



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y AMBIENTALES
CENTRO DE ESTUDIOS FORESTALES Y AMBIENTALES DE POSTGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA MANEJO DE BOSQUES



**EVALUACIÓN MULTITEMPORAL DE LOS CAMBIOS DE COBERTURAS
Y USOS DE LA TIERRA PARA LA ESTIMACIÓN DE FLUJOS DE
CARBONO EN BIOMASA AÉREA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO
SANTO DOMINGO, ESTADO MÉRIDA, VENEZUELA**

www.bdigital.ula.ve

Realizado por:

Ing. María Victoria Dávila Espinoza

Tutor Académico

Prof. Dr. Cristopher Camargo

Mérida, 2025

Reconocimiento

Agradecimientos

Culminar esta Maestría en Manejo de Bosques del CEFAP-ULA es una meta cumplida, que no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas especiales.

En primer lugar, agradezco a Dios por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar este camino académico y profesional.

A mis padres, Arminda y Saturnino, por ser el cimiento de mi vida, por sus sacrificios y su amor incondicional. Todo lo que soy se lo debo a su ejemplo y dedicación.

A mi hijo, Juan Pablo, quien ha sido mi mayor motivación y el motor que me impulsó a seguir adelante en los momentos de mayor cansancio. Este logro es, ante todo, para su futuro.

A mi tutor, Prof. Christopher Camargo, por ser más que un guía académico. Gracias por su apoyo incondicional y por creer en mí, incluso en los momentos de duda. Su integridad y calidad humana han sido el pilar que sostuvo este trabajo de grado, transformando cada desafío en una lección compartida. Este trabajo es, en gran medida, fruto de su de su excelente visión como especialista en Sistemas de Información Geográfica, cuya guía técnica fue fundamental para elevar el nivel de esta investigación.

A la Prof. Lilian Bracamonte, coordinadora del CEFAP, por ser ejemplo de resistencia y compromiso institucional. Agradezco que a pesar de las adversidades que atraviesa nuestro país, ha permitido que alcancemos nuestras metas profesionales apostando por el futuro de esta nación.

Al Instituto de Investigaciones para el Desarrollo Forestal (INDEFOR), en especial a su director, el Prof. Jesús Araujo, por haber hecho posible las salidas de campo mediante el apoyo logístico del vehículo de la institución. Su colaboración fue determinante para alcanzar los objetivos planteados en este estudio.

A mis evaluadores Prof. José Lozada y Prof. Arturo Osorio, por el tiempo y la rigurosidad dedicados a la revisión de este trabajo. Sus consejos y correcciones pertinentes fueron fundamentales para el crecimiento de esta investigación. Es un honor haber contado con sus observaciones, especialmente habiendo sido mis profesores tanto en el pregrado como en el posgrado; gracias por haber sido parte constante de mi formación académica durante todos estos años.

A los profesores de las diversas cátedras de la Maestría de Manejo de Bosques, por la excelencia en la formación recibida. Su compromiso y experticia técnica fueron fundamentales en mi desarrollo académico. Gracias por transmitirnos sus conocimientos con dedicación; su guía ha sido el insumo principal para formarnos como profesionales integrales y de alto nivel."

A mi amiga y colega Andreina, Gracias por tantos años de amistad incondicional. Compartir la pasión por el ámbito forestal y los desafíos de esta carrera contigo ha sido un regalo. Andreina y Marta, gracias por estar siempre presente en cada paso de este camino y apoyo inquebrantable.

Al Tio Poncho, Anita y Rosa Acevedo, a quienes considero mis segundos padres, brindándome siempre un hogar y apoyo incondicional.

A mis compañeros de estudio de la maestría, Laura, Katy y Simón, por la hermandad que construimos en el aula y en campo. Gracias por cada obstáculo que superamos juntos, por el apoyo mutuo y por la alegría de culminar esta etapa como el equipo que siempre fuimos.

Finalmente, agradezco profundamente a las personas que me brindaron su apoyo económico, permitiéndome dedicar el tiempo y los recursos necesarios para finalizar con éxito esta meta.

Resumen

La investigación aborda el papel de la teledetección como herramienta clave para el estudio del cambio climático, mediante el análisis multitemporal de la cobertura y uso de la tierra en la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, ubicada en la Región de los Andes Venezolanos.

Entre las fuentes utilizadas destacan la leyenda CORINE Land Cover para definir coberturas y usos de la tierra. Se realizó un análisis de reservas y flujos de carbono durante los períodos 2015–2020 y 2020–2025, aplicando las directrices del IPCC (AFOLU), el mapa de densidad de carbono de biomasa viva de [Harris et al. \(2021\)](#) (GFW), el mapa de carbono orgánico del suelo (COS) del Servicio Mundial de Información sobre Suelos, el mapa de reserva de carbono orgánico del suelo elaborado por [Sevilla et al. \(2021\)](#) para Venezuela y un modelo calibrado para la estimación de biomasa aérea en bosques andinos desarrollado por [Mora \(2022\)](#) aplicado sobre diversos NDVI.

Los resultados permiten identificar la sensibilidad de los reservorios de carbono frente a los cambios de cobertura, por ejemplo; Los cultivos transitorios presentaron una ligera expansión inicial (2015–2020), las tierras desnudas y degradadas crecieron de manera marcada, pasando de 116,17 ha en 2015 a 301,48 ha en 2025. El bosque denso alto de tierra firme disminuyó de 5689,77 ha a 5622,94 ha y los arbustales de 8050,15 ha a 7927,45 ha. En contraste, el herbazal denso aumentó de 1580,49 ha a 1653,97 ha.

El análisis de flujos de carbono reveló que, en el periodo 2015–2020, el bosque denso fue la principal fuente de emisiones (4166 Mg C), principalmente por su conversión a tierras degradadas y cultivos. El estudio cubre un vacío metodológico al ofrecer una primera aproximación a la estimación de reservas de carbono en la cuenca. Además se plantea la necesidad de establecer parcelas permanentes y generar ecuaciones alométricas locales para reducir la incertidumbre en futuros inventarios de GEI.

Palabras clave: calentamiento global, cambio climático, carbono, cambios de cobertura y uso de la tierra, Coordinación de la Información sobre el Medio Ambiente CORINE Land Cover, sensores remotos, análisis multitemporal.

Abstract

This research addresses the role of remote sensing as a key tool for climate change studies through a multitemporal analysis of land use and land cover (LULC) in the Upper Santo Domingo River Basin, located in the Venezuelan Andes.

Among the primary sources, the CORINE Land Cover legend was utilized to define land cover and use classes. An analysis of carbon stocks and flows was conducted for the 2015–2020 and 2020–2025 periods, applying IPCC (AFOLU) guidelines. The study integrated the live biomass carbon density map by Harris et al. (2021) (GFW), the Soil Organic Carbon (SOC) map from the World Soil Information Service, the soil organic carbon stock map for Venezuela by Sevilla et al. (2021), and a calibrated model for estimating aboveground biomass in Andean forests developed by Mora (2022) applied to various NDVI datasets.

The results identify the sensitivity of carbon reservoirs to land cover changes. For instance, transitory crops showed a slight initial expansion (2015–2020), while bare and degraded lands grew markedly, increasing from 116.17 ha in 2015 to 301.48 ha in 2025. High-density terra firme forest decreased from 5,689.77 ha to 5,622.94 ha, and shrublands from 8,050.15 ha to 7,927.45 ha. In contrast, dense grasslands increased from 1,580.49 ha to 1,653.97 ha.

Carbon flow analysis revealed that, during the 2015–2020 period, dense forest was the primary source of emissions (4,166 Mg C), mainly due to its conversion into degraded lands and crops. This study fills a methodological gap by providing a first approximation of carbon stock estimations in the basin. Furthermore, it highlights the necessity of establishing permanent plots and generating local allometric equations to reduce uncertainty in future GHG inventories.

Keywords: global warming, climate change, carbon, CORINE Land Cover (CLC), Coordination of Information on the Environment Land, Use and Land Cover (LULC), remote sensing, multitemporal analysis

Tabla de contenido

Capítulo I	12
1.1. Introducción.....	12
1.2. Planteamiento del Problema y Justificación.....	14
1.3. Objetivos.....	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos	21
Capítulo II	22
2. Marco teórico.....	22
2.1. Antecedentes.....	22
2.2. Bases teóricas	27
2.2.1. Contribución de los sensores remotos en el estudio de las coberturas y usos de la tierra y el carbono	27
2.2.2. Sumidero de carbono en los ecosistemas.....	30
2.2.3. Coberturas y usos de La Tierra y su importancia en la estimación del carbono	32
2.2.4. Cartografía de cobertura y uso de la tierra mediante sensores remotos.....	33
2.2.5. Cambios de cobertura y uso de la tierra (CCUT) y análisis multitemporal	33
2.2.6. Sistemas de clasificación de coberturas y usos de la tierra (CUT)	35
2.2.7. Cuenca hidrográfica	37
2.2.8. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero	39
2.2.9. Breve descripción del Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.....	40
Capítulo III.....	43
3. Materiales y métodos	43
3.1. Descripción del área de estudio.....	43
3.1.1. Ubicación del área de estudio	43
3.1.2. Aspectos Físico-naturales	44
3.1.2.1. Geología.....	44

3.1.2.2. Geomorfología.....	46
3.1.2.3. Suelos	48
3.1.2.4. Hidrografía.....	50
3.1.2.5. Clima.....	52
3.1.2.6. Vegetación	56
3.1.2.7. Fauna.....	58
3.1.3. Aspectos socioeconómicos	59
3.1.4. ABRAE	60
3.2. Análisis de Coberturas y Usos de la Tierra	62
3.2.1. Imágenes satelitales de SAS Planet y MDE Alos Palsar	63
3.2.2. Adquisición de imágenes satelitales Sentinel 2 L2A	63
3.2.3. Composición de bandas y mejoramiento de imagen satelital	64
3.2.4. Cartografía de coberturas y usos de la tierra para los años 2015, 2020 y 2025	65
3.2.4.1. Definición de Términos de referencia cartográfica de los mapas	65
3.2.4.2. Leyenda de coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover	66
3.2.4.3. Interpretación visual en pantalla de CUT	71
3.2.5. Verificación de campo y ajuste de la interpretación preliminar	72
3.2.6. Validación topológica de los mapas de coberturas y usos de la tierra	72
3.2.7. Validación de la exactitud de los mapas de cobertura y usos de la tierra..	73
3.3. Determinación de los cambios de cobertura y uso de la tierra	75
3.4. Estimaciones de carbono	75
4. Resultados.....	84
4.1 Imágenes satelitales Sentinel 2 L2A	84
4.2 Clave de interpretación de las categorías delimitadas basadas en la Leyenda Corine Land Cover	85
4.3 Verificación de campo y ajuste de la interpretación preliminar	94
4.4. Coberturas y usos de la tierra de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo	96
4.4.1. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2025	96
4.4.2. Validación de la exactitud cartográfica CUT 2025	98
4.4.3. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2020.....	102

4.4.4. Validación de la exactitud cartográfica CUT	103
4.4.5. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2015.....	106
4.4.6. Validación de la exactitud cartográfica CUT 2015.....	108
4.5. Determinación de los cambios de cobertura y uso de la tierra	111
4.5.1. Cambios de cobertura y uso de la tierra 2015-2020.....	111
4.5.2 Cambios de cobertura y uso de la tierra 2020-2025.....	114
4.5.3. Resumen de los dos periodos estudiados.....	117
4.6 Reservas de Carbono almacenado para los años 2015, 2020 y 2025.....	120
4.6.1 Biomasa Aérea para los años 2015, 2020 y 2025 estimado por metodología del IPCC	120
4.6.2 Biomasa subterránea, biomasa muerta (hojarasca) y carbono en el suelo (COS) para tierras forestales en los años 2015, 2020 y 2025 estimados por la metodología del IPCC.	122
4.6.2.1. Carbono en Humedales por medio de metodología IPCC.....	124
4.6.2.2. Biomasa Aérea para los años 2015, 2020 y 2025 estimado por modelo alométrico calibrado aplicados sobre NDVI y mapa de biomasa GFW.....	124
4.6.3 Análisis Comparativo de Metodologías para la Estimación de Reservas de Carbono en la biomasa aérea	125
4.7. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra.....	129
5. Conclusiones.....	133
Referencias citadas	138

