

DINÁMICA DE LA COBERTURA DEL SUELO EN TABACUNDO (2014-2024): EXPANSIÓN DE LA AGRICULTURA Y LOS INVERNADEROS

**Land Cover Dynamics in Tabacundo (2014-2024):
Expansion of Agriculture and Greenhouses**

*Dinâmica da Cobertura do Solo em Tabacundo (2014-2024):
Expansão da Agricultura e das Estufas*

• Kevin Valencia¹ • Sharon Beltrán¹

Fecha de recepción: 06 de mayo de 2025
Fecha de aceptación: 27 de junio de 2025

Doi: 10.33210/ca.v14i1.502

Cienciamérica (2025) | Vol. 14 N° . 1 | pp. 139-160

ISSN 1390-9592 ISSN-L 1390-681X

¹Fundación Museos de la Ciudad, Yaku Parque Museo del Agua. Quito-Ecuador.
Correos: kevin.valencia@fmcquito.gob.ec, sharonbel26@outlook.com

*K. Valencia and S. Beltrán, "Dinámica de la cobertura del suelo en Tabacundo (2014-2024): Expansión de la agricultura y los invernaderos", CienciAmérica, vol. 14, no. 1, pp. 139-160, Jan. 2025, DOI: 10.33210/ca.v14i1.502

RESUMEN

INTRODUCCIÓN. La cartografía de la cobertura del suelo es clave para la gestión territorial en regiones agrícolas dinámicas como Tabacundo, donde la rápida expansión de la agricultura y los invernaderos representa un desafío para la sostenibilidad. **OBJETIVO.** Cuantificar los cambios y transiciones de la cobertura del suelo en la parroquia entre 2014 y 2024. **MÉTODO.** Se realizó un análisis multitemporal con una ortofoto (2014) y una imagen Sentinel-2 (2024). Para generar los mapas de cobertura, se aplicó un algoritmo de clasificación supervisada (Random Forest) procesado en la plataforma Google Earth Engine (GEE), seguido de un refinamiento manual post-clasificación. Finalmente, las transformaciones se cuantificaron mediante un análisis de cambio. **RESULTADOS.** El análisis reveló que el 45.2% del territorio se transformó, destacando la conversión de bosque a agricultura y de esta a invernaderos. Esto resultó en un aumento de 543.46 ha de invernaderos y una pérdida neta de 649.57 ha de bosque. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** La expansión de la floricultura intensiva desplaza a la agricultura tradicional, provocando la pérdida de ecosistemas naturales. La metodología es una herramienta robusta para el monitoreo y la planificación territorial, sentando una línea base para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE

Cobertura del suelo, análisis de cambio, sentinel-2, Google Earth Engine, Tabacundo, invernaderos.



ABSTRACT

INTRODUCTION. Land cover mapping is key for land management in dynamic agricultural regions such as Tabacundo, where the rapid expansion of agriculture and greenhouses poses a sustainability challenge. **OBJECTIVE.** To quantify land cover changes and transitions in the parish between 2014 and 2024. **METHOD.** A multitemporal analysis was conducted using an orthophoto (2014) and a Sentinel-2 image (2024). To generate the cover maps, a supervised classification algorithm (Random Forest) was applied on the Google Earth Engine (GEE) platform, followed by manual post-classification refinement. Finally, transformations were quantified through change analysis. **RESULTS.** The analysis revealed that 45.2% of the territory was transformed, highlighting the conversion of forest to agriculture and from agriculture to greenhouses. This resulted in an increase of 543.46 ha in greenhouse area and a net loss of 649.57 ha of forest. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** The expansion of intensive floriculture displaces traditional agriculture, causing the loss of natural ecosystems. The methodology proves to be a robust tool for monitoring and land use planning, establishing a baseline for future research.

KEYWORDS

Land cover, change analysis, sentinel-2, Google Earth Engine, Tabacundo, greenhouses.



RESUMO

INTRODUÇÃO. O mapeamento da cobertura do solo é fundamental para a gestão territorial em regiões agrícolas dinâmicas como Tabacundo, onde a rápida expansão da agricultura e das estufas representa um desafio para a sustentabilidade. **OBJETIVO.** Quantificar as mudanças e transições da cobertura do solo na freguesia entre 2014 e 2024. **MÉTODO.** Realizou-se uma análise multitemporal com uma ortofoto (2014) e uma imagem Sentinel-2 (2024). Para gerar os mapas de cobertura, aplicou-se um algoritmo de classificação supervisionada (Random Forest), processado na plataforma Google Earth Engine (GEE), seguido de um refinamento manual pós-classificação. Finalmente, as transformações foram quantificadas através de uma análise de mudanças. **RESULTADOS.** A análise revelou que 45,2% do território foi transformado, destacando-se a conversão de floresta para agricultura e desta para estufas. Isto resultou num aumento de 543.46 ha na área de estufas e numa perda líquida de 649.57 ha de floresta. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** A expansão da floricultura intensiva desloca a agricultura tradicional, provocando a perda de ecossistemas naturais. A metodologia demonstra ser uma ferramenta robusta para o monitoramento e o planeamento territorial, estabelecendo uma linha de base para futuras pesquisas.

PALAVRAS-CHAVE

Cobertura do solo, análise de mudanças, sentinel-2, Google Earth Engine, Tabacundo, estufas.



INTRODUCCIÓN

La gestión sostenible del territorio requiere información precisa y actualizada sobre la cobertura y uso del suelo (LULC), especialmente en regiones con intensa actividad agrícola donde los cambios son dinámicos y sus impactos socioambientales, críticos[1]. Los mapas de cobertura no solo permiten monitorear la expansión de cultivos y la presión sobre recursos naturales como el agua y el suelo, sino que también son fundamentales para diseñar políticas de ordenamiento territorial que equilibren desarrollo económico y conservación. En este contexto, la teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta indispensable, al ofrecer datos periódicos, sinópticos y de bajo costo para la cartografía LULC a diversas escalas [2].

La parroquia de Tabacundo, ubicada en el cantón Pedro Moncayo (Pichincha, Ecuador), ejemplifica esta necesidad. Reconocida como un enclave agrícola de relevancia nacional e internacional por su producción florícola, especialmente el cultivo de rosas bajo invernadero, la región enfrenta desafíos únicos derivados de la rápida expansión de infraestructuras agrícolas y los cambios constantes en el uso del suelo [3]. Esta dinámica ha generado una demanda urgente de información territorial actualizada que permita, por ejemplo, optimizar el uso del agua para riego, recurso cuya demanda es particularmente alta en la floricultura [4].

