones relacionadas con cuerpos de agua (Sahu, 2008).

Nieve y nubes

La nieve presenta una reflectancia muy elevada hasta aproximadamente $0,8 \mu\text{m}$, para luego disminuir rápidamente. Las impurezas y el aumento del tamaño del grano reducen la reflectancia; en consecuencia, a medida que la nieve madura o envejece, su reflectancia decrece. En el caso de las nubes, se produce una dispersión no selectiva, apareciendo uniformemente brillantes en todo el rango comprendido entre $0,3$ y $3,0 \mu\text{m}$. Las cimas de las nubes y la nieve generalmente poseen la misma temperatura, por lo que no resulta sencillo separarlas en la región del infrarrojo térmico. Por esta razón, las dos ventanas atmosféricas existentes en las regiones de longitud de onda del infrarrojo medio ($1,55$ - $1,75 \mu\text{m}$ y $2,11$ - $2,35 \mu\text{m}$) resultan importantes para discriminar las nubes de

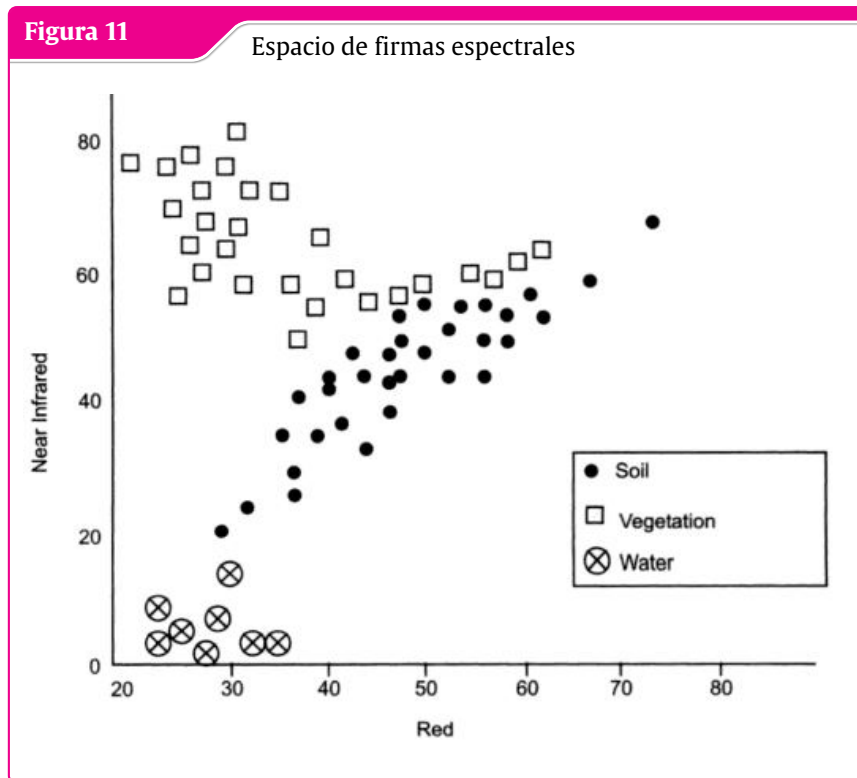
la nieve. A una longitud de onda de 1,6 μm , la nieve exhibe una reflectancia muy baja, mientras que la reflectancia de las nubes permanece alta, lo que permite una diferenciación significativa entre ambos elementos, pudiendo clasificarse y distinguirse las nubes directamente de la nieve a 1,6 μm (Sahu, 2008).



Fuente: (Sahu, 2008)

2.2.1.8 Espacio de firmas y características

La utilidad de las mediciones de firmas espectrales en distintas regiones de longitud de onda para diferenciar objetos puede ilustrarse mediante el concepto de espacio de características. La figura exhibe un espacio de características típico que involucra mediciones en las regiones roja e infrarroja; por simplicidad, se grafican las mediciones correspondientes únicamente a tres clases de objetos. Todos los puntos pertenecientes a la clase de suelo se localizan predominantemente a lo largo de una línea de puntos; los cuerpos de agua se ubican cerca del origen, junto con la vegetación, el suelo y el agua. Se ha encontrado que el vigor de la vegetación es proporcional a la distancia perpendicular desde el punto de vegetación considerado hasta la línea del suelo. Este concepto se extendió posteriormente a mediciones en un gran número de bandas espectrales, constituyendo la base del análisis multivariado (Sahu, 2008).



Fuente: (Sahu, 2008)

2.2.1.9 Sensores de teledetección

Un sensor se define como un dispositivo que capta energía (ya sea radiación electromagnética u otra clase), la transforma en una señal y la presenta en un formato adecuado para extraer información acerca del objeto o fenómeno estudiado. Según la procedencia de la energía, los sensores pueden clasificarse en activos o pasivos.

Los sensores de tipo activo emplean una fuente energética propia. La superficie terrestre es iluminada mediante la energía emitida por dicha fuente; parte de esa energía es reflejada por el terreno hacia el sensor, que la recibe y la registra para recopilar la información. Por el contrario, los sensores pasivos captan la energía electromagnética proveniente del Sol que es reflejada por la superficie, o bien la energía que emite la propia superficie terrestre. Estos sensores carecen de una fuente energética interna y no pueden operar durante la noche, a excepción de los sensores térmicos. Adicionalmente, los sensores (tanto activos como pasivos) pueden ser de tipo imagen, como una cámara o un sensor que adquiere imágenes de un área determinada, o de tipo no imagen, como los radiómetros de barrido o las sondas atmosféricas.

Resolución

La resolución se entiende como la aptitud del sistema para representar la información con la menor cantidad discretamente separable en términos de distancia (resolución espacial), intervalo

de longitud de onda de la radiación electromagnética (resolución espectral), tiempo (resolución temporal) y/o magnitud de radiación (resolución radiométrica).

Resolución espacial

La resolución espacial corresponde a la proyección sobre el terreno de un elemento detector o de una rendija. Dicho de otro modo, la resolución espacial del escáner es el segmento de superficie terrestre que es detectado en un instante dado. También recibe el nombre de elemento de resolución del terreno (GRE). La resolución espacial con la que se adquieren los datos produce dos efectos: por un lado, la capacidad de identificar distintos rasgos y, por otro, la capacidad de cuantificar su extensión. El primero se vincula con la exactitud de la clasificación, mientras que el segundo se relaciona con la habilidad para efectuar mediciones precisas. Se considera que las imágenes en las cuales únicamente son apreciables los elementos de gran tamaño poseen una resolución gruesa o baja. En las imágenes de resolución fina es factible detectar objetos de pequeñas dimensiones.

Resolución espectral

Las curvas de emisividad espectral caracterizan la reflectancia y/o emitancia de un rasgo u objetivo en un amplio rango de longitudes de onda. Las diferentes categorías de elementos y detalles presentes en una imagen pueden ser distinguidas comparando sus respuestas en distintos intervalos de longitud de onda. Clases generales, como el agua y la vegetación, pueden separarse utilizando rangos de longitud de onda amplios (visible, infrarrojo cercano), mientras que categorías más específicas, como los diferentes tipos de rocas, requieren una comparación de intervalos de longitud de onda más estrechos para su diferenciación. En consecuencia, la resolución espectral describe la capacidad del sensor para definir intervalos reducidos de longitud de onda; es decir, el muestreo de la imagen segmentada espacialmente en diferentes intervalos espectrales, lo que permite determinar la irradiación espectral de la imagen.

Resolución radiométrica

Constituye una medida de la capacidad del sensor para distinguir la variación más pequeña en la reflectancia o emitancia espectral entre distintos objetivos. La resolución radiométrica depende del nivel de saturación de la reflectancia y del número de niveles de cuantificación empleados. Así, un sensor cuya saturación se encuentre ajustada al 100 % de reflectancia con una resolución de 8 bits presentará una sensibilidad radiométrica deficiente en comparación con un sensor cuya saturación de radiancia esté ajustada al 20 % de reflectancia y emplee 7 bits de digitalización.

Resolución temporal

Consiste en la adquisición de datos espaciales y espectrales en intervalos de tiempo determinados. La resolución temporal también es conocida como repetitividad del satélite; se refiere a la capacidad del satélite para obtener imágenes de una misma zona exacta con el mismo ángulo de observación

en diferentes momentos. La resolución temporal de un sensor depende de diversos factores, tales como las capacidades propias del satélite o sensor, el solapamiento de las franjas de imagen y la latitud.

2.2.1.10 Índices para clasificar imágenes satelitales

En la teledetección aplicada a imágenes satelitales, un índice constituye una fórmula matemática de transformación espectral que combina dos o más bandas. La creación del índice se fundamenta en un patrón único para cada tipo de cobertura del suelo y en la respuesta espectral característica de los distintos elementos presentes en la superficie.

Índice de cuerpos de agua y contenido de agua en las plantas

El Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) es un índice derivado de la teledetección que permite medir las variaciones en el contenido hídrico de las hojas mediante el empleo de la banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR). El NDWI se utiliza para analizar el contenido de agua de la vegetación debido a su sensibilidad tanto al agua presente en las plantas como en los cuerpos de agua.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (2.9)$$

Donde:

El rango del NIR (infrarrojo cercano) se sitúa entre 0,841 y 0,876 nm.

El rango del SWIR (infrarrojo de onda corta) se sitúa entre 1,628 y 1,652 nm. **Para Landsat 4-7** se tiene:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Band4} - \text{Band5}}{\text{Band4} + \text{Band5}} \quad (2.10)$$

Para Landsat 8 se tiene:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Band5} - \text{Band6}}{\text{Band5} + \text{Band6}} \quad (2.11)$$

Aplicación de NDWI

Seguimiento de sequías, evaluación del riesgo de incendios, análisis del estrés hídrico, cartografía y cálculo de volúmenes de embalses, estimación de reducciones de rendimiento agrícola, monitoreo del descenso del nivel freático, vigilancia de la degradación del suelo, entre otras aplicaciones.

Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI)

El MNDWI corrige los errores del NDWI al extraer el contenido de agua a partir de los datos de teledetección. Este índice modificado emplea las bandas del verde y del SWIR para realzar las características de las masas de agua abierta en entornos dominados por zonas edificadas. Suprime el ruido procedente del suelo urbanizado, la vegetación y el terreno desnudo.

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{SWIR}}{\text{GREEN} + \text{SWIR}} \quad (2.12)$$

Para Landsat 4-7 se tiene:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Band2} - \text{Band5}}{\text{Band2} + \text{Band5}} \quad (2.13)$$

Para Landsat 8 se tiene:

$$\text{MNDWI} = \frac{\text{Band3} - \text{Band6}}{\text{Band3} + \text{Band6}} \quad (2.14)$$

El valor del MNDWI se encuentra en el intervalo $[-1,0; +1,0]$. Generalmente, los valores positivos más elevados, superiores a 0,5, indican cuerpos de agua; los valores más bajos, comprendidos entre 0 y 0,2, señalan áreas construidas; y los valores negativos corresponden a vegetación.

Aplicación de MNDWI

Cartografía de masas de agua, extracción de rasgos acuáticos en zonas densamente edificadas, monitoreo de cambios en el contenido hídrico.

Índices para áreas construidas (NDBI)

El Índice de Diferencia Normalizada para Zonas Construidas (NDBI) se emplea para extraer de manera automática las superficies edificadas o construidas dentro de áreas urbanas.

$$\text{NDBI} = \frac{\text{SWIR} - \text{NIR}}{\text{SWIR} + \text{NIR}} \quad (2.15)$$

Para Landsat 4-7 se tiene:

$$\text{NDBI} = \frac{\text{Band5} - \text{Band4}}{\text{Band5} + \text{Band4}} \quad (2.16)$$

Para Landsat 8 se tiene:

$$\text{NDBI} = \frac{\text{Band6} - \text{Band5}}{\text{Band6} + \text{Band5}} \quad (2.17)$$

El valor del NDBI oscila entre -1,0 y +1,0. Los valores más altos del NDBI corresponden a áreas edificadas; los valores más bajos indican presencia de vegetación; y los valores negativos representan cuerpos de agua. En los métodos basados en NDBI, se supone que todos los valores positivos de NDVI y NDBI representan respectivamente vegetación y zonas edificadas. Este enfoque presenta numerosos errores. Por ello, el índice acumulado (BU) minimiza dichos errores restando el NDVI del NDBI.

$$BU = NDVI - NDBI \quad (2.18)$$

El valor positivo más alto del índice de edificación indica las áreas construidas y los terrenos baldíos.

Aplicación de NDBI/BU

Predicción de escorrentía en cuencas hidrográficas, análisis de expansión urbana, planificación del uso del suelo en entornos urbanos, extracción de superficie urbana construida (suelo impermeable).

$$SAVI = \frac{(B_4 - B_3)(1 - L)}{B_4 + B_3 + L} \quad (2.19)$$

Índice Construido Basado en Índices (IBI)

El Índice Construido Basado en Índices (IBI) utiliza los índices NDBI, SAVI y MNDWI con el fin de mejorar la extracción de áreas edificadas, eliminando otras clases de uso y cobertura del suelo presentes en entornos urbanos.

$$IBI = \frac{NDBI - \frac{(SAVI + MNDWI)}{2}}{NDBI + \frac{(SAVI + MNDWI)}{2}} \quad (2.20)$$

Índices para vegetación

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice ampliamente utilizado en teledetección para medir los cambios en el contenido de agua de las hojas empleando las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (Red). El NDVI se usa para analizar el contenido hídrico de la vegetación debido a su sensibilidad al agua presente tanto en las plantas como en los cuerpos de agua.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2.21)$$

Donde:

El rango del NIR (infrarrojo cercano) se encuentra entre 0,841 y 0,876 nm.

El rango del SWIR (infrarrojo de onda corta) se encuentra entre 1,628 y 1,652 nm. **Para Landsat 4-7** se tiene:

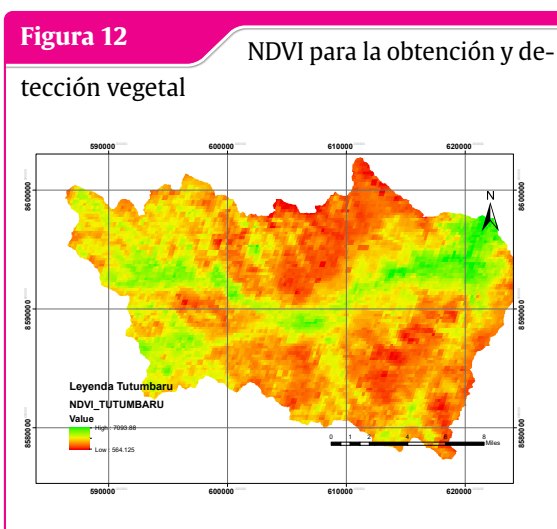
$$NDVI = \frac{Band4 - Band3}{Band4 + Band3} \quad (2.22)$$

Para Landsat 8 se tiene:

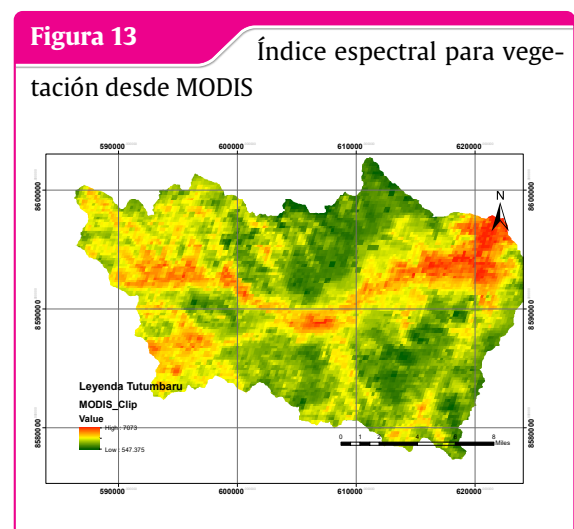
$$\text{NDVI} = \frac{\text{Band5} - \text{Band4}}{\text{Band5} + \text{Band4}} \quad (2.23)$$

Aplicación de NDVI

Las aplicaciones del NDVI son diversas; se trata de uno de los índices más empleados en la investigación territorial. Se utiliza en agricultura de precisión para supervisar el estado sanitario de la vegetación y la producción agrícola, en el monitoreo forestal mediante el análisis de cambios en el uso y cobertura del suelo, evaluando la degradación del suelo, la expansión urbana, entre otros usos.



Fuente: (Sivakumar et al. 2004)



Fuente: (Sivakumar et al. 2004)

Índice de Vegetación Mejorada (EVI)

El Índice de Vegetación Mejorada (EVI) se calcula de forma similar al NDVI, pero incorpora una corrección atmosférica adicional para subsanar las imprecisiones del NDVI. El EVI es capaz de eliminar los ruidos de fondo y atmosféricos, así como el problema de saturación. Realza la señal de la vegetación con una mayor sensibilidad en regiones de alta biomasa y se emplea para cuantificar el verdor de la vegetación.

$$\text{EVI} = \frac{G(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + C1\text{Red} - C2\text{Blue} + L)} \quad (2.24)$$

Donde:

NIR, Red y Blue representan la reflectancia de la superficie corregida atmosféricamente.

L es el factor de ajuste del fondo del dosel que aborda el problema de saturación.

C1 y C2 son los coeficientes de resistencia a los aerosoles que mitigan la reflectancia de los aerosoles en la banda roja utilizando la banda azul.

Para Landsat 4-7 se tiene:

$$EVI = \frac{2.5(\text{Band4} - \text{Band3})}{(\text{Band4} + 6\text{Band3} - 7.5\text{Band1} + 1)} \quad (2.25)$$

Para Landsat 8 se tiene:

$$EVI = \frac{2.5(\text{Band4} - \text{Band3})}{(\text{Band4} + 6\text{Band3} - 7.5\text{Band1} + 1)} \quad (2.26)$$

Aplicación de EVI

Seguimiento de la vegetación en agricultura de precisión, en masas forestales densas, estimación del rendimiento de cultivos, entre otras aplicaciones.

Índices para textura de suelos

Los parámetros de textura del suelo se obtienen a partir de la teledetección satelital utilizando la capa superficial del terreno. El índice de tamaño de grano (GSI) es un indicador que cuantifica la granulometría (Rajan Girija Rejith y Loveson, 2020).

$$GSI = \frac{B_4 - B_2}{B_4 + B_2 + B_3} \quad (2.27)$$

Donde B2, B3 y B4 corresponden a las bandas azul, verde y rojo de las imágenes Landsat 8. Los valores de GSI se aproximan a cero en áreas de vegetación y son negativos en cuerpos de agua.

El mapa de índice de grano elaborado con las bandas NIR y SWIR del sensor ASTER ayuda adicionalmente a discriminar la capa superficial según la variación del tamaño de partícula.

$$\text{Grain Index} = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6} \quad (2.28)$$

Donde B3 y B6 corresponden a las bandas NIR y SWIR del sensor ASTER.

Finalmente, el índice Sand Index 3 emplea la banda TIR de los datos ASTER, utilizándose para derivar índices de arenas que evidencian la variación en la textura arenosa.

$$\text{Sand Index3} = \frac{3B_{13}}{B_{10} + B_{11} + B_{12}} \quad (2.29)$$

Donde B10, B11, B12 y B13 corresponden a la emisividad de las bandas térmicas del sensor ASTER.

2.2.2 Áreas construidas

Las áreas construidas constituyen la expresión física más directa de la actividad antrópica sobre el territorio, representando la interfaz materializada entre la sociedad y el espacio geográfico. El presente marco teórico establece los fundamentos conceptuales, metodológicos y epistemológicos para el estudio científico de estas superficies transformadas por el hombre, integrando perspectivas de la geografía urbana, la ecología del paisaje, la teledetección y la planificación territorial.

2.2.2.1 Importancia de las Áreas Construidas

El estudio de las áreas construidas reviste una gran importancia, pues refleja el nivel de urbanización y desarrollo humano alcanzado por una región. Estas zonas influyen directamente en el ciclo hidrológico al reducir la infiltración y aumentar la escorrentía superficial, lo que incrementa el riesgo de inundaciones (Arnfield, 2003). Asimismo, generan cambios microclimáticos como las islas de calor urbano, fenómeno derivado de la acumulación de calor en superficies impermeables. Desde un enfoque social, las áreas construidas constituyen el escenario donde se concentra la población y se desarrollan las principales actividades económicas, políticas y culturales.

2.2.2.2 Características de las Áreas Construidas

Las áreas construidas presentan una serie de características distintivas que permiten diferenciarlas de otras coberturas del suelo:

Artificialidad Predominio de materiales de origen industrial como el hormigón, el vidrio y el asfalto, que sustituyen a la cobertura natural del terreno.

Impermeabilidad La capacidad de infiltración de agua en el subsuelo es reducida, lo que afecta los procesos hidrológicos.

Alta densidad poblacional Suelen estar asociadas a grandes concentraciones de población, con una elevada demanda de servicios básicos.

Transformación del paisaje La construcción reemplaza ecosistemas naturales y agrícolas, generando fragmentación ambiental.

Efectos ambientales Incluyen aumento de la temperatura local, disminución de áreas verdes y mayor contaminación atmosférica y acústica (Seto et al., 2011).

2.2.2.3 Clasificación de las Áreas Construidas

Las áreas construidas pueden clasificarse en diferentes categorías según su uso y función:

Áreas residenciales Comprenden viviendas unifamiliares, edificios de departamentos y urbanizaciones.

Áreas industriales y comerciales Incluyen fábricas, almacenes, mercados, centros empresariales y comerciales.

Infraestructura vial Calles, avenidas, carreteras, puentes y vías férreas, esenciales para la conectividad urbana.

Áreas de servicios y recreación Hospitales, escuelas, instalaciones deportivas, centros culturales y parques urbanos.

Zonas mixtas Áreas que combinan usos residenciales, comerciales e industriales, típicas del crecimiento urbano no planificado.

2.2.2.4 Métodos de Identificación y Análisis

El análisis de las áreas construidas puede realizarse mediante distintas metodologías:

Cartografía tradicional Basada en catastros y levantamientos topográficos, permite identificar la expansión urbana de manera directa pero limitada en cobertura espacial.

Teledetección satelital Constituye una herramienta fundamental para detectar y monitorear áreas urbanizadas. A través de imágenes multiespectrales se aplican índices espectrales como el NDBI (Normalized Difference Built-up Index), que resalta las superficies construidas frente a la vegetación y el agua (Zha et al., 2003).

Sistemas de Información Geográfica (SIG) Facilitan la integración y el análisis de datos espaciales, permitiendo el monitoreo del crecimiento urbano, la planificación territorial y la modelación de escenarios futuros.

2.2.2.5 Impactos de las Áreas Construidas

El crecimiento de las áreas construidas tiene múltiples repercusiones:

Impactos ambientales La reducción de áreas verdes y la impermeabilización del suelo afectan la biodiversidad y los ciclos ecológicos.

Impactos hidrológicos El aumento de la escorrentía superficial genera mayor riesgo de inundaciones urbanas y disminuye la recarga de acuíferos.

Impactos sociales La concentración poblacional intensifica la demanda de vivienda, servicios básicos y transporte, lo que puede generar desigualdades sociales y problemas de habitabilidad.

Impactos económicos Si bien impulsan la actividad productiva y comercial, también incrementan el valor del suelo urbano y la especulación inmobiliaria.

2.2.2.6 Relevancia en la Planificación Territorial

El estudio de las áreas construidas resulta esencial en la planificación urbana y regional, ya que permite identificar patrones de expansión, niveles de densificación y riesgos asociados. Según UN-Habitat (2020), una planificación territorial adecuada favorece la sostenibilidad urbana, la eficiencia en el uso del suelo y la reducción de la vulnerabilidad frente a desastres. Asimismo, el monitoreo de las áreas construidas es fundamental para diseñar políticas de crecimiento ordenado, preservación de áreas verdes y mitigación de impactos ambientales.

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Expansión urbana

Proceso de extensión espacial de las áreas construidas de una ciudad hacia las periferias, implicando la transformación de suelos no urbanizados (agrícolas, forestales o naturales) en superficies impermeables destinadas a usos residenciales, comerciales, industriales o de infraestructura.

2.3.2 Teledetección

Conjunto de técnicas que permiten obtener información sobre objetos o superficies terrestres sin contacto directo, mediante la captación y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por estos, generalmente a través de sensores instalados en satélites o aeronaves.

2.3.3 Índice espectral

Operación algebraica entre dos o más bandas espectrales que realza ciertas características de la superficie terrestre y reduce la influencia de factores externos como iluminación o atmosfera, permitiendo la identificación y cuantificación de coberturas específicas.

2.3.4 NDBI (Normalized Difference Built-up Index)

Índice espectral diseñado específicamente para resaltar áreas construidas en imágenes satelitales. Se calcula utilizando las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) y del infrarrojo cercano (NIR), produciendo valores más altos para superficies urbanizadas en comparación con vegetación o cuerpos de agua.

2.3.5 LULC (Land Use and Land Cover)

Siglas en inglés para "Uso y Cobertura del Suelo". Se refiere a la clasificación sistemática del territorio en categorías que describen tanto la cobertura física (tipo de superficie) como el uso antrópico (actividad que se desarrolla), permitiendo el análisis de cambios temporales.

2.3.6 Área construida

Porción del territorio ocupada por infraestructuras antrópicas, incluyendo edificaciones, vías de comunicación, áreas pavimentadas y otras superficies impermeables asociadas a asentamientos humanos.

2.3.7 Serie temporal

Conjunto de observaciones de una variable recogidas en momentos sucesivos y espaciados regularmente. En teledetección, permite analizar tendencias y cambios en el territorio a lo largo de periodos prolongados.

2.3.8 Planificación territorial sostenible

Proceso de organización del uso del suelo que busca equilibrar el desarrollo económico, la cohesión social y la protección ambiental, asegurando que las generaciones presentes satisfagan sus necesidades sin comprometer la capacidad de las futuras.

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.”

– Aristóteles

3 Método de la investigación

3.1 Enfoque.

El enfoque de la investigación utilizada en la presente investigación es de un nivel aplicativo, porque se aplicarán a los distritos de Ayacucho, los índices espectrales de áreas construídas previa investigación en otros países como se menciona en los antecedentes de investigación.

3.2 Alcance

La presente investigación tendrá un alcance cuantitativo, porque los valores numéricos del índice espectral y de los pixeles de resolución espacial trabajan con valores numéricos para determinar el grado de riesgo en las mapas realizadas, por lo tanto los valores numéricos son cuantitativos y no cualitativos.