Lista de figuras

Figura 1.1. Emisiones históricas de GEI para el mundo Fuente: Elaboración propia a partir de datos de WRI (2021)	16
Figura 1.2. Emisiones históricas de GEI para Venezuela. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de WRI (2021)	17
Figura 1.3. Balance de emisiones y absorciones del subsector uso de la tierra. Fuente: Elaboración propia a partir de datos a partir de los datos de RBV (2017).	18
Figura 2.1. Partes de la cuenca y ejemplo de la cuenca del Río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia a partir de Marquina et al. (2024) y Vásquez et al. (2016)	39
Figura 3.1. Ubicación geográfica de la cuenca alta del Río Santo Domingo, estado Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos del IGVSBS-SIGOT	43
Figura 3.2. Geología de la Cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de la capa de Bellizzia et al. (1976).	44
Figura 3.3. Morfología simbólica 3D y sus correspondientes geoformas para los 10 elementos de relieve comunes. Fuente: Jasiewicz y Stepinski (2013)	47
Figura 3.4. Geomorfología de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Mérida. Elaboración propia a partir de la metodología de Jasiewicz y Stepinski (2013)	47
Figura 3.5. Pendiente de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de FAO – UNESCO (1976)	48
Figura 3.6. Categorías de suelos de la cuenca alta del río Santo Domingo. Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de ANIH-CGD (2024)	49
Figura 3.7. Hidrografía de la Cuenca Alta de Río Santo domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de capas vectoriales de hidrografía, MDE para curvas de nivel e información de Rocha (1998) y Cordova et al. (2016).	52
Figura 3.8. Temperatura mínima a máxima de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017)	53
Figura 3.9. Temperatura media anual de la cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017)	54
Figura 3.10. Precipitación mínima a máxima anual de la Cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. WorldClim (Fick y Hijmans, 2017)	55
Figura 3.11. Precipitación mensual de la cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017)	55
Figura 3.12. Tipos de clima de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Mérida según Köppen. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Sánchez (2016a)	56
Figura 3.13. Vegetación en las zonas de vida según el Sistema Holdridge, a) Bosque Húmedo Montano Bajo b) Bosque Muy Húmedo Montano y c) Páramo	56
Figura 3.14. Algunas especies vegetales: a) Digitalis Purpurea L., b) Alnus Acuminata, c) Hypericum juniperinum, d) Polylepis seríceo y e) Coespeletia timotensis. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de (Ewel y Madriz, 1968; Delgado y León, 2017; Araujo, 2024; IFLA, 2025)	58
Figura 3.15. Especies Fauna: a) Tremarctos ornatus, b) Odocoileus lasiotis, c) Cryptotis meridensis, d) Pauxi pauxi, e) Redonda empetrus, f) Cuniculus taczanowskii, g) Mannophryne cordilleriana, h) Atelopus mucubajiensis. Fuente: Elaboración propia a partir de datos e imágenes de Rodríguez et al. (2015).	59
Figura 3.16. Actividades económicas: a) Agricultura tradicional, b) Laguna de Mucubají P.N. Sierra Nevada, c) Parada turística en el sector Baho y d) Centro poblado sector Las Piedras. Fuente: Elaboración propia	60
Figura 3.17. Áreas Bajo Régimen de Administración Especial – ABRAE (Sistema de Áreas Protegidas de Venezuela) de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de las capas vectoriales de IGVSBS-SIGOT	62

Figura 3.18. Resumen de metodología de cambios de existencias de carbono por año, en una categoría (estrato o subcategorías) y en los depósitos de cada uno de ellos. Elaboración propia a partir de IPCC (2006)	78
Figura 3.19. Resumen de metodología de cambios de existencias de carbono por año, en una categoría (estrato o subcategorías) y en los depósitos de cada uno de ellos. Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2006)	80
Figura 4.1. Puntos de Observación Panorámica utilizados para la verificación de campo y ajuste de la interpretación visual en campo. Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 4.2. Salida de campo para toma de puntos con el GPS, fotografías panorámicas, revisión de la cartografía impresa e interpretación en pantalla en computador portátil. Fuente: Elaboración Propia	95
Figura 4.3. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2025. Fuente: Elaboración propia	97
Figura 4.4. Muestras para validar el mapa de cobertura y uso de la cuenca (Fuente: Elaboración propia a partir de la edición del experto).	100
Figura 4.5. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2020 Fuente: Elaboración propia	102
Figura 4.6. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2015. Fuente: Elaboración propia	107
Figura 4.7. Cambios netos entre 2015-2020 para la cuenca alta del Río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia	116
Figura 4.8. Cambios netos entre 2020-2025 para la cuenca alta del rio Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia	119
Figura 4.9. Mapas de cambios netos de categorías resaltantes. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 4.10. Mapas de Biomasa aérea para Bosque denso de tierra firme 2015 – 2020 – 2025 calculado a partir de NDVI. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 4.11. Mapas de reservas de Carbono en el suelo (superior) y en la biomasa aérea (inferior). Fuente: Elaboración propia.	127

Lista de tablas

Tabla 2.1. Definiciones de los depósitos de carbono. Fuente: IPCC (2006)	32
Tabla 2.2. Estructura de niveles para métodos AFOLU. IPCC (2006).	41
Tabla 3.1. Porcentaje de Superficie en Hectáreas de las unidades estratificadas. Fuente: (Bellizzia et al., 1976)	45
Tabla 3.2. Bandas espectrales del sensor Sentinel 2 L2A. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la ESA (2015)	64
Tabla 3.3. Términos de referencia cartográficos. Fuente: Elaboración propia	66
Tabla 3.4. Categorías empleadas en la metodología CORINE Land Cover adaptada a la cuenca alta del rio Santo Domingo – Mérida. Fuente: elaborado a partir de IDEAM (2010).	71
Tabla 3.5. Ficha para cada categoría Corine Land Cover para constituir la Clave de interpretación. (Fuente. Elaboración propia con la información de Junta de Andalucía (2007), Basterra (2011) e INEGI (2015)	72
Tabla 3.6. Factores de Emisión utilizados para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Fuente: IPCC (2006)	80

Tabla 3.7. Categorías para estimar biomasa aérea y carbono (Fuente. Elaboración propia con la información del IPCC, 2003)	81
Tabla 4.1. Imágenes Sentinel 2 empleadas en la identificación de las coberturas y usos de la tierra en La Cuenca Alta del Río Santo Domingo. Fuente: elaboración propia.	85
Tabla 4.2. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas 2025. Fuente: Elaboración propia.	98
Tabla 4.3. Porcentaje del área de las coberturas y usos de la tierra al 5% y 10% para las unidades de muestreo para el año 2025. Fuente: Elaboración propia	99
Tabla 4.4. Matriz de confusión representada en hectáreas, para el análisis del Mapa de cobertura y usos de la tierra de La Cuenca Alta del Río Santo Domingo 2025. Fuente: Elaboración propia.....	101
Tabla 4.5. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas y usos de la tierra 2020. Fuente: Elaboración propia.....	103
Tabla 4.6. Matriz de confusión representada en hectáreas, para el análisis del Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del río Santo Domingo 2020. Fuente: Elaboración propia.....	105
Tabla 4.7. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas y usos de la tierra 2015. Fuente: Elaboración propia.....	108
Tabla 4.8. Matriz de confusión representada en hectáreas, para el análisis del Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del río Santo Domingo 2015. Fuente: Elaboración propia.....	110
Tabla 4.9. Matriz de cambio de cobertura (ha), en el período 2015-2020 en la cuenca alta Del Río Santo Domingo 2015-2020. Fuente: Elaboración propia.	112
Tabla 4.10. Resumen de cambios encontrados para el periodo 2015 – 2020. Fuente: Elaboración propia.	113
Tabla 4.11. Matriz de tabulación cruzada en hectáreas para La cuenca alta del Río Santo Domingo en el periodo 2020-2025. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 4.12. Resumen de cambios encontrados para el periodo 2020-2025. Fuente: Elaboración propia	116
Tabla 4.13. Resumen de Áreas en hectáreas de las diferentes coberturas y usos en los tres períodos. Fuente: Elaboración propia.	118
Tabla 4.14. Biomasa Aérea de las categorías y subcategorías para los años 2015, 2020 y 2025 de la cuenca alta del río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia.	121
Tabla 4.15. Depósitos de carbono en las categorías y subcategorías para los años 2015, 2020 y 2025 de la cuenca alta del río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia.	122
Tabla 4.16. Biomasa subterránea, biomasa muerta (hojarasca) y COS solo para la categoría de tierras forestales para los años 2015, 2020 y 2025. Fuente: Elaboración propia.	123
Tabla 4.17. Total de Reservas de Carbono en el Bosque Denso Alto (Método IPCC). Fuente: Elaboración propia.	123
Tabla 4.18. Comparación de resultados de acuerdo con las tres metodologías aplicadas para la determinación de biomasa aérea y carbono orgánico en el suelo	128
Tabla 4.19. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra para 2015 – 2020. Fuente: Elaboración propia	131
Tabla 4.20. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra para el periodo 2020 – 2025. Fuente: Elaboración propia.	132

Capítulo I

1.1. Introducción

La teledetección es una técnica de observación mediante sensores remotos que captura información de las superficies terrestre, marina y atmosférica sin contacto directo (IGN, 2020). Los datos recolectados se almacenan para analizar sus características espaciales, a menudo influenciadas por fenómenos globales como el cambio climático. Este fenómeno se debe a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, que retienen el calor solar y provocan el calentamiento global (Reef Resilience Network, 2023).

Actualmente, la teledetección permite observar, estudiar y monitorear procesos clave para la investigación del cambio climático (Yang *et al.*, 2013). Estos incluyen los cambios de cobertura y usos de la tierra, el clima, las reservas de carbono y los pronósticos meteorológicos, entre otros.

En la Región Andina venezolana, la expansión de la frontera agrícola ha intensificado el cambio de uso del suelo y coberturas vegetales. Esto ha causado que se reduzca el área de páramos y otros ecosistemas, lo que tiene serias consecuencias, como la pérdida de diferentes especies, la disminución del agua disponible y el aumento de la temperatura (Camargo *et al.*, 2020). Todo esto, cambia por completo el normal funcionamiento de los ecosistemas locales.

La cuenca alta del río Santo Domingo, como parte de la región andina venezolana, caracterizada por ecosistemas de páramo, bosques montanos y subandinos, de gran relevancia ecológica y social, presenta reservorios de carbono altamente sensibles a los cambios de cobertura, tanto naturales como inducidos por actividades humanas como la expansión de la frontera agrícola y el aumento de áreas urbanas (Marquina *et al.*, 2024).

Como resultado de las ideas previamente comentadas, el análisis multitemporal de las coberturas y usos de la tierra no solo constituye un recurso clave para el conocimiento territorial de dicha cuenca, sino que también contribuye a la comprensión de la dinámica de sus reservas de carbono.

Estos análisis tienen el potencial de ser replicados en variadas áreas del país (como otras cuencas hidrográficas u otras unidades espaciales). La información resultante es crucial para desarrollar planes de ordenamiento territorial y de manejo de la vegetación, identificar áreas prioritarias para la conservación e impulsar la educación y concienciación sobre el cambio climático.

Con el propósito de evaluar la cuenca desde la perspectiva del cambio climático, se llevó a cabo un análisis detallado que involucró un inventario de las reservas y flujos de carbono generados por los cambios en la cobertura y uso de la tierra durante los períodos 2015-2020 y 2020-2025.

Para estimar el carbono almacenado en los depósitos de biomasa terrestre, que incluyen la biomasa viva (tanto aérea como subterránea), la biomasa muerta (sólo hojarasca) y la biomasa presente en el suelo, así como las emisiones y absorciones de CO₂ derivadas de la conversión de las coberturas y usos, se utilizaron las directrices del sector Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU) establecidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Estas directrices, inicialmente propuestas en 2006 (IPCC, 2006) y posteriormente refinadas en 2019 (IPCC, 2019), emplean categorías y subcategorías de uso de la tierra basadas en las Orientaciones de Buenas Prácticas (OBP) para Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) de 2003 (IPCC, 2003). Además, integran Datos de Actividad (DA) que evalúan las actividades relacionadas con el uso de la tierra y sus cambios en las distintas clases y subclases (obtenibles por medio de interpretación visual en pantalla de imágenes satelitales), junto con los Factores de Emisión (FE) que evalúan las reservas de carbono y sus cambios. Esta integración permite estimar las reservas de carbono terrestres y las emisiones y absorciones de CO₂.

En añadidura a este enfoque, se recurrió a productos globales y nacionales de biomasa viva y suelo, como el mapa de densidad de carbono descrito por Harris *et al.* (2021), el mapa de COS del Servicio Mundial de Información sobre suelos, el mapa de reserva de carbono orgánico del suelo elaborado por Sevilla *et al.* (2021) y un modelo calibrado para la estimación de biomasa aérea en bosques andinos desarrollado por Mora (2022).

En síntesis, dado que la cuenca alta del río Santo Domingo es una unidad de análisis e intervención integrada —donde convergen dinámicas naturales y sociales, más allá de ser un simple espacio de drenaje hídrico— se confirma la necesidad de estudiar cómo los cambios en la cobertura vegetal afectan sus reservas de carbono.