Entre las herramientas más promisorias para abordar este desafío destaca la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sus satélites proporcionan imágenes multiespectrales de alta resolución con bandas clave en el visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) [5], [6], las cuales han demostrado ser esenciales para discriminar coberturas complejas como invernaderos [7], [8]. Complementariamente, plataformas como Google Earth Engine (GEE) han revolucionado el procesamiento de datos geoespaciales al integrar vastos archivos de imágenes satelitales con capacidades de cómputo en la nube, eliminando barreras técnicas y económicas para el análisis LULC [9].

Experiencias previas en la región han demostrado el potencial de estas tecnologías. Estudios como el de [10] han logrado identificar invernaderos en la región andina con altas precisiones utilizando Sentinel-2 y GEE, mientras otras investigaciones han analizado la expansión agrícola y deforestación en la Amazonía ecuatoriana [1] y los Andes [11], a menudo empleando series temporales de datos Landsat o Sentinel y clasificadores como Random Forest (RF) [8]. A nivel cantonal, un estudio de 2013 ya reportaba una superficie de 85.62 hectáreas (0.25% del territorio) de invernaderos para Pedro Moncayo [12]. Sin embargo, a pesar de estos valiosos antecedentes, persiste una falta de análisis detallados y recientes a escala de parroquia, que es la unidad territorial donde las presiones y los cambios se manifiestan con mayor intensidad [4]. Se desconocen, en particular, las dinámicas y transiciones específicas entre la agricultura tradicional, la expansión de la floricultura y las coberturas vegetales nativas.

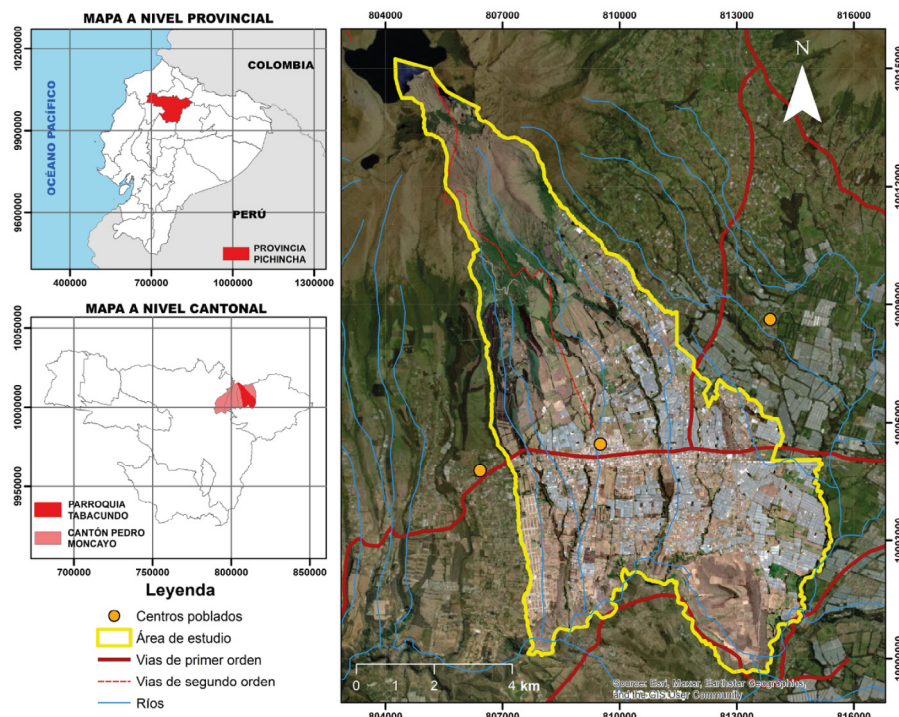
Para llenar este vacío de conocimiento, el objetivo principal de este estudio es cuantificar los cambios y transiciones de la cobertura del suelo en la parroquia de Tabacundo entre 2014 y 2024, con un enfoque en la dinámica entre la vegetación natural, la agricultura y la expansión de invernaderos.

La novedad de este trabajo radica en que, más allá de generar un mapa actualizado, ofrece un análisis cuantitativo de los procesos de cambio, revelando las complejas interacciones entre los distintos usos del suelo. Al proporcionar datos detallados a escala local, este estudio aporta una herramienta fundamental para la planificación y gestión sostenible de uno de los enclaves agrícolas más importantes y dinámicos de Ecuador.

MÉTODO

Área de estudio

El estudio se centró en la parroquia rural de Tabacundo, cabecera cantonal de Pedro Moncayo, ubicada en la provincia de Pichincha, al norte de Ecuador, como se muestra en la Figura 1. Geográficamente, se localiza en la región interandina, y su configuración geomorfológica es el resultado de la interacción entre una intensa

Figura 1. Mapa de ubicación de la Parroquia Tabacundo

Fuente de datos: Los mapas de contexto utilizan servicios de mapa base de Esri [15]. La imagen de fondo del panel principal corresponde a una composición en color natural (B4, B3, B2) de una imagen Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), correspondiente al 28 de agosto de 2024 [16]. Los límites administrativos y la red vial fueron obtenidos del Instituto Geográfico Militar [17].

actividad volcánica y la posterior erosión fluvial [13]. La parroquia se asienta sobre una planicie suavemente ondulada, a una altitud promedio superior a los 2,800 msnm, formada por una potente secuencia de depósitos piroclásticos (cenizas y lapilli) provenientes de volcanes como el Cayambe [12]. Estos materiales han originado suelos fértiles de tipo andosol, conocidos localmente como cangahua, que son la base de la alta productividad de la zona [12].

Gracias a estas condiciones edafoclimáticas, la parroquia es uno de los principales centros de producción de flores del país, con una extensa superficie cubierta por invernaderos destinados principalmente al cultivo de rosas de exportación. El área de estudio se inscribe en la cuenca alta del río Guayllabamba, donde la red hidrográfica ha modelado el paisaje post-volcánico, generando un sistema de valles y quebradas [14]. Estudios recientes en cuencas aledañas, como la del río Pisque, han documentado la expansión de la floricultura y su impacto en la región [4].

Adquisición y procesamiento de datos

Para el análisis multitemporal de la cobertura del suelo se emplearon dos fuentes de datos geoespaciales: una imagen satelital Sentinel-2A para el año 2024 y una ortofoto de alta resolución del Instituto Geográfico Militar (IGM) correspondiente al año 2014.