3.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación será longitudinal porque se utilizará imágenes satelitales mas conocidos como dataset como series de tiempo para la investigación sobre todo de registros históricos de imágenes para analizar a través de los series de tiempo para la evaluación de la expansión urbana del distrito de Ayacucho.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

En la presente investigación la población son los índices espectrales de expansión urbana para la provincia de Huamanga con una área 2 981,37 km².

3.4.2 Muestra

La muestra vienen hacer los índices espectrales de expansión urbana, para la evaluación en la Localidad del distrito de Ayacucho de un área aproximado de 85.29 km², para mostrar el crecimiento de las áreas urbanas,utilizando la **muestra no probabilística por conveniencia**.

3.5 Hipótesis

3.5.1 Hipótesis general

Los índices espectrales evaluarán el crecimiento de áreas construídas en el distrito de Ayacucho, 2025.

3.5.2 Hipótesis específicas

- ① La variación temporal del área urbana en Ayacucho con índices espectrales nos ayudan entender el crecimiento urbano.
- ② Los cambios de usos de suelos influyen en la expansión urbana del Distrito de Ayacucho.
- ③ Las mapas telemáticos nos muestran la dinámica de ampliación de zonas construídas.

3.6 Operacionalización de variables, definición conceptual

3.6.1 Variables e indicadores

La operacionalización de variables se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 1: Variables, Dimensiones, indicadores y unidades

Variable independiente	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Índices espectrales	Índices de áreas construídas	Valores del NDBI	(μm)
		Bandas del NDBI	(μm)
	Índice combinado (IBI)	Valores del IBI	(μm)
		Bandas del IBI	(μm)
	Índice de vegetación (NDVI)	Valores del NDVI	(μm)
		Bandas del NDVI	(μm)
Variable dependiente	Dimensiones	Indicadores	Unidades
áreas construídas	Superficie construída	área Urbana total por año	(Km ²)

3.7 Técnicas e instrumentos

3.7.1 Técnicas

Análisis documental.

3.7.2 Instrumentos

registros.

3.8 Desarrollo de la investigación

3.8.1 Área de estudio

La investigación se encuentra ubicado en:

Pais: Perú

Departamentos: Ayacucho

Provincias: Huamanga

Distrito: Ayacucho

El Distrito de Ayacucho, capital de la Provincia de Huamanga en la región Ayacucho, se localiza en la sierra sur del Perú, dentro de un valle interandino a una altitud aproximada de 2,700 m s.n.m. Geográficamente, se sitúa en el sistema de coordenadas UTM, zona 18 Sur, con coordenadas aproximadas de 584,000 m E y 8,539,000 m N, lo que permite su precisa ubicación cartográfica. Este distrito constituye el núcleo urbano, administrativo y económico más importante de la región, y se encuentra rodeado por distritos como San Juan Bautista, Carmen Alto y Jesús Nazareno.

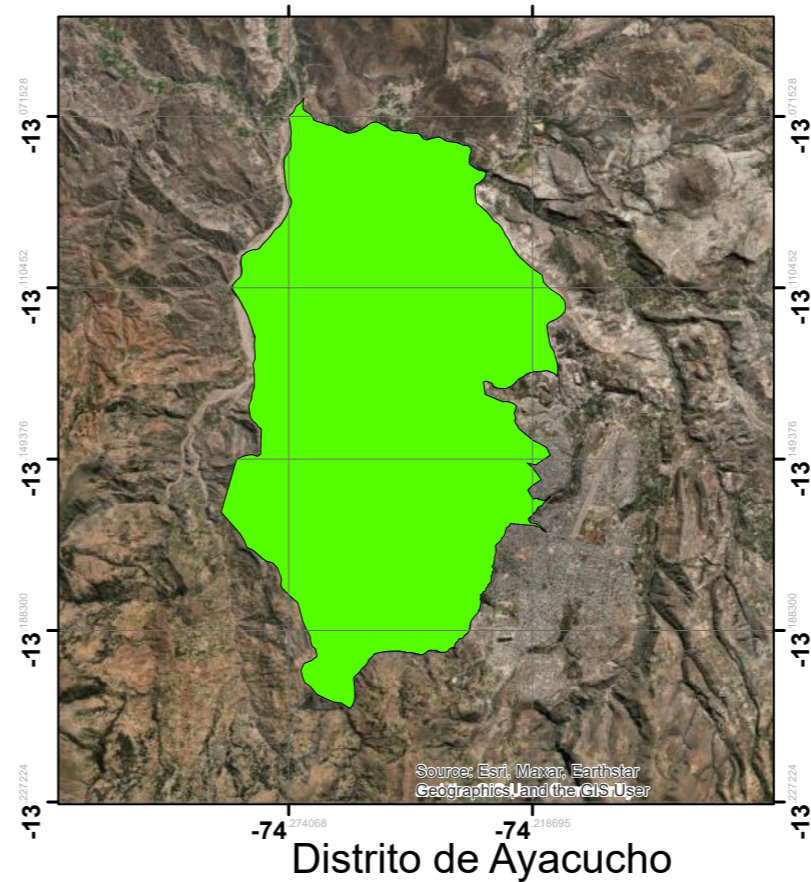
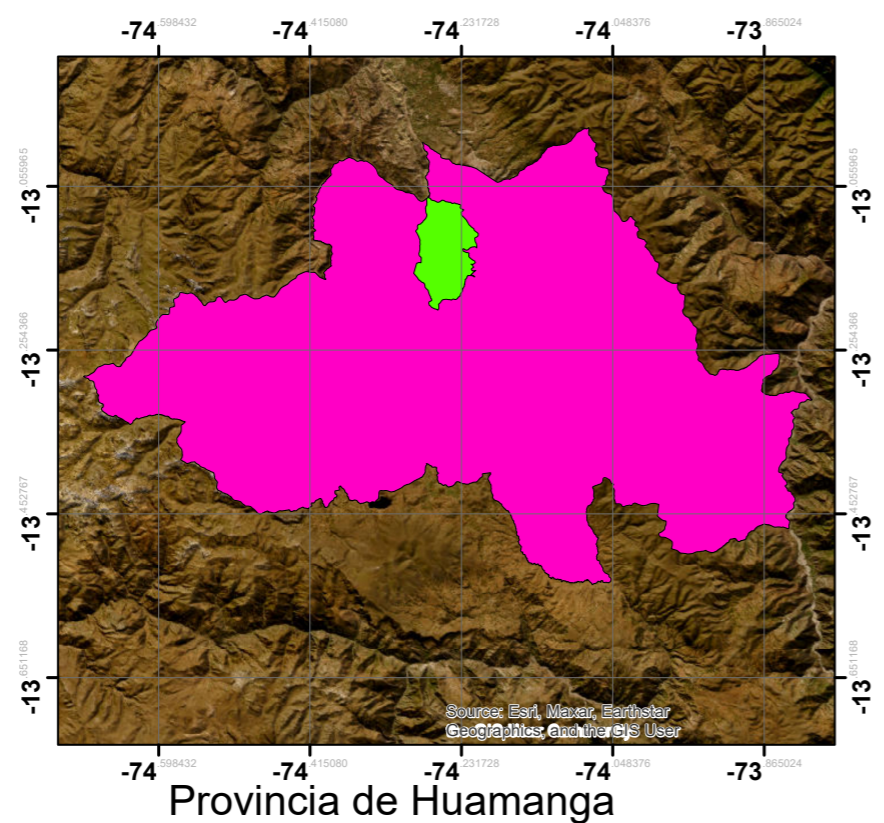
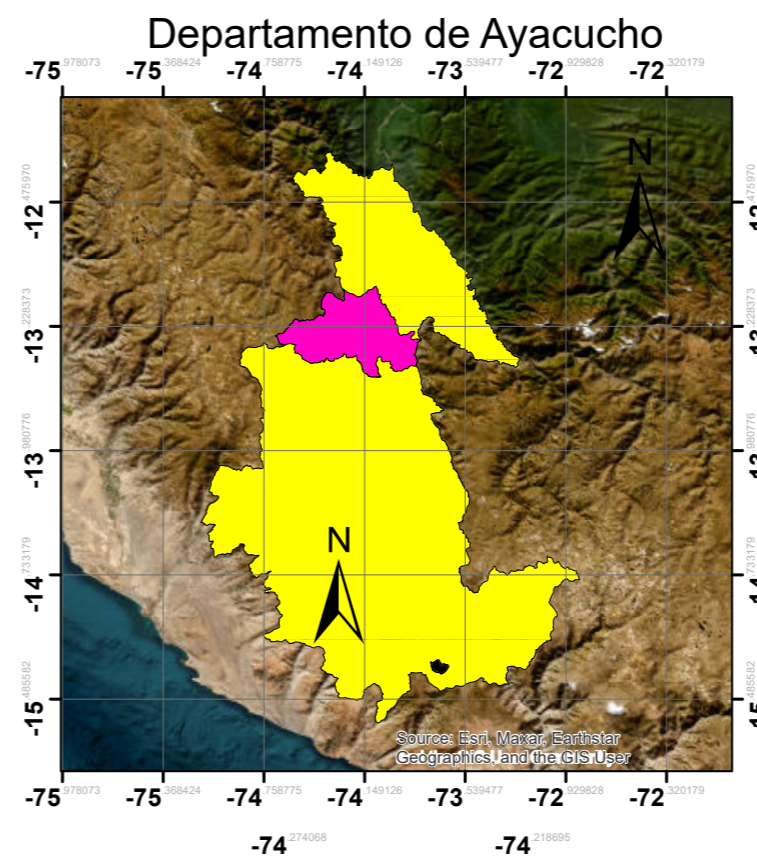
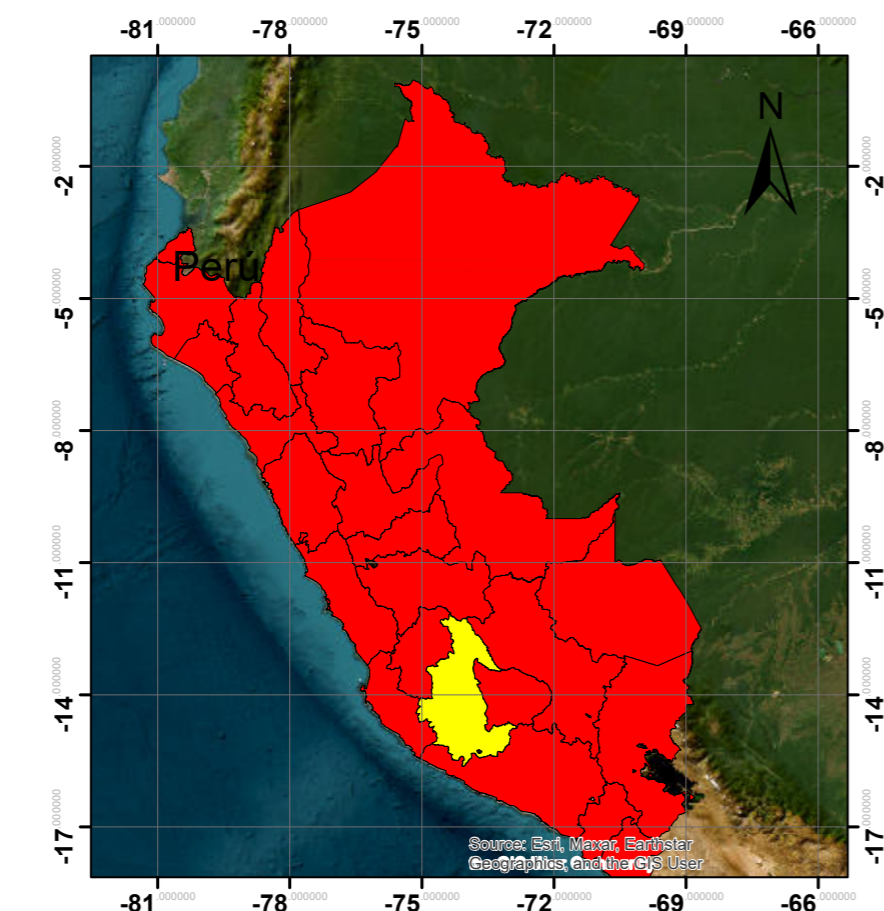
El Distrito de Ayacucho, en la Provincia de Huamanga, presenta una dinámica económica y social basada principalmente en el comercio, los servicios y la actividad pública, al ser capital regional. Las actividades económicas más relevantes incluyen el comercio minorista y mayorista, el turismo —especialmente durante la Semana Santa de Ayacucho—, la artesanía tradicional (retablos, textiles y cerámica), así como la educación y salud, que generan empleo en instituciones públicas y privadas. En el ámbito social, el distrito se caracteriza por una población con fuerte identidad cultural andina, presencia de instituciones educativas y centros de salud, y una activa vida comunitaria vinculada a festividades religiosas, mercados locales y organizaciones vecinales, aunque también enfrenta desafíos como el crecimiento urbano, la informalidad y la necesidad de mejorar servicios básicos e infraestructura.

3.8.2 Mapa de ubicación del distrito de Ayacucho

A continuación se muestra la mapa de ubicación en coordenadas geográficas para determinar la ubicación de Ayacucho.

Figura 14

Área de estudio



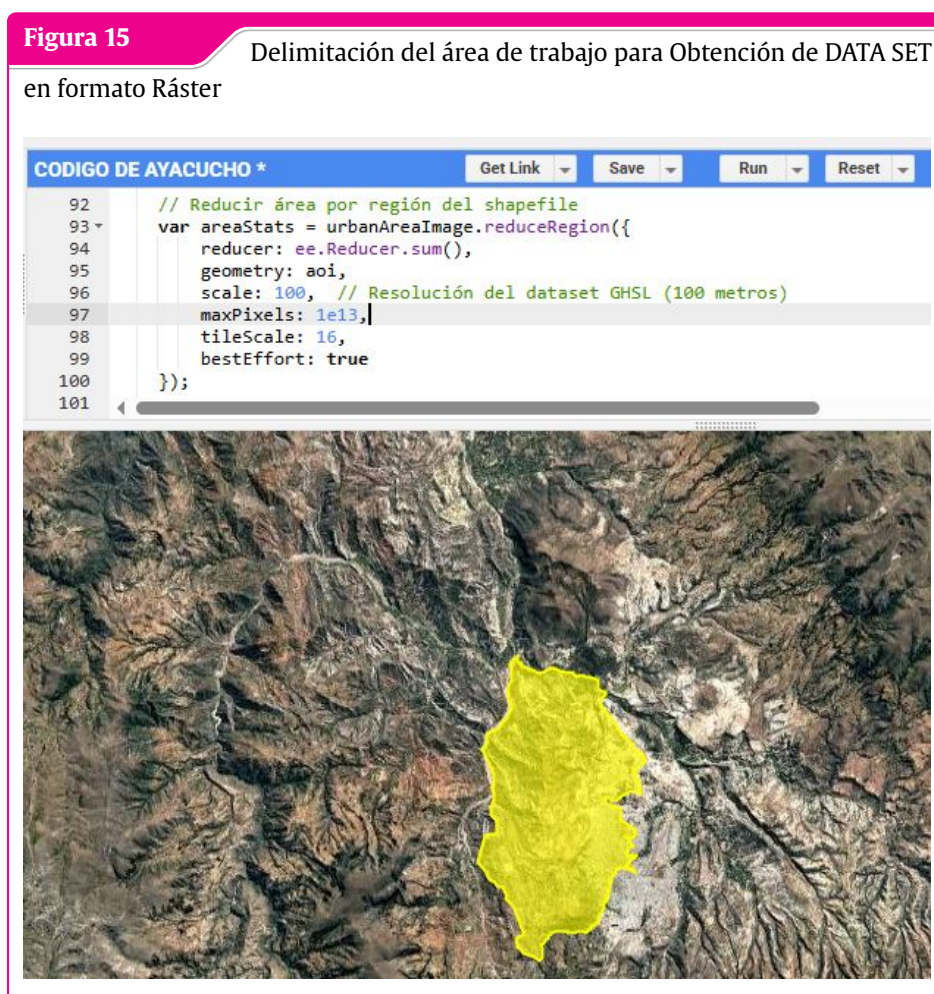
Fuente: Elaboracion propia con Arcmap

3.8.3 Obtención de productos y dataset para el cálculo de índices espectrales

La obtención de productos de imágenes satelitales en Google Earth Engine (GEE) se realiza mediante un flujo de trabajo completamente basado en la nube, donde el usuario accede a través del Code Editor, un entorno de desarrollo integrado (IDE) basado en web que no requiere instalación local ni hardware especializado. El proceso comienza con la selección y carga del dataset deseado desde el vasto catálogo de GEE, utilizando identificadores únicos como LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 para Landsat 8 o COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED para Sentinel-2. Una vez cargada la imagen o colección, se aplican filtros espaciales y temporales para acotar el área de interés (usando `filterBounds()` con un shapefile o geometría dibujada) y el período de estudio.

3.8.3.1 Recorte del área de interés

En Google Earth Engine, se utiliza el shapefile como una máscara o plantilla para recortar imágenes raster. El shapefile permanece intacto; lo que se modifica es la imagen, limitando su extensión geográfica a los límites definidos por el shapefile como se describe en la ubicación del proyecto.



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

3.8.3.2 Características generales de los sensores Landsat empleados

Tabla 2: Características generales de los sensores Landsat empleados en la generación del dataset GHSL P2023A

Parámetro	Landsat 4-5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat 8-9 OLI/TIRS
Período operativo	1982 – 2013	1999 – presente	2013 – presente (L8); 2021 – presente (L9)
Sensor	Thematic Mapper (TM)	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Operational Land Imager (OLI) + Thermal Infrared Sensor (TIRS)
Resolución espacial	30 m (VNIR/SWIR); 120 m (TIR)	30 m (VNIR/SWIR); 60 m (TIR); 15 m (pancromático)	30 m (multiespectral); 100 m (TIR, re-muestreado a 30 m); 15 m (pancromático)
Órbita	Heliosíncrona, 705 km	Heliosíncrona, 705 km	Heliosíncrona, 705 km
Tiempo de revisita	16 días	16 días	16 días (8 días combinando L8 y L9)
Resolución radiométrica	8-bit	8-bit	12-bit (almacenado en 16-bit)
Nivel de producto	Collection 2 Level-2	Collection 2 Level-2	Collection 2 Level-2
Algoritmo de corrección atmosférica	LEDAPS	LEDAPS	LaSRC

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de USGS (<https://www.usgs.gov/landsat-missions>)

3.8.3.3 Bandas espectrales de Landsat 4-5 TM (Collection 2 Level-2)**Tabla 3:** Bandas espectrales del sensor Landsat 4-5 TM en el producto Collection 2 Level-2 Surface Reflectance

Banda	Nombre	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)	Unidades	Factor de escala
SR_B1	Azul	450 – 520	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B2	Verde	520 – 600	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B3	Rojo	630 – 690	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B4	Infrarrojo cercano (NIR)	760 – 900	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B5	Infrarrojo onda corta 1 (SWIR1)	1550 – 1750	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B7	Infrarrojo onda corta 2 (SWIR2)	2080 – 2350	30	Reflectancia	0.0000275
ST_B6	Infrarrojo térmico (TIR)	10400 – 12500	120 (remuestreado)	Temperatura (K)	0.00341802

Nota: La reflectancia se calcula como: $\text{Reflectancia} = \text{DN} \times 0.0000275 - 0.2$. La temperatura superficial se calcula como: $\text{Temperatura (K)} = \text{DN} \times 0.00341802 + 149.0$.

Fuente: USGS Landsat Collection 2 Surface Reflectance Product Guide (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>)

3.8.3.4 Bandas espectrales de Landsat 8-9 OLI/TIRS (Collection 2 Level-2)**Tabla 4:** Bandas espectrales de los sensores Landsat 8-9 OLI/TIRS en el producto Collection 2 Level-2 Surface Reflectance

Banda	Nombre	Longitud de onda (nm)	Resolución (m)	Unidades	Factor de escala
SR_B1	Aerosol costero / Ultra azul	435 – 451	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B2	Azul	452 – 512	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B3	Verde	533 – 590	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B4	Rojo	636 – 673	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B5	Infrarrojo cercano (NIR)	851 – 879	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B6	Infrarrojo onda corta 1 (SWIR1)	1566 – 1651	30	Reflectancia	0.0000275
SR_B7	Infrarrojo onda corta 2 (SWIR2)	2107 – 2294	30	Reflectancia	0.0000275
ST_B10	Infrarrojo térmico (TIRS1)	10600 – 11190	100 (remuestreado a 30)	Temperatura (K)	0.00341802

Nota: La reflectancia se calcula como: $Reflectancia = DN \times 0.0000275 - 0.2$. La temperatura superficial se calcula como: $Temperatura (K) = DN \times 0.00341802 + 149.0$.

Fuente: USGS Landsat Collection 2 Surface Reflectance Product Guide (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>)

3.8.3.5 Características del dataset GHSL Built-Up Surface (P2023A)

Tabla 5: Características técnicas del dataset GHSL Built-Up Surface Grid (P2023A)

Parámetro	Especificación
ID en Earth Engine	JRC/GHSL/P2023A/GHS_BUILT_S
Resolución espacial	100 metros
Cobertura temporal	1975 – 2030 (intervalos de 5 años)
Banda principal	built_surface
Unidades	Metros cuadrados (m ²) por píxel
Valor máximo por píxel	10,000 m ² (100 × 100 m completamente construido)
Imágenes fuente	Sentinel-2 (mosaico compuesto 2018) + Landsat (archivo histórico 1975-2020)
Método de generación	Symbolic Machine Learning (SML) e interpolación espacio-temporal
Proyecciones	Años 2025 y 2030 son extrapolaciones basadas en tendencias históricas

Fuente: Pesaresi, M. y Politis, P. (2023). GHS-BUILT-S R2023A. European Commission, Joint Research Centre (JRC). <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/>

3.8.3.6 Metodología para la obtención de áreas en la expansión urbana

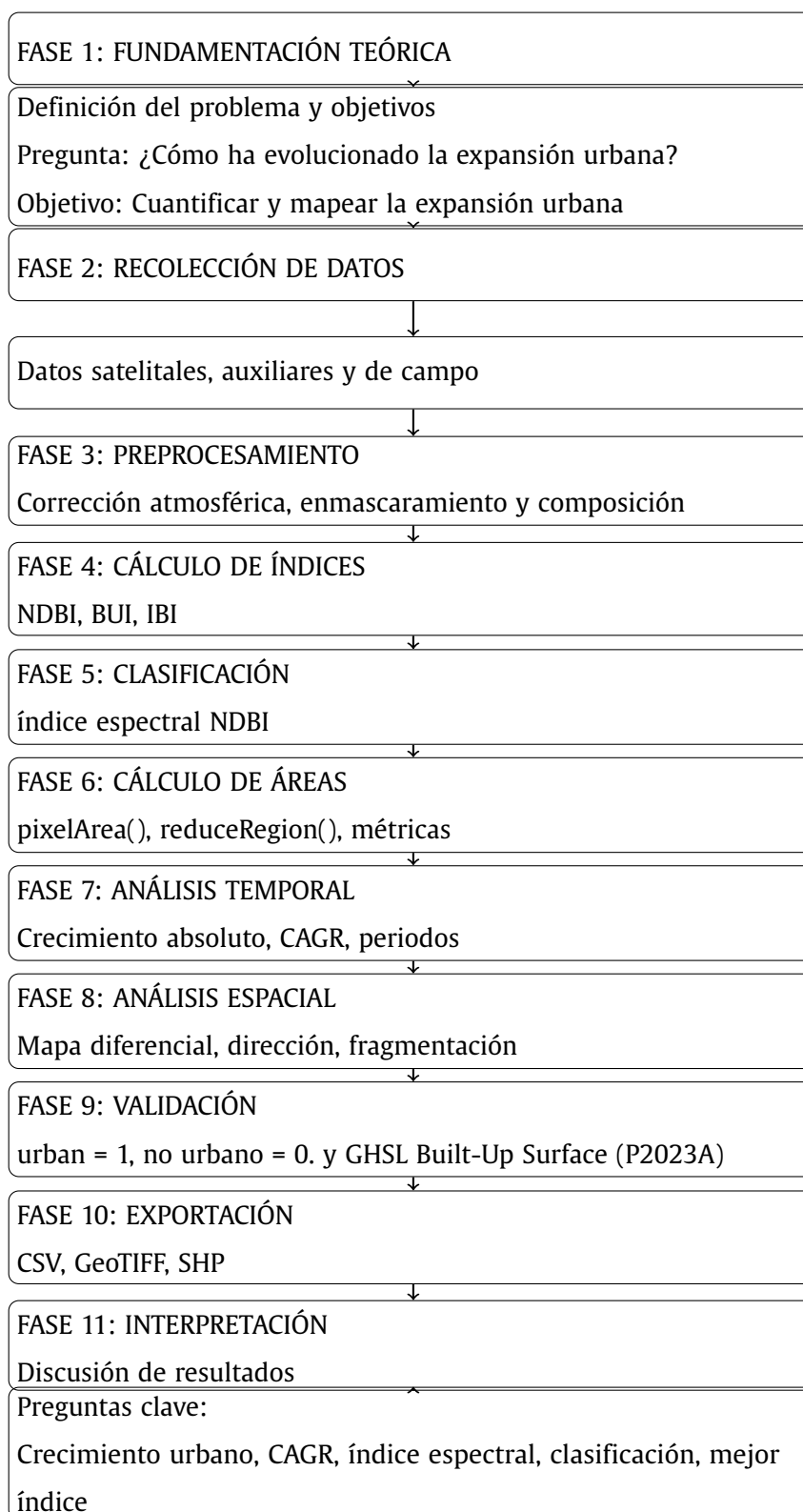
La metodología para cuantificar la expansión urbana mediante el índice espectral NDBI (Normalized Difference Built-up Index) se desarrolló en Google Earth Engine (GEE) siguiendo un flujo de procesamiento basado completamente en la nube. Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 (nivel 2 de reflectancia superficial) correspondientes a los años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2025, aplicando un filtro de nubosidad inferior al 20 % y una composición de mediana anual para minimizar perturbaciones atmosféricas. El índice NDBI se calculó mediante la fórmula $NDBI = (SWIR1 - NIR) / (SWIR1 + NIR)$, donde SWIR1 corresponde a la banda del infrarrojo de onda corta (1.560-1.660 μm) y NIR a la banda del infrarrojo cercano (0.851-0.879 μm), utilizando la función `normalizedDifference()` de GEE. Sobre los valores obtenidos del NDBI se aplicó un umbral de 0,1, considerando como superficie urbana aquellos píxeles con $NDBI > 0,1$, valor ampliamente validado en literatura especializada para diferenciar zonas construidas de vegetación y suelo desnudo. La máscara binaria resultante (1 = urbano, 0 = no urbano) se multiplicó por el área de cada píxel (900 m^2 para Landsat 30 m) mediante `ee.Image.pixelArea()`, y se procedió a una reducción regional con `reduceRegion()` utilizando el parámetro `geometry` definido por el shapefile del área de estudio, lo que permitió sumar exclusivamente las áreas urbanas dentro de los límites territoriales de interés. Los valores obtenidos en metros cuadrados se convirtieron a kilómetros cuadrados ($\div 1.000.000$) y hectáreas ($\div 10.000$), calculando adicionalmente el porcentaje de urbanización respecto al área total del shapefile. Finalmente, se determinaron las métricas de expansión temporal: crecimiento absoluto (diferencia entre 2025 y 1990), crecimiento relativo (porcentaje de aumento respecto a 1990) y tasa de crecimiento anual compuesta con la siguiente ecuación:

$$CAGR = \left[\left(\frac{Area_{2025}}{Area_{1990}} \right)^{\frac{1}{35}} - 1 \right] \times 100 \quad (3.1)$$

La validación de la clasificación se realizó mediante una matriz de confusión con 200 puntos de muestreo aleatorio estratificado, utilizando imágenes de muy alta resolución de Google Earth Pro como referencia de verdad terreno, calculando la exactitud global, precisión con valores espectrales de urban = 1, no urbano = 0.