Finalmente, es esencial señalar la ausencia de un estudio específico sobre la estimación de las reservas de carbono en esta cuenca. Por lo tanto, esta investigación busca cubrir dicho vacío metodológico y representa una oportunidad única para iniciar la comprensión de los procesos de emisión y absorción de carbono en el área.

1.2. Planteamiento del Problema y Justificación

El clima de la Tierra está cambiando ([U.S. Environmental Protection Agency - EPA, 2024](#)). Múltiples evidencias muestran modificaciones en océanos y ecosistemas del planeta, tales como cambios en los patrones de temperatura atmosférica y precipitaciones, aumento de la temperatura de los océanos, del nivel del mar y de la acidificación, deshielo de los glaciares y del hielo marino, cambios en la intensidad, duración y frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos ([IPCC, 2006](#); [Marvel *et al.*, 2023](#)) y cambios en las características de los ecosistemas (ejemplos: duración de la estación de crecimiento y momento de floración de las plantas y época de migración de las aves) ([EPA, 2025a](#); [EPA, 2025b](#)).

A nivel mundial, las consecuencias de dichas modificaciones de forma más precisa lo constituyen el aumento de la temperatura entre 1,5 y 4,5 °C en los próximos 100 años, alteraciones entrópicas cíclicas del clima y de los fenómenos del Niño y Niña ([EOS, 2021](#)), aumento de enfermedades transmitidas por vectores, inundaciones de terrenos y ciudades ubicadas en áreas costeras, tormentas más intensas y continuas, extinción de plantas y animales, pérdida de cosechas en áreas vulnerables, aumento de sequías, alteraciones en los patrones de precipitación global, características de los hábitats costeros, incendios forestales y de actividades productivas como la generación hidroeléctrica, el turismo, y aumento del nivel medio del mar entre 10 y 90 cm para el año 2100 (si la temperatura aumenta más de 2,5 °C), ocasionado por el derretimiento de una parte de los cuerpos de agua sólida ([MINEC, 2019](#)).

Estas modificaciones, entre muchas otras, son el resultado de la acumulación de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (óxido de nitrógeno, metano y gases fluorados), como consecuencia fundamentalmente del uso de los combustibles fósiles y la deforestación, que impiden la salida a capas más altas de la atmósfera de las radiaciones infrarrojas que emite la superficie terrestre (De La Rosa, 2008; Tafur *et al.*, 2022; Parlamento Europeo, 2023; EPA, 2024). Dicho cambio representa una amenaza sin precedentes a la estabilidad de los ecosistemas terrestres (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2006) y la vida humana (Keller y Blodgett, 2007).

Los ecosistemas terrestres y los océanos absorben algo más de la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las actividades humanas, lo que compensa parcialmente sus efectos climáticos (Leung *et al.*, 2023), emisiones que desde 1850 han aumentado las concentraciones del dióxido de carbono más del 47 %, las de óxido nítrico el 23 % y las de metano más del 156 % (Canadell *et al.*, 2021).

Según el World Resources Institute – WRI (2021), a nivel mundial, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado un 50% entre 1990 y 2021 (Figura 1.1), siendo el consumo de energía la mayor fuente de emisiones antropogénicas de GEI, sector que es responsable de un 75,5 % (37,41 Gt CO₂ eq) de las emisiones globales, que incluye los subsectores de transporte, generación de calor y electricidad, edificaciones, industria manufacturera y construcción, emisiones fugitivas y la quema de otros combustibles; además de éste, los sectores con más emisiones son la agricultura, incluyendo a la ganadería (5,86 Gt CO₂ eq, o 11,83 %); los procesos industriales de productos químicos, del cemento y de otros (3,26 Gt CO₂ eq, o 6,58 %); los residuos, incluyendo vertederos y aguas residuales (1,68 Gt CO₂ eq, o 3,39 %); y el de uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura (USCUSS), así como la deforestación (1,34 Gt CO₂ eq, o 2,70 %).

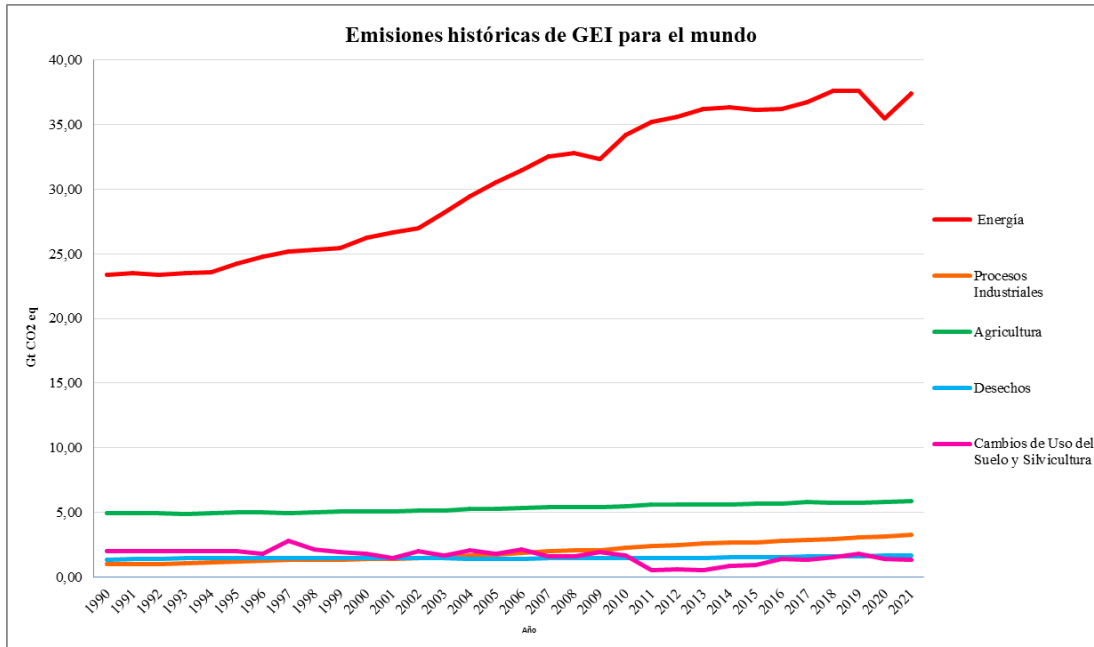


Figura 1.1. Emisiones históricas de GEI para el mundo Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [WRI \(2021\)](#).

En el caso particular del dióxido de carbono no eliminado de la atmósfera por los sumideros naturales, este persiste durante miles de años, lo que significa que CO₂ emitido hace mucho tiempo sigue contribuyendo al cambio climático en la actualidad ([Marvel et al., 2023](#)). Esta realidad requiere fuertes reducciones de las emisiones para limitar el calentamiento global inducido por el hombre a niveles específicos, como los señalados en algunas “Trayectorias Socioeconómicas Compartidas” o SPP (Shared Socioeconomic Pathways, por sus siglas en inglés) señaladas en el Sexto Informe de Evaluación (AR6) elaborado por el IPCC ([IPCC, 2021](#); [Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño - CIIFEN, 2022](#)).

Uno de los sectores que incide en el cambio climático, es el de cambios de coberturas y usos de la tierra (aunada a la silvicultura) (ver Figura 1.1), estos implican la transformación de ecosistemas naturales en áreas agrícolas, urbanas o industriales, los cuales pueden desencadenar secuencias complejas de liberación y absorción de carbono y consecuencias devastadoras para la biodiversidad ([Ellis et al., 2010](#); [Thornton et al., 2023](#)). De igual modo, el cambio climático tiene incidencia sobre las coberturas y usos de la tierra y la producción de biomasa vegetal, así como en sus cambios ([Li y Fang, 2016](#)), razones por las cuales, se requiere ejecutar estudios más

detallados y con multiplicidad de enfoques sobre este sector emisor de GEI (Riverí y Ginarte, 2023).

En Venezuela, las consecuencias del cambio climático implican la modificación de los patrones de temperatura (para el año 2060 los valores promedio sobrepasarán los 28 °C en gran parte del país), disminución generalizada de la lluvia en el país a lo largo del siglo XXI, disminución de la capacidad de recuperación estacional de los embalses, menor disponibilidad y aumento de conflictos de uso del agua y probables alteraciones negativas de su calidad, mayor vulnerabilidad de los sistemas de agua potable y saneamiento, y posible incremento del número de casos de enfermedades gastrointestinales y vectores (ejemplo: dengue y malaria) (MINEC, 2019).

En cuanto a inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, Venezuela alcanzó en el año 2021, 0,226 Gt CO₂ eq de emisiones (Figura 1.2), siendo el sector energético el generador del 53,76% (0,122 Gt CO₂ eq), seguido por los cambios de uso de la tierra y silvicultura con 0,043 Gt CO₂ eq (18,82 %), agricultura con 0,38 Gt CO₂ eq (16,77 %), procesos industriales con 0,013 Gt CO₂ eq (5,66 %) y desechos con 0,011 Gt CO₂ eq (4,99%). (WRI, 2021).

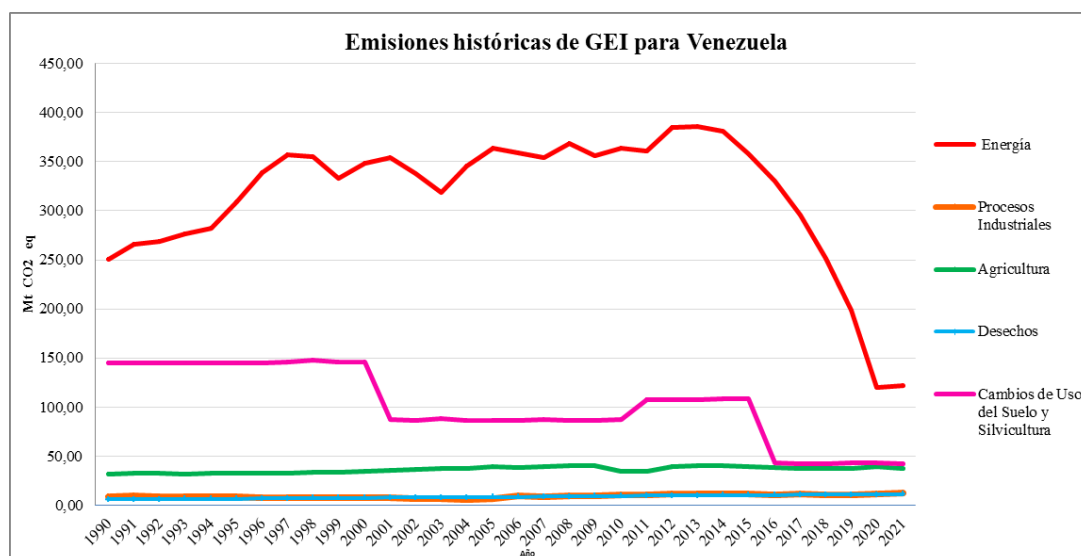


Figura 1.2. Emisiones históricas de GEI para Venezuela. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de WRI (2021).

Precisando un poco más la información con respecto al subsector usos de la tierra estimada en Venezuela para el año 2010 (Segunda Comunicación de Cambio Climático), el mismo señaló (Figura 1.3) una absorción de 89.977 Gg CO₂ procedente mayoritariamente de la categoría tierras de bosque que permanecieron como tales; sin embargo, el mismo subsector experimentó una emisión de 59.738 Gg de CO₂ debido a la conversión de tierras forestales a cultivos, denotando en consecuencia la permanencia del subsector como un sumidero, al absorber de forma neta 30.239 Gg de CO₂ (RBV, 2017).

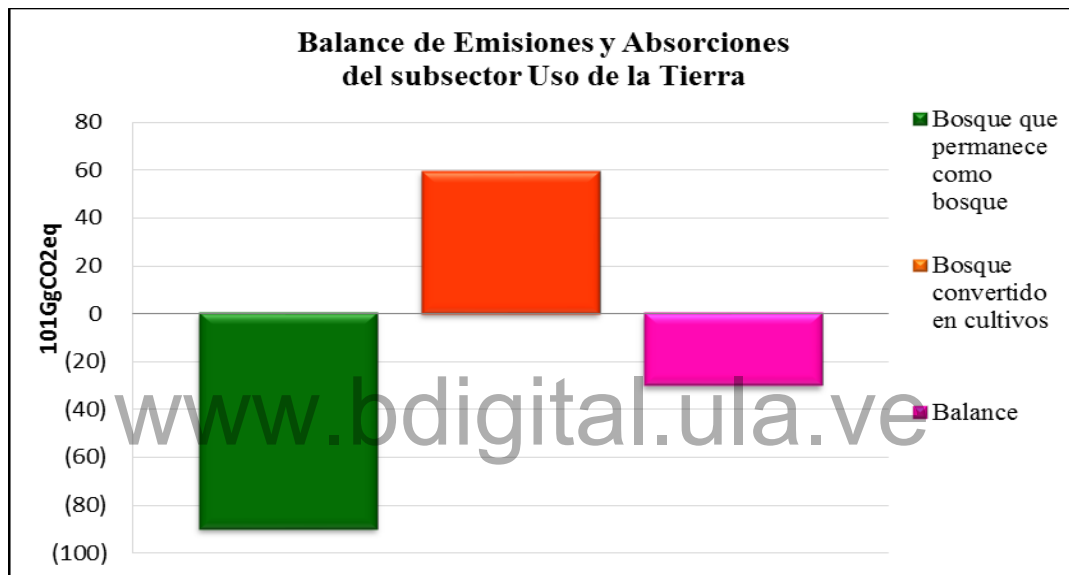


Figura 1.3. Balance de emisiones y absorciones del subsector uso de la tierra. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de RBV (2017).