Datos para el análisis de 2014

Para establecer la línea base histórica, se empleó un mosaico de ortofotos del periodo 2010-2014, generado por el programa SIGTIERRAS y proporcionado por el Instituto Geográfico Militar (IGM) de Ecuador [18]. Este producto, derivado de fotografías aéreas capturadas con cámaras fotogramétricas de alta precisión, presentaba una resolución nativa de 30 cm en tres bandas espectrales (RGB), lo que permitió una detallada interpretación visual. Con el fin de asegurar la compatibilidad para el análisis de cambio de cobertura, el mosaico fue remuestreado a una resolución espacial de 10 m, haciéndolo coincidir con las imágenes Sentinel-2. El IGM no facilitó detalles específicos sobre las fechas de captura o los sensores y aeronaves empleados, al no tener disponible dicha información.

Datos para el análisis de 2024

Para determinar el estado actual de la cobertura, se utilizó una imagen Sentinel-2A de Nivel-2A (Reflectancia de Superficie) correspondiente al tile T17NRA, adquirida el 28 de agosto de 2024. La escena seleccionada (ID: S2A_MSIL2A_20240828T153621_N0511_R068_T17NRA_20240828T220158) presenta una cobertura de nubes del 19.58% y un 4.43% de sombra de nubes. Esta imagen cumple con los criterios de calidad geométrica del proveedor [6] y ofrecía una visibilidad adecuada del área de estudio. El análisis se centró en seis de sus bandas multiespectrales, las cuales se detallan en la Tabla 1.

Para la generación de los mapas de cobertura de 2014 y 2024, se implementó un enfoque de clasificación supervisada. La metodología se adaptó del flujo de trabajo semiautomático para el análisis de imágenes de alta resolución en Google Earth Engine (GEE) propuesto por [19], [20].

Algoritmo y configuración

Se seleccionó el algoritmo Random Forest (RF), un método de aprendizaje automático robusto y ampliamente utilizado para la clasificación de imágenes geoespaciales [21]. Este clasificador, implementado en GEE, es un conjunto de árboles de decisión que ha de-

mostrado ser eficaz al no ser sensible a valores atípicos y al manejar datos de alta dimensionalidad. Para este estudio, el clasificador se configuró para ejecutarse con 100 árboles de decisión, mientras que los demás hiperparámetros se mantuvieron con los valores por defecto de la plataforma. La implementación de RF en GEE también permite calcular la importancia de las variables, lo que se utilizó para evaluar la contribución relativa de cada banda espectral al modelo final (Tabla 7).

Generación de datos de entrenamiento y validación

Se siguió un protocolo de muestreo aleatorio estratificado para la recolección de los datos de referencia, garantizando una representación equilibrada de cada clase. Las clases de cobertura definidas para este estudio fueron: Agricultura, Agua, Arbustos y herbáceas, Bosque, Impermeable, Invernadero y Suelo. Estas categorías se establecieron específicamente para reflejar las coberturas de interés en la parroquia de Tabacundo [19].

El proceso de muestreo consistió en los siguientes pasos. Primero, utilizando las herramientas de geometría de GEE y la interpretación visual sobre las imágenes (Sentinel-2 de 2024 y la ortofoto de 2014), se digitalizaron manualmente 25 polígonos representativos para cada una de las siete clases, con el

Tabla 1. Bandas multiespectrales usadas en el estudio

Banda	Acónimo	Rango espectral (nm)	Resolución nativa (m)	Utilidad principal en este estudio
B2	Azul	490	10	Diferenciación de cuerpos de agua y suelo desnudo [5].
B3	Verde	560	10	Evaluación del vigor de la vegetación [5].
B4	Rojo	665	10	Absorción por clorofila, clave para separar vegetación [5].
B8	NIR	842	10	Alta reflectancia en vegetación sana, biomasa [5].
B11	SWIR 1	1610	20	Sensibilidad al contenido de humedad en suelo y vegetación [5].
B12	SWIR 2	2190	20	Diferenciación de tipos de suelo, rocas y vegetación seca[5].

Fuente: Elaboración propia.



apoyo de las imágenes de alta resolución de Google Satellite. A partir de estos polígonos (estratos), se generó un total de 30,030 puntos de referencia.

Finalmente, este conjunto de muestras se dividió aleatoriamente en dos subconjuntos independientes: un 70% (21,000 puntos) se destinó al entrenamiento del clasificador RF, y el 30% restante (9,030 puntos) se reservó para la evaluación de la precisión del mapa final.

El clasificador RF se entrenó utilizando como variables predictoras los valores de reflectancia de las bandas espectrales para cada punto de entrenamiento. Una vez entrenado, el modelo se aplicó a toda el área de estudio para generar los mapas LULC para los años 2014 y 2024.

Post-clasificación y refinamiento del mapa

Los mapas generados mediante algoritmos de clasificación automática inherentemente presentan inconsistencias a diferentes escalas [22], [23]. Por ello, para maximizar la coherencia espacial y la precisión temática del producto final, se implementó un proceso de refinamiento en dos etapas, cada una diseñada para corregir un tipo específico de error:

1. Corrección de errores de alta frecuencia

(automática): Para solucionar las inconsistencias más simples, como el ruido de "sal y pimienta" (píxeles aislados o en pequeños grupos), se aplicó un filtro de mayoría(modal) en Google Earth Engine. Este filtro utiliza un kernel de 3x3 píxeles para reasignar a cada píxel el valor de la clase más común en su vecindario, homogeneizando el mapa de manera efectiva [22].

2. Corrección de errores sistemáticos (ma-

nual): Una vez eliminado el ruido de alta frecuencia, se procedió a rectificar los errores sistemáticos a mayor escala, como polígonos completos asignados a una clase incorrecta. Para ello, el mapa ráster filtrado se transformó primero a un formato de polígonos (vector) utilizando el software QGIS. Posteriormente, se realizó una exhaustiva inspección visual sobre este mapa vectorial. Cada polígono fue comparado con las imágenes fuente (Sentinel-2 y la ortofoto IGM) y los mapas base de alta resolución disponibles. Aquellos polígonos que no representaban fielmente la cobertura del terreno fueron reasignados a la clase correcta. Este refinamiento manual fue crucial para asegurar que el mapa final correspondiera con la mayor fidelidad posible a la realidad del área de estudio.

Tabla 2. Matriz de confusión de la clasificación 2014 final y refinada (conjunto de validación, n=9050).