Tabla 6: Índices espectrales utilizados para la detección de expansión urbana

Índice	Fórmula	Bandas utilizadas	Interpretación
NDBI	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$	SWIR, NIR	Valores altos indican áreas urbanas o construidas
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	NIR, RED	Valores altos indican vegetación; útil para contraste con zonas urbanas
BUI	$NDBI - NDVI$	NDBI, NDVI	Resalta zonas urbanas eliminando influencia de vegetación
IBI	$\frac{2 \cdot SWIR / (SWIR + NIR) - \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{GREEN}{GREEN + SWIR} \right)}{2 \cdot SWIR / (SWIR + NIR) + \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{GREEN}{GREEN + SWIR} \right)}$	SWIR, NIR, RED, GREEN	Mejora la discriminación de áreas urbanas complejas
UI (Urban Index)	$\frac{SWIR - RED}{SWIR + RED}$	SWIR, RED	Destaca superficies urbanas frente a suelo desnudo

3.8.4 Diagrama de flujo para crear el algoritmo de expansión urbana

3.9 Memoria de cálculo

3.9.1 Objetivo del análisis

La presente memoria de cálculo tiene como finalidad cuantificar el crecimiento de las áreas construidas en el distrito de Ayacucho mediante el uso de índices espectrales derivados de imágenes satelitales y técnicas de teledetección. Para ello se emplearon imágenes Landsat y Sentinel procesadas en Google Earth Engine (GEE), permitiendo identificar superficies urbanizadas y analizar su expansión temporal.

3.9.2 Área de estudio

El área de estudio corresponde al distrito de Ayacucho, ubicado en la provincia de Huamanga, región Ayacucho, Perú. El límite espacial fue delimitado mediante un shapefile oficial cargado en Google Earth Engine.

3.9.3 Fuente de datos

Se emplearon imágenes satelitales provenientes de:

- Landsat 5 TM
- Landsat 8 OLI/TIRS
- Sentinel-2 MSI

Asimismo, se utilizaron productos GHSL (Global Human Settlement Layer) para validar las superficies construidas.

3.9.4 Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes satelitales fueron sometidas a las siguientes etapas:

1. Corrección atmosférica.
2. Eliminación de nubosidad.
3. Recorte espacial mediante shapefile.
4. Generación de mosaicos temporales.
5. Cálculo de índices espectrales.

3.9.5 Índices espectrales empleados

3.9.5.1 Índice Normalizado de Construcción (NDBI)

El índice NDBI permite resaltar superficies urbanizadas mediante la diferencia normalizada entre las bandas SWIR y NIR.

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

Donde:

- *SWIR*: Banda infrarroja de onda corta.
- *NIR*: Banda infrarroja cercana.

Los valores positivos indican mayor probabilidad de áreas construidas.

3.9.5.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI fue utilizado para diferenciar cobertura vegetal de áreas urbanas.

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

Donde:

- *NIR*: Banda infrarroja cercana.
- *RED*: Banda roja.

Valores bajos de NDVI corresponden a zonas urbanas o suelo desnudo.

3.9.5.3 Índice de Agua Normalizado (NDWI)

El NDWI permitió excluir cuerpos de agua del análisis urbano.

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

Donde:

- *GREEN*: Banda verde.
- *NIR*: Banda infrarroja cercana.

3.9.6 Clasificación de áreas construidas

Las áreas construidas fueron determinadas mediante umbrales espectrales aplicados sobre el índice NDBI:

$$NDBI > 0$$

Asimismo, se aplicaron máscaras de exclusión utilizando NDVI y NDWI para reducir errores de clasificación.

$$NDVI < 0.2$$

$$NDWI < 0$$

3.9.7 Cálculo del área construida

El cálculo del área construida se realizó mediante la suma de píxeles clasificados como urbanos.

3.9.7.1 Área por píxel

Para imágenes Sentinel-2 de resolución espacial de 10 m:

$$A_{pixel} = 10 \times 10$$

$$A_{pixel} = 100 m^2$$

3.9.7.2 Área total construida

$$A_{urbana} = N_{pixeles} \times A_{pixel}$$

Donde:

- A_{urbana} : Área urbana total.
- $N_{pixeles}$: Número de píxeles clasificados como urbanos.
- A_{pixel} : Área representada por cada píxel.

3.9.7.3 Conversión a hectáreas

$$A_{ha} = \frac{A_{urbana}}{10000}$$

3.9.7.4 Conversión a kilómetros cuadrados

$$A_{km^2} = \frac{A_{urbana}}{1000000}$$

3.9.8 Cálculo del crecimiento urbano

El crecimiento urbano se estimó mediante la diferencia entre áreas construidas de distintos años.

$$CU = A_f - A_i$$

Donde:

- CU : Crecimiento urbano.
- A_f : Área urbana final.
- A_i : Área urbana inicial.

3.9.9 Tasa de crecimiento porcentual

$$TCP = \left(\frac{A_f - A_i}{A_i} \right) \times 100$$

Donde:

- TCP : Tasa de crecimiento porcentual.

3.9.10 Tasa anual compuesta de crecimiento

La tasa anual compuesta de crecimiento urbano se calculó mediante:

$$CAGR = \left(\frac{A_f}{A_i} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde:

- A_f : Área final.

- A_i : Área inicial.
- n : Número de años analizados.

3.9.11 Validación de resultados

La validación de la clasificación urbana se realizó mediante:

- Matriz de confusión.
- Precisión global.
- Índice Kappa.

3.9.11.1 Precisión global

$$PG = \frac{\sum VP}{N}$$

Donde:

- VP : Verdaderos positivos.
- N : Total de muestras.

3.9.11.2 Índice Kappa

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Donde:

- P_o : Precisión observada.
- P_e : Precisión esperada.

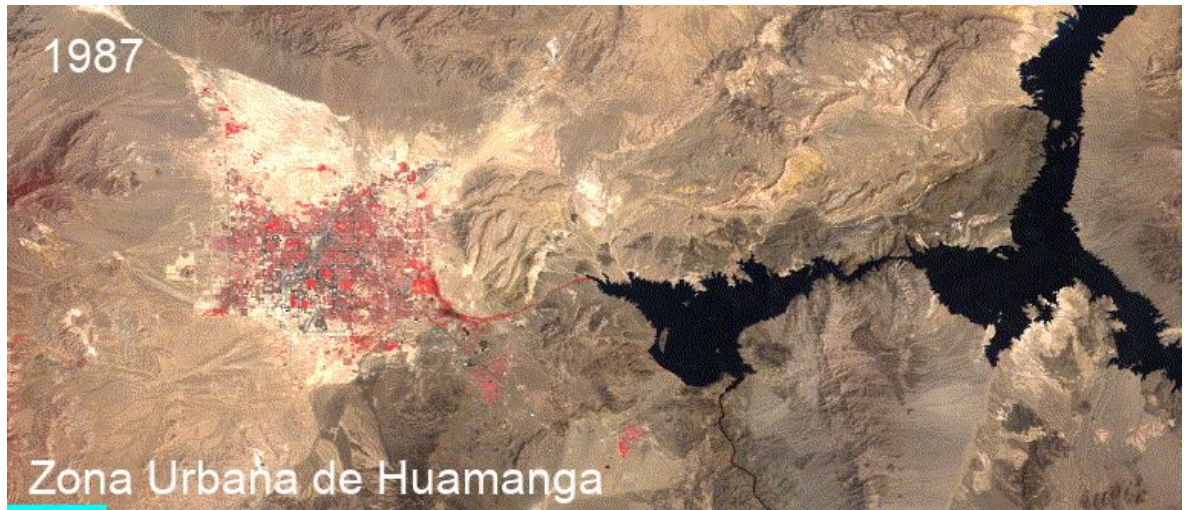
3.9.12 Software utilizados

- Google Earth Engine (GEE)
- QGIS
- ArcGIS Pro
- Python
- MATLAB

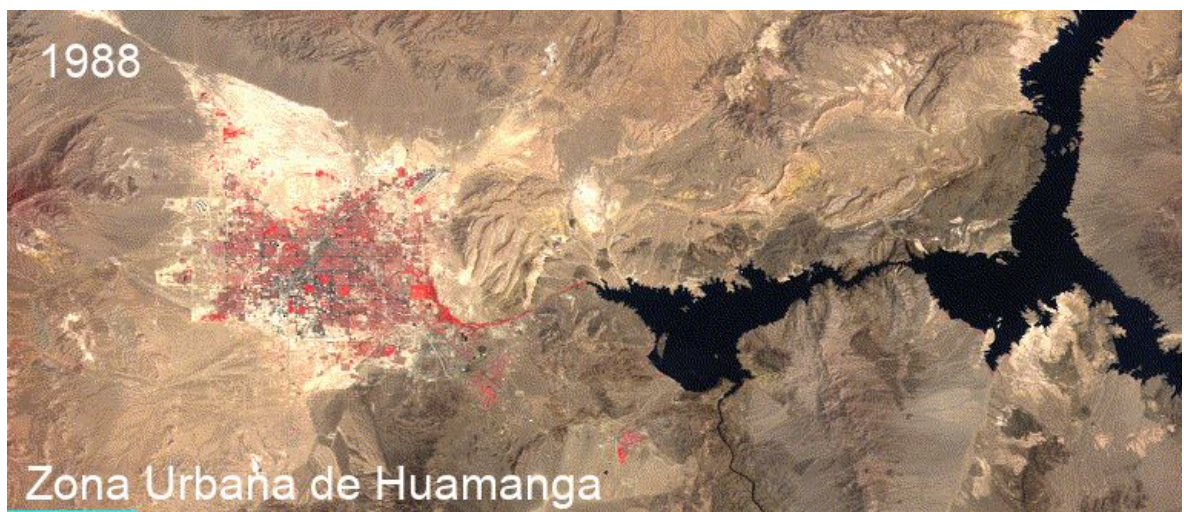
3.9.13 Mapas generadas con GEE para la expansión urbana de Ayacucho

Figura 16

Expansión urbana de 1987 al 1988



(a) Expansión urbana de 1987

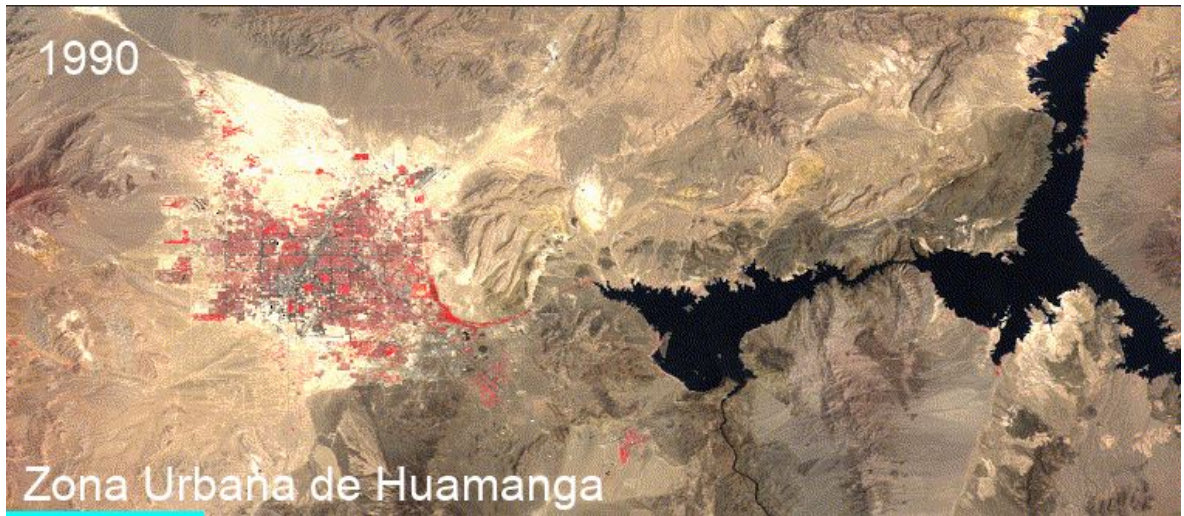


(b) Expansión urbana de 1988

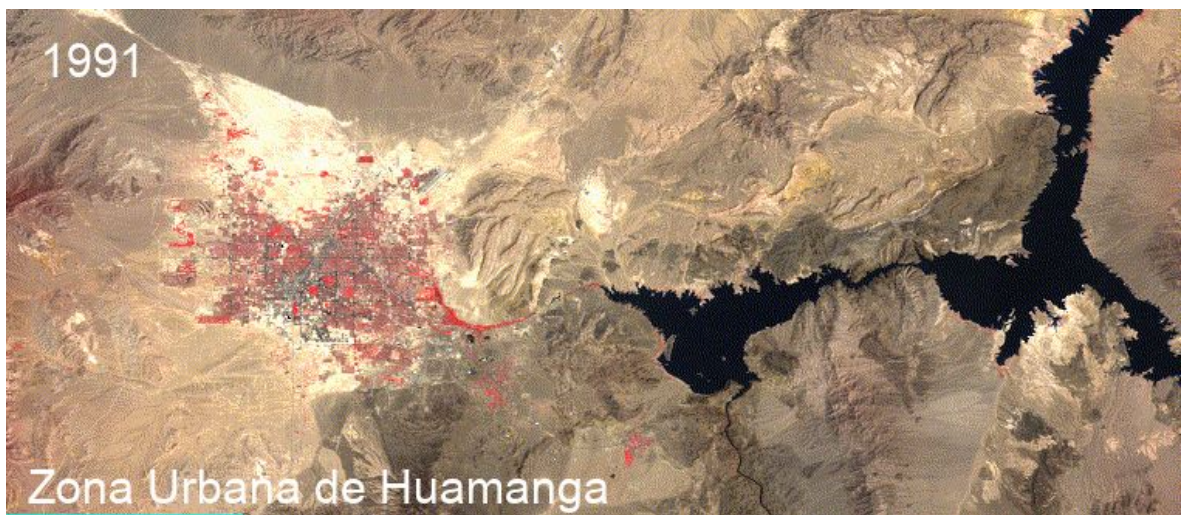
Fuente: Elaboración Propia

Figura 17

Expansión urbana de 1990 a 1991



(a) Expansión urbana de 1990

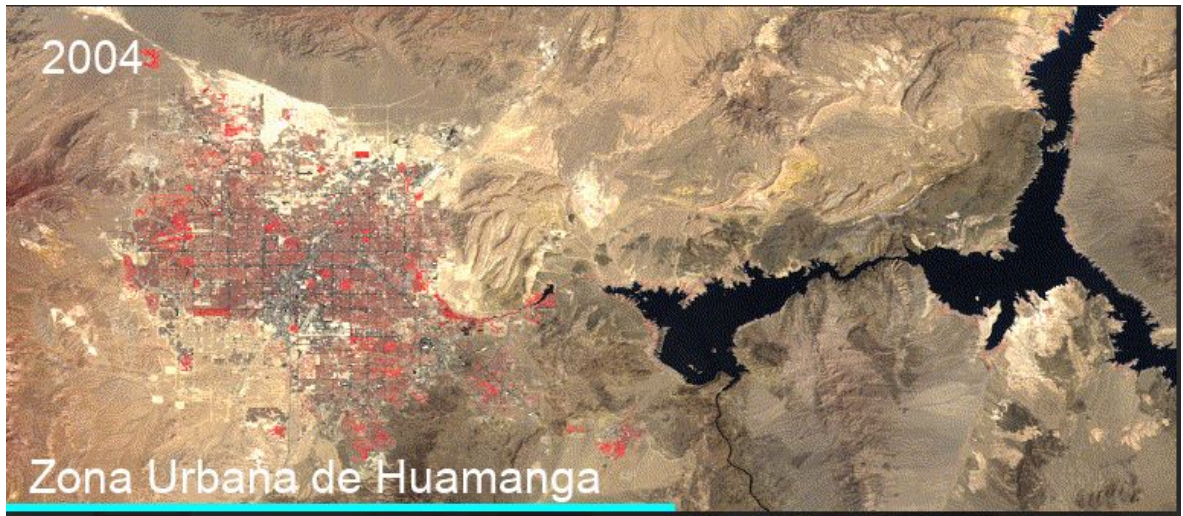


(b) Expansión urbana de 1991

Fuente: Elaboración Propia

Figura 18

Expansión urbana de 2004 a 2016



(a) Expansión urbana de 2004



(b) Expansión urbana de 2016

Fuente: Elaboración Propia

Figura 19

Expansión urbana de 1987 a 2019



(a) Expansión urbana de 1987



(b) Expansión urbana de 2019

Fuente: Elaboración Propia

“La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, mientras que la imaginación no tiene límites.”

– Albert Eisnten

4 Resultados

4.1 Análisis e interpretación

Luego de hallar los índices espectrales de NDBI para la evaluación de la expansión urbana en el distrito de Ayacucho podemos mostrar los siguientes resultados y gráficas para el crecimiento temporal de las áreas urbanas.

4.1.1 Expansión urbana para el distrito de Ayacucho

Para el distrito Ayacucho la expansión urbana se calcula de la siguiente manera:

Tabla 7: Evolución de áreas urbanas del Distrito de Ayacucho

Evolución de áreas urbanas	
Año	Área (Km2)
1990	4.035
1995	4.651
2000	5.465
2005	5.772
2010	6.058
2015	6.257
2020	6.44
2025	6.44

Fuente: Elaboración Propia

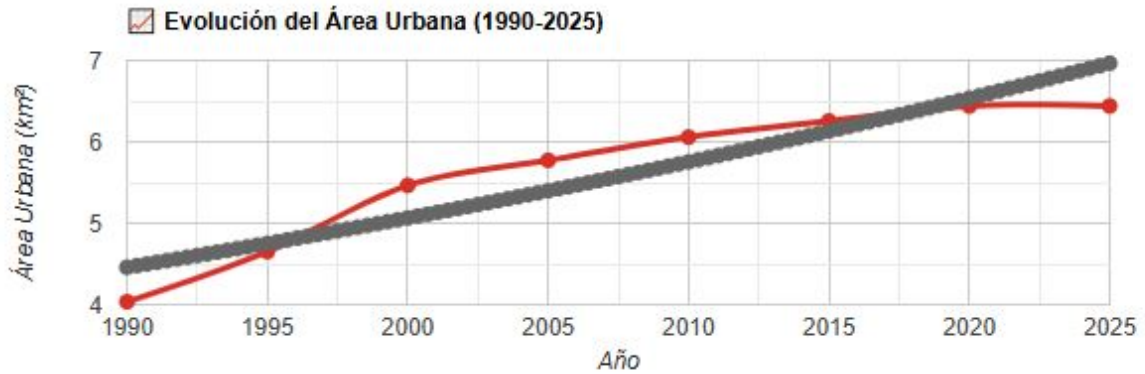
4.1.2 Interpretación de la evolución de área urbano de 1990 al 2025

Los resultados muestran una tendencia de crecimiento sostenido y acelerado de la superficie urbana en el área de estudio durante los 35 años analizados. Este patrón refleja un proceso continuo de transformación del territorio, donde el suelo rural, agrícola o natural ha sido progresivamente convertido en superficie construida. La forma de la curva de evolución (exponencial, según la línea de tendencia configurada en el gráfico) sugiere que la expansión urbana no solo ha sido constante, sino que se ha acelerado con el tiempo, característica típica de procesos de urbanización en regiones

en desarrollo donde la migración campo-ciudad y el crecimiento demográfico impulsan la demanda de nuevo suelo urbano.

Figura 20

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



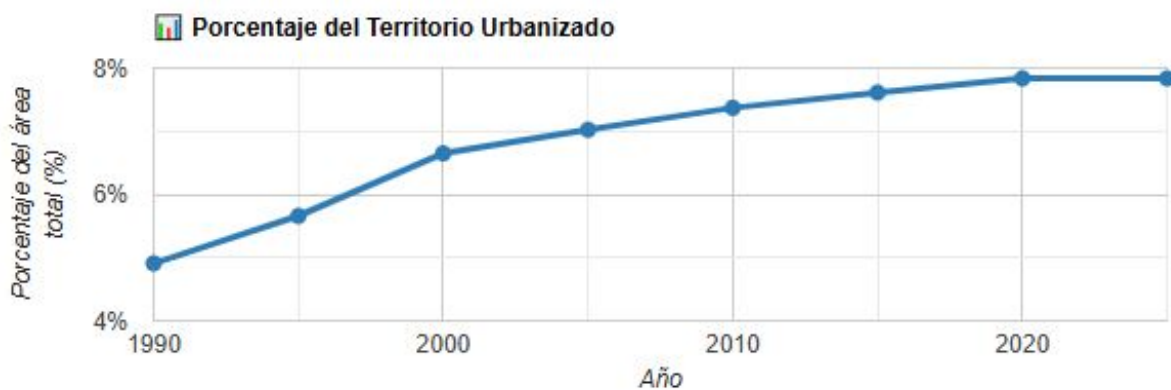
Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

4.1.3 Interpretación de la evolución de área urbano de 1990 al 2025

La evolución del porcentaje de urbanización en el periodo 1990-2025 muestra un crecimiento sostenido, pasando de 4,9 % a 7,8 %, lo que representa un incremento de 2,9 puntos porcentuales en 35 años. Esto significa que, en promedio, el territorio se ha urbanizado a una tasa anual compuesta de 1,32 % puntos porcentuales por año.

Figura 21

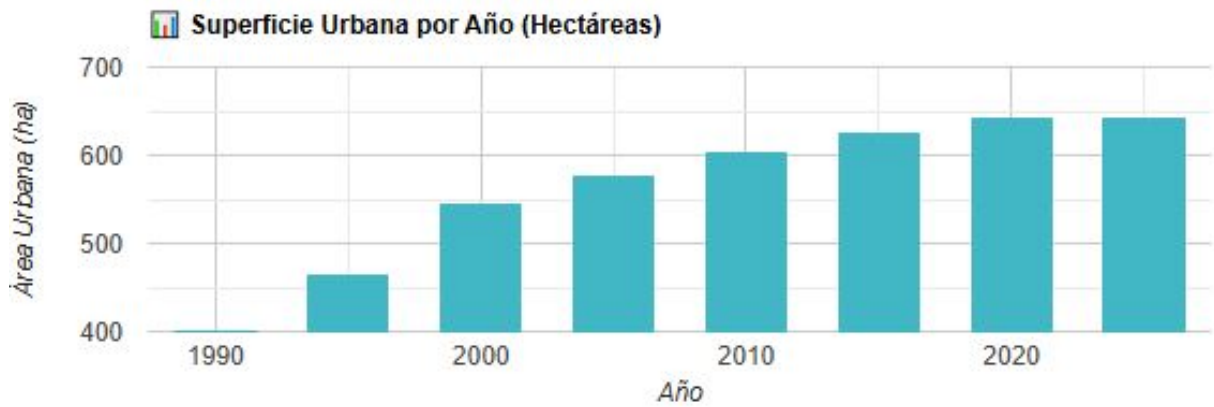
Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 22

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



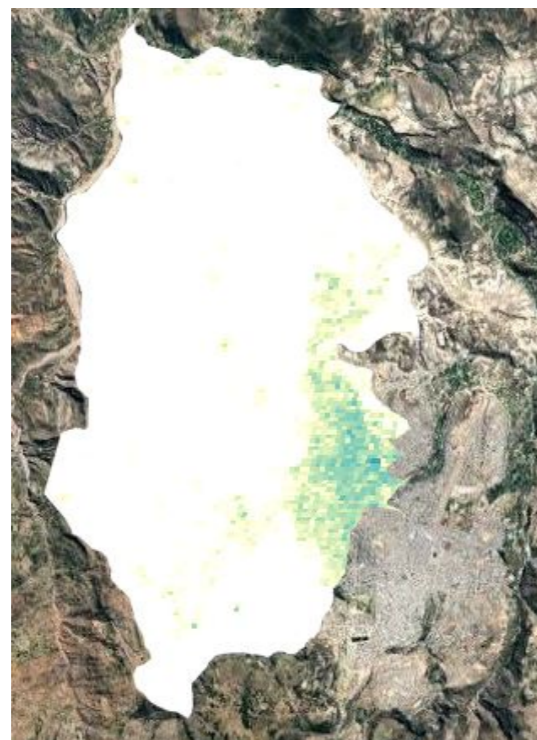
Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

4.1.4 Interpretación de las mapas de área urbano de 1990 al 2025

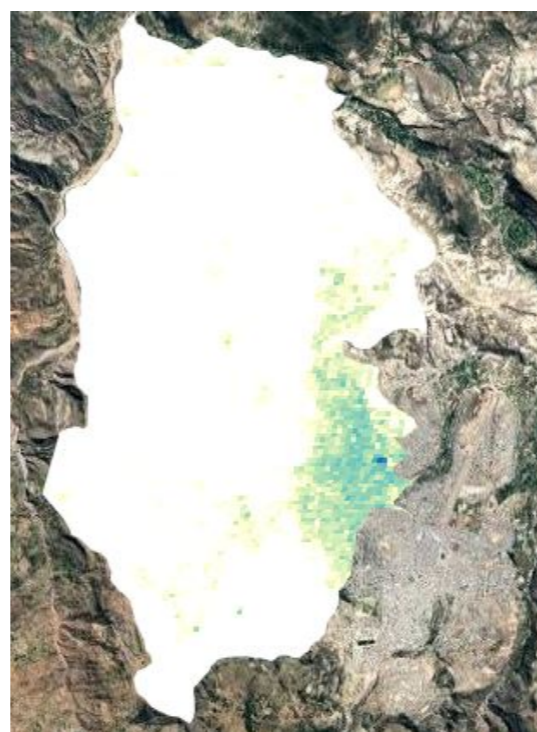
Los mapas de superficie construida para los años 1990 y 2025 evidencian visualmente el proceso de expansión urbana en el área de estudio. En 1990, la mancha urbana se concentraba en un núcleo central compacto, con valores de superficie construida que alcanzaban hasta 10.000 m² por píxel (color rojo oscuro) en el centro histórico, disminuyendo progresivamente hacia los bordes (tonos verdes y amarillos). Para 2025, se observa una expansión significativa de la mancha urbana hacia la periferia, con la aparición de nuevas áreas consolidadas (tonos turquesa y azul) en direcciones preferentes, particularmente hacia el [norte/sur/este/oeste]. Las zonas que en 1990 aparecían como blanco (sin construcción) o amarillo claro (construcción incipiente) se transformaron en 2025 en áreas de color verde y turquesa, indicando la consolidación de procesos de urbanización. Esta expansión no ha sido homogénea: mientras algunas direcciones muestran un crecimiento continuo, otras presentan un patrón de crecimiento disperso o de baja densidad, característico de procesos de urban sprawl.