Ahora bien, dentro de la variedad de ecosistemas que presenta Venezuela, se encuentran los pertenecientes a la biorregión de los Andes venezolanos (Madi *et al.*, 2014). Estos son conocidos por una alta fragilidad e importancia para la regulación hídrica, y presentan una situación de vulnerabilidad extrema ante las actividades humanas (PCNCC, 2005). La agricultura intensiva (principal actividad económica), es la que ha generado en gran medida cambios en la cobertura vegetal, y fomentan la liberación de gases de efecto invernadero a la atmosfera (Lozano, 2006). De igual modo, estos cambios, han traído como consecuencias otros problemas ambientales como compactación del suelo, incendios forestales, deforestación, resistencia a plagas y enfermedades, entre otros (EOS, 2025a), que influyen en la biodiversidad e impactan directamente en los flujos de carbono.

A pesar de que es importante entender las emisiones, almacenamientos y absorciones de carbono, no hay estudios que examinen de forma completa los cambios en el uso y cobertura del suelo (CCUT) y su relación con los flujos de carbono en los Andes venezolanos. Por el contrario, existen estudios como los desarrollados por [Ramírez et al. \(2016\)](#) y [Sánchez et al. \(2024\)](#) a escala de parcelas con modelos alométricos, que han permitido obtener resultados de biomasa aérea para las coberturas boscosas involucradas, como una estimación que representa una parte del carbono total almacenado. Sin embargo, ambos estudios carecen de representaciones cartográficas para entender la variabilidad espacial de la biomasa aérea (y, por tanto, del carbono). Esto se debe principalmente a que el desarrollo de dichos modelos es costoso, pueden presentar limitaciones de tiempo y accesibilidad en áreas remotas y reflejar información específica de una o pocas especies (exclusión de especies con DAP < 10 cm o selección de las de mayor importancia), lo que dificulta su uso a escalas regionales y nacionales ([Tafur et al., 2022](#); [Fu et al., 2025](#)).

Otro ejemplo palpable de lo anteriormente mencionado es la cuenca alta del Río Santo Domingo, área de gran importancia económica y ambiental para el estado Mérida y el país, pues en ella coexisten una variedad de coberturas y usos, en los que estimaciones de almacenamiento, absorción y emisión de GEI, no han sido aún precisados.

Por lo tanto, es fundamental realizar estudios multitemporales que permitan identificar y cuantificar inventarios de carbono existentes, así como también posibles cambios acaecidos en el tiempo ([OMM, 2021](#)). Para ello se debe actualizar y detallar las categorías que representan de mejor manera las coberturas y usos de la tierra presentes en un área, utilizando métodos estandarizados de clasificación, como por ejemplo la de *CORINE Land Cover*, la cual permite generar datos fiables y completos de las mismas ([Malaver et al., 2023](#)). Este tipo de análisis, no solo contribuye a una mejor comprensión de la dinámica de un área de estudio, sino que también proporciona información valiosa para el conocimiento de los inventarios de carbono y, por ende, la formulación de políticas de conservación y manejo sostenible de los recursos naturales ([OMM, 2021](#)).

Este trabajo, pretende analizar, a partir de la identificación de los cambios de cobertura y usos de la tierra (CCUT - metodología *CORINE Land Cover*) y el seguimiento de las directrices del IPCC, los flujos de carbono presentes en la cuenca alta Del Río Santo Domingo, Estado Mérida, empleando imágenes satelitales Sentinel 2 y variadas técnicas de percepción remota y SIG para los periodos 2015-2020 y 2020-2025. Aunado a este enfoque, se procura comparar estos resultados con otros productos de carbono como el mapa de biomasa viva planteado por [Harris et al. \(2021\)](#), el mapa de COS del Servicio Mundial de Información sobre suelos, el mapa de reserva de carbono orgánico del suelo elaborado por [Sevilla et al. \(2021\)](#) y un modelo calibrado para la estimación de biomasa aérea en bosques andinos desarrollado por [Mora \(2022\)](#).

La ejecución de este estudio ayudará a generar información confiable y fidedigna para el estado Mérida y el país, en cuanto a la estimación actualizada de las coberturas y usos de la cuenca alta del río Santo Domingo, su dinámica en términos de ganancias, pérdidas y permanencias de las categorías involucradas, así como también estimaciones sobre balance de carbono en la última década. Todo ello servirá para generar líneas de acción que ayuden al diseño de estrategias de conservación, mitigación y adaptación de los efectos de esta dinámica sobre las comunidades del área de estudio y el cambio climático. Asimismo, servirá de base para contribuir con el inventario nacional de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) a través de una propuesta metodológica replicable en otras cuencas hidrográficas del país u otras unidades espaciales del territorio.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estimar mediante SIG, los flujos de carbono en biomasa aérea a partir del análisis de los cambios de cobertura y usos de la tierra en la cuenca alta del Río Santo Domingo, Estado Mérida, Venezuela.

1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer las coberturas y usos de la tierra a partir del sistema de clasificación *Corine Land Cover* en la cuenca alta del río Santo Domingo, Mérida Venezuela.
- Elaborar la base cartográfica de las coberturas y usos de la tierra presentes en la cuenca alta del río Santo Domingo, Mérida Venezuela para los años 2015, 2020 y 2025.
- Identificar los cambios en las coberturas y usos de la tierra de la cuenca alta del río Santo Domingo, Mérida Venezuela para los años 2015, 2020 y 2025.
- Calcular el C almacenado en la biomasa aérea y demás depósitos posibles en las áreas de estudio para los años 2015, 2020 y 2025.
- Estimar los flujos de C (emisiones/capturas) comparando las reservas en la biomasa aérea para los períodos 2015-2020 y 2020-2025.

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes

La teledetección, en el análisis de la tierra, ha transformado y ganado relevancia en proyectos ambientales. Los estudios llevados a cabo hasta el momento son significativos y corroboran las oportunidades que existen para gestionar el cambio climático en espacios globales, regionales y locales, donde es imprescindible considerar el manejo de ecosistemas esenciales, además de incrementar habilidades de investigación concernientes al entendimiento de los flujos de carbono. A continuación, se presentan algunos estudios en dichas categorías espaciales de análisis:

Comenzando por el plano internacional, se ubicaron los siguientes trabajos:

[Ballut-Dajud et al. \(2024\)](#) compararon la capacidad de almacenamiento de carbono en dos humedales tropicales (manglares) ubicados en La Caimanera, Colombia, y El Llano, México, utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A y una clasificación supervisada. Además, determinaron profundidad, densidad aparente y porcentaje de carbono orgánico del suelo. A partir, de dicha información, detectaron que las áreas deforestadas son fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero porque contienen menos carbono que las áreas boscosas. Finalmente, concluyeron que el carbono orgánico promedio almacenado en el suelo de estas áreas está por debajo del promedio de otros suelos de bosques de manglares existentes en el continente americano.

[Crespo et al. \(2024\)](#) analizaron la cantidad de CO₂ que se almacena en los eucaliptos del Parque Metropolitano Guanguiltagua (Quito-Ecuador) a partir del cálculo del Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI) entre los años 1982 y 2030, en una imagen del satélite Landsat 8 (con el software QGIS) y en una imagen satelital Sentinel-2A (con el software SNAP). A través de un modelo matemático, determinaron cuánto CO₂ representa cada píxel visualmente. En otra fase del estudio, recolectaron información en el lugar mediante ecuaciones alométricas en 50

cuadrantes de 100 m² cada uno, para calcular la cantidad de CO₂ fijado, obteniendo como resultado 1,5 toneladas en promedio. Con regresiones lineales, proyectaron el cálculo para toda el área arbolada del parque, obteniendo un total de 42.150 toneladas de CO₂ fijadas. Este estudio, además, contribuye a los inventarios que buscan desarrollar iniciativas para reducir la huella de carbono en la ciudad de Quito.

Ometto et al. (2023) presentan un estudio realizado con imágenes satelitales del año 2016 donde utilizaron datos LiDAR de la Amazonía distribuidos en todas las categorías de vegetación, obtuvieron índices de vegetación del satélite MODIS y emplearon información de precipitación de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical (TRMM, por sus siglas en inglés). De igual modo, utilizaron 174 inventarios forestales geolocalizados mediante un Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS) para validar las estimaciones. El diseño experimental desarrollado permitió una representación completa de diversos tipos de vegetación, generando un mapa de biomasa aérea con un valor máximo de 518 Mg ha⁻¹, con una media de 174 Mg ha⁻¹ y una desviación estándar de 102 Mg ha⁻¹. Este conjunto de datos único permitió una mejor representación de la distribución de la biomasa y la estructura forestal, lo que proporcionó información crucial para la toma de decisiones en materia de conservación forestal, planificación, estimación de emisiones de carbono y mecanismos para apoyar la reducción de las mismas.

Cifuentes et al. (2018) elaboraron un manual para la medición de carbono azul en manglares, brindando recomendaciones metodológicas apegadas a principios internacionales de buenas prácticas establecidas por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en el año 2003 y por el programa de Observaciones Globales de la Dinámica de la Cobertura Forestal y el Uso del Suelo (GOFC-GOLD, por sus siglas en inglés) del año 2016, para cuantificar de forma completa la existencia de carbono azul en manglares (sobre y bajo el suelo, raíces, regeneración, madera caída y herbáceas). De igual manera, describen cómo diseñar un inventario, señalando los pasos del trabajo de campo desde una perspectiva práctica. Además, muestran los procedimientos de laboratorio necesarios para realizar los análisis químicos en muestras de suelo y tejido vegetal de

los manglares. También desarrollan una sección con los pasos para modelar el uso/cobertura del suelo en zonas marino-costeras.

[Mercy \(2017\)](#) presentó un estudio sobre el efecto combinado de los cambios en el uso de la tierra y la cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés) y los efectos de la variabilidad climática para un área de estudio específica en Kenia. El estudio se realizó entre los años 1995 y 2010. Los cambios revelaron usos de la tierra competitivos, lo que aumentó las coberturas de suelos desnudos y rocas. Por otra parte, la pérdida de cubierta vegetal tuvo un efecto neto de aumento tanto de la temperatura máxima como mínima. En cuanto a los efectos climáticos extremos, estos afectaron negativamente la cobertura de cultivos y pastizales, lo que provocó la invasión de la cobertura forestal.

[Baccini et al. \(2012\)](#) utilizaron datos satelitales multiespectrales MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) y SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Aplicaron modelos de regresión y machine learning para correlacionar los datos remotos con mediciones de biomasa (procedentes de parcelas permanentes). A partir de ello, produjeron un mapa de densidad de carbono sobre el suelo (AGB, por sus siglas en inglés) para los trópicos con resolución de 1 km² (el más preciso hasta esa fecha) y estimaron la biomasa tropical total en 228,7 Pg C, que resultó ser un 21% más alta que estimaciones previas, como la de la evaluación de los recursos forestales mundiales realizada en el año 2010 por FAO. De igual modo, identificaron que las mayores reservas se encontraban en Brasil (53,2 Pg C), Indonesia (15,3 Pg C) y en la República del Congo (13,7 Pg C). Finalmente, estimaron una tasa de emisión neta de carbono por deforestación de 1,0 Pg C/año (período 2000-2010), usando un modelo de contabilidad de carbono (bookkeeping carbon model).

En el ámbito nacional, destacan los siguientes estudios relacionados con el tema:

[López \(2025\)](#) estimó los flujos (emisiones/capturas) de carbono a partir de la determinación de los cambios de cobertura y uso de la tierra, para los periodos 1998 - 2008 y 2008 - 2018, evaluando las reservas en la biomasa aérea en dos áreas operacionales de PDVSA Gas, S.A., Distrito Anaco. En dichas áreas se determinó

que el 55,40% de las tierras permanecieron inalteradas y 44,60% han experimentado cambios. En las mismas áreas de estudio se removieron 2,76 Tg C o 10.138,62 kt CO₂ eq. de la atmósfera, lo que significa que han funcionado como sumideros de C. Para finalizar, afirma que PDVSA cuenta con un inventario actualizado de la estimación de las emisiones de GEI; sin embargo, las fuentes y depósitos relacionados con la vegetación aún no han sido considerados.