Clase predicha ↓ / Referencia →	0 (Inv)	1 (Agr)	2 (Bos)	3 (Urb)	4 (Arb)	5 (Sue)	6 (Agu)	Total predicho	Presición usuario (UA)
0 (Inv)	1345	35	10	18	20	12	0	1440	93.40%
1 (Agr)	40	1285	45	10	85	20	0	1485	86.50%
2 (Bos)	15	38	1420	5	45	10	2	1535	92.50%
3 (Urb)	12	15	5	1350	10	45	3	1440	93.80%
4 (Arb)	25	85	48	15	1295	30	0	1498	86.40%
5 (Sue)	15	10	10	45	31	1335	8	1454	91.80%
6 (Agu)	0	0	0	2	0	7	137	146	93.80%
Total referencia	1452	1468	1538	1445	1496	1459	150	9050	-
Precisión productor (PA)	92.60%	87.50%	92.30%	93.40%	86.60%	91.50%	91.30%	-	-

Nota. Inv: Invernadero, Agr: Agricultura, Bosq: Bosque, Urb: Urbano, Arb: Arbustos y herbáceas, Sue: Suelo, Agu: Agua.
Fuente: Elaboración propia.



Tabla 3. Matriz de confusión de la clasificación 2024 final y refinada (conjunto de validación, n=9005).

Clase predicha↓/ Referencia→	0 (Inv)	1 (Agr)	2 (Bos)	3 (Urb)	4 (Arb)	5 (Sue)	6 (Agu)	Total predicho	Presición usuario (UA)
0 (Inv)	1448	12	2	6	2	2	0	1472	98.40%
1 (Agr)	14	1420	18	4	12	1	0	1469	96.70%
2 (Bos)	4	15	1505	1	13	0	0	1538	97.90%
3 (Urb)	2	8	1	1418	9	6	0	1444	98.20%
4 (Arb)	2	12	12	5	1460	9	0	1500	97.30%
5 (Sue)	2	1	0	10	5	1483	1	1502	98.70%
6 (Agu)	0	0	0	0	0	1	79	80	98.80%
Total referencia	1472	1468	1538	1444	1501	1502	80	9005	-
Precisión productor (PA)	98.40%	96.70%	97.90%	98.20%	97.30%	98.70%	98.80%	-	-

Nota. Inv: Invernadero. Agr: Agricultura. Bosq: Bosque. Urb: Urbano. Arb: Arbustos y herbáceas. Sue: Suelo. Agu: Agua.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de cambio de cobertura (2014-2024)

Para cuantificar las transiciones entre las diferentes clases de cobertura del suelo durante el periodo de estudio, se realizó un análisis de cambio post-clasificación. El paso fundamental previo consistió en asegurar una perfecta alineación espacial y dimensional entre los mapas de cobertura finales (2014 y 2024). Para ello, se aplicó una máscara de recorte común a ambos rásteres, garantizando que los dos productos compartieran una idéntica extensión geográfica, resolución (10x10 metros) y sistema de coordenadas (WGS 84 UTM Zona 17S). Este procedimiento es un requisito indispensable para realizar un análisis de cambio píxel a píxel válido.

Una vez alineados los mapas, se aplicó una técnica de tabulación cruzada (cross-tabulation). Específicamente, se utilizó la herra-

mienta de cambio de cobertura ("Land Cover Change") del complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) para QGIS [24]. Esta herramienta genera una matriz que compara la clase de cada píxel en el mapa de 2014 con la clase de ese mismo píxel en el mapa de 2024. El resultado es una tabla detallada que cuantifica el área de cada tipo de transición (ej. el área que era "Bosque" en 2014 y pasó a ser "Agricultura" en 2024).

A partir de esta matriz de cambio, se calculó la superficie en hectáreas para cada transición. Finalmente, se sumaron todas las áreas donde la clase de 2014 era diferente a la de 2024 para obtener el "área total con cambio", y aquellas donde la clase se mantuvo idéntica para obtener el "área total sin cambio". Este análisis permitió construir la tabla de transiciones presentada en la sección de Resultados.

Tabla 4. Métricas de precisión global para 2014 y 2024

Métrica	Clasificación 2014 (Post-filtro)	Clasificación 2014 (Final refinada)	Clasificación 2024 (Post-filtro)	Clasificación 2024 (Final refinada)
Precisión general (OA)	86.1%	89.5%	94.2%	97.8%
Coefficiente kappa (K)	0.823	0.864	0.925	0.971

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de la precisión

Se realizó una evaluación de la precisión cuantitativa de forma independiente para los mapas de cobertura del suelo de los años 2014 y 2024. Para ambos periodos, la precisión se midió en dos etapas clave del proceso de post-clasificación, con el fin de cuantificar el impacto del refinamiento manual. En todos los casos, la evaluación se basó en el conjunto de validación correspondiente (30% del total de muestras) que no fue utilizado durante el entrenamiento [19].

El procedimiento fue el siguiente:

1. **Evaluación post-filtro:** Se realizó una primera evaluación de la precisión después de aplicar un filtro de mayoría (kernel) sobre el mapa de clasificación inicial de cada año [23].
2. **Evaluación final refinada:** Se llevó a cabo una segunda evaluación sobre el producto cartográfico definitivo, después de un refinamiento manual detallado en un software GIS para corregir errores evidentes [23].

Precisión de la clasificación de 2014

La fiabilidad del mapa de 2014 se evaluó en las dos etapas mencionadas. La matriz de confusión que se presenta en la Tabla 2 corresponde al mapa final y refinado de 2014.

Precisión de la clasificación de 2024

De igual manera, para el mapa de 2024 se evaluó la precisión antes y después del refinamiento manual. La Tabla 3 muestra la matriz de confusión para el producto cartográfico final y refinado de 2024, donde se observa una mayor discriminación entre clases gracias a la calidad de los datos Sentinel-2.

Resumen y comparación de la precisión

La Tabla 4 consolida las métricas de precisión global (Precisión General y Coeficiente Kappa) para ambos años y en ambas etapas de evaluación. Los resultados demuestran dos hallazgos clave: 1) el refinamiento manual mejoró consistentemente la fiabilidad de los mapas en ambos periodos, y 2) la clasificación de 2024 fue sustancialmente más

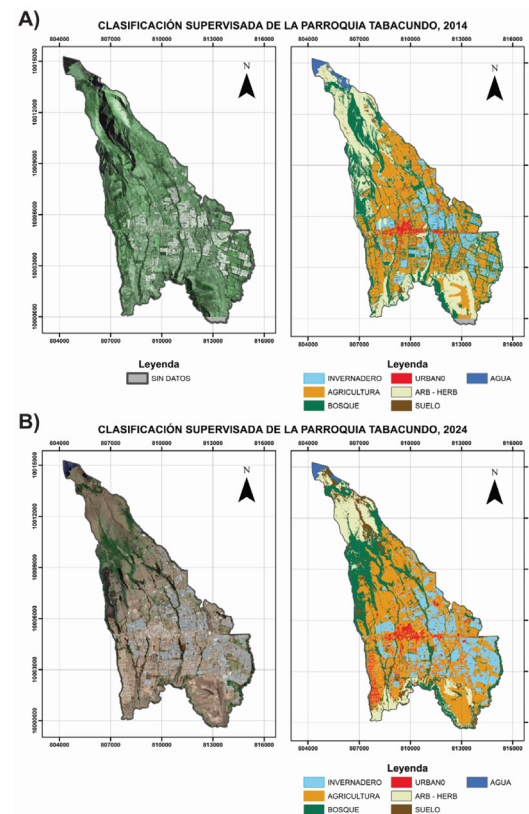
precisa que la de 2014, debido a la superioridad de los datos multiespectrales.