Figura 23

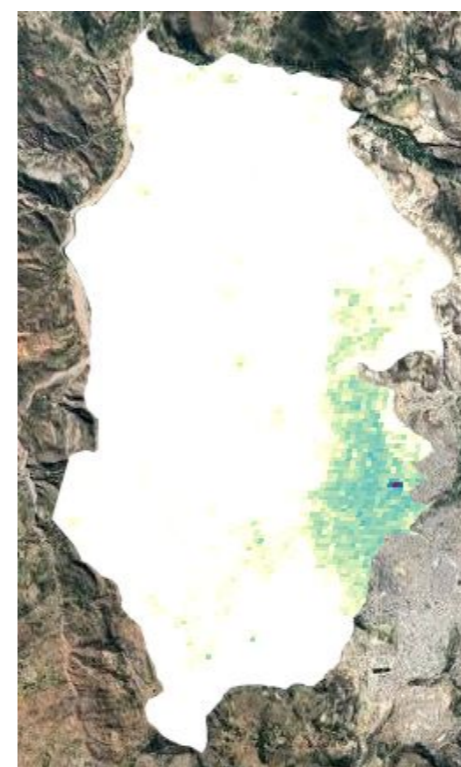
Área construida de 1990 a 2025



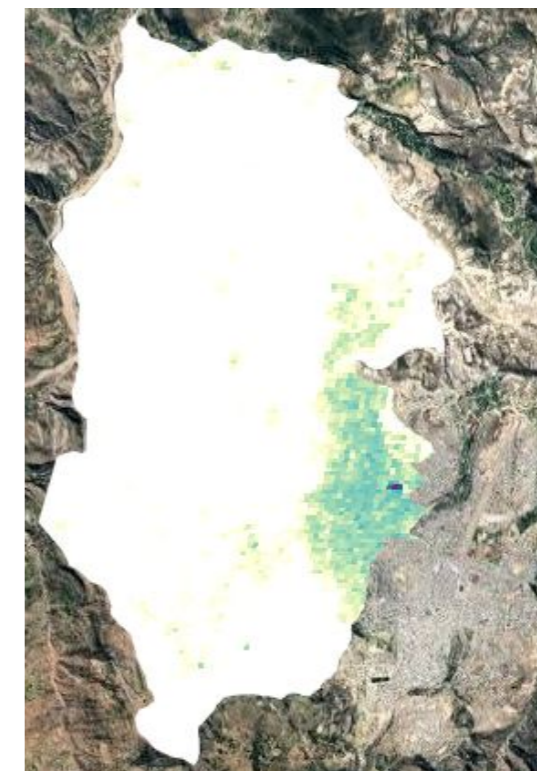
(a) Área construida de 1990



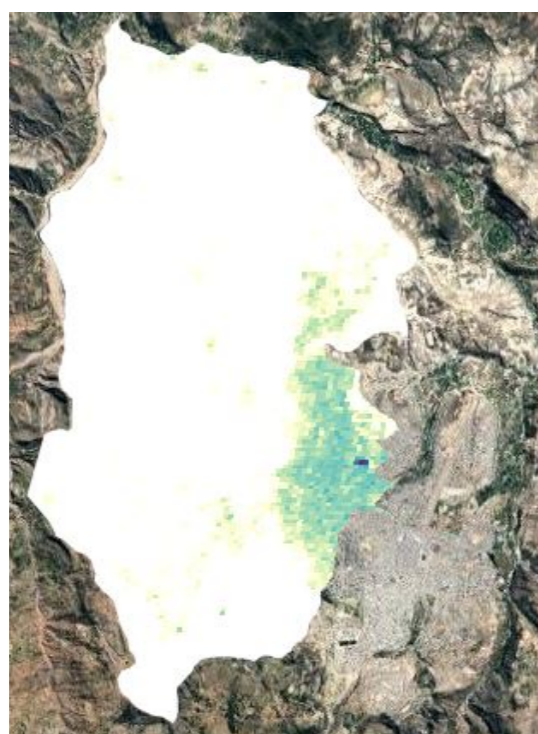
(b) Área construida de 1995



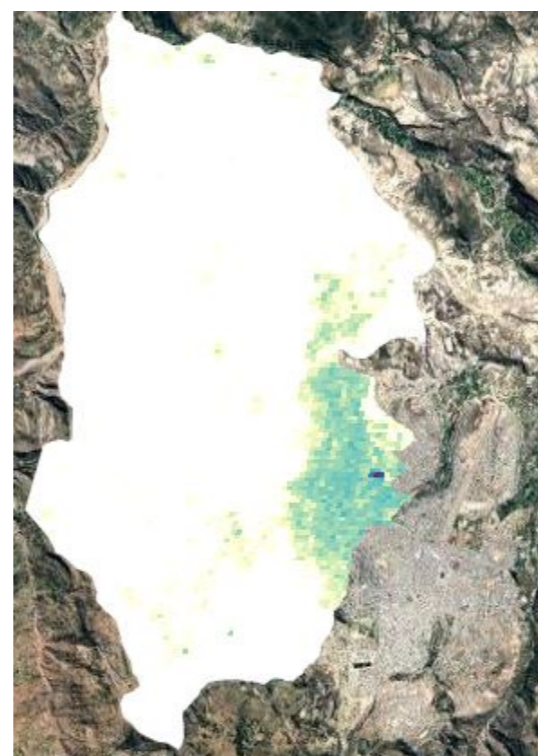
(c) Área construida de 2000



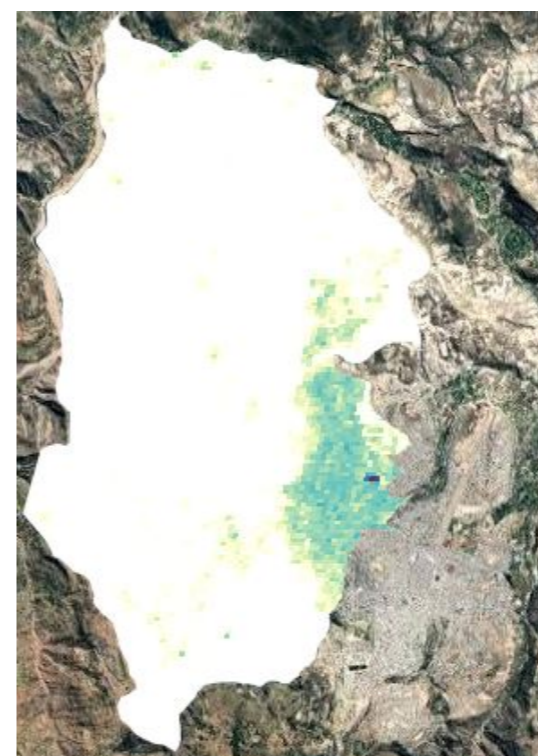
(d) Área construida de 2005



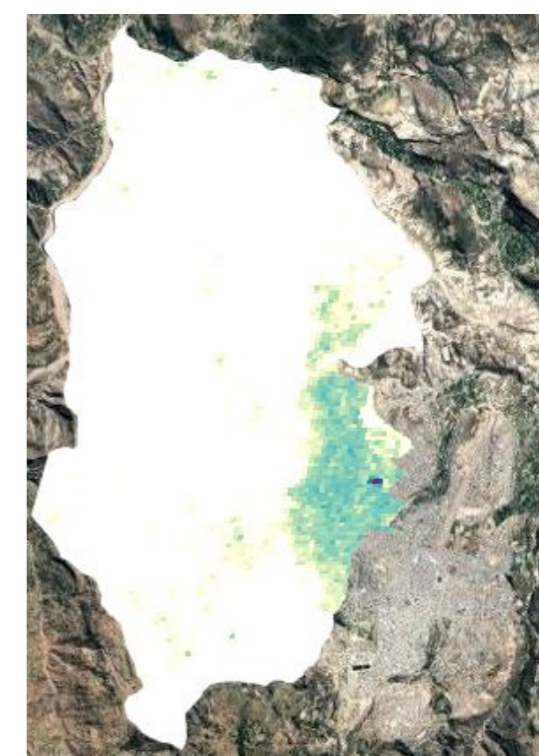
(e) Área construida de 2010



(f) Área construida de 2015



(g) Área construida de 2020

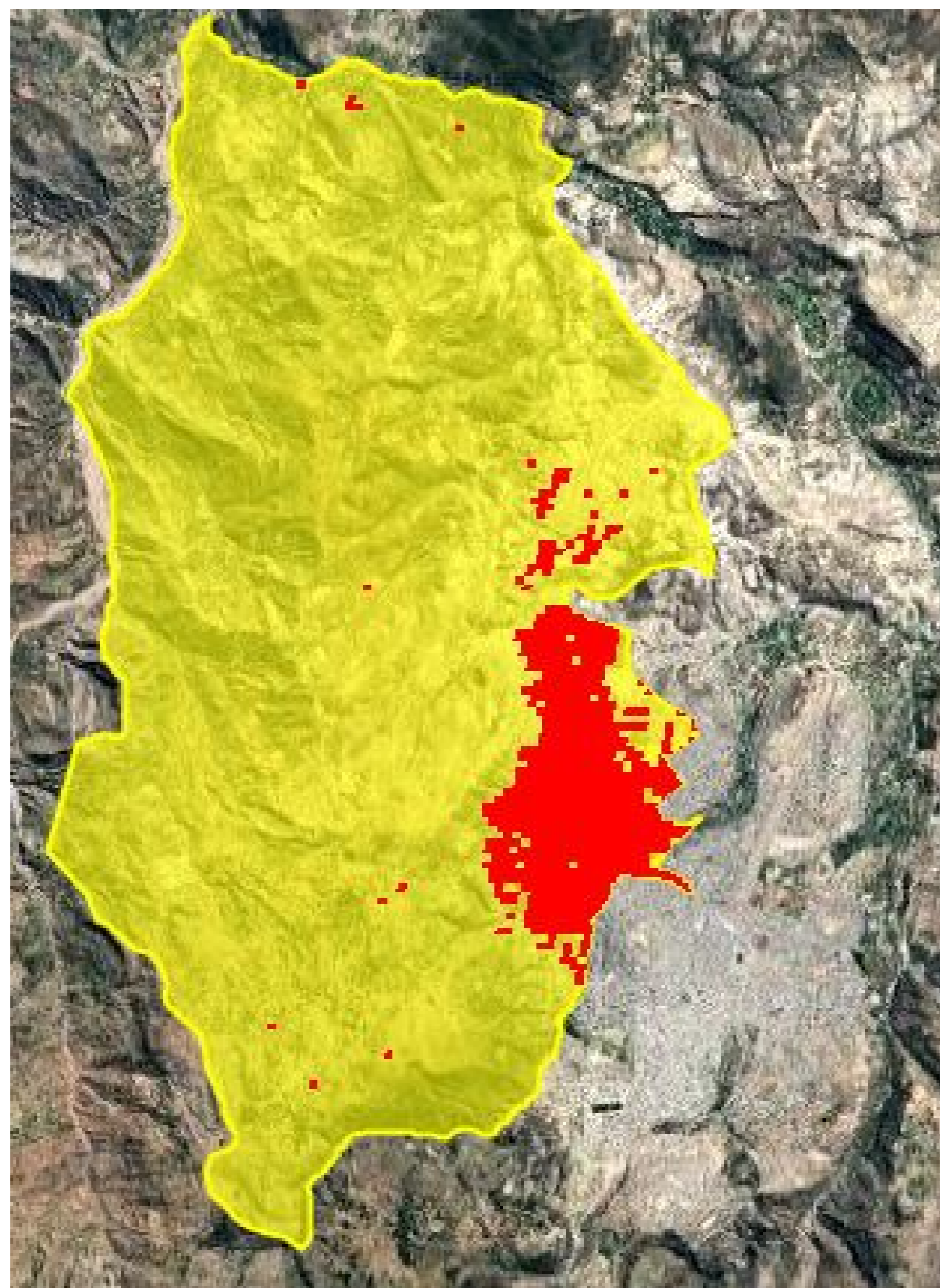


(h) Área construida de 2025

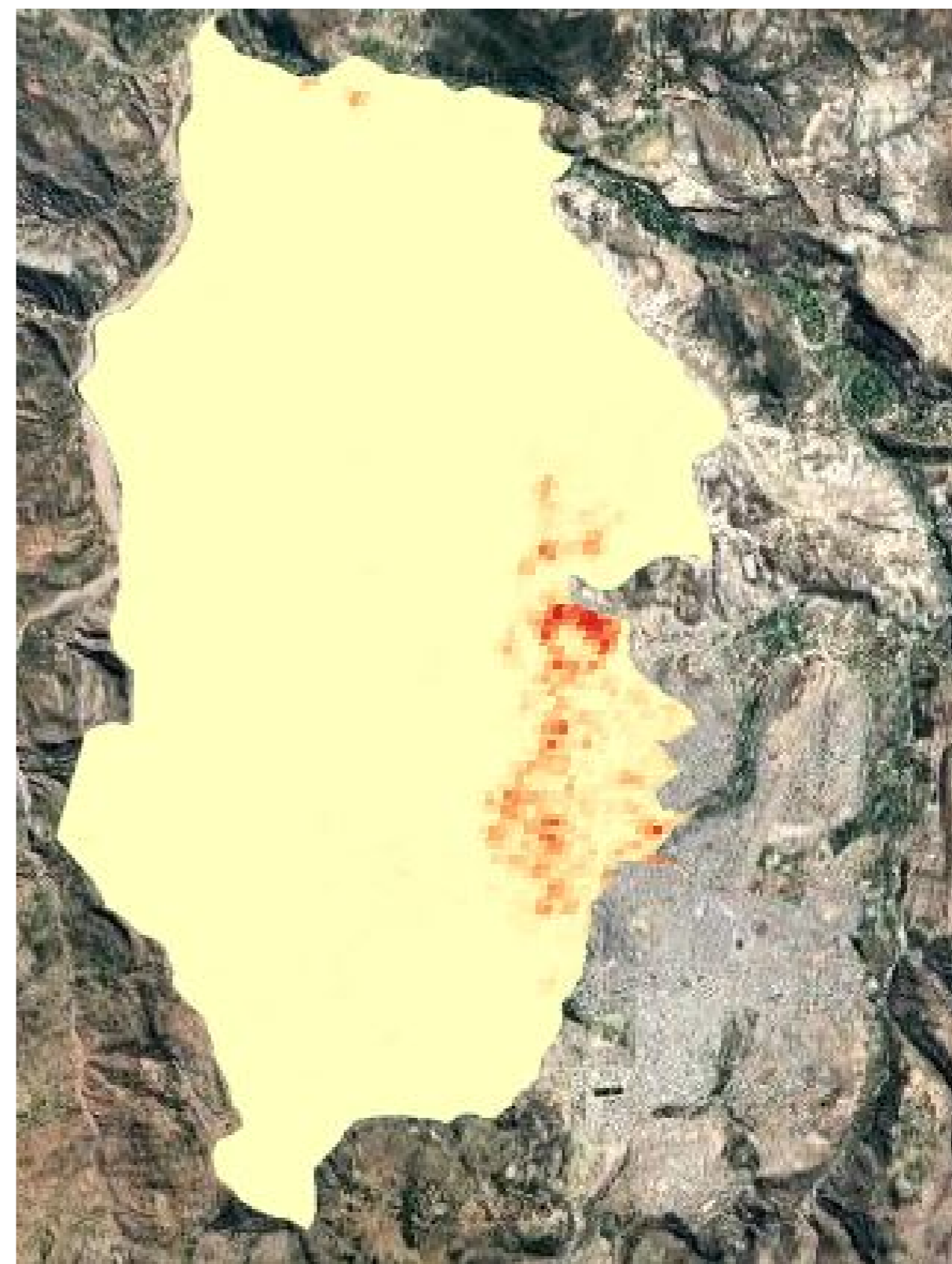
Fuente: Elaboración Propia

Figura 24

Expansión urbana del distrito de Ayacucho de 1990 a 2025



(a) Expansión urbana de 1990 a 2025



(b) Zonas urbanas 2025

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5 Expansión urbana para el distrito de Carmen alto

Para el distrito de Carmen Alto la expansión urbana con un área de shapefile de 17.33 Km², se cuenta de la siguiente manera

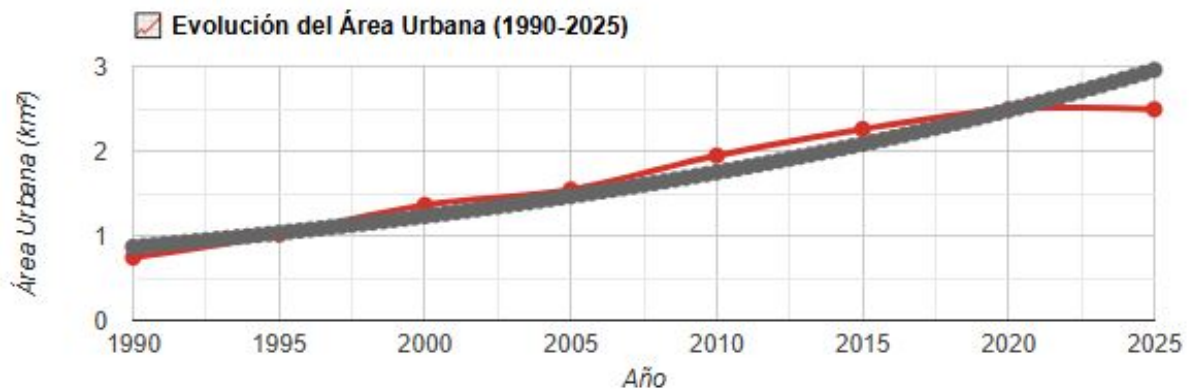
Tabla 8: Evolución de áreas urbanas

Evolución de áreas urbanas	
Año	Área (Km ²)
1990	0.742
1995	1.014
2000	1.363
2005	1.544
2010	1.946
2015	2.258
2020	2.492
2025	2.492

Fuente: Elaboración Propia

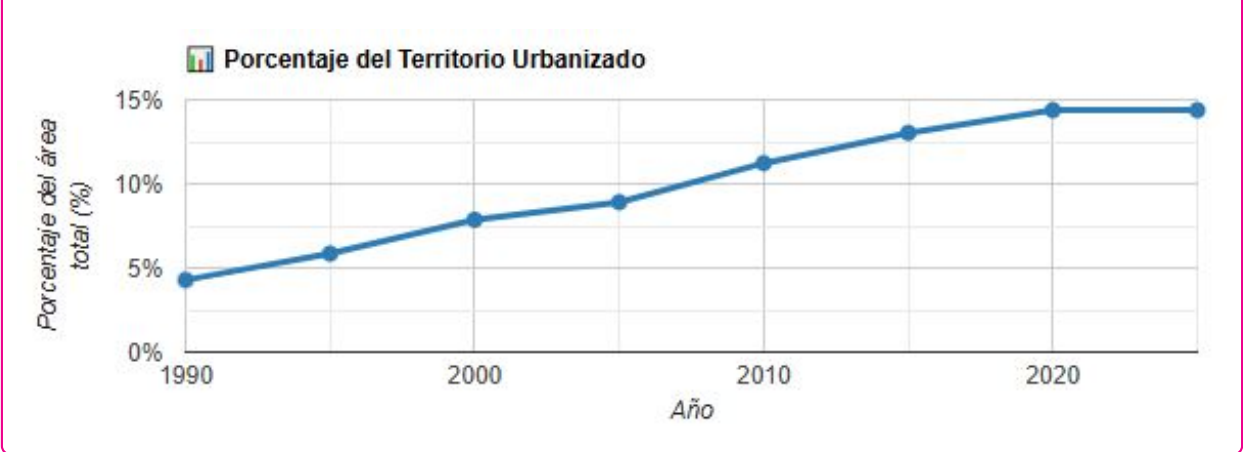
Figura 25

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 26 Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 27 Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 28