Flores (2013) propuso una metodología para la estimación de biomasa aérea a partir de imágenes satelitales en la Reserva Forestal Caparo (RFC). En una primera etapa, aplicó correcciones radiométricas y geométricas, y calculó los índices de vegetación Cociente Simple (CS), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y el Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII), utilizando datos LANDSAT y MODIS. En la segunda etapa, clasificó datos de parcelas permanentes (PPM) del periodo 1990-2004 y estimó la biomasa aérea seca de los árboles mediante ecuaciones alométricas, empleando las ecuaciones de Brown y Chave. La tercera etapa consistió en relacionar los índices de vegetación y la reflectividad de las bandas espectrales de LANDSAT con la biomasa y el carbono, desarrollando dos modelos de predicción de biomasa. Estas ecuaciones se aplicaron a imágenes históricas para estimar la biomasa y el carbono en el tiempo y espacio. Finalmente, en la cuarta etapa, analizó la productividad y dinámica de la biomasa-carbono en el bosque tropical de la RFC.

En lo que respecta al contexto del estado Mérida, se destacan los siguientes trabajos

Sánchez *et al.* (2024) usaron datos de monitoreo de parcelas permanentes del bosque húmedo de La Mucuy y del bosque húmedo de San Eusebio (parte de la Red de Bosques Andinos) para analizar la estructura, diversidad y dinámica de los bosques entre 2016 y 2023. Estos bosques presentan similitud en riqueza general de especies y estrategias de dispersión de los árboles, pero difieren en la composición de especies y sus orígenes biogeográficos. Los bosques de La Mucuy son significativamente más productivos (tasa media de productividad leñosa: $3,09 \pm 1,42 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras

que en las parcelas de San Eusebio la tasa fue $0,73 \pm 0,48 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Asimismo, aunque la riqueza y composición de especies no mostró cambios significativos durante los 6 años, ambos lugares incrementaron su biomasa aérea total, actuando como importantes sumideros de carbono, impulsado quizás por el crecimiento de grandes árboles en estos bosques. Los resultados enfatizan la necesidad de mantener los esfuerzos de seguimiento a largo plazo para vincular de forma explícita los cambios en la composición, biodiversidad y servicios ecosistémicos con los cambios en los factores ambientales bajo escenarios de cambio climático.

Mora (2022) llevó a cabo un estudio sobre la dinámica arbórea en tres parcelas permanentes de 60 x 60 m de selva nublada de la Mucuy, Mérida - Venezuela, en un gradiente altitudinal de 2300 a 3000 msnm. Desarrolló una remediación de las parcelas instaladas en el año 2016 por la Red de Bosques Andinos, con la finalidad de evaluar los cambios en la estructura y composición del bosque, incluyendo tasas de crecimiento, mortalidad y el almacenamiento de carbono. En dichas parcelas se registraron 69 especies de 27 familias y 46 géneros y la dinámica del bosque mostró un 1,3% de cambio. En cuanto a los claros en el bosque, estos se formaron por la muerte de árboles debido a factores bióticos y abióticos. En lo que respecta a la biomasa aérea promedio, esta fue de $220,78 \pm 13,41 \text{ ton C ha}^{-1}$, con un aumento de $7,32 \text{ ton C ha}^{-1}$ desde 2016 a 2022, lo que indica que las parcelas son efectivos sumideros de carbono, con una tasa de absorción promedio de $2,57 \pm 1,22 \text{ ton C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Ramírez *et al.* (2016) estimaron el almacenamiento de carbono y captura de CO_2 como servicios ecosistémicos de la cuenca del río Mucujún a través del establecimiento de parcelas permanentes. Realizaron pruebas de densidad de la madera para especies presentes en los bosques y midieron la biomasa aérea para individuos con diámetros $\geq 10 \text{ cm}$, lo que les permitió obtener una biomasa total de $126,64 \pm 0,2731 \text{ t ha}^{-1}$, la estimación de carbono almacenado en $63,32 \pm 0,1365 \text{ t ha}^{-1}$ año y la captura de $228,71 \pm 0,5009 \text{ t ha}^{-1}$ de CO_2 .

A continuación, se presentan estudios previos realizados en la cuenca del Río Santo Domingo

[Marquina et al. \(2024\)](#) realizaron la caracterización del paisaje en la cuenca alta del río Santo Domingo, utilizando distintas fuentes de datos para definir tres unidades de paisaje con características biofísicas, dinámica geoeconómica y valores perceptuales bien diferenciados. Los procesos territoriales identificados en cada unidad de paisaje están relacionados con recursos naturales específicos, que estructuran ciertas redes geoeconómicas, que a su vez crean un entorno y efecto cultural diferenciados. Esta diferenciación del paisaje es muy útil para desarrollar estrategias que controlen las actividades productivas en la gestión territorial y el turismo sostenible en la región.

[Osorio et al. \(2009\)](#) presentaron un estudio donde generaron un mapa de cobertura y uso de la tierra en la cuenca alta del río Santo Domingo utilizando una imagen satelital de alta resolución ETM+ Landsat del año 2001 con la cual realizaron una interpretación visual en pantalla por medio de un SIG, validada posteriormente con visita de campo. El estudio identificó diez clases de uso y cobertura de la tierra en la cuenca, que abarca una superficie total de 41.724,8 hectáreas. Las principales categorías encontradas fueron: Formación de páramo: 14.567 ha (35%), Matorrales: 13.369,3 ha (32%) y Bosque natural: 4.235,4 ha (10,15%). Estos resultados reflejaron una predominancia del páramo y los matorrales, aunque también evidenciaron una significativa presencia de actividades agrícolas.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Contribución de los sensores remotos en el estudio de las coberturas y usos de la tierra y el carbono

A nivel mundial, con el lanzamiento de LANDSAT en 1972, comienza la era de la observación de la Tierra a gran escala para realizar análisis básicos de cobertura vegetal ([Chuvieco, 2016](#); [NASA, 2025](#); [INEGI, 2025](#)). Ya en los años 80 y 90 se afina la teledetección para mapear deforestación y cambios de uso de la tierra y se empiezan a usar imágenes multitemporales para observar las tendencias en la cobertura vegetal ([FAO, 2002a](#)).

A finales de los años 90 y durante los 2000, a partir del Protocolo de Kioto (aprobado el 11 de diciembre de 1997) y la creciente preocupación por el cambio climático

(UNFCCC, 2025), se desarrollan estudios que combinan los cambios de cobertura con estimaciones de carbono, donde aparecen metodologías integradas que relacionan datos de sensores remotos y modelos de biomasa aérea (Vásquez y Arellano, 2012). Ejemplos de ellos son las investigaciones desarrolladas por Houghton *et al.* (2000), DeFries *et al.* (2002), Achard *et al.* (2004) y Baccini *et al.* (2012).

Resulta perentorio señalar que, anterior a la década de 2010, la estimación de las reservas de captación de carbono de los bosques seguía siendo una actividad basada en gran medida en los inventarios de campo (Malhi *et al.*, 2006), condición que fue orientándose y aumentando paulatinamente en los años siguientes a enfoques asistidos por sensores remotos aéreos y espaciales (Asner *et al.*, 2010), que permitieron generar el primer mapa global de altura de los bosques (Lefsky, 2010), necesario para la estimación de la biomasa, y el mapa de referencia de las reservas de carbono de biomasa (Saatchi *et al.*, 2011), que abarca 2.500 millones de hectáreas de bosque en 75 países de tres continentes; así lo reseña Carlowicz (2012).

Hasta el presente, los avances en sensores remotos como MODIS, Landsat 7 y 8 (y recientemente 9), Sentinel-2 y LIDAR terrestre, aerotransportado y espacial, entre otros, han permitido generalizar los análisis de cambios de coberturas y usos de la tierra, rendimiento de cultivos, estimación de altura y estructura del dosel forestal, flujos y almacenamientos de carbono y comprensión y mitigación de los efectos del cambio climático (IGN, 2020; EOS, 2025a; Kerry *et al.*, 2022; GEDI Ecosystem Lidar, 2025; Fu *et al.*, 2025). De igual modo, han aparecido plataformas como *Global Forest Watch* (GFW), que usan datos satelitales para monitorear cambios de cobertura y carbono casi en tiempo real, los cuales permiten también la posibilidad de generar alertas de deforestación (GFW, 2014). Ejemplos del uso de productos de sensores remotos más avanzados y de la plataforma GFW en varios países son Zhan *et al.* (2020), Tafur *et al.* (2022) y Pincay (2024).

En Venezuela, por limitaciones de acceso a datos y capacidades técnicas, el primer estudio de cobertura vegetal apoyado en la interpretación de imágenes satelitales Landsat y cartas de radar se realizó en 1982 (Madi *et al.*, 2011; MINEVH, 2014). Posteriormente Huber y Alarcón, en su mapa de 1988 recurrieron también al uso de

imágenes satelitales (Hubber, 1996). En el mismo orden de ideas, Aguilera *et al.* (1987) elaboraron un mapa de vegetación para un área aproximada de 5.270 km², al este del estado Bolívar, a partir de imágenes provenientes principalmente de radar (SLAR) y satélite (Landsat).

A partir del año 1993, la Dirección de Vegetación del MARNR emprendió la elaboración de un nuevo mapa de vegetación del norte de Venezuela a escala 1:250.000, utilizando como base la información de imágenes Landsat TM; otra iniciativa a escala nacional en la cartografía vegetal fue el Proyecto MARNOT (Manejo de Recursos Naturales y Ordenamiento de Tierras) del MARN, concluido en 2007, que tuvo como objetivo la actualización de los datos contenidos en los Sistemas Ambientales Venezolanos, a partir de la interpretación de imágenes satelitales recientes (Rodríguez *et al.*, 2010). Posteriormente, El Ministerio de Ambiente en el año 2014, presentó un mapa de cobertura vegetal a escala 1: 2.000.000 y 75 mapas a escala 1:250.000, elaborado a partir de imágenes Spot y Landsat (MINEHV, 2014). Otros estudios que se pueden mencionar, que implican el uso de sensores remotos en estudios de la cobertura forestal son Pacheco *et al.* (2011), Gutiérrez *et al.* (2013) y Pacheco *et al.* (2015), entre otros.

Otro estudio similar que se puede mencionar, aunque desde otro enfoque de clasificación de la vegetación, fue el de Chacón *et al.* (2013), quienes presentaron una propuesta metodológica de clasificación de la cobertura de la tierra bajo un enfoque ecológico que se estructura en tres niveles o escalas espaciales: las ecorregiones, los paisajes ecológicos y los ecosistemas, basados en la consideración de la estructura, funcionamiento y distribución de los ecosistemas, y en procedimientos de teledetección.

En cuanto a estudios sobre biomasa aérea y carbono empleando sensores remotos desarrollados en Venezuela, se tienen, los elaborados por Castel *et al.* (2002) con datos JERS-1 SAR en una plantación de pinos (estados Anzoátegui y Monagas), por Flores (2013) para la Reserva Forestal Caparo (llanos occidentales) utilizando imágenes Landsat y MODIS, y más recientemente las investigaciones de Pacheco *et al.* (2021) en la Reserva Forestal Imataca (estados Bolívar y Delta Amacuro) a partir

de una serie de imágenes Landsat, y de [Mora \(2022\)](#), en la cuenca de la quebrada La Mucuy (estado Mérida) empleando imágenes PlanetScope. Estos, por mencionar algunos.

2.2.2. Sumidero de carbono en los ecosistemas

Las plantas desempeñan un papel crucial en el almacenamiento de carbono ([EFSA, 2025](#)). A través de la fotosíntesis, capturan el mismo y lo convierten en la materia orgánica que forma sus estructuras ([Chazdon y Montgomery, 2002](#)). Con el tiempo, esta materia se transforma en restos vegetales y se incorpora al suelo, creando así una valiosa reserva de carbono tanto en la superficie como bajo ella ([Jaramillo, 2004](#); [Clemente-Arenas, 2022](#)). Los organismos heterótrofos (como animales, hongos y muchas bacterias) no lo fijan directamente, sino que obtienen carbono al consumir materia orgánica ([Jaramillo, 2004](#)), mientras que la vegetación arbórea o arbustiva amplía la capacidad de captura de carbono considerablemente ([Chazdon y Montgomery, 2002](#)). Por otro lado, es importante también señalar que se puede almacenar cantidad de carbono debajo del suelo, tanto en la biomasa de las raíces, como en el carbono orgánico e inorgánico almacenado en el suelo ([Vásquez et al., 2024](#)).