RESULTADOS

El procedimiento experimental permitió los resultados de la clasificación permitieron cuantificar la distribución de la cobertura del suelo en la parroquia de Tabacundo para los años 2014 (Figura 2A) y 2024 (Figura 2B). El área total analizada fue de 7,090.41 hectáreas en la clasificación de 2014 y de 7,120.63 hectáreas en la de 2024.

En el año 2014, las coberturas predominantes en la parroquia eran la agricultura, que ocupaba el 36.6% del territorio (2,591.93 ha), y el Bosque, que representaba el 26.5% (1,880.04 ha). La vegetación de tipo Arbustos y herbáceas también constituía una porción significativa del paisaje, con un 22.5% (1,594.96 ha). Las coberturas de Invernadero y Urbano

Figura 2. Mapas de cobertura del suelo de la parroquia de Tabacundo para 2014 y 2024



(A) Clasificación de cobertura para el año 2014. (B) Clasificación de cobertura para el año 2024. Fuente de datos: (A) Instituto Geográfico Militar (IGM) [17], [18]; (B) Imagen Sentinel-2 del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) [16]. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Distribución de la cobertura del suelo en la parroquia de Tabacundo para los años 2014 y 2024

Categoría	Área 2014 (ha)	Porcentaje 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Porcentaje 2024 (%)
Invernadero	634.27	8.9%	1,177.94	16.5%
Suelo	75.52	1.1%	557.75	7.8%
Agricultura	2,591.93	36.6%	2,900.06	40.7%
Urbano	195.17	2.8%	315.81	4.4%
Agua	118.53	1.7%	65.16	0.9%
Bosque	1,880.04	26.5%	1,235.00	17.3%
Arbustos y herbáceas	1,594.96	22.5%	868.91	12.2%
Total	7,090.42	100.0%	7,120.63	100.0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Distribución de la cobertura del suelo en la parroquia de Tabacundo para los años 2014 y 2024 para el área común.

Categoría	Área 2014 (ha)	Porcentaje 2014 (%)	Área 2024 (ha)	Porcentaje 2024 (%)
Invernadero	2590.83	36.62%	2891.52	40.87%
Suelo	116.86	1.65%	64.88	0.92%
Agricultura	1591.11	22.49%	856.58	12.11%
Urbano	1871.65	26.45%	1222.08	17.27%
Agua	634.06	8.96%	1177.52	16.64%
Bosque	75.43	1.07%	546.64	7.73%
Arbustos y herbáceas	195	2.76%	315.71	4.46%
Total	7074.94	100.00	7074.93	100.00

Fuente: Elaboración propia.

ocupaban el 8.9% y 2.8% del área, respectivamente (Tabla 5).

Para el año 2024, la Agricultura se mantenía como la clase de cobertura dominante, representando el 40.7% de la superficie (2,900.06 ha). En este periodo, el Bosque abarcaba el 17.3% (1,235.00 ha) y los Invernaderos el 16.5% (1,177.94 ha) del territorio. La cobertura de Arbustos y herbáceas correspondía al 12.2%, mientras que el área Urbana representaba el 4.4% del total (Tabla 5). Los valores para 2014 y 2024 se ven representados gráficamente en la Figura 3.

Importancia de las variables espectrales

Se calculó la importancia relativa de cada banda espectral en los modelos Random Forest para ambos periodos (Tabla 7). Para la clasificación de 2024, las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR 2 y SWIR 1) y del infrarrojo cercano (NIR) fueron las más influyentes, mientras que en el modelo de 2014, basado en RGB, la banda del Rojo (B4) tuvo la mayor contribución. Esta comparación confirma el valor superior de los datos multiespectrales de Sentinel-2, cuyas bandas infrarrojas son clave para discriminar con precisión las complejas coberturas del área de estudio [5].

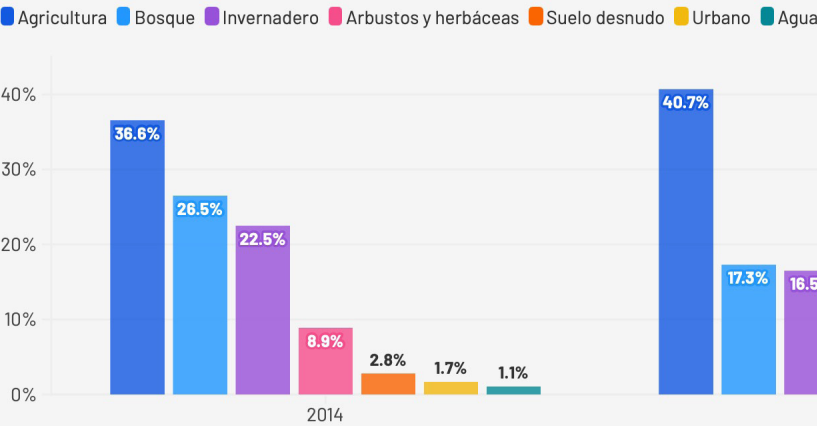


Tabla 7. Importancia relativa de las bandas espectrales en los modelos de clasificación

Banda espectral	Acronimo	Importancia relativa (modelo 2014)	Importancia relativa (modelo 2024)
B2	Azul	35.5	41.49
B3	Verde	48.2	49.26
B4	Rojo	61.7	52.53
B8	Nir	-	69.04
B11	Swir 1	-	72.37
B12	Swir 2	-	86.69

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Distribución porcentual de la cobertura del suelo



Fuente: Elaboración propia.