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 1995



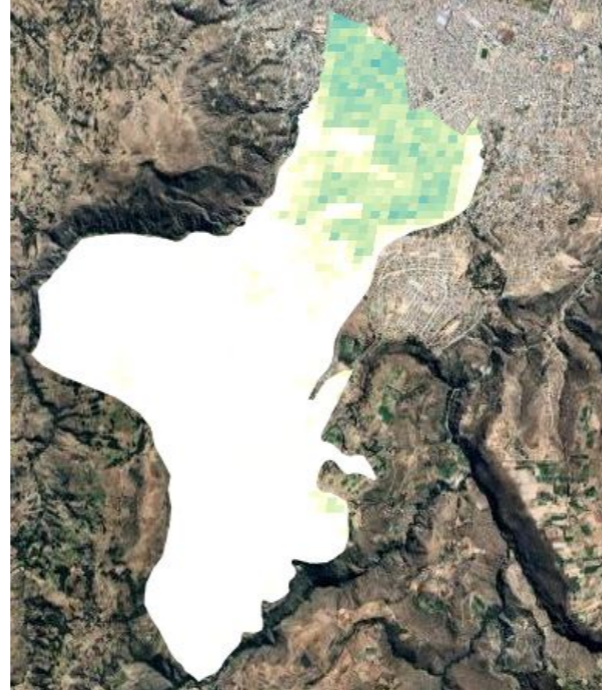
(c) Área construida de 2000



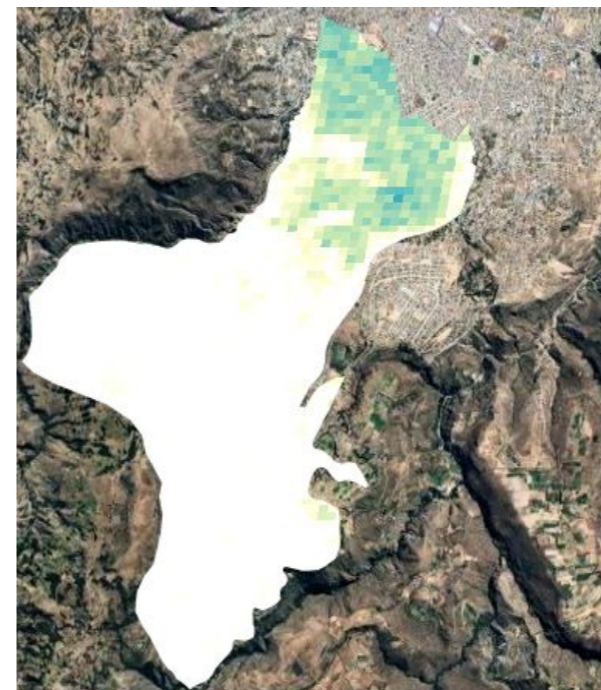
(d) Área construida de 2005



(e) Área construida de 2010



(f) Área construida de 2015



(g) Área construida de 2020

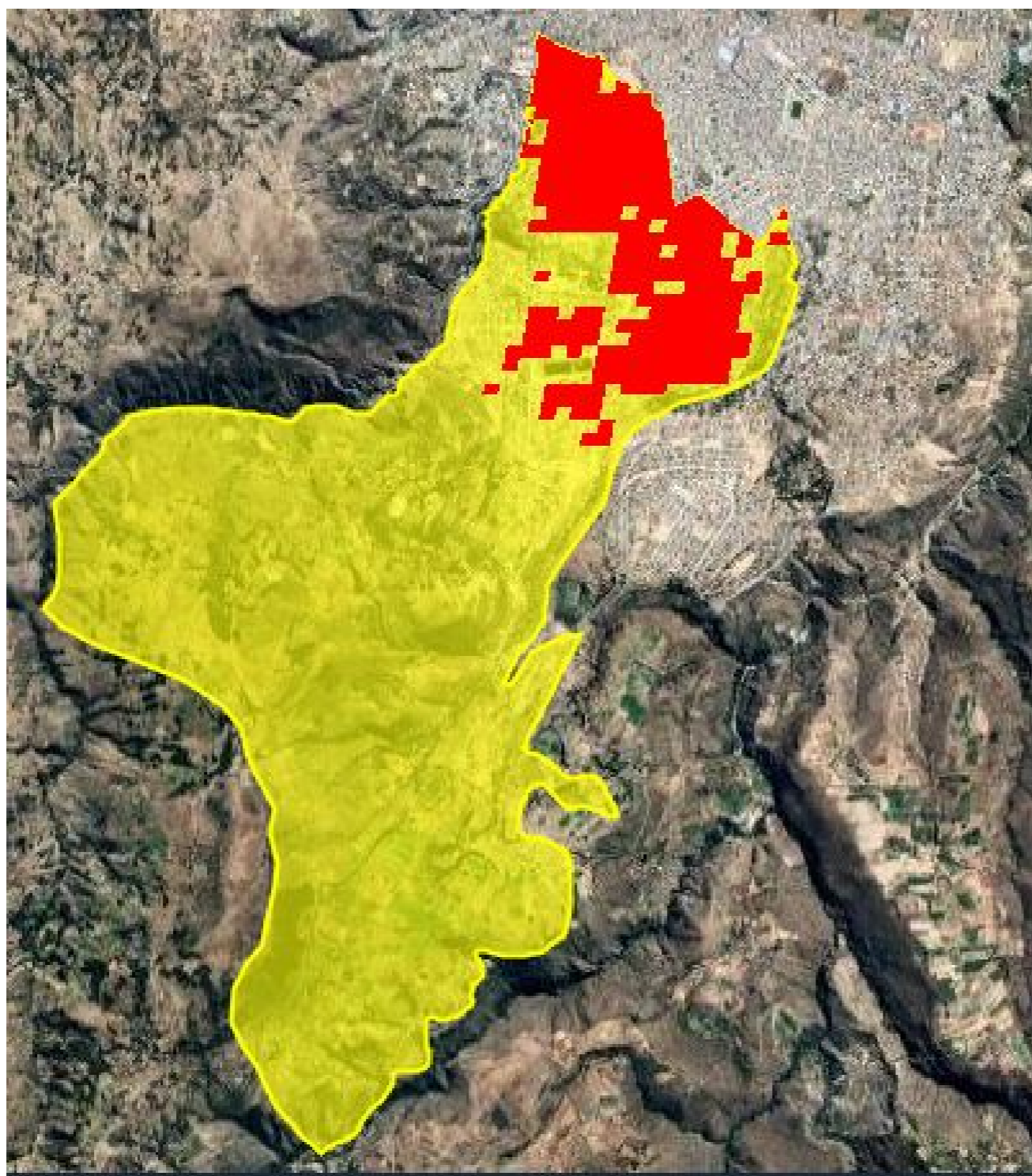


(h) Área construida de 2025

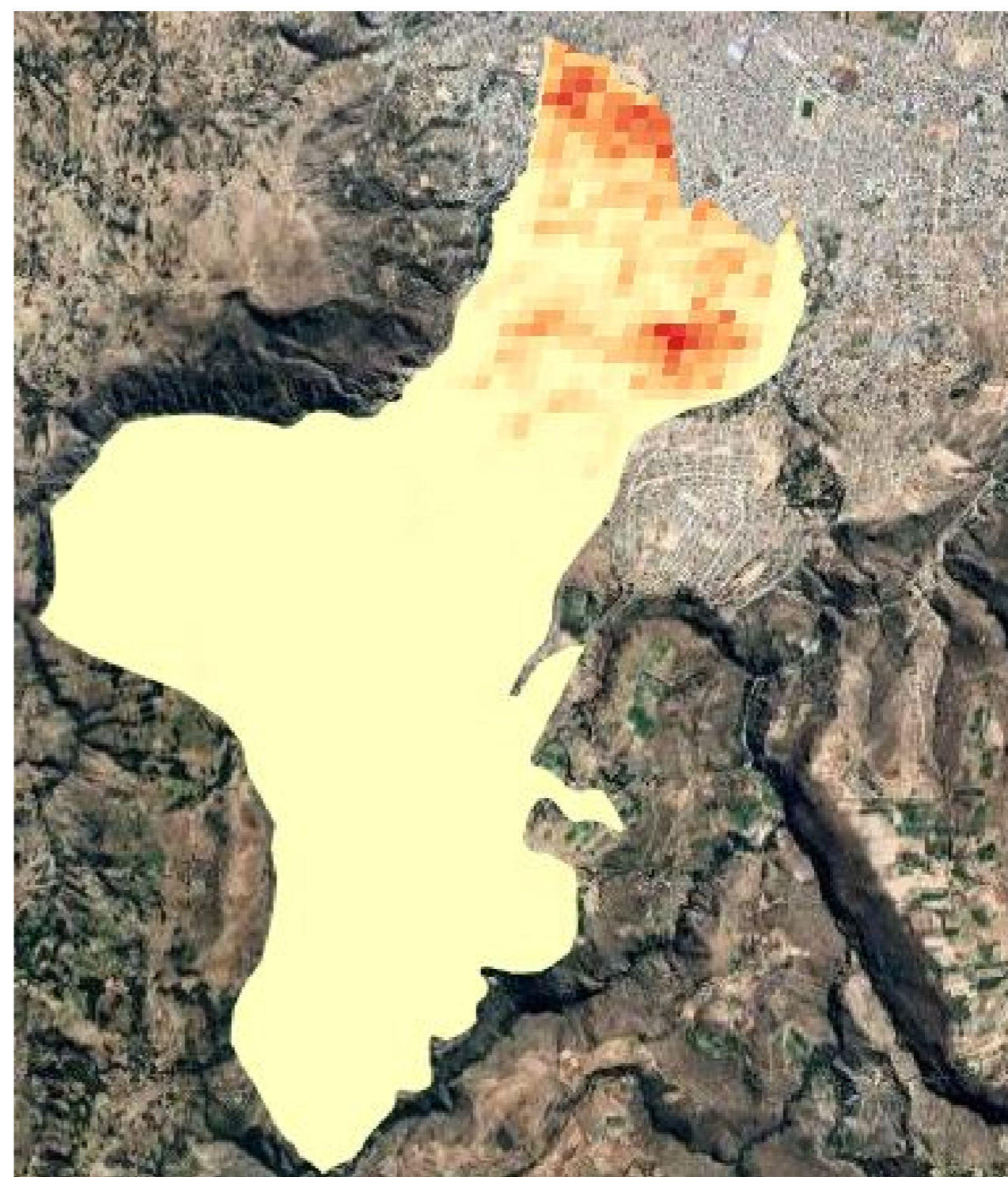
Fuente: Elaboración Propia

Figura 29

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 2025

Fuente: Elaboración Propia

4.1.6 Expansión urbana para el distrito de Jesús de Nazareno

Para el distrito de Jesús de Nazareno para la expansión urbana con un área de shapefile de 15.94 Km², se cuenta de la siguiente manera

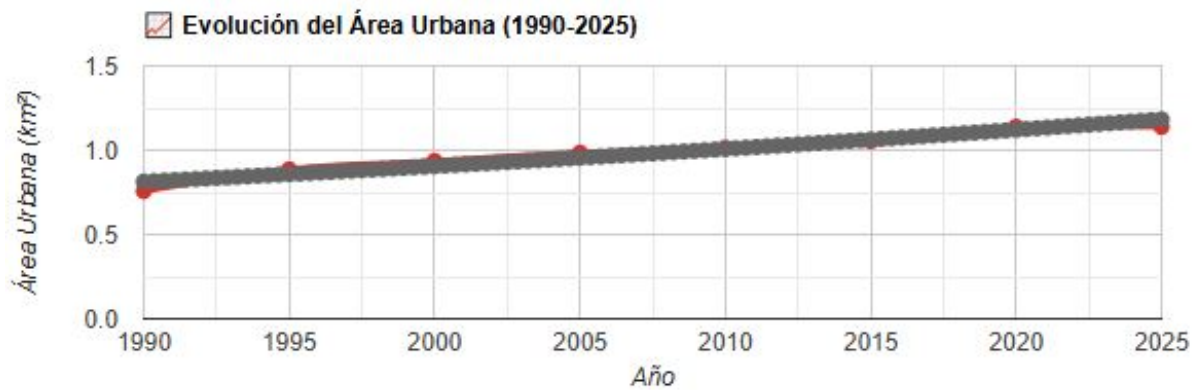
Tabla 9: Evolución de áreas urbanas

Evolución de áreas urbanas	
Año	Área (Km ²)
1990	0.758
1995	0.885
2000	0.935
2005	0.984
2010	1.014
2015	1.054
2020	1.139
2025	1.139

Fuente: Elaboración Propia

Figura 30

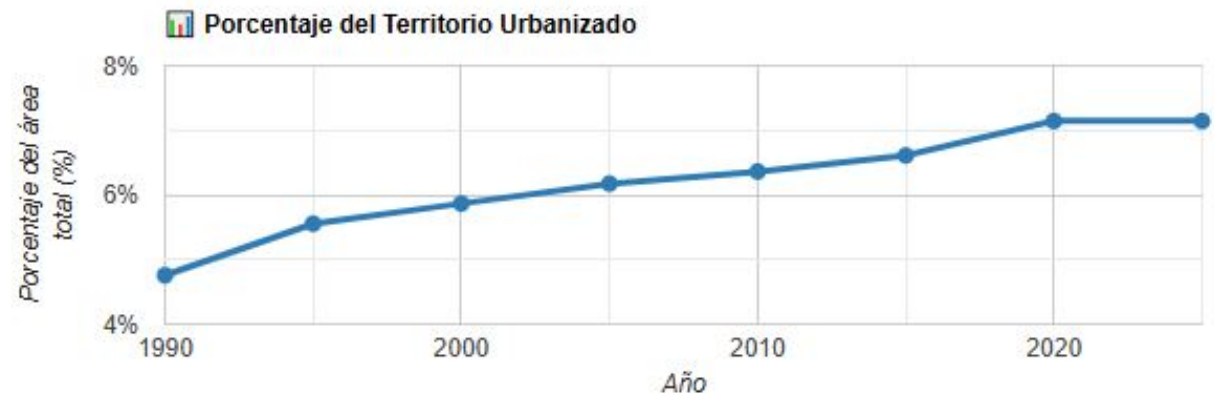
Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 31

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 32

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 33

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 1995



(c) Área construida de 2000



(d) Área construida de 2005



(e) Área construida de 2010



(f) Área construida de 2015



(g) Área construida de 2020

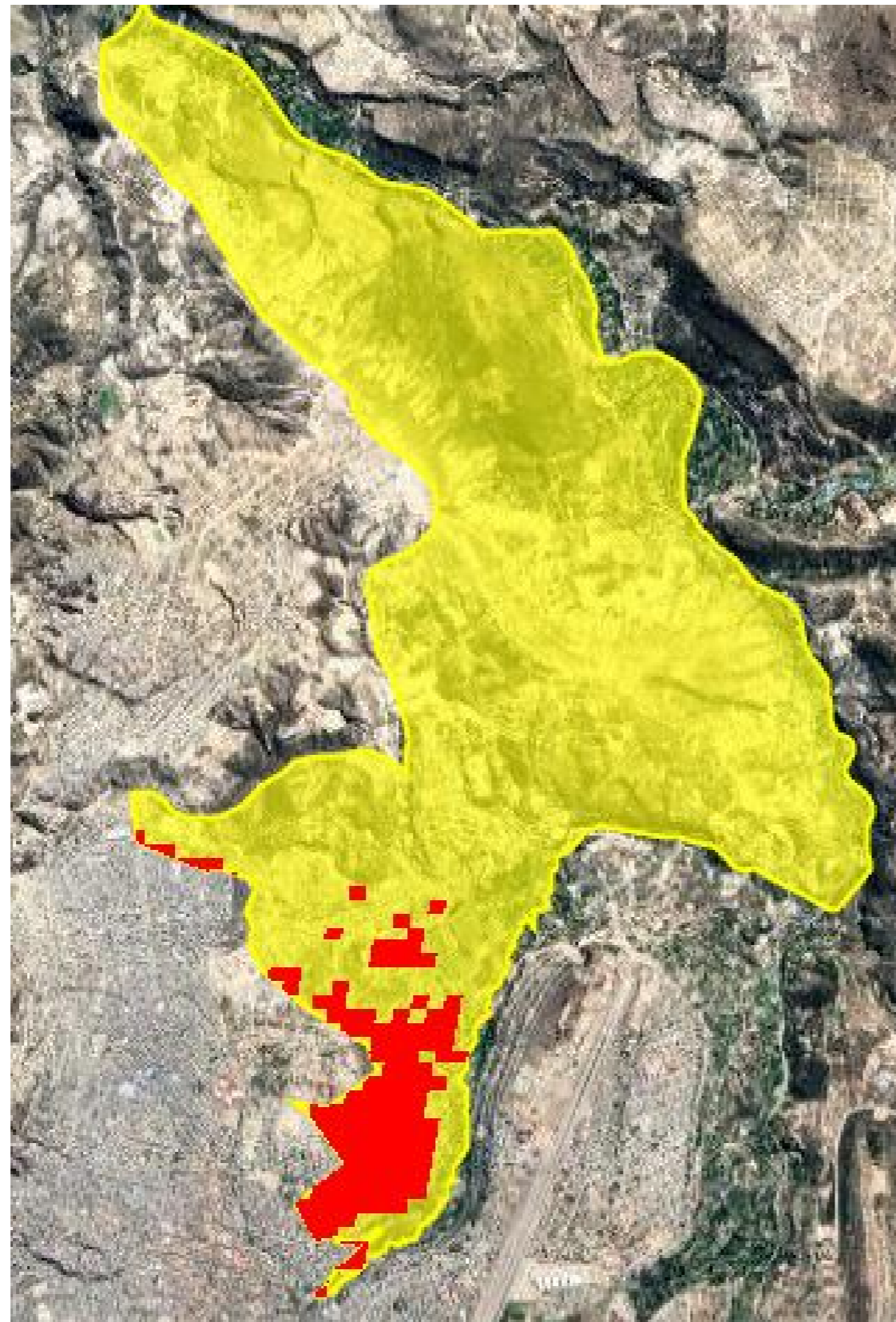


(h) Área construida de 2025

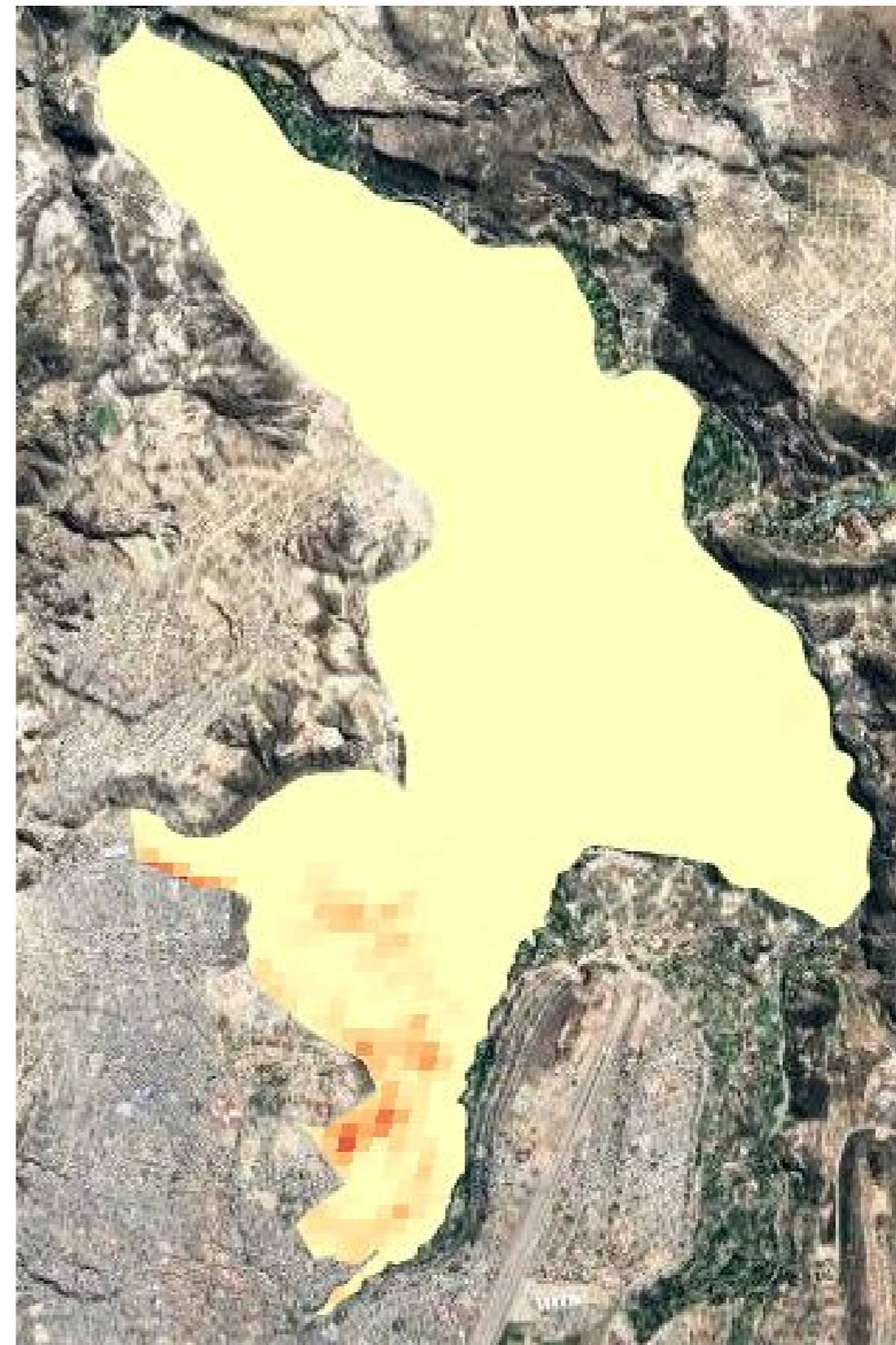
Fuente: Elaboración Propia

Figura 34

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 2025

Fuente: Elaboración Propia

4.1.7 Expansión urbana para el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray

Para el distrito de Andrés Avelino Cáceres Dorregaray para la expansión urbana con un área de shapefile de 9.18 Km², se cuenta de la siguiente manera

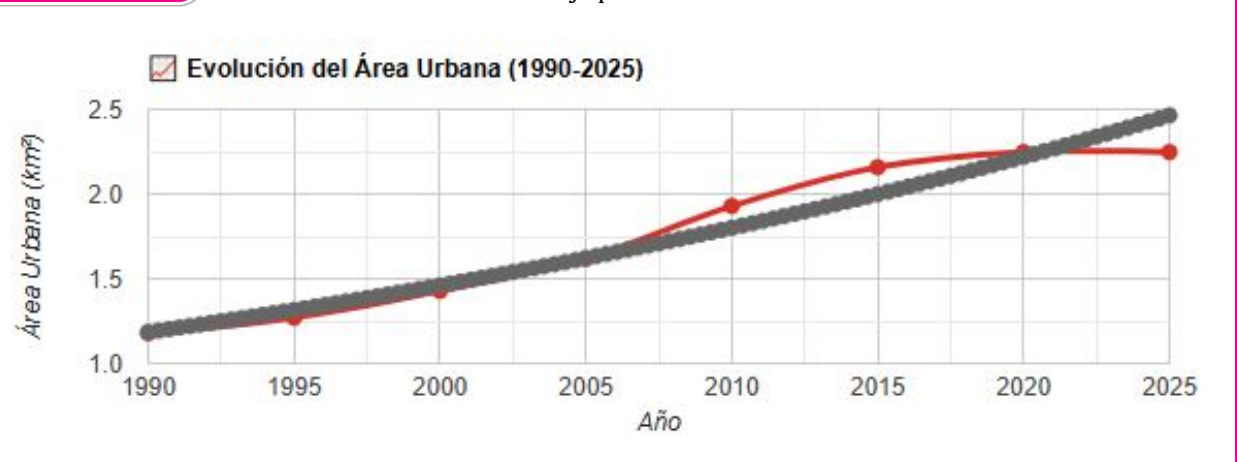
Tabla 10: Evolución de áreas urbanas

Evolución de áreas urbanas	
Año	Área (Km ²)
1990	1.179
1995	1.27
2000	1.428
2005	1.618
2010	1.929
2015	2.158
2020	2.247
2025	2.247

Fuente: Elaboración Propia

Figura 35

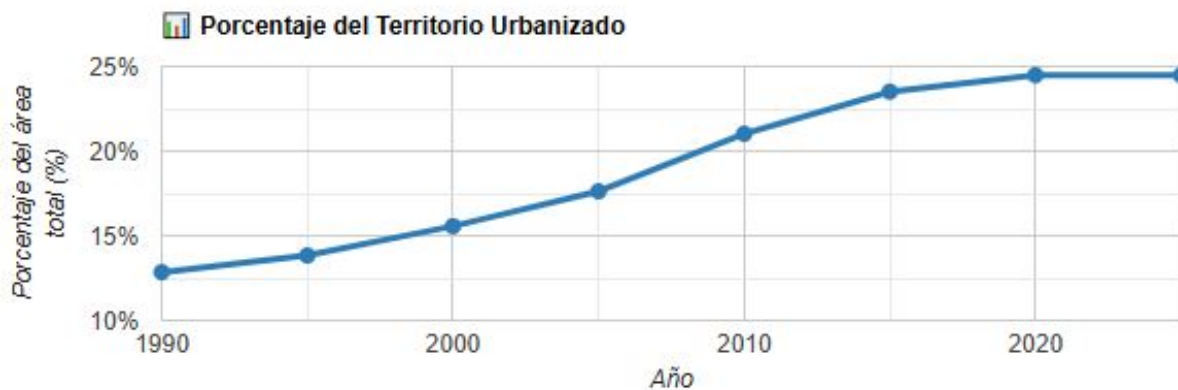
Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 36

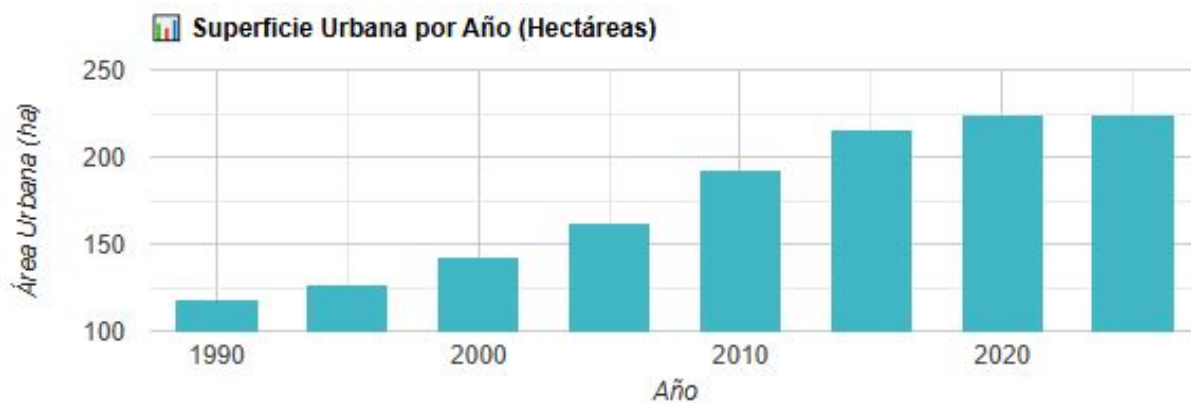
Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 37

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



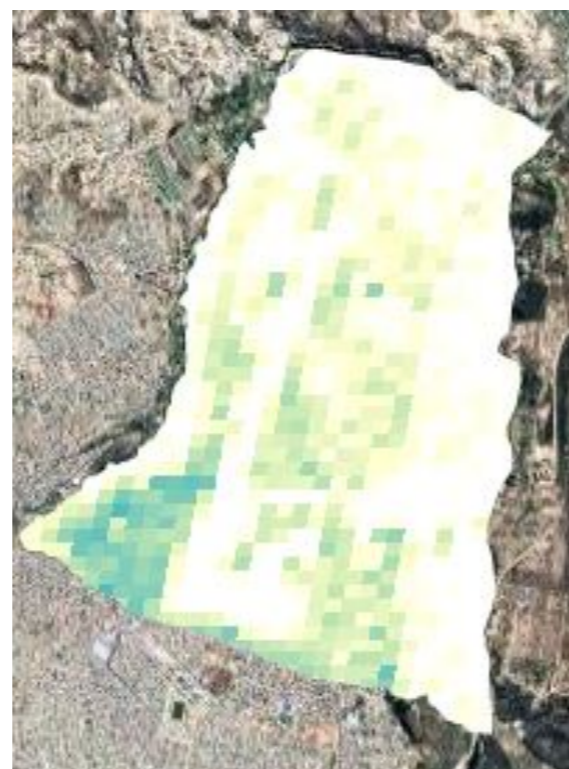
Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 38