La cantidad de carbono retenido en la biomasa vegetal de los ecosistemas terrestres está principalmente determinada por la proporción y el tamaño de los árboles y arbustos ([Clemente-Arenas, 2022](#)). Sin embargo, el uso y la gestión de la tierra, aunado a los cambios del clima, tienen su influencia sobre una diversidad de procesos de los ecosistemas que afectan los flujos de carbono, tales como la fotosíntesis, la respiración, la descomposición y la combustión ([IPCC, 2006](#); [Jaramillo, 2004](#); [Ometto et al., 2023](#)). Un ejemplo de ello es la producción de biomasa aérea en sistemas agroforestales (SAFs), la cual puede variar considerablemente entre diferentes tipos y regiones ecológicas, pudiendo oscilar entre 2,3 y 48 Mg ha⁻¹ año⁻¹ ([Young, 1997](#)).

En este mismo orden de ideas, la biomasa aérea, que comprende toda la materia orgánica viva sobre la superficie del suelo (tallos, ramas, hojas y frutos) y la subterránea, presente en las raíces vivas ([IPCC, 2006](#); [FAO y MINEC, 2022](#)), pueden

experimentar cambios en el almacenamiento de carbono, lo que a su vez puede afectar al sistema climático mediante la liberación de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (USGCRP, 2023).

Procesos como deforestación y degradación forestal liberan carbono a la atmósfera, mientras que la regeneración natural y reforestación actúan como mecanismos de acumulación o captura (Gasparri *et al.*, 2007; Pool-Novelo *et al.*, 2019; Mogollón *et al.*, 2022). Dichos procesos definen la dinámica de los flujos de carbono, los cuales pueden calcularse utilizando fracciones de biomasa que se supone se convierten en CO₂ (Achard *et al.*, 2004), lo que permite a su vez el cálculo de la variación en las reservas de carbono en dos momentos distintos (t_1 y t_2), y su relación con cambios en las coberturas del suelo; muestra de ello son los estudios de Pacheco *et al.* (2021), Perea-Ardila *et al.* (2021) y Fan *et al.* (2023) entre una extensa variedad de autores. Finalmente, partiendo de lo explicado anteriormente, se pueden definir cinco depósitos de carbono, descritos en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Definiciones de los depósitos de carbono. Fuente: IPCC (2006).

Depósito	Descripción
Biomasa aérea	Toda la biomasa de la vegetación viva, tanto maderera como herbácea, que se halla por encima del suelo, incluidos tallos, cepas, ramas, corteza, semillas y follaje.
Biomasa subterránea	Toda la biomasa de las raíces vivas. A menudo, las raíces finas, de menos de 2 mm de diámetro (sugerido), se excluyen porque, empíricamente, no se las puede distinguir de la materia orgánica del suelo o de la hojarasca.
Madera muerta	Incluye toda la biomasa leñosa no viviente que no está contenida en la hojarasca, ya sea en pie, tendida en el suelo o enterrada. La madera muerta incluye la madera tendida en la superficie, las raíces muertas y las cepas de 10 cm de diámetro o más.
Hojarasca	Incluye toda la biomasa no viva con un tamaño mayor que el límite establecido para la materia orgánica del suelo (sugerido 2 mm) y menor que el diámetro mínimo elegido para la madera muerta (p. ej. 10 cm), que yace muerta, en diversos estados de descomposición por encima o dentro del suelo mineral u orgánico. Incluye la capa de hojarasca como se la define habitualmente en las tipologías de suelos.
Materia orgánica del suelo	Incluye el carbono orgánico contenido en suelos minerales hasta una profundidad dada. El valor por defecto para la profundidad del suelo es de 30 cm.

2.2.3. Coberturas y usos de La Tierra y su importancia en la estimación del carbono

Cobertura y uso de la tierra son términos que se utilizan con frecuencia indistintamente, ello es bastante lógico pues están estrechamente relacionados y en algunos lugares incluso se superponen (De la Rosa, 2008). La cobertura es un indicador biofísico que describe los materiales que cubren el territorio, como por ejemplo, asfalto, vegetación, suelo desnudo, agua, etc., los mismos se observan directamente desde el aire mediante sensores remotos (Borràs *et al.*, 2017). En contraste, uso de la tierra hace referencia a la manera en que la sociedad utiliza el suelo para desarrollar actividades económicas, ejemplos: aprovechamientos forestales y áreas residenciales (Hoyo *et al.*, 2013; Montero y Viales, 2015; Al-doski *et al.*, 2020). A diferencia del primero, no se logran observar de forma directa, sino indirectamente se determinan según criterio del interprete cartográfico (sustentado en una leyenda establecida y un interés en particular).

Resulta evidente que cobertura y uso de la tierra tienen significados distintos. Así pues, una clase cartográfica de uso de la tierra puede comprender varias clases de cobertura terrestre. Por ejemplo, un área con vegetación puede tener la cobertura de bosque o árboles, pero el uso de la tierra puede ser un área de recreación o un vivero de árboles (Bareth y Waldhoff, 2018).

La evaluación de las reservas de carbono en diversos tipos de uso y cobertura es esencial para las políticas medioambientales centradas en la reducción de las emisiones de CO₂ y la mitigación del cambio climático (Zafar *et al.*, 2024). Por ejemplo, la conversión de un bosque a una plantación agrícola no solo modifica la cobertura vegetal, sino que también genera emisiones de dióxido de carbono por la pérdida de biomasa y carbono almacenado en el suelo; así mismo, el establecimiento de nuevas coberturas vegetales, como en procesos de reforestación o restauración ecológica, puede contribuir a capturas netas de carbono (FAO, 2002b; Lefebvre *et al.*, 2021; EOS, 2025b).

2.2.4. Cartografía de cobertura y uso de la tierra mediante sensores remotos

La cartografía permite analizar y mapear cualquier territorio en diferentes áreas. Esta se basa actualmente en la adquisición de datos a través de sensores remotos, aviones o drones que capturan información sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto directo (EOS, 2025c); por lo tanto, la cartografía muestra de manera visual cómo se distribuyen las coberturas y usos del suelo en una región determinada.

La eficiencia del mapeo de la cobertura y uso del suelo usando teledetección depende de muchos factores, como el paisaje, la programación de muestreo, la selección y tipo de datos en bruto, aspectos que deben considerarse cuidadosamente para obtener resultados precisos y confiables (Borràs *et al.*, 2017).

Es bastante cierto que los mapas de cobertura y uso de la tierra son hoy en día abordados simultáneamente, y la construcción del último depende completamente del primero (Velázquez *et al.*, 2016). Usualmente, se suministran en forma de mapas digitales, ya sea en formato de datos ráster o vector. En estos mapas, se categorizan las áreas de diversos usos y coberturas en distintas categorías (Bareth y Waldhoff, 2018).

Un mapa aceptable de cobertura y uso de la tierra exige inexorablemente imágenes de alta calidad y un conocimiento profundo de teledetección (Velázquez *et al.*, 2016). Para lograr dicho propósito, las clasificaciones requieren una leyenda que siga los principios de definiciones exhaustivas y que sean mutuamente excluyentes, para discretizar un área de estudio en un conjunto de categorías (Hansen, 2018). A diferencia de los inventarios de vegetación, que se centran en tipos de vegetación seleccionados, los conjuntos de datos de uso y cobertura de la tierra proporcionan información exhaustiva sobre la composición de toda la superficie terrestre (Bareth y Waldhoff, 2018).

2.2.5. Cambios de cobertura y uso de la tierra (CCUT) y análisis multitemporal

El desarrollo de estudios multitemporales aplicados a la detección de cambios en las coberturas y usos de la tierra ha cobrado especial importancia en el ordenamiento territorial; en la formulación de políticas tendientes a la conservación y protección de

los recursos naturales, sobre todo si en un territorio están presentes áreas naturales protegidas (Alva y León, 2017).

El cambio en el uso de la tierra es un proceso clave debido a sus efectos directos sobre la identidad y la estructura de la cobertura vegetal (Cuchiatti, 2017). De igual modo, es de importancia crítica en la evaluación histórica y la proyección futura de la productividad primaria neta (NPP, por sus siglas en inglés) terrestre a escala regional, continental y mundial (Pan *et al.*, 2015). Por ello, la comparación de inventarios de vegetación elaborados en diferentes momentos permite identificar, tanto cualitativa como cuantitativamente, la magnitud de los cambios que la impactan (Bareth y Waldhoff, 2018).

Para detectar con precisión las modificaciones en la distribución espacial de las comunidades vegetales, es necesario aplicar métodos complejos que integren la recopilación y el análisis de datos de teledetección tomados en distintos periodos (Pan *et al.*, 2015). En el contexto de Venezuela, las restricciones en cuanto a la disponibilidad y resolución de la información han llevado a utilizar cartografías generales, enfocadas en registrar los cambios en la coberturas y usos de las principales formaciones vegetales (Ejemplos: Corrales (2010); Hernández *et al.* (2012); Hoyos *et al.* (2013); Pan *et al.* (2015), Delgado (2018) y Malaver *et al.* (2023).

Los cambios de uso y cobertura de la tierra, han sido identificados como una de las causas de pérdida de biodiversidad y de la deforestación en el mundo (Rodríguez-Morales *et al.*, 2009; Ramírez *et al.*, 2015; Pool-Novelo *et al.*, 2019; Pincay, 2024). Fundamentalmente, el uso de la tierra urbana ha remplazado coberturas agrícolas y boscosas causando pérdidas de servicios ambientales (Avalos *et al.*, 2018), los cuales en ocasiones se producen sin tener en cuenta las características del territorio (Belenguer, 2016). Es importante aclarar que los cambios pueden producirse también por procesos naturales, pero en este caso tiende a ser lento y gradual, aunque también se pueden dar cambios repentinos y rápidos (Montero y Viales, 2015).

Finalmente, el análisis multitemporal de los cambios en la cobertura y usos de la tierra constituye un recurso importante en el proceso integral de la ordenación del

territorio (planificación y gestión), pues funciona: como un instrumento diagnóstico que refleja la dinámica que ha experimentado el espacio geográfico, como elemento esencial para el modelado y comprensión de las principales formas de la tierra y como herramienta para la conservación y el uso sostenible de los servicios ambientales existentes (Madugundu *et al.*, 2014; Malaver *et al.*, 2023; Raffay *et al.*, 2025).

2.2.6. Sistemas de clasificación de coberturas y usos de la tierra (CUT)

La clasificación de coberturas y usos de la tierra constituye un componente fundamental, dado que proporciona un marco estructurado que identifica, categoriza y puede permitir la comparación de los cambios ocurridos en el paisaje a lo largo del tiempo (Di Gregorio y Jansen, 2000). El diseño o elección de un sistema de clasificación para aplicar en un área de estudio debe considerar la especificidad ecológica, diferenciando entre formaciones naturales y usos antrópicos, la capacidad de detectar cambios relevantes de vegetación natural a usos agrícolas o urbanos que impliquen pérdidas significativas de biomasa aérea, y además debe tener homogeneidad de clases para garantizar que cada categoría sea internamente consistente y separable en las imágenes satelitales (Posada y Salvatierra, 2016).

Las leyendas utilizadas en los mapas de cobertura y uso del suelo suelen basarse en clasificadores de tipo fisionómico y estructural para las clases correspondientes a las formaciones vegetales (al igual que los mapas tradicionales de vegetación), lo que permite definir y distinguir, por ejemplo, bosques y arbustales (Hansen, 2018).

Existen varios sistemas que han sido ampliamente utilizados para clasificar la cobertura y el uso del suelo a nivel regional y global, entre ellos el desarrollado por el USGS (*United States Geological Survey*), el más antiguo, diseñado para asistir las necesidades de las agencias federales y estatal de EE.UU. a la hora de clasificar la capacidad, la vulnerabilidad y el potencial de las actividades desarrolladas y el valor de la tierra, por medio de sensores remotos (Vargas, 2020). Este sistema está constituido por nueve categorías principales que conforman un primer nivel (superficie urbana, tierras agrícolas, tierras de pastoreo, tierras forestales, superficies

de agua, humedales, tierras secas, tundras, nieve y hielo perenne), que pueden detallarse luego en dos niveles subsiguientes ([Anderson et al., 1976](#)).

Similar al sistema USGS, es el planteado por la Unión Geográfica Internacional (UGI), que posee también nueve clases organizadas en orden descendente de acuerdo con la intensidad del uso de la tierra (centros poblados y tierras no agrícolas, horticultura, árboles y otros cultivos permanentes, tierras de cultivos, pastos mejorados permanentes, praderas no mejoradas, tierras boscosas, pantanos y ciénagas y tierras improductivas) ([OEA, 1977](#); [Pacheco y Pozzobon, 2011](#)).

Otro sistema es el desarrollado por el Instituto Internacional de Ciencias de la Geoinformación y Observación de la Tierra perteneciente a la Universidad de Twente, Países Bajos (ITC, por sus siglas en inglés). Este establece una clara distinción entre los conceptos de cobertura y uso, que, sin embargo, amerita una relación definida entre sus clases, pues en efecto, un tipo de cobertura puede tener dos o más tipos de uso (la no existencia de subclases sugiere que este esquema solo es utilizable en estudios exploratorios o generales) ([CIAF, 2005](#)).