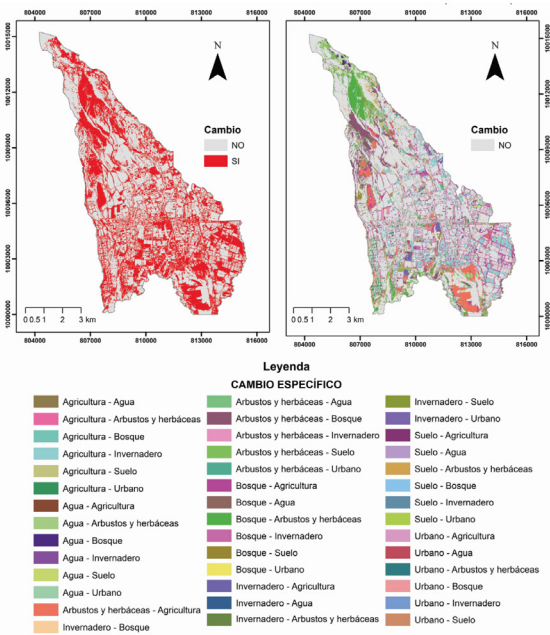
Análisis del cambio de cobertura en el área común (2014-2024)

Para realizar un análisis de cambio directo (Figura 4), las clasificaciones de 2014 y 2024 se ajustaron a un área de estudio común de 7,074.94 ha (Tabla 6). Dentro de esta superficie, se encontró que el 54.8% del territorio (3,876.97 ha) no experimentó ningún cambio en su cobertura, mientras que un significativo 45.2% (3,197.97 ha) se transformó entre 2014 y 2024.

El análisis de las transiciones dentro del área que sí cambió revela una dinámica compleja de pérdida de vegetación natural, expansión agrícola y crecimiento de infraestructuras. La Tabla 8 desglosa las transiciones encontradas, las cuales en conjunto explican la transformación del paisaje.

El proceso de cambio más dominante fue la conversión de Bosque a Agricultura, que re-

Figura 4. Dinámica del cambio de cobertura del suelo en Tabacundo (2014-2024)



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8. Transiciones de cambio de cobertura del suelo (2014-2024) dentro del área modificada (3,197.97 ha)

Transición de cobertura 2014 a 2024	Área (ha)	Porcentaje del cambio total (%)
Bosque→agricultura	478.57	14.96%
Agricultura→invernadero	389.60	12.18%
Arbustos y herbáceas→bosque	377.46	11.80%
Arbustos y herbáceas→agricultura	345.73	10.81%
Arbustos y herbáceas→suelo desnudo	251.99	7.88%
Bosque→arbustos y herbáceas	230.50	7.21%
Bosque→suelo desnudo	190.47	5.96%
Bosque→invernadero	175.36	5.48%
Agricultura→urbano	146.16	4.57%
Urbano→agricultura	82.95	2.59%
Agricultura→suelo desnudo	73.15	2.29%
Agricultura→bosque	70.65	2.21%
Invernadero→agricultura	68.64	2.15%
Bosque→urbano	48.72	1.52%
Arbustos y herbáceas→invernadero	45.89	1.44%
Agricultura→arbustos y herbáceas	32.63	1.02%
Suelo→arbustos y herbáceas	27.96	0.87%
Suelo→agricultura	23.23	0.73%
Agua→bosque	19.55	0.61%
Agua→agricultura	16.29	0.51%
Urbano→invernadero	15.57	0.49%
Arbustos y herbáceas→urbano	15.07	0.47%
Agua suelo→	11.07	0.35%
Invernadero→urbano	10.96	0.34%
Agua→arbustos y herbáceas	9.62	0.30%
Suelo→bosque	5.78	0.18%
Invernadero→suelo	5.00	0.16%
Agua→invernadero	3.80	0.12%
Bosque→agua	3.68	0.11%
Agricultura→agua	3.11	0.10%

Suelo→urbano	3.06	0.10%
Invernadero→bosque	2.78	0.09%
Suelo→nvernadero	2.60	0.08%
Urbano→bosque	2.16	0.07%
Urbano→suelo	2.09	0.07%
Invernadero→arbustos y herbaceas	1.86	0.06%
Arbustos y herbaceas→agua	1.65	0.05%
Urbano→arbustos y herbaceas	1.36	0.04%
Agua→urbano	0.97	0.03%
Invernadero→agua	0.15	0.00%
Urbano→agua	0.12	0.00%
Suelo→agua	0.01	0.00%
Total	3197.97	100%

Fuente: Elaboración propia.

presentó la transición individual más grande con 478.57 ha (15% del total del área cambiada). La expansión de Invernaderos fue otro motor clave de la transformación, alimentada principalmente por la conversión de tierras que antes eran Agricultura (389.60 ha). A su vez, la agricultura también se expandió sobre áreas de Arbustos y herbáceas (345.73 ha).

Se observaron también procesos de regeneración y degradación. La transición más notable en este sentido fue la conversión de Arbustos y herbáceas a Bosque, con 377.46 ha, sugiriendo un proceso de sucesión ecológica o reforestación en ciertas zonas. No obstante, las áreas de Arbustos y herbáceas también fueron transformadas a Suelo desnudo (251.99 ha) y a Agricultura, indicando su vulnerabilidad. El crecimiento Urbano, por su parte, se produjo mayoritariamente sobre antiguas tierras agrícolas (146.16 ha).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio revelan una profunda y acelerada transformación del paisaje en la parroquia de Tabacundo entre 2014 y 2024. En este último año, las coberturas de origen antrópico (Agricultura, Invernadero y Urbano) dominan el 61.97% del territorio, un

claro indicador de la intensa presión humana sobre el ecosistema local. Este patrón es consistente con la dinámica de otras regiones andinas especializadas en agricultura de exportación impulsada por demandas económicas globales en el sector florícola [3], [25].

El análisis de cambio de cobertura confirma que la expansión de la floricultura es el principal motor de esta transformación, una actividad económica que a pesar de generar una gran cantidad de empleos (aproximadamente 12,617 en 2019) [26] incrementa las presiones sobre recursos hídricos y conflictos territoriales [3], [27]. El notable aumento de la superficie de Invernadero (+543.46 ha) se produjo directamente a expensas de la Agricultura tradicional (389.60 ha) y del Bosque (175.36 ha). Este hallazgo sugiere un proceso de intensificación económica, donde cultivos de alto valor como las flores no solo desplazan a los cultivos tradicionales, sino que también impulsan la deforestación.

La dinámica de la cobertura agrícola presenta una particular complejidad. A pesar de ceder una porción significativa de sus tierras a los invernaderos y al crecimiento urbano, registró una ganancia neta (+300.69 ha). Esto se explica porque la agricultura se expandió



de manera aún más agresiva sobre coberturas naturales, convirtiendo 478.57 ha de Bosque y 345.73 ha de Arbustos y herbáceas. Este efecto de "desplazamiento y expansión" evidencia una presión en cascada: la floricultura intensiva presiona a la agricultura tradicional, y esta, a su vez, avanza sobre la frontera forestal. Esta pérdida de Bosque (-649.57 ha netos) y Arbustos y herbáceas (-734.53 ha netos) representa la principal consecuencia ambiental, con potenciales implicaciones para la regulación hídrica y la biodiversidad local.