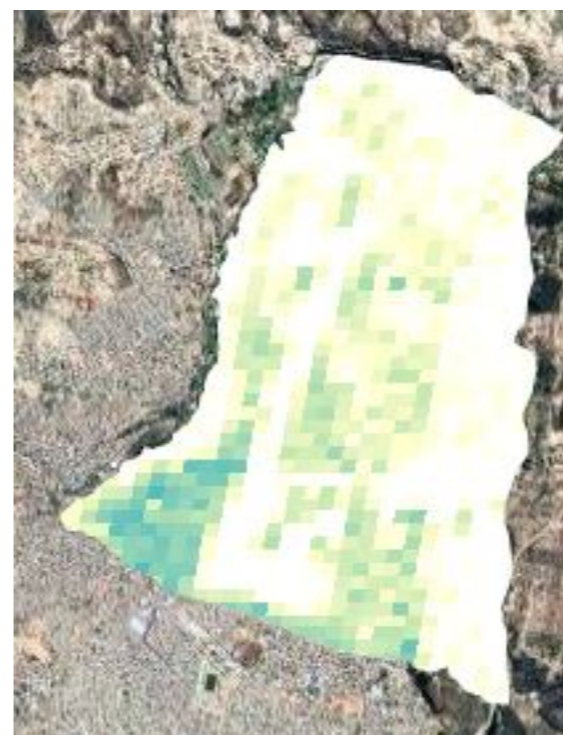
Área construida de 1990 a 2025



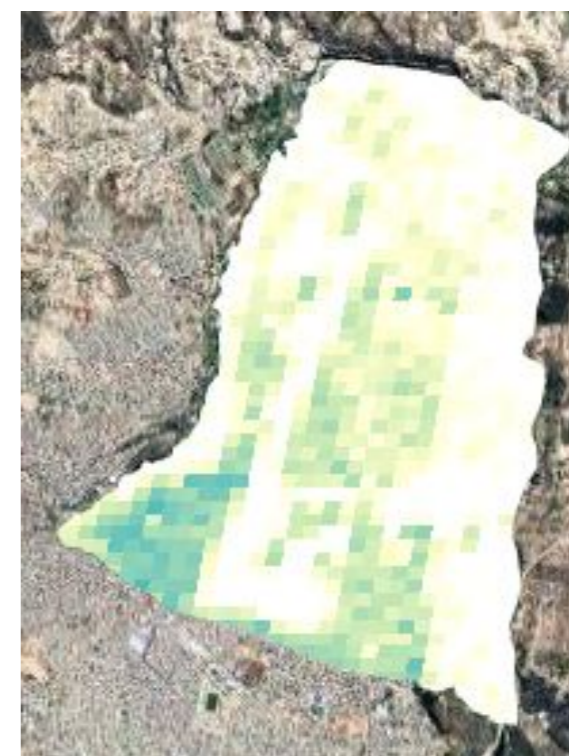
(a) Área construida de 1990



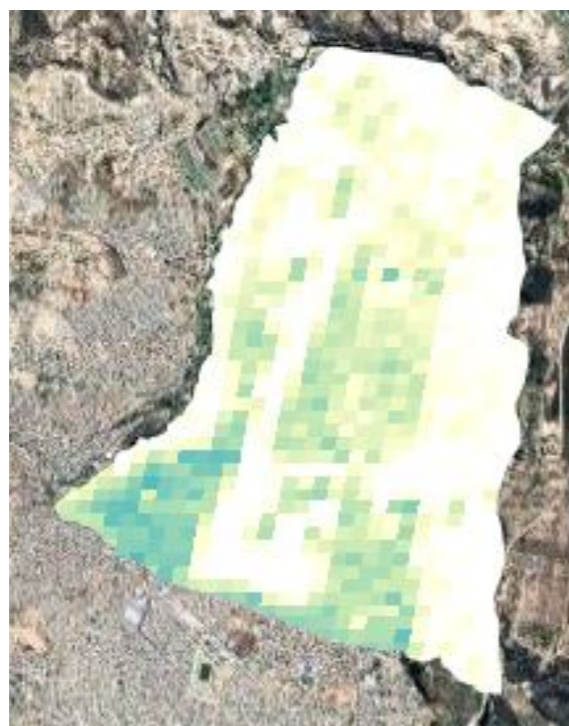
(b) Área construida de 1995



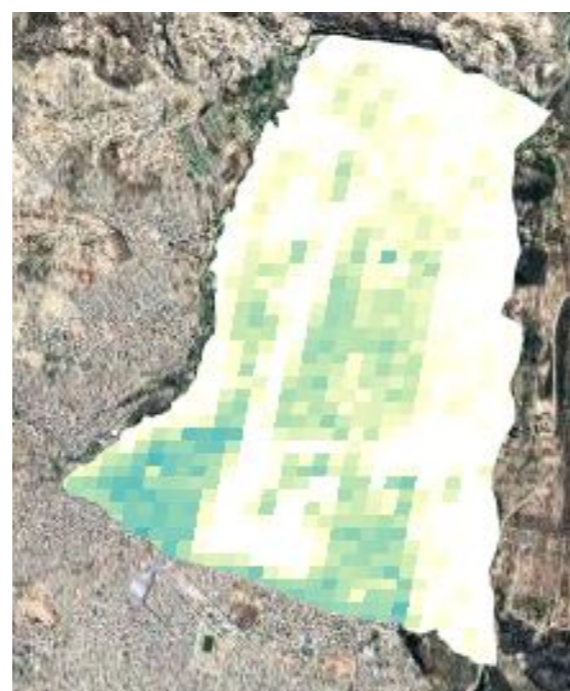
(c) Área construida de 2000



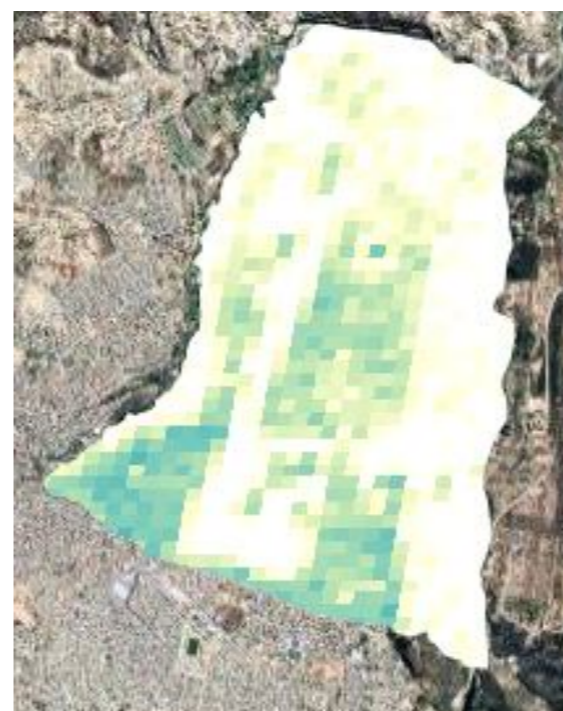
(d) Área construida de 2005



(e) Área construida de 2010



(f) Área construida de 2015



(g) Área construida de 2020

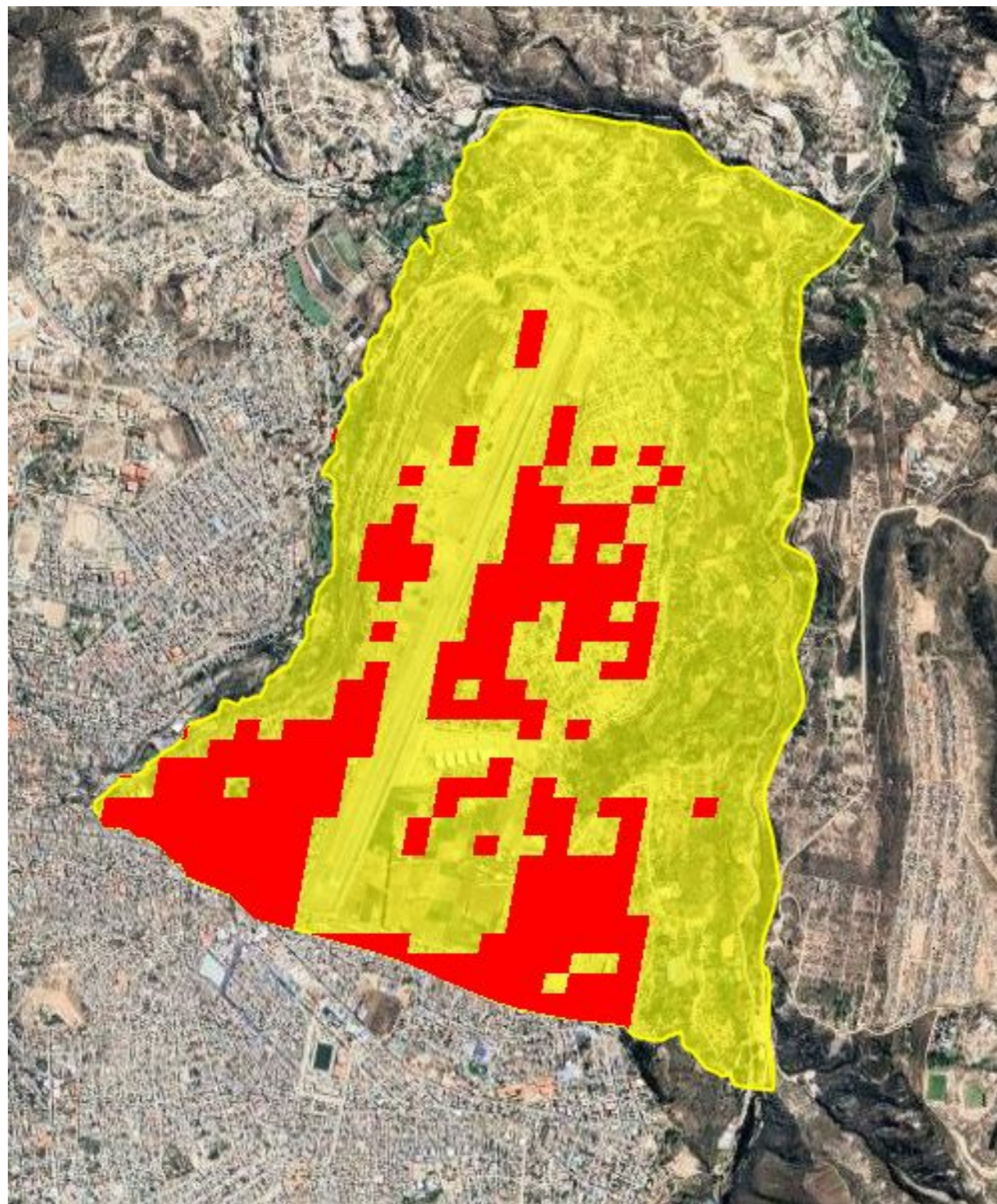


(h) Área construida de 2025

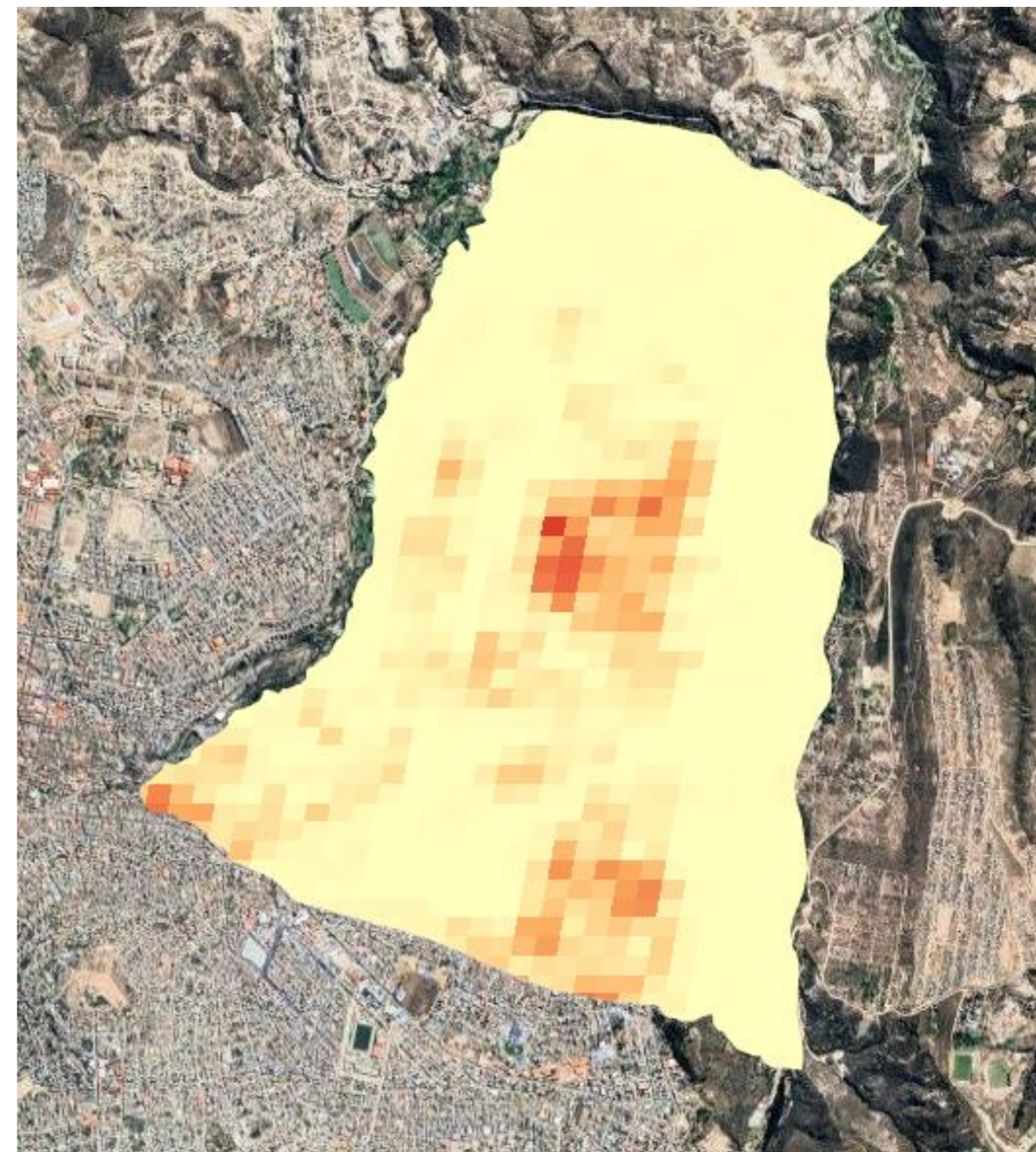
Fuente: Elaboración Propia

Figura 39

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 2025

Fuente: Elaboración Propia

4.1.8 Expansión urbana para el distrito de San Juan Bautista

Para el distrito de San Juan Bautista para la expansión urbana con un área de shapefile de 15.02 Km², se cuenta de la siguiente manera

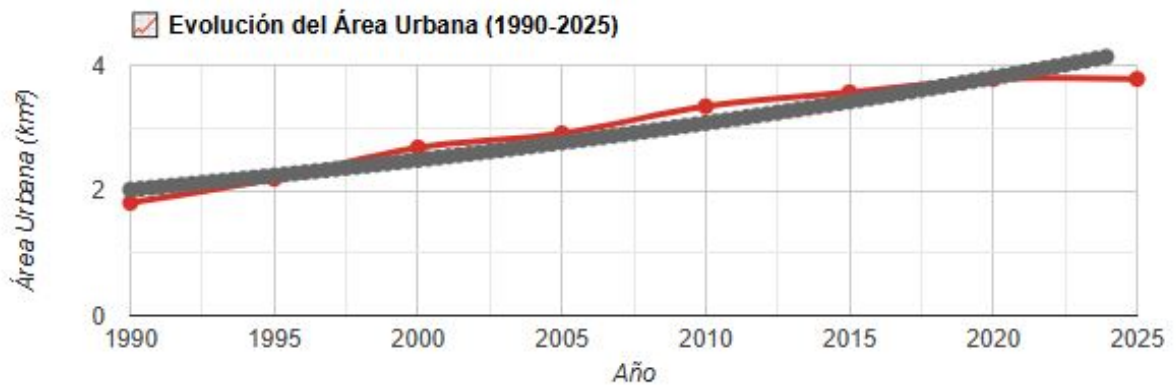
Tabla 11: Evolución de áreas urbanas

Evolución de áreas urbanas	
Año	Área (Km ²)
1990	1.803
1995	2.187
2000	2.684
2005	2.91
2010	3.342
2015	3.567
2020	3.78
2025	3.78

Fuente: Elaboración Propia

Figura 40

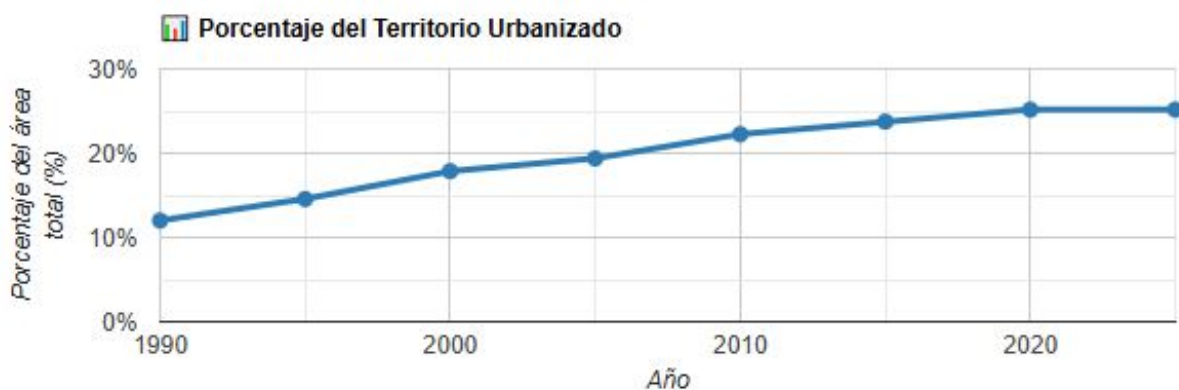
Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboración Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 41

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 42

Delimitación del área de trabajo para Obtención de DATA SET en formato Ráster



Fuente: Elaboracion Propia de la USGS EARTH EXPLORER

Figura 43

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 1995



(c) Área construida de 2000



(d) Área construida de 2005



(e) Área construida de 2010



(f) Área construida de 2015



(g) Área construida de 2020

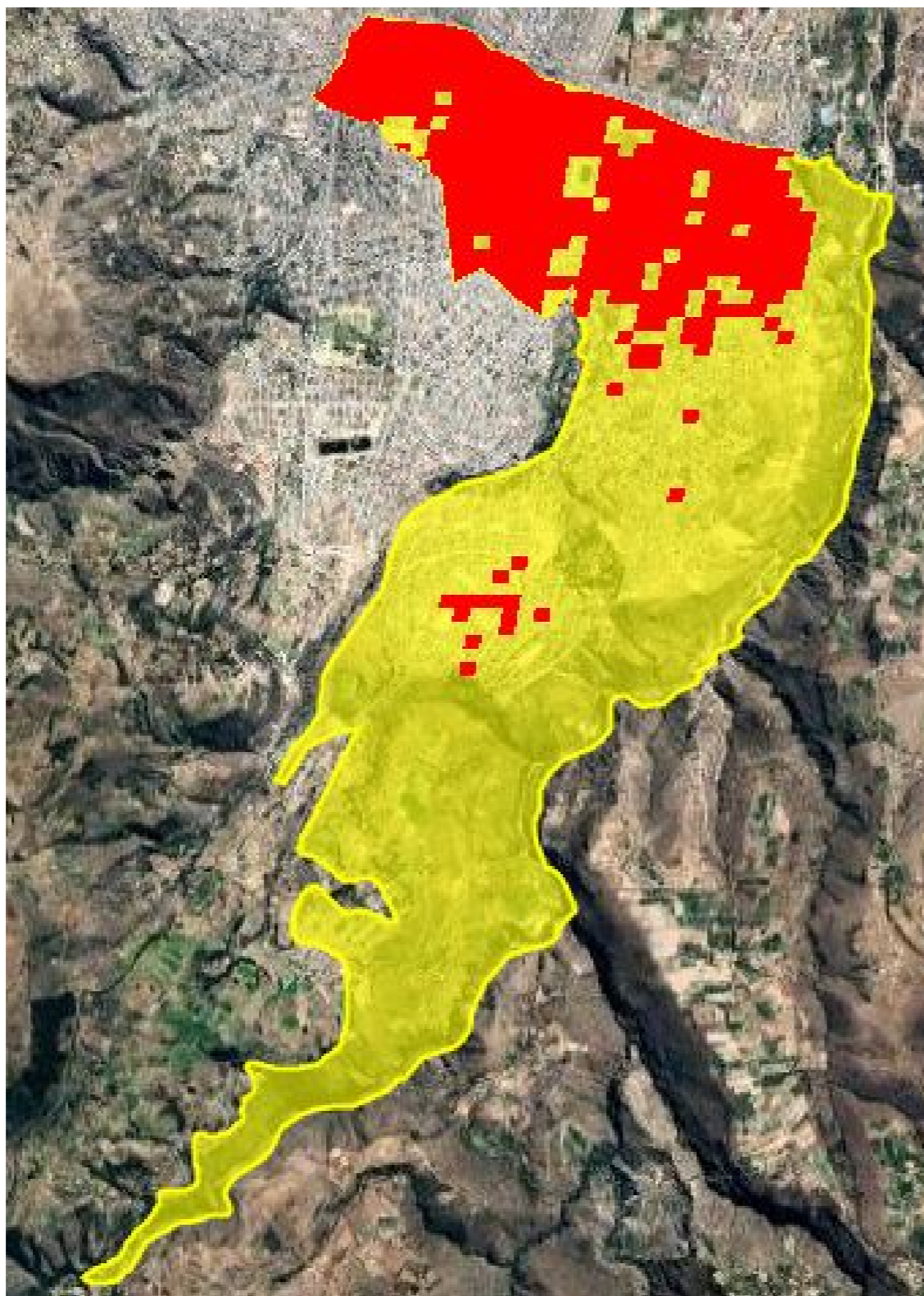


(h) Área construida de 2025

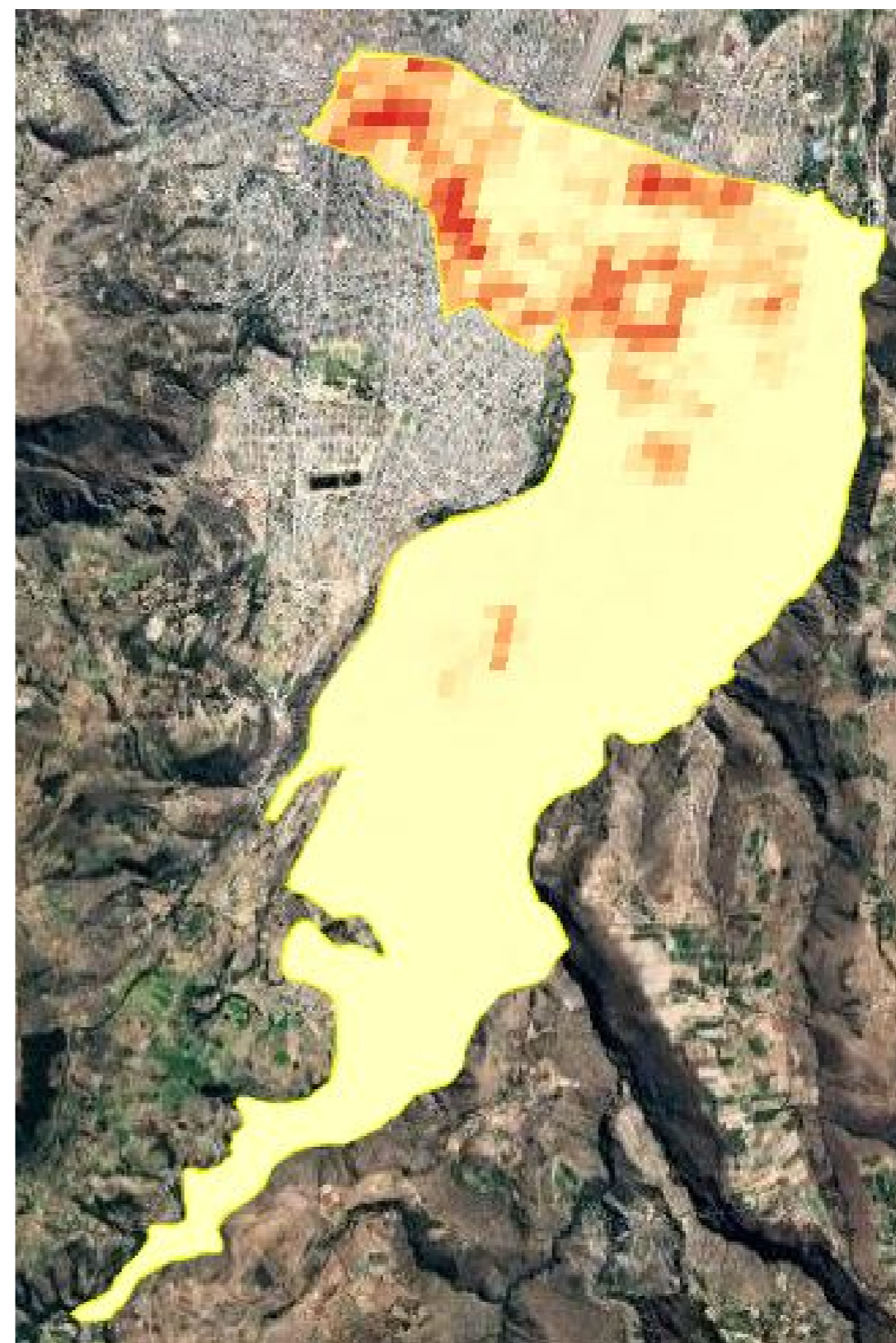
Fuente: Elaboración Propia

Figura 44

Área construida de 1990 a 2025



(a) Área construida de 1990



(b) Área construida de 2025

Fuente: Elaboración Propia

4.1.9 Cambios de uso y coberturas de suelo (LULC)

Para el análisis de cambios y usos de suelo se realizó la simbología de cada clase caracterizando a cada uso de suelo como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 12: Cambios de LULC de 1990 al 2022

Simbología de LULC	
Clase 1	Cultivo temporal
Clase 2	Bosque cerrado siempreverde
Clase 3	Bosque cerrado caducifolio
Clase 4	Matorral
Clase 5	Pastizal
Clase 6	Vegetacion escasa
Clase 7	Llanura inundable
Clase 8	Superficies impermeables
Clase 9	Areas esteriles
Clase 10	Bosque abierto siempre verde
Clase 11	Bosque abiertocaducifolio
Clase 12	Bosque abierto coniferas
Clase 13	Bosque abierto mixto
Clase 14	Bosque mixto abierto
Clase 15	Liquenes musgos
Clase 16	Bosque cerrado coniferas
Clase 17	Marsh