En este mismo orden de ideas, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) propuso una clasificación de seis categorías de uso del suelo: bosques, tierras agrícolas, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras, categorías ampliamente empleadas para cálculos relacionados con el almacenamiento de carbono y reportes de emisiones de gases de efecto invernadero ([IPCC, 2006](#)).

Otras clasificaciones mencionables son las desarrolladas en Colombia, tales como la presentada por el Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica (CIAF) y la Subdirección de Agrología, ambas pertenecientes al Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). La primera establece criterios de jerarquización de clases correspondientes a categorías menores de modo que sean congruentes con los distintos niveles de detalle de coberturas y usos de la tierra, particularmente los destinados a planificación del uso y manejo de la tierra; la segunda describe la cobertura y, paralelamente, indica el tipo de uso predominante (ejemplo: Cobertura

Bosque / Uso conservación de vida silvestre, aprovechamiento selectivo, entre otros) (CIAF, 2005).

Finalmente, un sistema de clasificación muy utilizado es Corine Land Cover, desarrollado con el fin de normalizar la elaboración de mapas en los países europeos (Alva y León, 2017; Büttner *et al.*, 2021). Ha sido adaptada en algunos países de América Latina; ejemplos: Colombia (IDEAM, 2010) y Costa Rica (Rosales, 2016). Este sistema proporciona información sobre la cubierta terrestre, el uso del suelo y sus cambios temporales, que puede ser empleada en la gestión del territorio, la gestión forestal, la gestión del agua, la gestión de emergencias, etc. (Pérez *et al.*, 2020). Su leyenda está construida en forma jerárquica e incluye los territorios artificializados, los territorios agrícolas, los bosques y las áreas seminaturales, las áreas húmedas y las superficies de agua (Suárez-Parra *et al.*, 2026).

2.2.7. Cuenca hidrográfica

Según Aparicio (2011), se define como una unidad del territorio donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. De forma similar, Bastidas (2007) especifica que es un área delimitada por una divisoria topográfica que drena a un drenaje común. Este punto de salida o drenaje común puede ser en un río principal, un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar (Barragán *et al.*, 2018).

La cuenca hidrográfica constituye una unidad funcional (un sistema ecológico) donde interactúan los componentes bióticos y abióticos, dentro de la cual se suceden ciclos (agua, nutrientes) o partes de ellos, y ocurren flujos de energía y materiales entre los componentes (Rosales y García, 2015). En otro orden de ideas, Formaggio (2024) agrega que es el espacio donde se desarrollan las actividades humanas, pues todas las áreas industriales, urbanas, rurales, agrícolas o de preservación ambiental están insertas en alguna parte de ella.

Otra forma de entender la cuenca hidrográfica es desde el punto de vista de la ordenación y desarrollo de cuencas hidrográficas. Desde esta visión, la cuenca está formada por componentes que se integran e interrelacionan; estos son de orden

natural, socioeconómico y político-institucional. El primero incluye aspectos geológicos, geomorfológicos, hidroclimáticos, suelos, vegetación, fauna, minerales y fuentes de energía, que es el soporte de hechos, oferta y fuente de recursos naturales, condicionante de procesos que devienen de la sociedad, disparador de amenazas naturales y fuerza que interviene en la producción del espacio social construido; el segundo se refiere a la población y los actores sociales que hacen vida activa, los usos de la tierra, las actividades económicas, infraestructuras y expresiones de la identidad cultural, que son los hechos y procesos sociales que afectan el medio natural y determinan cómo se ocupa y transforma el territorio, y el tercero, incluye las políticas, acciones y decisiones del Estado que intervienen en la gestión del territorio, cuyo papel es fundamental para regular, planificar y orientar el uso de la tierra y los recursos, influyendo en la ocupación y desarrollo de la cuenca (Ovalles *et al.*, 2012).

Esta unidad territorial puede dividirse en cuenca alta, donde la topografía es sumamente accidentada y escarpada; cuenca media, donde se hallan los valles; y cuenca baja, dominada por pendientes bajas (Figura 2.1) (Vásquez *et al.*, 2016). Además de su división, pueden clasificarse según la orografía (de montaña, de alta montaña, llanos, pampas y praderas), según la vertiente (ejemplos: del Pacífico, del Atlántico y del Caribe; de lagos o cuencas endorreicas), según su tamaño (grandes, medianas, pequeñas), según su relación con límites políticos-administrativos (nacionales, binacionales, internacionales, estatales, etc.) según su balance hídrico (balanceadas, deficitarias o críticas, con exceso de agua), según su densidad de drenaje (densamente, medianamente o pobremente drenadas), según su uso experimental (experimentales, unitarias, pares, piloto, testigo, etc.) y según la permanencia del caudal durante el año (permanentes, intermitentes, efímeras) (Guevara, 2000; Bastidas, 2007; Vásquez *et al.*, 2016).

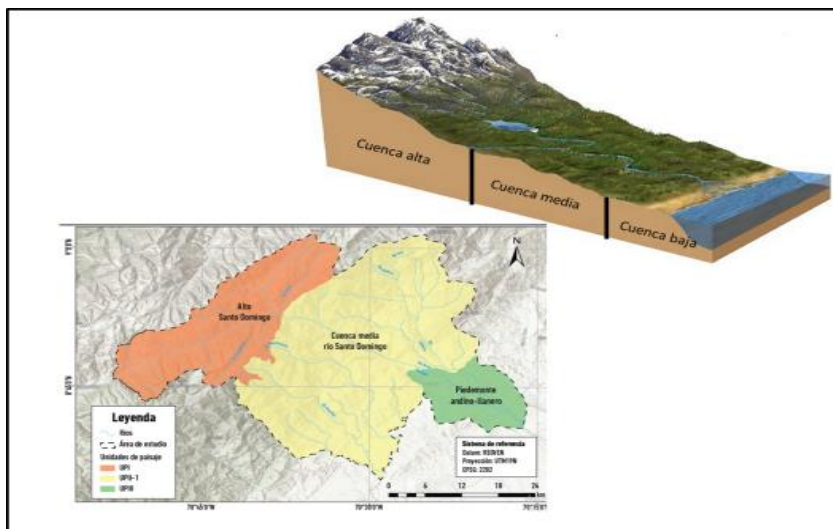


Figura 2.1. Partes de la cuenca y ejemplo de la cuenca del Río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia a partir de [Marquina et al. \(2024\)](#) y [Vásquez et al. \(2016\)](#).

Finalmente, cabe señalar que además de la producción de agua, las cuencas hidrográficas proveen otros servicios ecológicos, entre los cuales se destacan: *i*) hábitats de especies terrestres y acuáticas; *ii*) producción de alimentos que se integran en las cadenas tróficas de los ecosistemas, *iii*) depuración de aguas contaminadas y reposición y *iv*) fertilización natural de suelos en las cuencas bajas. Por estos motivos, las cuencas deben ser consideradas como lugares valiosos para el ser humano y, por lo tanto, preservadas, protegidas o utilizadas de forma sustentable ([Rosales y García, 2015](#)).

2.2.8. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero

Las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero constituyen el resultado de la invitación efectuada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para actualizar las Directrices, versión revisada en 1996 (1996 Guidelines) ([IPCC, 1997](#)) y Orientación sobre las buenas prácticas y la gestión de la incertidumbre en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (GPG2000) ([IPCC, 2000](#)) y la Orientación sobre las buenas prácticas para uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (GPG-LULUCF 2003) ([IPCC, 2003](#)) asociadas, en las que se brindan

metodologías acordadas internacionalmente para que utilicen los países, con el objeto de estimar los inventarios de gases de efecto invernadero e informarlos a la CMNUCC (IPCC, 2006).

Las Directrices contienen 5 volúmenes, uno para cada sector (Volúmenes 2 a 5) y uno para la orientación general aplicable a todos los sectores (Volumen 1). Estos son:

Volumen 1: Orientación general y generación de informes

Volumen 2: Energía

Volumen 3: Procesos industriales y uso de productos (IPPU)

Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU)

Volumen 5: Desechos

Los Volúmenes 2 a 5 contienen capítulos que brindan una orientación metodológica para las categorías específicas de emisión y absorción, recomendaciones concretas para incertidumbre, garantía y control de calidad, coherencia de la serie temporal y generación de informes. En cuanto al volumen 1, ofrece una orientación de buenas prácticas acerca de problemas comunes a todos los métodos de estimación cubiertos por la orientación específica del sector en los Volúmenes 2 a 5 y en las instrucciones para la generación de informes (IPCC, 2006).

2.2.9. Breve descripción del Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra

Este capítulo integra la orientación previa individual incluida en las Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada en 1996 para la Agricultura (Cap. 4) y para Usos de la tierra, cambios de uso de la tierra y silvicultura (Cap. 5). En esta integración se reconoce que los procesos que subyacen a las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, así como las diferentes formas de carbono almacenado en tierra, pueden producirse en todos los tipos de tierras. De igual modo, se reconoce que los cambios de uso de la tierra pueden producirse en todos los tipos de tierras.

Este método adopta las seis categorías de uso de la tierra que se utilizan en la GPG-LULUCF (tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y

otras tierras), que a su vez se subdividen, además, en tierras que se mantienen en la misma categoría y aquellas que se convierten de una a otra. Sobre estas, métodos genéricos para contabilizar los cambios en las existencias de C de la biomasa, la materia orgánica muerta y del suelo se pueden aplicar.

Para ello se plantea la adopción de tres niveles jerárquicos para los métodos (tabla 2.2), que abarcan desde factores de emisión por defecto y simples ecuaciones hasta el uso de datos y modelos específicos de cada país para adaptarlos a las circunstancias nacionales.

Tabla 2.2. Estructura de niveles para métodos AFOLU. Fuente: adaptado de IPCC (2006).

Nivel 1	Están diseñados para que resulten los más simples de usar, para lo cual se suministran ecuaciones y los valores de los parámetros por defecto (p. ej. factores de emisión y de cambio en las existencias). Es necesario contar con datos de la actividad específicos por país, aunque, en lo referido al Nivel 1, a menudo se dispone mundialmente de fuentes de estimaciones de datos de la actividad (mapas de cobertura de la tierra a nivel global) aunque, en general, estos datos son poco precisos a nivel de espacio.
Nivel 2	se emplea el mismo abordaje metodológico que en el Nivel 1, pero se aplican factores de emisión y de cambio en las existencias que se basan en datos específicos del país o de la región en lo referido a las categorías más importantes de uso de la tierra. Los factores de emisión definidos por país son más apropiados para las regiones climáticas y los sistemas de uso de la tierra. Es típico que en el Nivel 2 se utilicen datos de resolución temporal y espacial y de actividad más desagregada, de manera que se correspondan con los coeficientes definidos para el país por regiones específicas y por categorías de uso especializado de la tierra.
Nivel 3	Se utilizan métodos de orden superior, basados en datos de la actividad de alta resolución y desagregados a nivel sub-nacional. Estos métodos de orden superior ofrecen estimaciones de mayor certeza que los niveles más bajos. Estos sistemas pueden incluir muestreos de campo exhaustivos realizados a intervalos regulares y/o sistemas de datos basados en Sistemas de Información Geográfica, datos sobre suelos y datos de la actividad de uso y gestión de la tierra, que integran varios tipos de monitorización. Zonas en las que, habitualmente, se puede hacer un seguimiento de los cambios de uso de la tierra con el correr del tiempo, por lo menos estadísticamente.

2.2.10. NDVI (Normalized Differential Vegetation Index)

Índice de vegetación desarrollado por [Rouse et al. \(1973\)](#) como una mejora del el RVI (Ratio Vegetation Index) desarrollado por Pearson y Miller en 1972 ([Darvishzadeh et al., 2006](#)), para evitar probables errores derivados de desviaciones de los datos de las bandas roja e infrarroja, y que arroja como resultando valores

comprendidos entre -1 y 1 (Chuvieco, 2008), siendo los valores cercanos a 0 indicadores de ausencia de vegetación (Hernández *et al.*, 2014).

El uso de estas bandas está fundamentado en el fuerte contraste de la región espectral del rojo (R), por presentar máxima absorción de la radiación debido a los pigmentos de la clorofila y del infrarrojo cercano (IRC) que la refleja, producto de la estructura celular de la hoja (Panda *et al.*, 2010; Karnieli *et al.*, 2013). Ambas bandas al contener más del 90% de la información espectral de la vegetación (Baret *et al.*, 1989), conducen a la transformación de la imagen píxel a píxel, justificada en la búsqueda de una mejor discriminación entre suelo y vegetación y en disminuir el efecto del relieve (pendiente y orientación) para la caracterización espectral de las distintas coberturas (Soria y Granados, 2005).