Desde el punto de vista metodológico, la combinación de datos Sentinel-2 (cuya capacidad para discriminar coberturas complejas como invernaderos ha sido validada en trabajos recientes [10], [28] y un análisis multitemporal demostró ser altamente eficaz, alcanzando precisiones robustas para ambos años. La capacidad de cuantificar las transiciones específicas entre clases proporcionó una visión detallada de los procesos de cambio, superando la limitación de los análisis basados en una sola fecha.

Limitaciones del estudio

A pesar de la robustez del análisis de cambio, persisten algunas limitaciones inherentes al enfoque metodológico:

Resolución espacial: La resolución de 10 metros de las bandas principales del satélite Sentinel-2 resulta adecuada para análisis a escala de paisaje; sin embargo, puede no captar elementos lineales o de pequeña dimensión, como caminos rurales, acequias o invernaderos de menor tamaño. Este tipo de limitaciones ha sido superado en estudios que incorporan imágenes de muy alta resolución, obtenidas mediante drones u otras plataformas [29].

Dinámica Estacional: Aunque el estudio abarcó dos fechas, no se analizó la fenología o dinámica estacional de la vegetación. El uso de series temporales de imágenes podría permitir una diferenciación más fina entre tipos de cultivos o estados de la vegetación natural a lo largo del año.

Validación de Campo: El estudio se basó ex-

clusivamente en la interpretación de imágenes satelitales para la generación de puntos de referencia. La falta de una validación in situ introduce un grado de incertidumbre, especialmente en la diferenciación de clases espectralmente similares como "Suelo desnudo" y áreas urbanas de baja densidad o residuos de cosecha [30], [31].

Conclusiones

Este estudio generó con éxito mapas de cobertura del suelo de alta precisión para la parroquia de Tabacundo y cuantificó sus cambios entre 2014 y 2024. La principal conclusión es que el paisaje está siendo transformado por una agricultura intensiva y en expansión, particularmente la floricultura bajo invernadero, que está provocando una pérdida significativa de bosques y vegetación arbustiva.

La metodología empleada, basada en datos Sentinel-2 de libre acceso y plataformas como Google Earth Engine, demostró ser una herramienta potente y replicable para el monitoreo de paisajes agrícolas dinámicos en la región andina. Los resultados obtenidos son un insumo crítico para la planificación territorial y la gestión sostenible de los recursos naturales en Tabacundo.

Con base en los hallazgos y limitaciones, se proponen las siguientes líneas de investigación futura:

Integrar factores socioeconómicos: Analizar los impulsores (drivers) económicos y políticos detrás de los cambios de cobertura observados para informar mejor la toma de decisiones.

Explotar series temporales densas: Utilizar el archivo completo de Sentinel-2 para analizar la fenología de los cultivos, con el fin de diferenciar tipos específicos de agricultura y evaluar la intensidad de uso del suelo.

Realizar validación en campo: Complementar futuros estudios con campañas de validación in situ para aumentar la fiabilidad en la clasificación de clases complejas.

Modelar impactos ambientales: Usar los mapas de cobertura generados como base para

modelar los impactos de los cambios de cobertura sobre los recursos hídricos, la erosión del suelo y la conectividad de los ecosistemas.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este trabajo no ha sido financiado por ninguna entidad o proyecto de investigación.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El principal aporte de este trabajo es la cuantificación de las transiciones de cobertura del suelo en Tabacundo para el periodo 2014-2024, identificando la sustitución de agricultura tradicional por invernaderos y la consecuente presión sobre el bosque como los procesos de cambio dominantes. Esta caracterización de la dinámica del paisaje genera una línea base cartográfica, espacialmente explícita y actualizada, que constituye un insumo crítico para el modelado de impactos ambientales y la formulación de políticas de ordenamiento territorial. Metodológicamente, el estudio valida un marco de trabajo de bajo costo y alta replicabilidad para el monitoreo de agroecosistemas de montaña, demostrando la sinergia entre datos históricos y de la misión Sentinel-2 procesados en plataformas de libre acceso.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Todos los autores contribuyeron de igual manera en el desarrollo del presente artículo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Geográfico Militar (IGM) del Ecuador por facilitar la ortofoto de alta resolución correspondiente al año 2014, la cual fue un insumo fundamental para realizar el análisis multitemporal de este estudio.

REFERENCIAS

[1] R. E. Bilsborrow and S. J. Walsh, "Agri-

cultural Colonization in the Ecuadorian Amazon: Population, Biophysical, and Geographical Factors Affecting Land Use/Land Cover Change and Landscape Structure Investigation Group: LC-01," 2003. [Online]. Available: https://ecuador.web.unc.edu/wp-content/uploads/sites/17175/2018/05/NASA1_Final_Technical_Report_March_2003.pdf

[2] C. G. Aguilar, "Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador," CEDAMAZ, vol. 5, no. 1, Dec. 2016, Accessed: Jun. 19, 2025. [Online]. Available: <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/43>

[3] Vallejo Nicolás y Tenesaca Gabriel, "Especialización, proletarización y transformaciones territoriales: Un acercamiento al sector florícola en el cantón Pedro Moncayo | FlacsoAndes," Flacso Andes, 2020. <https://www.flacsoandes.edu.ec/node/63170> (accessed Jun. 19, 2025).

[4] C. Cachipundo, C. Sandoval, and J. Sandoval, "Sentinel-2A imaging in mapping greenhouse rose production and rainwater harvesting for agricultural irrigation use," Environ. Res. Commun., vol. 6, no. 11, 2024, doi: 10.1088/2515-7620/AD9437.

[5] D. P. Roy, J. Li, H. K. Zhang, L. Yan, H. Huang, and Z. Li, "Examination of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance," Remote Sens. Environ., vol. 199, pp. 25–38, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.RSE.2017.06.019.