Fuente: Elaboración Propia

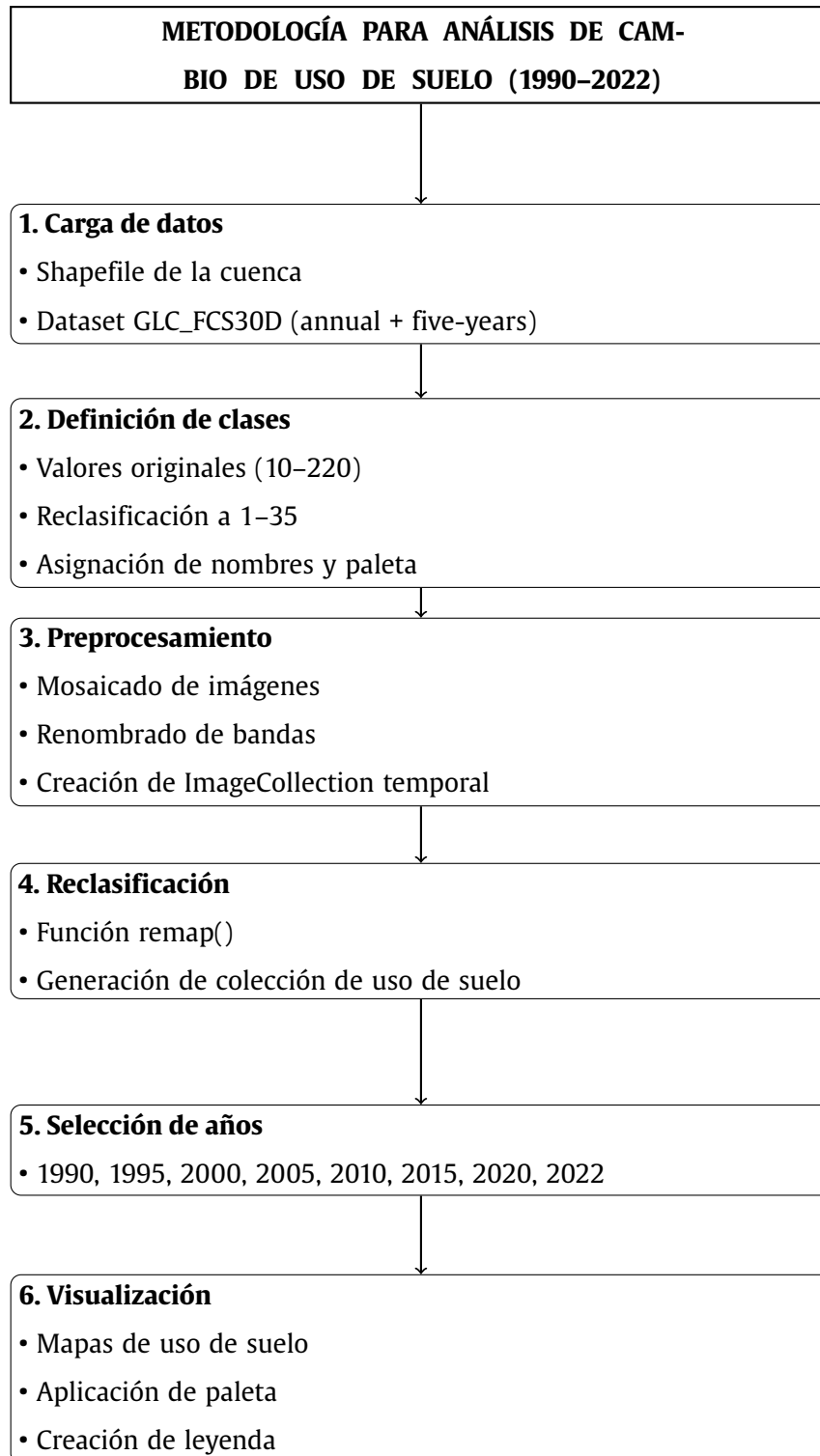
4.1.10 Metodología para cambios de (LULC)

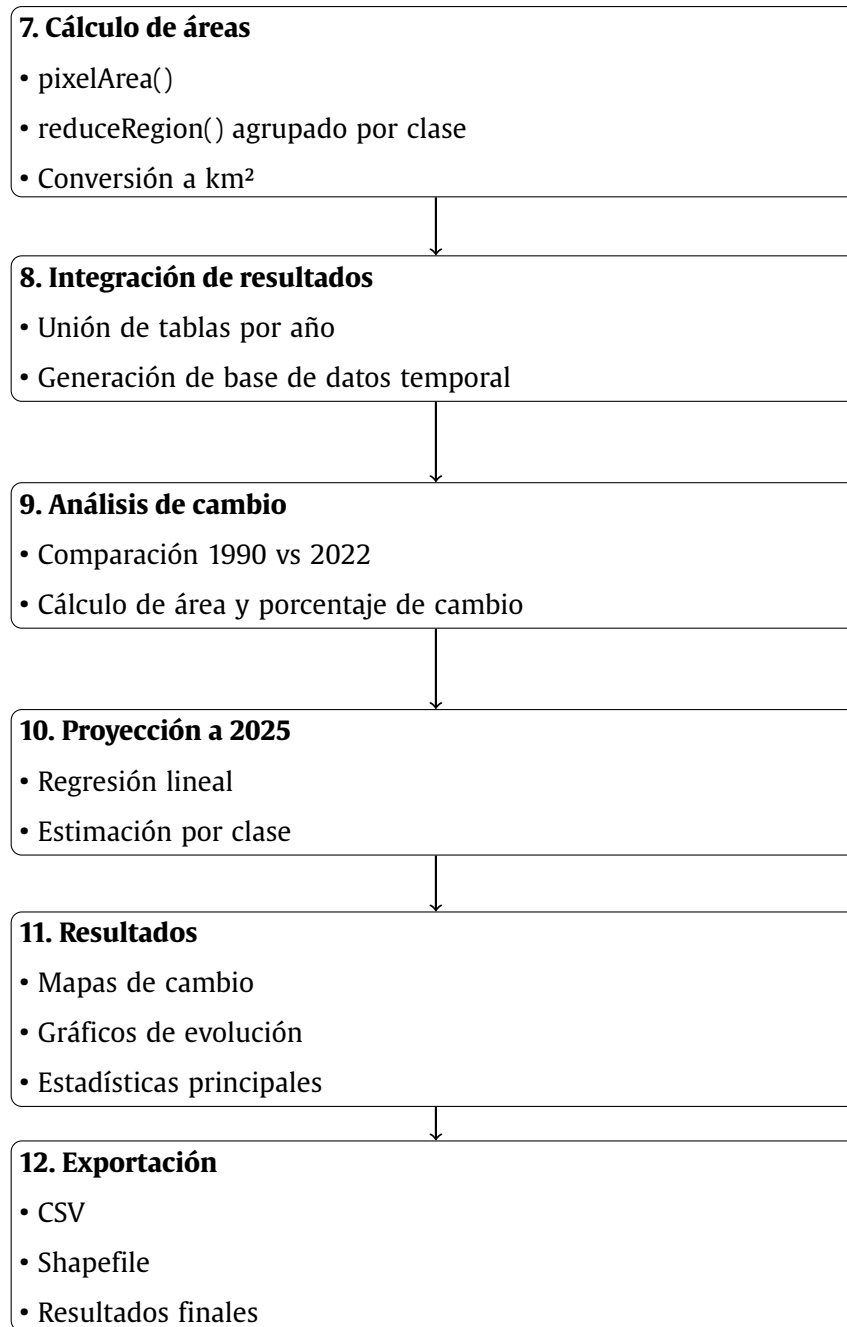
La metodología implementada para el análisis de cambio de uso de suelo en la cuenca de Ayacucho se estructuró en ocho fases principales. Primero, se cargó el shapefile del área de estudio y el dataset GLC_FCS30D (Global Land Cover Fine Classification System at 30m), que proporciona mapas de cobertura con 35 clases temáticas y resolución espacial de 30 metros, disponibles en formatos anual (2000-2022) y quinquenal (1985-2015). Segundo, se realizó el preprocesamiento de las imágenes, que incluyó el mosaicado de colecciones, el renombrado de bandas por año y la unificación en una sola ImageCollection con cobertura temporal continua. Tercero, se aplicó un remapeo de clases mediante la función `remap()`, transformando los valores originales no consecutivos (10, 11, 12, 20, ...) en una secuencia numérica de 1 a 35 para facilitar el procesamiento y la visualización. Cuarto,

se extrajeron imágenes correspondientes a los años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2022, seleccionados para representar intervalos quinquenales que permiten detectar tendencias de cambio sin el ruido de variaciones interanuales. Quinto, se calcularon las áreas por cada clase de uso de suelo utilizando `ee.Image.pixelArea()` para determinar el área real de cada píxel (900 m²) y `reduceRegion()` con un reducer de suma agrupada por clase, obteniendo resultados en metros cuadrados que posteriormente se convirtieron a kilómetros cuadrados y hectáreas. Sexto, se realizó el análisis de cambio mediante la comparación binaria `neq()` entre las clasificaciones de 1990 y 2022, generando un mapa de zonas de cambio (rojo) y estabilidad (verde), y calculando el área y porcentaje de territorio que experimentó alguna transición. Séptimo, se desarrollaron proyecciones lineales para 2025 utilizando regresión simple con los datos históricos 1990-2022, asumiendo la continuidad de las tendencias observadas. Octavo, se generaron visualizaciones (mapas temáticos, gráficos de evolución temporal, leyendas interactivas) y se exportaron los resultados en formatos CSV y Shapefile para su posterior análisis en sistemas de información geográfica y software estadístico.

4.1.11 Diagrama de flujo para la metodología de LULC

El diagrama de flujo describe la metodología para analizar el cambio de uso de suelo en una cuenca de Ayacucho entre 1990 y 2022 mediante el uso de datos satelitales. El proceso inicia con la carga de la cuenca y del dataset `GLC_FCS30D`, seguido de la definición y reclasificación de las clases de cobertura. Luego se realiza el preprocesamiento de imágenes y la generación de una colección temporal, a partir de la cual se seleccionan años específicos para el análisis. Posteriormente, se visualizan los mapas con su respectiva leyenda y se calcula el área por cada clase de uso de suelo en km². Con estos resultados se integran datos multitemporales, se evalúan los cambios entre 1990 y 2022 y se estiman tendencias futuras hacia 2025 mediante regresión lineal. Finalmente, se generan mapas, gráficos y estadísticas, que son exportados en diferentes formatos para su análisis y presentación.



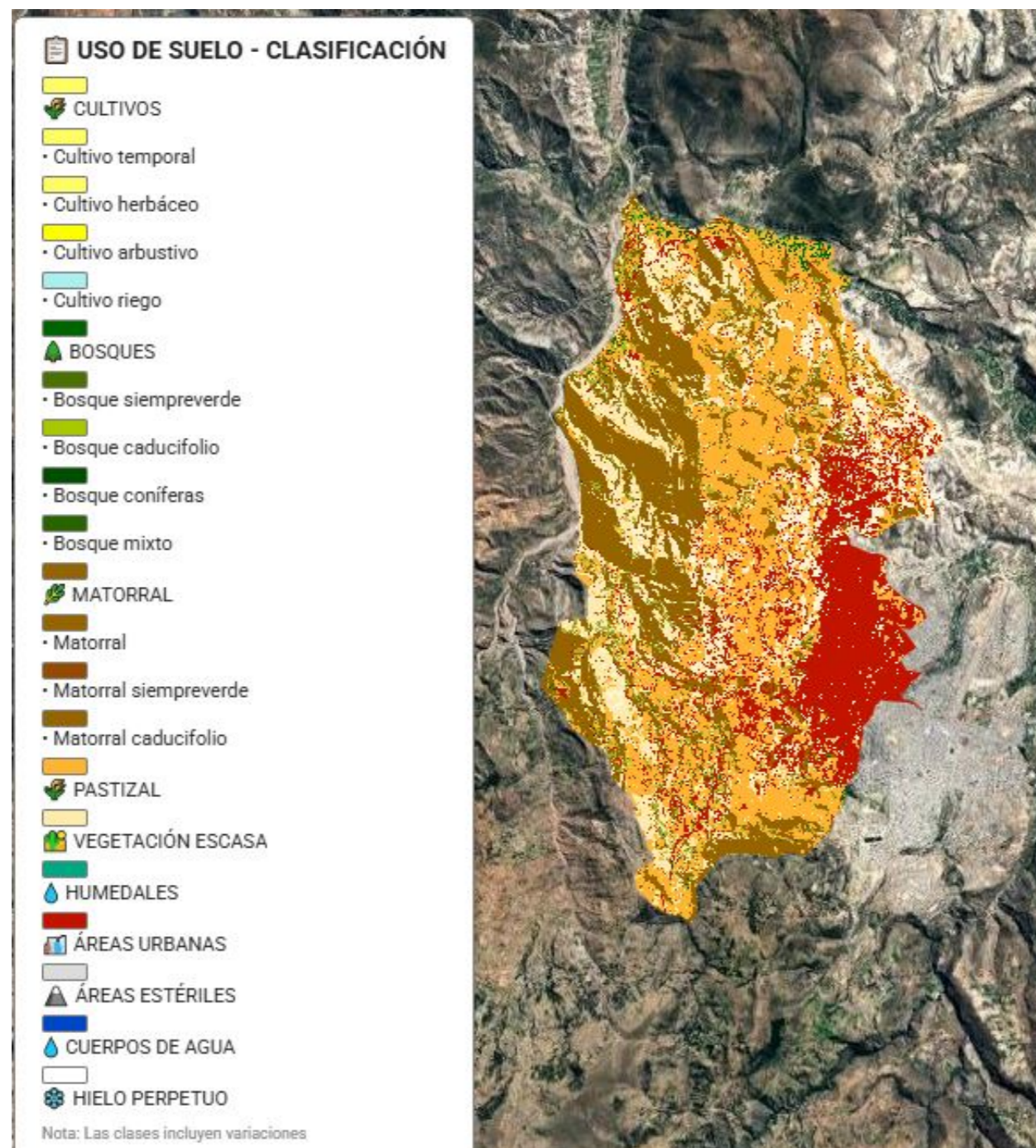


4.1.12 Mapas de cambio y usos de suelos para Ayacucho

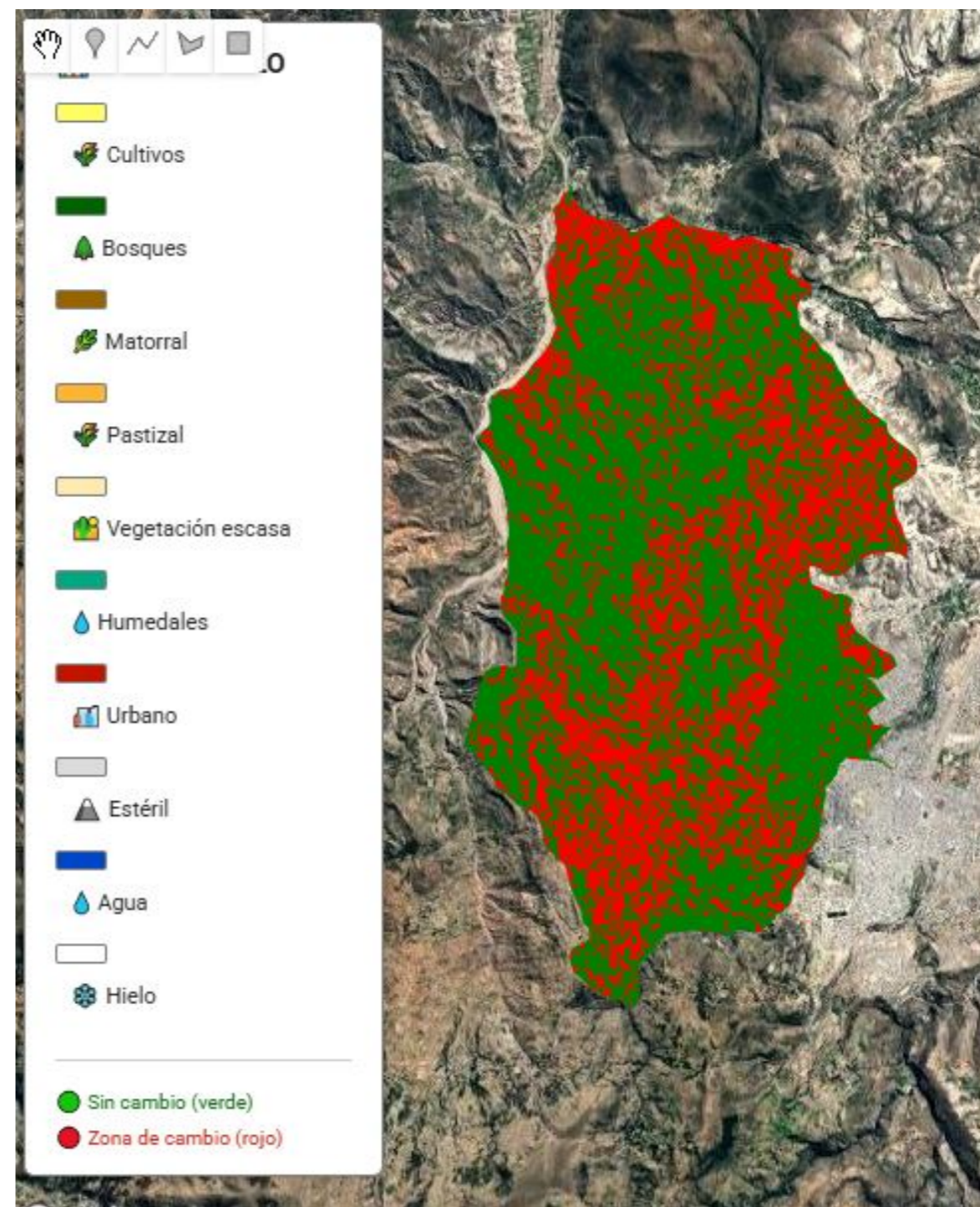
La generación de mapas de cambios de uso de suelo se realizó mediante una metodología basada en la comparación píxel a píxel de clasificaciones temáticas multitemporales en Google Earth Engine con la metodología mencionada anteriormente.

Figura 45

Cambios de usos de suelos



(a) Uso de suelos del 2022

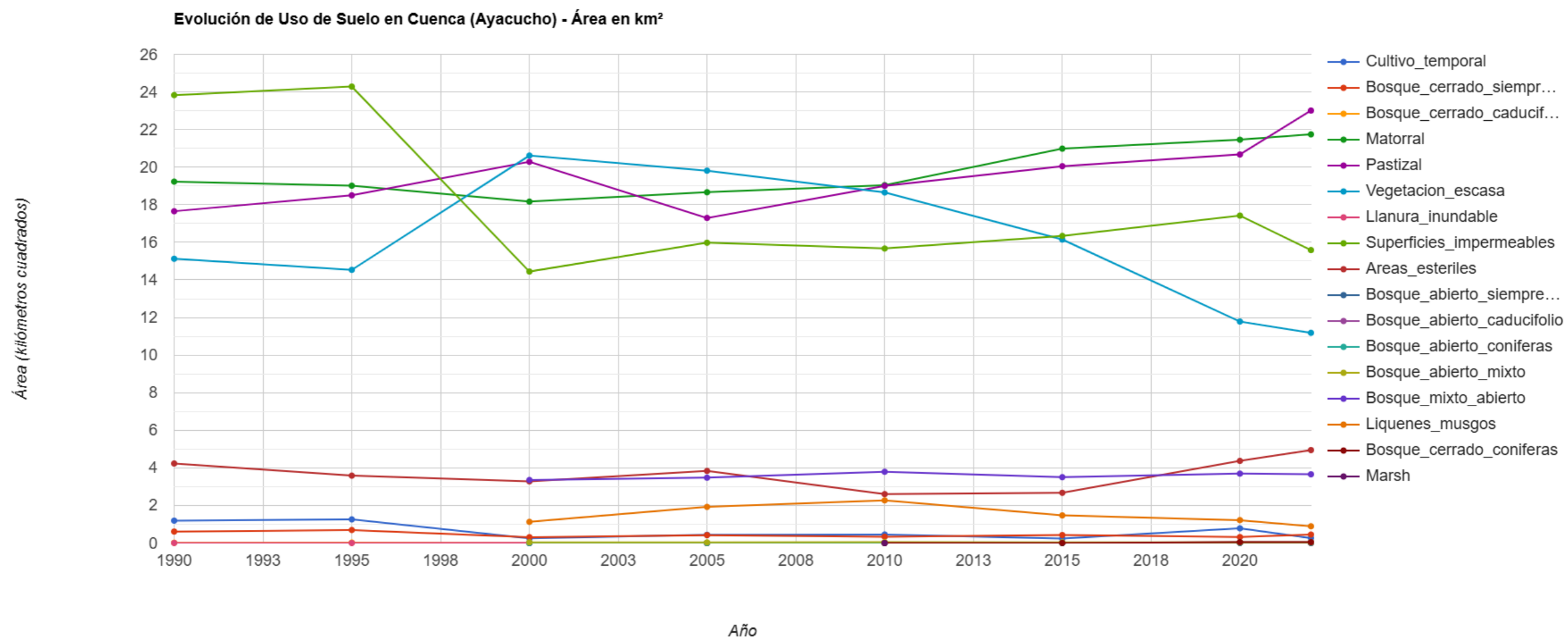


(b) Zona de cambios de 1990 a 2022

Fuente: Elaboración Propia

Figura 46

Evolución de Uso de Suelo en Cuenca (Ayacucho) - Área en km²



Fuente: Elaboracion Propia

4.1.13 Tabla de valores de los cambios de LULC

La tabla contiene las áreas en kilómetros cuadrados para cada una de las 17 clases de uso de suelo en los años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2022. Para interpretar correctamente estos datos, se debe organizar la información por clase y analizar su evolución temporal. Cada fila de la tabla representa el área de una clase específica en un año determinado, permitiendo calcular el cambio absoluto (diferencia entre dos años) y el cambio relativo (porcentaje de variación respecto al año base).

Tabla 13: Cambios de LULC de 1990 al 2022

LULC/Año	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022
Clase 1	1.19	1.258	0.244	0.439	0.455	0.234	0.782	0.264
Clase 2	0.609	0.691	0.312	0.422	0.334	0.425	0.317	0.451
Clase 3	0.017	0.027	0.004	0.002	0.001	0.003	0.006	0.009
Clase 4	19.228	19.01	18.164	18.663	19.041	20.982	21.457	21.744
Clase 5	17.652	18.499	20.283	17.295	19.002	20.05	20.672	23.009
Clase 6	15.126	14.532	20.615	19.812	18.653	16.146	11.784	11.184
Clase 7	0.003	0.001	0.008	0.003	0.005	0.004	0.011	0.004
Clase 8	23.831	24.284	14.445	15.978	15.669	16.339	17.419	15.584
Clase 9	4.231	3.585	3.282	3.835	2.603	2.672	4.369	4.945
Clase 10			0.002	0.003	0.003	0.004	0.007	0.005
Clase 11			0.008	0.004	0.006	0.004	0.04	0.036
Clase 12			0.002	0.001	0.001	0.003	0.026	0.021
Clase 13			0.039	0.033	0.049	0.041	0.038	0.038
Clase 14			3.354	3.476	3.791	3.504	3.692	3.657
Clase 15			1.125	1.923	2.27	1.47	1.218	0.89
Clase 16					0.003	0.005	0.049	0.046
Clase 17					0.001			

Fuente: Elaboración Propia

“La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, mientras que la imaginación no tiene límites.”

— Albert Eisnten

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones

Se cumplieron los objetivos de la siguiente manera:

5.1.1 Conclusión general

1. Para el objetivo general se logró cumplir con el objetivo con la aplicación de la teledetección satelital mediante índices espectrales y análisis multitemporal permitió evaluar el crecimiento de las áreas construidas en el distrito de Ayacucho desde el año de 1990 con un área de 4.035 km², llegando al 2025 con una área de 6.44 km²

5.1.2 Conclusiones específicos

1. Para el objetivo específico 1, El objetivo de determinar la variación temporal del área urbana en el distrito de Ayacucho mediante imágenes satelitales e índices espectrales (NDBI, UI) se cumplió al cuantificar la evolución de la superficie construida entre 1990 y 2025. Los resultados muestran una tendencia de crecimiento progresivo durante tres décadas: el área urbana pasó de 4.035 km² en 1990 a 6.44 km² en 2020, lo que representa un incremento acumulado del 59.6 %. Sin embargo, entre 2020 y 2025 se registró una variación nula (6.44 km² en ambos años), evidenciando una estabilización del crecimiento urbano en el último quinquenio. Esta interrupción en la expansión superficial sugiere que, para el año 2025, los índices espectrales como NDBI y UI detectarían procesos de densificación urbana (crecimiento vertical o relleno de vacíos) en lugar de expansión horizontal, fenómeno que no se refleja únicamente en el aumento de área construida. Por lo tanto, se concluye que la variación temporal del área urbana no fue continua ni uniforme, presentando una fase de crecimiento sostenido (1990-2020) seguida de una fase de estancamiento aparente (2020-2025).
2. El análisis de la relación entre los cambios de usos de suelo y la expansión urbana en el Distrito de Ayacucho entre 1990 y 2022 revela una dinámica territorial compleja que no se ajusta a un modelo clásico de crecimiento urbano progresivo. Las superficies impermeables (Clase 8), que representan el área urbana construida, mostraron una disminución neta del 34.6 % en el período analizado, pasando de 23.831 km² (1990) a 15.584 km² (2022). Este comportamiento contradictorio sugiere que no hubo una expansión urbana continua, sino

más bien una posible reclasificación de coberturas, errores en la interpretación de imágenes satelitales o procesos de reversión de usos urbanos a otras categorías.

En paralelo, los cambios en los usos de suelo evidencian las siguientes tendencias significativas:

Pérdida de vegetación escasa (Clase 6): Disminuyó de 15.126 km² a 11.184 km² (-26.1 %), lo que indica una transformación hacia otros usos.

Incremento de pastizales (Clase 5): Aumentó de 17.652 km² a 23.009 km² (+30.3 %), convirtiéndose en la cobertura dominante hacia 2022.

Incremento de matorrales (Clase 4): Creció de 19.228 km² a 21.744 km² (+13.1 %), consolidándose como una cobertura estable.

Reducción de cultivos temporales (Clase 1): Disminuyó drásticamente de 1.19 km² a 0.264 km² (-77.8 %), evidenciando el abandono de actividades agrícolas.

Relación encontrada: No se observa una relación directa entre la expansión de superficies impermeables y la pérdida de coberturas vegetales o agrícolas, dado que el área urbana no creció sino que se redujo. Sin embargo, sí se identifica una transición de usos de suelo: las áreas de vegetación escasa y cultivos temporales han sido reemplazadas principalmente por pastizales y matorrales, lo que sugiere un proceso de sucesión ecológica o cambio en las prácticas de manejo del territorio, más que una urbanización acelerada.

Se concluye que, para el Distrito de Ayacucho entre 1990 y 2022, los cambios de usos de suelo no están explicados por la expansión urbana, sino por una recomposición hacia coberturas herbáceas y arbustivas. Se recomienda validar la clasificación de superficies impermeables con imágenes de mayor resolución espacial y realizar trabajo de campo para confirmar la dinámica real de ocupación del territorio.

3. Para el objetivo específico 3, se realizan mapas para la expansión urbana de los diferentes distritos de Huamanga, en especial para el distrito de Ayacucho y también se realizan mapas para los cambios de usos de suelos con sus respectivos resultados.