[6] Google, "Conjuntos de datos de Sentinel-2 en Earth Engine | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers." [Online]. Available: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-2?hl=es-419>

[7] F. B. Balcik, G. Senel, and C. Goksel, "Greenhouse mapping using object based classi-

- fication and sentinel-2 satellite imagery," in 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics, Agro-Geoinformatics 2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. doi: 10.1109/AGRO-GEOINFORMATICS.2019.8820252.
- [8] S. Jombo and S. Adelabu, "Evaluating Landsat-8, Landsat-9 and Sentinel-2 images in land use and land cover (LULC) classification in a heterogeneous urban area," *GeoJournal*, vol. 88, pp. 377-399, Jun. 2023, doi: 10.1007/S10708-023-10982-8.
- [9] O. Mutanga and L. Kumar, "Google Earth Engine Applications," *Remote Sens.* 2019, Vol. 11, Page 591, vol. 11, no. 5, p. 591, Mar. 2019, doi: 10.3390/RS11050591.
- [10] G. M. Villegas Rugel, D. Ochoa, J. M. Menendez, and F. Van Coillie, "Evaluating the Applicability of Global LULC Products and an Author-Generated Phenology-Based Map for Regional Analysis: A Case Study in Ecuador's Ecoregions," *L.* 2023, Vol. 12, Page 1112, vol. 12, no. 5, p. 1112, May 2023, doi: 10.3390/LAND12051112.
- [11] J. I. Ochoa-Brito, A. Ghosh, and R. J. Hijmans, "Cropland expansion in Ecuador between 2000 and 2016," *PLoS One*, vol. 18, no. 9, p. e0291753, Sep. 2023, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0291753.
- [12] I. E. Ecuatoriano and G. A. D. de Pichincha, "Memoria técnica cantón Pedro Moncayo proyecto: 'Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25000' Sistemas productivos.," 2013. [Online]. Available: https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/pedro_moncayo/mt_pedro_moncayo_sistemas_productivos.pdf
- [13] M. Hall and P. Mothes, "The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador," *Bull. Volcanol.*, vol. 70, no. 6, pp. 675-702, Apr. 2008, doi: 10.1007/S00445-007-0161-2/METRICS.
- [14] GAD Municipal del Cantón Pedro Moncayo, "Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2021-2023," 2021.
- [15] Esri, "World Imagery," 2025.
- [16] European Space Agency, "Sentinel-2 Data," European Space Agency, 2023. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/copernicus/sentinel-2> (accessed Jun. 20, 2025).
- [17] Instituto Geográfico Militar, "Base escala 1:50.000 y 250.000," 2011.
- [18] SIGTIERRAS, "Fotografía Aérea y Ortofotos," 2014. <http://www.sigtierras.gob.ec/fotografia-aerea-y-ortofotos/> (accessed Jun. 20, 2025).
- [19] M. K. Bennett, N. Younes, and K. Joyce, "Automating Drone Image Processing to Map Coral Reef Substrates Using Google Earth Engine," *Drones* 2020, Vol. 4, Page 50, vol. 4, no. 3, p. 50, Aug. 2020, doi: 10.3390/DRONES4030050.
- [20] L. Breiman, "Random forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324/METRICS.
- [21] P. O. Gislason, J. A. Benediktsson, and J. R. Sveinsson, "Random Forests for land cover classification," *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 27, no. 4, pp. 294-300, Mar. 2006, doi: 10.1016/J.PATREC.2005.08.011.
- [22] Y. Jiang, H. Wang, Y. Cai, and B. Fu, "Salt and Pepper Noise Removal Method Based on the Edge-Adaptive Total Variation Model," *Front. Appl. Math. Stat.*, vol. 8, p. 918357, Jun. 2022, doi: 10.3389/FAMS.2022.918357/BIBTEX.
- [23] T. Sarzana, A. Maltese, A. Capolupo, and E. Tarantino, "Post-processing of Pixel and Object-Based Land Cover Classifications of Very High Spatial Resolution Images," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 12252 LNCS, pp. 797-812, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-58811-3_57.
- [24] L. Congedo, "Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS," *J. Open Source Softw.*, vol. 6, no. 64, p. 3172, Aug. 2021, doi:

10.21105/JOSS.03172.

- [25] G. Knapp, "Mountain Agriculture for Global Markets: The Case of Greenhouse Floriculture in Ecuador," *Mt. Phys. Human-Environmental, Sociocult. Dyn.*, vol. 1, no. 2, pp. 274-282, Mar. 2018, doi: 10.1080/24694452.2016.1203282.
- [26] G. A. D. M. del Cantón Pedro Moncayo, "Plan Estrategico Institucional gadmunicipal de Pedro Moncayo 2022." 2023. [Online]. Available: http://www.pedro-moncayo.gob.ec/documentos/LeyTransparencia_2023/abril/K1 Plan Estrategico Institucional gadmunicipal de Pedro Moncayo2022.pdf
- [27] P. Mena-Vásconez, "Flowers, powers, and water flows : conflicts over Irrigation Water and Rose Farming in the Ecuadorian Andes," *Wageningen Sch. Soc. Sci.*, Apr. 2020, doi: 10.18174/510268.
- [28] B. Niu et al., "Global-PCG-10: a 10-m global map of plastic-covered greenhouses derived from Sentinel-2 in 2020," *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, pp. 1-30, 2025, doi: 10.5194/essd-2024-538.
- [29] M. A. Aguilar, R. Jiménez-Lao, C. Ladisa, F. J. Aguilar, and E. Tarantino, "Comparison of spectral indices extracted from Sentinel-2 images to map plastic covered greenhouses through an object-based approach," *GIScience Remote Sens.*, vol. 59, no. 1, pp. 822-842, Jun. 2022, doi: 10.1080/15481603.2022.2071057.
- [30] B. Delaney, K. Tansey, and M. Whelan, "Satellite Remote Sensing Techniques and Limitations for Identifying Bare Soil," *Remote Sens.* 2025, Vol. 17, Page 630, vol. 17, no. 4, p. 630, Feb. 2025, doi: 10.3390/RS17040630.
- [31] K. Adhikari et al., "Hyperspectral Bare Soil Index (HBSI): Mapping Soil Using an Ensemble of Spectral Indices in Machine Learning Environment," *L.* 2023, Vol. 12, Page 1375, vol. 12, no. 7, p. 1375, Jul. 2023, doi: 10.3390/LAND12071375.

KEVIN VALENCIA

Nota biográfica del autor

<https://orcid.org/0000-0002-0558-4477>

Ingeniero en Biodiversidad y Recursos Genéticos por la Universidad Tecnológica Indoamérica y Magíster en Gestión Ambiental por la Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Sus líneas de investigación incluyen la biodiversidad, gestión ambiental, biotecnología, sistemas de información geográfica y teledetección aplicada al análisis territorial. Actualmente, se desempeña como gestor de investigación en el Yaku Parque Museo del Agua, parte de la Fundación Museos de la Ciudad, en Quito, Ecuador.

SHARON BELTRÁN

Nota biográfica del autor

<https://orcid.org/0009-0001-5572-3519>

Ingeniera en Biodiversidad y Recursos Genéticos de la Universidad Tecnológica Indoamérica. Ha trabajado como asistente de investigación en proyectos relacionados con etnobiología, cambio climático, ecología de anfibios y genética. Investigación independiente en temas sobre modelamiento territorial y ecología.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