Referencias Bibliográficas

- Biswas, R. N., Islam, M. N., Islam, M. N. y Shawon, S. S. (2020). Modeling on approximation of fluvial landform change impact on morphodynamics at Madhumati River Basin in Bangladesh. *Modeling Earth Systems and Environment* (vid. pág. 85).
- Bouzekri, S., Lasbet, A. A. y Lachehab, A. (2015). A New Spectral Index for Extraction of Built-Up Area Using Landsat-8 Data. *J Indian Soc Remote Sens - ISRS - SHORT NOTE* (vid. pág. 85).
- Canty, M. J. (2019). *Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing With Algorithms for Python Fourth edition*. (Vid. pág. 85).
- Cavalli, R. M. (2021). Capability of Remote Sensing Images to Distinguish the Urban Surface Materials: A Case Study of Venice City. *Remote sensing MDPI* (vid. pág. 85).
- Cordeiro, M. C., Martinez, J.-M. y Luque, S. P. (2021). Automatic water detection from multidimensional hierarchical clustering for Sentinel-2 images and a comparison with Level 2A processors. *Elsevier Remote Sensing of Environment* (vid. pág. 85).
- Gavankar, N. L. y Ghosh, S. K. (2018). Extracción automática de la huella del edificio a partir de una imagen de satélite de alta resolución con morfología matemática. *Revista Europea de Teledetección* (vid. pág. 85).
- Guha, S., Govil, H., Dey, A. y Gill, N. (2018). Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing* (vid. pág. 85).
- Hasan, M. M. (2024). Spatio-Temporal Analysis of Cox's Bazar from 1990 to 2020: Exploring the Relationship between LST, NDVI, NDBI and LULC. *Research Square* (vid. pág. 5).
- Hashim, H., Latif, Z. A. y Adnan, N. A. (2019). URBAN VEGETATION CLASSIFICATION WITH NDVI THRESHOLD VALUE METHOD WITH VERY HIGH RESOLUTION (VHR) PLEIADES IMAGERY. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing* (vid. pág. 85).
- Hemanth, D. J. (2020). *Artificial Intelligence Techniques for Satellite Image Analysis*. (Vid. pág. 85).
- Jiang, H., Feng, M., Zhu, Y., Lu, N., Huang, J. y Xiao, T. (2014). An Automated Method for Extracting Rivers and Lakes from Landsat Imagery. *OPEN ACCESS REMOTE SENSING* (vid. pág. 85).
- Laachrate, H., Fadil, A. y Ghafiri, A. (2018). Soil Moisture Mapping Using SMOS applied to flood monitoring in the Moroccan context. *The international archive of the photogrammetry, Re-*

- mote sensing and Spatial Information Sciences , 5ta International Conference on Geoinformation Science GeoAdvances 2018. 10-11 October 2018 Casablanca Morocco* (vid. pág. 85).
- Lemenkova, P. (2020). GRASS GIS FOR CLASSIFICATION OF LANDSAT TM IMAGES BY MAXIMUM LIKELIHOOD DISCRIMINANT ANALYSIS: TOKYO AREA, JAPAN (vid. pág. 85).
- Lome, J. A. (2014). *Evolución de la temperatura de suelos 'del Perú a partir de imágenes LST del sensor . MODIS a bordo del satélite Terra durante el periodo 2000-2012*. UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRSTÓBAL DE HUAMANGA FACULTADDE ING.MINAS,GEOLOGÍA Y CIVIL Escuela de Formación Profesional de Ciencias Físico-Matemáticas. (Vid. pág. 85).
- MEI, S., GENG, Y., HOU, J. y DU, Q. (2021). Learning hyperspectral images from RGB images via a coarse-to-fine CNN. *SCIENCE CHINA Information Sciences* (vid. pág. 85).
- Mengistu, M. y Senamaw, A. (2020). Remote Sensing and GIS Based Potential Landslide Hazard Zonation in Ambo Woreda: Central Ethiopia. *Journal of Enviroment and Earth Science* (vid. pág. 85).
- Mezaal, M. R., Pradhan, B., Shafri, H. Z. M. y Yuso, Z. M. (2017). Detección automática de deslizamientos usando la teoría de Dempster-Shafer a partir de datos derivados de LiDAR y ortofotos. *Geomática, riesgos naturales y riesgo* (vid. pág. 85).
- MORALES, N. F. B. (2017). *TELEDETECCIÓN ESPACIAL LANDSAT, SENTINEL2, ASTER L1T y MODIS*. (Vid. pág. 85).
- Muhaimin, M., Fitriani, D., Adyatma, S. y Arisanty, D. (2022). mapping build-up area density using normalized difference built-up index (ndbi) and urban index (ui) wetland in the city banjarmasin. *4th IGEOS: International Geography Seminar 2020* (vid. pág. 5).
- Padarian, J., Minasny, B. y McBratney, A. (2015). Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. *Elsevier* (vid. pág. 85).
- Rafik Bouhennache, A. T.-A., Toufik Bouden y Chaddad, A. (2018). A new spectral index for the extraction of built-up land features from Landsat 8 satellite imagery. *Geocarto International* (vid. pág. 85).
- Rajan Girija Rejith, L. G., Mayappan Sundararajan y Loveson, V. J. (2020). Satellite-based spectral mapping (ASTER and landsat data) of mineralogical signatures of beach sediments: a precursor insight. *Geocarto International* (vid. págs. 30, 85).

- Rishikeshan, C. A. y Ramesh, H. (2017). An ANN supported mathematical morphology based algorithm for lakes extraction from satellite images. *ISH Journal of Hydraulic Engineering* (vid. pág. 85).
- RODRIGUEZ, J. L. L. (2015). *EVOLUCION TEMPORAL DEL INDICE DE VEGETACION DE DIFERENCIA NORMALIZADA MEDIANTE IMAGENES SATELITALES, VALLE MUYURINA, DISTRITO TAMBILLO - AYACUCHO, 2008-2013*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTOBAL DE HUAMANGA FACULTAD DE INGENIERIA DE MINAS, GEOLOGIA Y CIVIL ESCUELA DE FORMACION PROFESIONAL DE CIENCIAS FISICO MATEMATICAS. (Vid. pág. 85).
- Sahu, K. C. (2008). *Textbook of remote sensing and geographical information systems*. (Vid. págs. 9-24).
- Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación*. (Vid. pág. 85).
- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A. y Skakun, S. (2017a). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontier in Earth Sciences* (vid. pág. 85).
- Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A. y Skakun, S. (2017b). LARGE SCALE CROP CLASSIFICATION USING GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM. *Space Research Institute NASU-SSAU, Kyiv, Ukraine* (vid. pág. 85).
- Singgalen, Y. A. (2024). Spatio-temporal Analysis through NDVI, NDBI, and SAVI Using Landsat 8/9 OLI. *researchgate* (vid. pág. 6).
- Sivakumar, M., Roy, P., Harmsen, K. y Saha, S. (2004). *Satellite remote Sensing and GIS applications in agricultural meteorology*. (Vid. pág. 29).
- Suparta, W. (2024). Application of the NDBI Method For Determining of Built-Up Land (A Case Study For Surabaya City, Indonesia). *researchgate* (vid. pág. 7).
- Yasin, M. Y., Abdullah, J., Noor, N. M., Yusoff, M. M. y Noor, N. M. (2022). Landsat observation of urban growth and land use change using NDVI and NDBI analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (vid. pág. 6).
- Yousif, G., Tayeb, L. y Khaleel, S. (2023). Relationship of LST, NDVI, and NDBI using Landsat-8 data in Duhok city in 2019-2022. *researchgate* (vid. pág. 5).
- Zang, N., Hong, Y., QIN, Q. y Zhu, L. (2013). Evaluati3n of the Visible and shortwave infrared Drought index in China. *Institute of Remote Sensing and GIS Peking University Beijing 100871 China, school of Civil Engineering anad Enviroment Sciences University of Oklajoma OK 73072 USA*

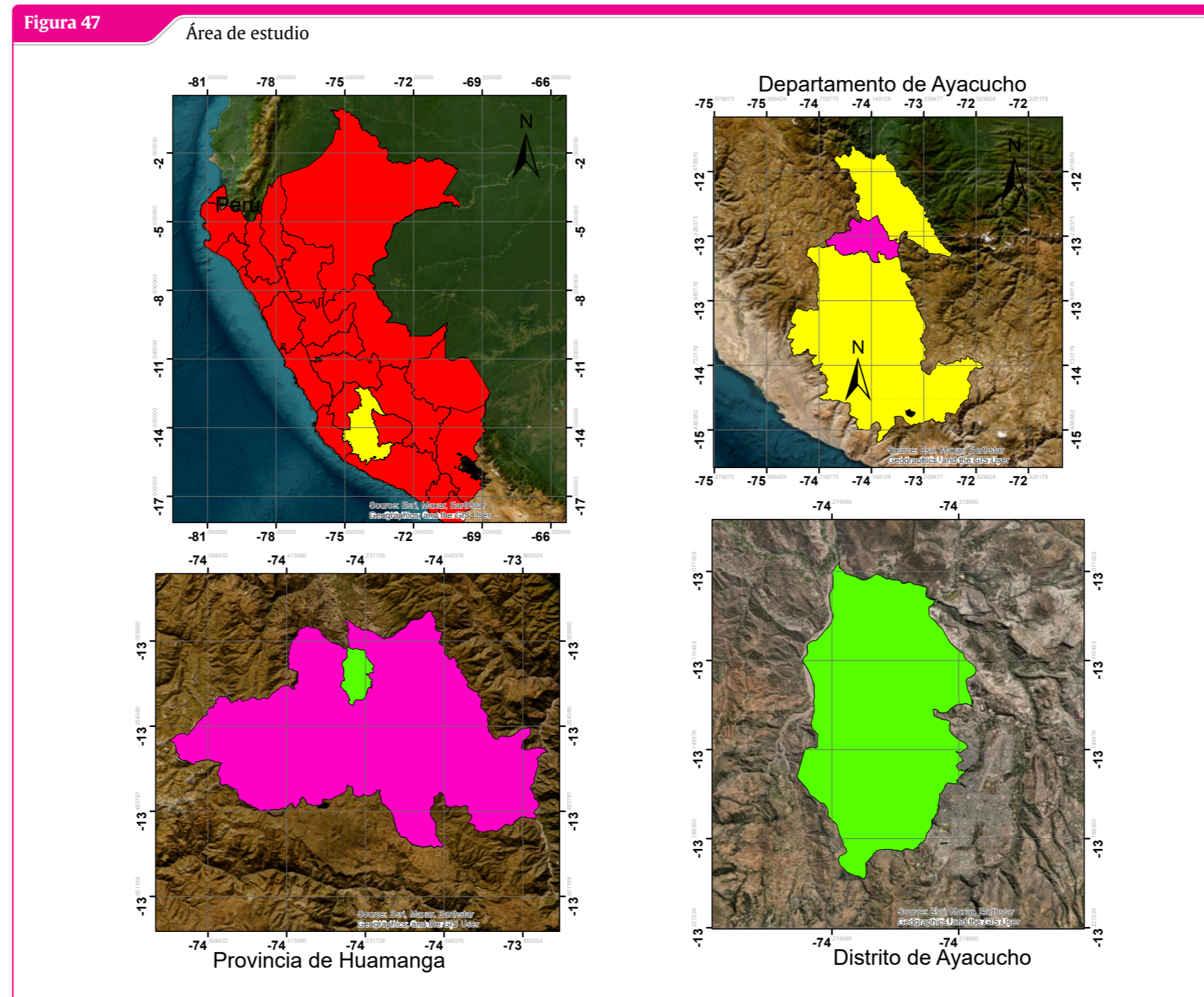
National Satellite Meteorological center of China Meterological Administración Beijing 100081, China (vid. [pág. 85](#)).

“La imaginación es más importante que el conocimiento. El conocimiento es limitado, mientras que la imaginación no tiene límites.”

— Albert Eisnten

A Anexos

A.1 Ubicación distrito de Ayacucho



Fuente: Elaboración Propia con Arcmap

A.2 Código de procesamiento de imágenes en Java Script

Código A.1: Código GEE para análisis urbano

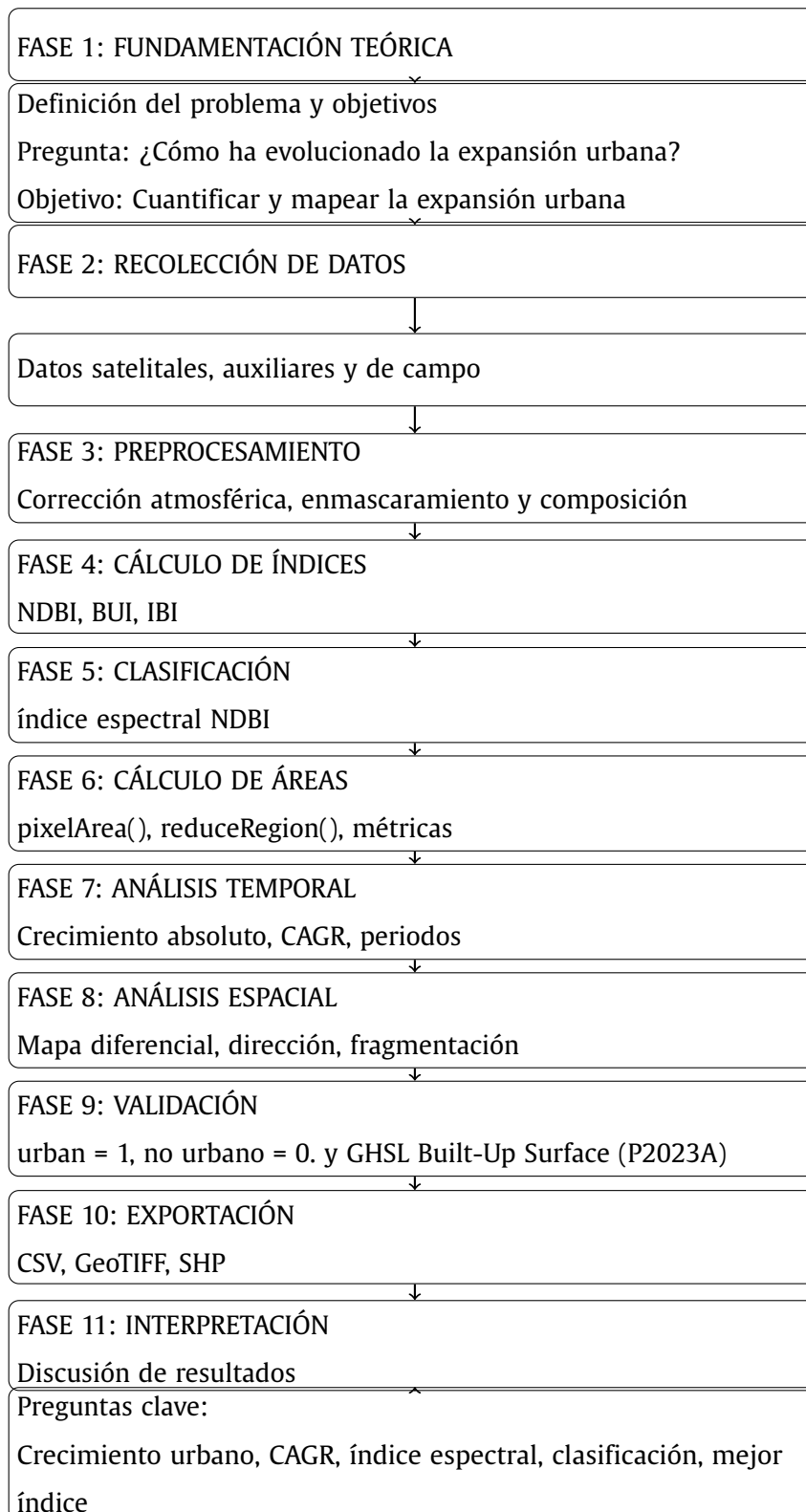
```

1 // =====
2 // ANALISIS DE EXPANSION URBANA 1990 - 2025
3 // Usando GHSL Built-Up Surface (100m)
4 // =====
5
6 // 1. CARGAR SHAPEFILE
7 var shapefile = table;
8 var aoi = shapefile.geometry();
9
10 // 2. CARGAR DATOS GHSL
11 var ghslBuilt = ee.ImageCollection('JRC/GHSL/P2023A/GHS_BUILT_S')
12     .select('built_surface');
13
14 // 3. CONFIGURAR PARAMETROS
15 var urbanThresholdM2 = 3000;    30\% de 10000 m2
16 var yearsList = ee.List.sequence(1990, 2025, 5);
17
18 // 4. FUNCION PARA CALCULAR AREA URBANA
19 var calculateUrbanArea = function(year) {
20     var startDate = ee.Date.fromYMD(ee.Number(year), 1, 1);
21     var endDate = ee.Date.fromYMD(ee.Number(year), 12, 31);
22
23     var image = ghslBuilt.filterDate(startDate, endDate).first();
24     var imageClipped = image.clip(aoi);
25     var urbanMask = imageClipped.gte(urbanThresholdM2);
26
27     var pixelArea = ee.Image.pixelArea();
28     var urbanAreaImage = urbanMask.multiply(pixelArea);
29
30     var areaStats = urbanAreaImage.reduceRegion({
31         reducer: ee.Reducer.sum(),
32         geometry: aoi,
33         scale: 100,

```

```
34     maxPixels: 1e13
35   });
36
37   var urbanAreaM2 = ee.Number(areaStats.get('built_surface'));
38   var urbanAreaKm2 = urbanAreaM2.divide(1e6);
39
40   return ee.Feature(null, {
41     'year': year,
42     'area_km2': urbanAreaKm2
43   });
44 };
45
46 print('Calculo completado');
```

A.2.1 Diagrama de flujo



A.3 Panel fotográfico

Figura 48

Vista Panorámica de la expansión urbana del mirador de Acuchimay



Fuente: Elaboración Propia

Figura 49

Vista Panorámica de la expansión urbana del mirador de Cabrapata



Fuente: Elaboración Propia

Figura 50

Vista Panorámica de la expansión urbana



Fuente: Elaboración Propia

Figura 51

Vista Panorámica de la expansión urbana



Fuente: Elaboración Propia

Figura 52

Vista Panorámica de la expansión urbana



Fuente: Elaboración Propia

Figura 53

Vista Panorámica de la expansión urbana



Fuente: Elaboración Propia

A.4 Matriz de consistencia

Tabla 14: Matriz de consistencia

Título: Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025 Autor: Eder Iván Conislla Cáceres						
MATRIZ DE CONSISTENCIA						
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variables	Metodología	Población y muestra	Técnicas e Instrumentos de investigación
¿ En qué medida los índices espectrales pueden evaluar el crecimiento de áreas construidas en el distrito de Ayacucho, 2025 ?	Aplicar la teledetección satelital para evaluar el crecimiento de las áreas construidas en el distrito de Ayacucho durante el año 2025 mediante índices espectrales y análisis multitemporal.	Los índices espectrales evaluarán el crecimiento de áreas construidas en el distrito de Ayacucho, 2025.	Variable independiente Índices espectrales Variable dependiente Crecimiento de áreas construidas	Tipo de investigación Investigación Cuantitativa. Nivel de investigación Aplicativo. Enfoque de investigación Cuantitativo. Diseño de la investigación No experimental longitudinal.	Población : En la presente investigación la población son los índices espectrales de expansión urbana para la provincia de Huamanga con una área 2 981,37 km ² . Muestra : La muestra vienen hacer los índices espectrale de NDBI, para la evaluación en la Localidad del distrito de Ayacucho de un área aproximado de 85.29 km ² , para mostrar el crecimiento de las áreas urbanas,utilizando la muestra no probabilística por conveniencia.	Técnicas: Análisis documental . Instrumentos: Registro.
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicos				
1 ¿ En qué medida la variación temporal del área urbana en Ayacucho con índices espectrales nos ayudan entender el crecimiento urbano ?	Determinar la variación temporal del área urbana en Ayacucho a través de imágenes satelitales y el cálculo de índices espectrales adecuados como NDBI y UI.	La variación temporal del área urbana en Ayacucho con índices espectrales nos ayudan entender el crecimiento urbano.				
2 ¿ En qué medida los cambios de usos de suelos relacionan a la expansión urbana del Distrito de Ayacucho ?	Analizar la relación de los cambios de usos de suelos y la expansión urbana del Distrito de Ayacucho.	Los cambios de usos de suelos influyen en la expansión urbana del Distrito de Ayacucho.				
3 ¿ En qué medida las mapas telemáticos nos muestran la dinámica de ampliación de zonas construidas ?	Elaborar mapas temáticos que muestren la dinámica reciente de ampliación de zonas construidas.	Las mapas telemáticos nos muestran la dinámica de ampliación de zonas construidas.				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15: Matriz de operacionalización de variables

Título : Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025 Autor: Eder Iván Conislla Cáceres					
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES					
Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Variables	Dimesiones	Indicadores
índices espectrales	Cálculos derivados de combinaciones de bandas espectrales que permiten resaltar áreas construidas, vegetación o cuerpos de agua.	Aplicación de fórmulas espectrales a imágenes satelitales (NDVI, NDBI, IBI, MNDWI) para discriminar áreas construidas y realizar análisis multitemporal.	Variable independiente índices espectrales	Índices de áreas construídas (NDBI)	valores de NDBI (µm) Bandas del NDBI (µm)
Crecimiento de áreas construídas	Proceso de expansión espacial y densificación de zonas urbanizadas sobre el territorio, medido a partir de cambios en la cobertura de suelo.	Medición de la superficie urbana en diferentes fechas a partir del análisis de índices espectrales y clasificación de imágenes satelitales. Medición de la superficie urbana en diferentes fechas a partir del análisis de índices espectrales y clasificación de imágenes satelitales. Medición de la superficie urbana en diferentes fechas a partir del análisis de índices espectrales y clasificación de imágenes satelitales. Medición de la superficie urbana en diferentes fechas a partir del análisis de índices espectrales y clasificación de imágenes satelitales.			Índice combinado (IBI)
			Variable dependiente Crecimiento de áreas construídas	Índices de vegetación (NDVI)	valores de NDVI (µm) Bandas del NDVI (µm)
				Superficie construída	área urbana total por año (m2)



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 21-2026-FIMGC

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE CIVIL

En la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, en la ciudad de Ayacucho, en cumplimiento a la **Resolución Decanal No 128-2026-FIMGC-D**, a los **once días del mes de mayo de 2026**, siendo las **4:00 p.m.**, reunidos en el **Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil**, bajo la presidencia del **MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS**, y los miembros: **Ing. Ángel Hugo VILCHEZ PEÑA**, **Ing. Rocky Giban AYALA BIZARRO** y **Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ**, actuando como secretario docente el **Alex Sander IRCAÑAUPA HUAMANÍ**, para proceder a la sustentación de tesis para optar el **Título Profesional de Ingeniero de Civil**, del Bachiller en Ciencias de la Ingeniería de Civil:

Eder Ivan CONISLLA CACERES

Quien presentó la tesis denominada:

Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025

Los señores miembros del jurado luego de expuesta la tesis y absueltas las preguntas, deliberaron y declararon:

Aprobado con 16 (Dieciséis)

Siendo las **5:29** del día **11 de mayo del 2026**, culmina el acto de sustentación de tesis, y en conformidad de lo actuado los miembros del jurado firmamos al pie del presente.

MSc. Ing. José Ernesto ESTRADA CÁRDENAS
Presidente

Ing. Ángel Hugo VILCHEZ PEÑA
Miembro

Ing. Saul Walter RETAMOZO FERNANDEZ
Miembro

Ing. Rocky Giban AYALA BIZARRO
Miembro - Asesor

Ing. Daniel FERRUA CARRION
Secretario docente de la FIMGC



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTANCIA N° 11-2026-FIMGC/ASIH

El que suscribe; responsable verificador de originalidad de trabajos de tesis de pregrado con el software Turnitin, de la Escuelas Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil; en cumplimiento a la Resolución de Consejo Universitario N° 039-2021-UNSCH-CU, Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga y Resolución Decanal N° 697-2024-FIMGC-UNSCH-D, dejo constancia de originalidad de trabajo de investigación, que el/la Sr./Srta.

Apellidos y Nombres : Eder Ivan CONISLLA CACERES
Escuela Profesional : INGENIERÍA CIVIL
Título de la Tesis : Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025
Evaluación de la Originalidad : 17 % Índice de Similitud
Identificador de la entrega : 2964371918

Por tanto, según los Artículos 12, 13 y 17 del Reglamento de Originalidad de Trabajos de Investigación, es **PROCEDENTE** otorgar la **Constancia de Originalidad** para los fines que crea conveniente.

En señal de conformidad y verificación se firma la presente constancia

Ayacucho, 18 de mayo del 2026



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil


Mg. Ing. Alex Sander IRCANAUPA HUAMANI
Verificador de Originalidad de Trabajos de Tesis de Pregrado
Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025

por Eder Ivan CONISLLA CÁCERES

Fecha de entrega: 18-may-2026 01:22p. m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2964371918

Nombre del archivo: Te_Eder_Ivan_Conislla_Caceres.pdf (5.87M)

Total de palabras: 23910

Total de caracteres: 133198

Evaluación de crecimiento de áreas construidas con índices espectrales de teledetección en el distrito de Ayacucho, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

17%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

13%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga

Trabajo del estudiante

11%

2

repositorio.unsch.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1%

4

dokumen.pub

Fuente de Internet

1%

5

documentop.com

Fuente de Internet

<1%

6

www.biodiversidad.gob.mx

Fuente de Internet

<1%

7

estudoscariocas.rio

Fuente de Internet

<1%

8

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

9

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

10

www.usgs.gov

Fuente de Internet

<1%

11

periodicos.pucpr.br

Fuente de Internet

<1%

12

infotec.repositorioinstitucional.mx

Fuente de Internet

<1%

13

repositorio.chapingo.edu.mx

Fuente de Internet

<1%

14

repositorio.uta.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

15 uvadoc.uva.es <1 %
Fuente de Internet

16 Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD,UNAD <1 %
Trabajo del estudiante

17 Submitted to Universidad Ricardo Palma <1 %
Trabajo del estudiante

18 hdl.handle.net <1 %
Fuente de Internet

19 andrewmaclachlan.github.io <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas Activo Excluir coincidencias < 30 words
Excluir bibliografía Activo