Cabe acotar que el NDVI (al igual que muchos otros índices de vegetación) originalmente fueron propuestos a lo largo de muchos años para la caracterización de cubiertas de vegetación (Huete, 1988). Sin embargo, también han sido empleados en la evaluación de biomasa, uso del agua, estrés hídrico en plantas, producción, determinación de salud y vigor de cultivos y cartografía de usos de la tierra (Jackson y Huete, 1991; Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos *et al.*, 2006), lo que ha conllevado a que se empleen con mayor frecuencia como indicadores cuantitativos del funcionamiento de los ecosistemas (Rodríguez y Bullock, 2013; Orr *et al.*, 2017).

Capítulo III

3. Materiales y métodos

3.1. Descripción del área de estudio

3.1.1. Ubicación del área de estudio

La cuenca se encuentra ubicada entre la Sierra Nevada y Sierra de la Culata, entre las coordenadas geográficas $8^{\circ}45'00''$ a $9^{\circ}02'00''$ de latitud Norte y $70^{\circ}32'42''$ y $70^{\circ}51'00''$ de longitud Oeste, y en coordenadas UTM entre 967.700 m y 998.900 m Norte, y 298.250 m a 330.600 m Este (figura 3.1) . Desde sus nacientes hasta el sitio de presa (Complejo Hidroeléctrico General José Antonio Páez), tiene una superficie de 41691,46 ha y pertenece a los municipios Cardenal Quintero y Pueblo Llano del Estado Mérida ([Osorio et al., 2009](#)). Por el noroeste limita con la cuenca del Río Motatán, al suroeste con la cuenca del río Chama, al sureste con las cuencas de los ríos Canaguá, Escagüey, Bumbum y Mucusanviche por el noreste con la cuenca alta del río Boconó y la cuenca media del río Santo Domingo ([Dirección de Cartografía Nacional, 1976](#)).

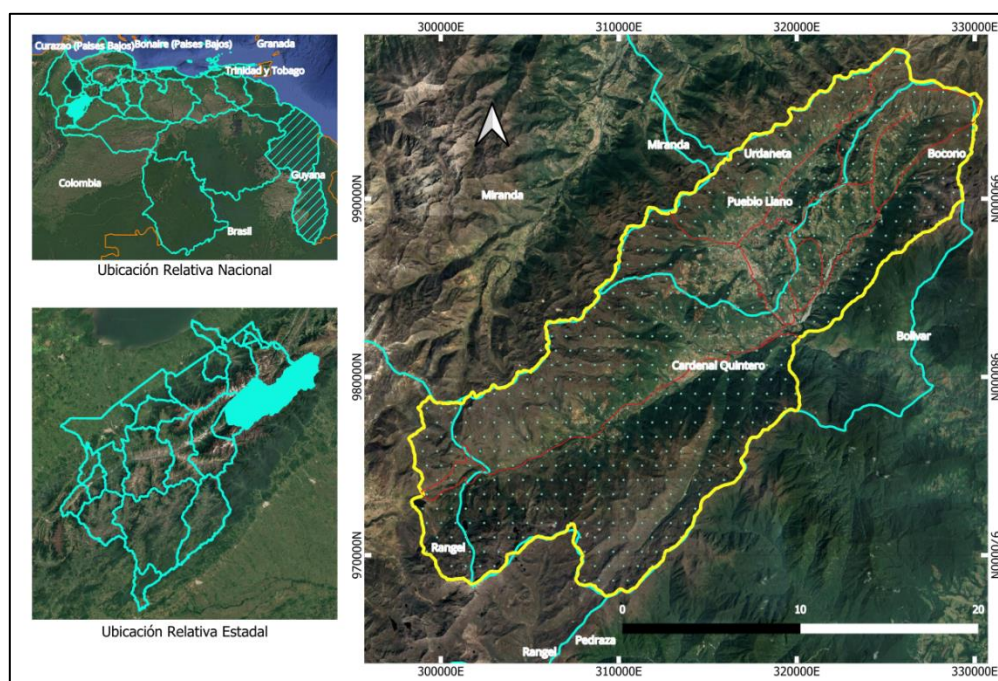


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la cuenca alta del Río Santo Domingo, estado Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de los archivos del IGVSB-SIGOT.

3.1.2. Aspectos Físico-naturales

3.1.2.1. Geología

En cuanto a la litología, el área de estudio es muy homogénea; presenta rocas pertenecientes a tres formaciones geológicas bien definidas. La primera, la formación Mucuchachí (paleozoico), localizada en los alrededores del Pico del Águila; la segunda, el grupo Iglesias (precámbrico), que abarca casi toda la cuenca y la tercera, los depósitos cuaternarios (pleistoceno), presente entre Santo Domingo, las Piedras y Pueblo Llano (principalmente en el fondo del valle). En añadidura a estas, se ubican a lo largo de la divisoria noroccidental pequeños sectores con rocas ígneas intrusivas ácidas del paleozoico superior; de igual modo, al sureste, se halla una porción reducida de rocas ígneas intrusivas ácidas del paleozoico medio (Figura 3.2 y tabla 3.1). (Bellizzia *et al.*, 1976; Vivas, 1992a)

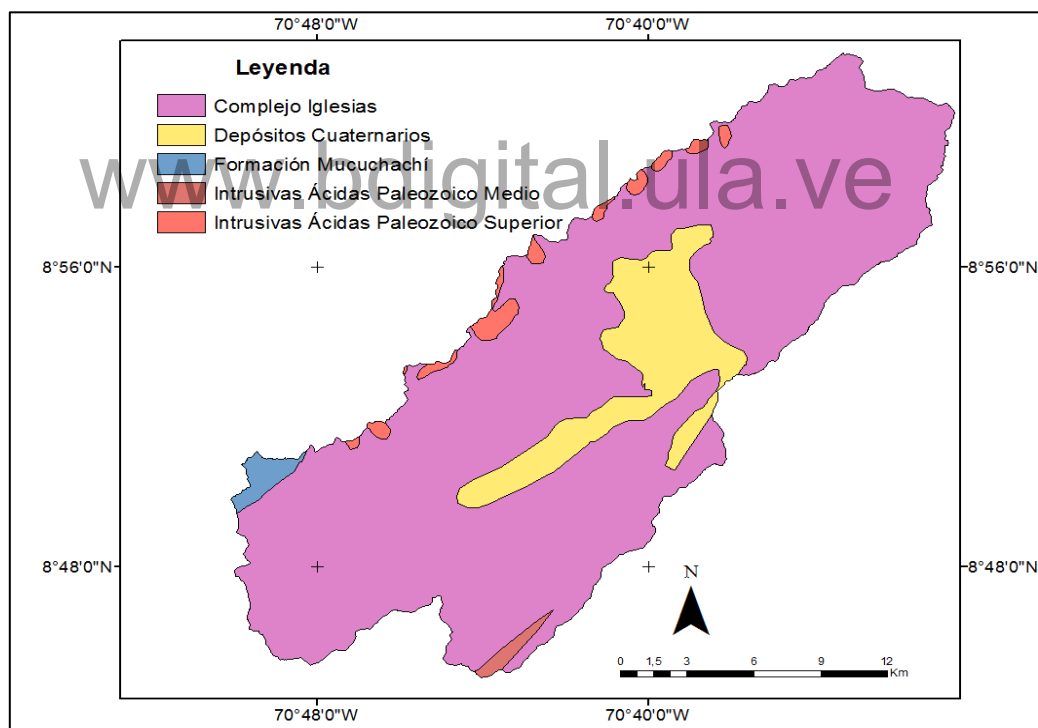


Figura 3.2. Geología de la Cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de la capa de Bellizzia *et al.* (1976).

Tabla 3.1. Porcentaje de Superficie en Hectáreas de las unidades estratificadas. Fuente: (Bellizzia *et al.*, 1976).

Unidades Estratigráficas	Superficie (ha)	% Total
Complejo Iglesias	35.708,07	85,59
Formación Mucuchachí	398,67	0,96
Depósitos Cuaternarios	4.649,14	11,14
Intrusivas ácidas paleozoico superior	748,83	1,79
Intrusivas ácidas paleozoico medio	214,39	0,51
Total:	41719,10	100,00

Nota: La diferencia de 27,14 hectáreas entre el mapa del área de estudio y los mapas físico-naturales (geología y otros) se debió a imprecisiones del algoritmo de delimitación automática de cuencas del SIG sobre el MDE Alos Palsar en el sector de la laguna Los Guaches. Este desfase, originado durante el anteproyecto, fue corregido posteriormente en la delimitación de coberturas y usos de la tierra mediante el cotejo con cartografía de referencia para asegurar la precisión en la estimación de los flujos de carbono

La **formación Mucuchachí** comprende pizarras laminadas y limosas, de color negro a gris verdoso, carbonosas y en parte filíticas (con presencia de piritita); con las pizarras se intercalan delgadas franjas de areniscas impuras, laminadas, duras, de color claro, las cuales localmente muestran desarrollos masivos (cuarcitas); también se encuentran conglomerados y calizas. El **complejo iglesias** se compone esencialmente de esquistos y gneises cuarzo-faldespático-micáceo-granatíferos, ortogneises graníticos y anfibolitas; localmente se encuentran cuerpos lenticulares de cuarcitas, migmatitas y mármoles y en el tope de la sección, esquistos pelíticos bien laminados con estauroлита, andalusita y cianita (Petróleos de Venezuela S. A. - INTEVEP, 1999). Los **depósitos cuaternarios** corresponden desde el pleistoceno medio al superior (Q₂ y Q₁) (Vivas, 1992b), y constituyen sedimentos aluviales que varían desde conglomerados consolidados a poco o muy consolidados, arena de granos de diverso grosor poco consolidada o no consolidada, arcillas y limos o mezclas de clásticos de diverso tamaño desde bloques hasta arcillas (Vivas, 1992a).

Un aspecto geológico importante de mencionar, es la presencia de la Falla de Boconó, que en toda su longitud dentro de la cuenca está realzada por el alineamiento continuo

con el valle del río Santo Domingo, claramente visible en imágenes de radar; muy particularmente la falla se expresa morfológicamente de manera espectacular por encima de los 3000 m en ambientes glaciares y periglaciares, especialmente en la divisoria de aguas de las cuencas con el río Chama (Audemar, 2009). Además del alineamiento con el valle antes mencionado (con anchura variable entre 1 y 5 km), se identifican, de manera reiterada, cuellos y ensilladuras de falla, trincheras, lagunas de falla, escarpes de falla, lomos lineales y lomos de obturación (Audemar, 2014).

3.1.2.2. Geomorfología

La morfología comprende modelado glaciar y periglaciar en las cumbres elevadas y vertientes asimétricas con entallamiento profundo en forma de “v” en la parte superior y media (UFORGA-ULA, 2015). También existen secuencias aluviales en cono-terrazas y en abanicos de lavas torrenciales ($Q_2 - Q_1$) en las zonas bajas, donde se presentan actividades agrícolas y asentamientos poblacionales (Vivas, 1992b). En síntesis, la cuenca del río Santo Domingo en su tramo superior presenta un modelado glaciar y un modelado fluvio-glaciar a la altura de Los Frailes y terrazas fluviales cerca del poblado de Santo Domingo (Zinck, 1980).

Cabe mencionar, que la orogénesis dio lugar a la configuración de macizos serranos elevados que superan los 3.000 m (Marquina *et al.*, 2024), como el pico Mucuñuque que viene a representar la elevación mayor al final de la Sierra Nevada y Comienzo de la de Santo Domingo (Vivas, 1992a). De igual modo, las formas de erosión glaciar como circos rocosos, depósitos morrénicos, rocas aborregadas, cuerpos lagunares y pantanos son abundantes en la zona superior (Vivas, 2015). En cuanto a los procesos erosivos, estos son comunes en las laderas, aunque controlados y atenuados por las coberturas vegetales (Marquina *et al.*, 2024).

Un análisis de las geoformas (Figura 3.3) bajo la metodología propuesta por Jasiewicz y Stepinski (2013) (aplicada sobre el modelo de elevación *Alos Palsar* con resolución espacial de 12,5 m), señala que el área posee 0,03 ha (0,000075 %) de superficie estrictamente plana; 383,23 ha (0,918 %) de áreas de cimas; 3132,45 ha (7,507 %) de crestas o lomos de montaña (divisorias principalmente); 22,59 ha (0,054 %) de área salientes desde las crestas; 8224,86 ha (19,712 %) de crestas menores que

sobresalen a los cuerpos principales de las divisorias; 18967,7 ha (45,459 %) de áreas de pendiente; 6953,61 ha (16,665 %) de hondonada; 10,71 ha (0,026 %) de pie o base de pendiente (aisladas); 3744,3 ha (8,974 %) de valles y 285,54 ha (0,684 %) de depresiones (Figura 3.4).

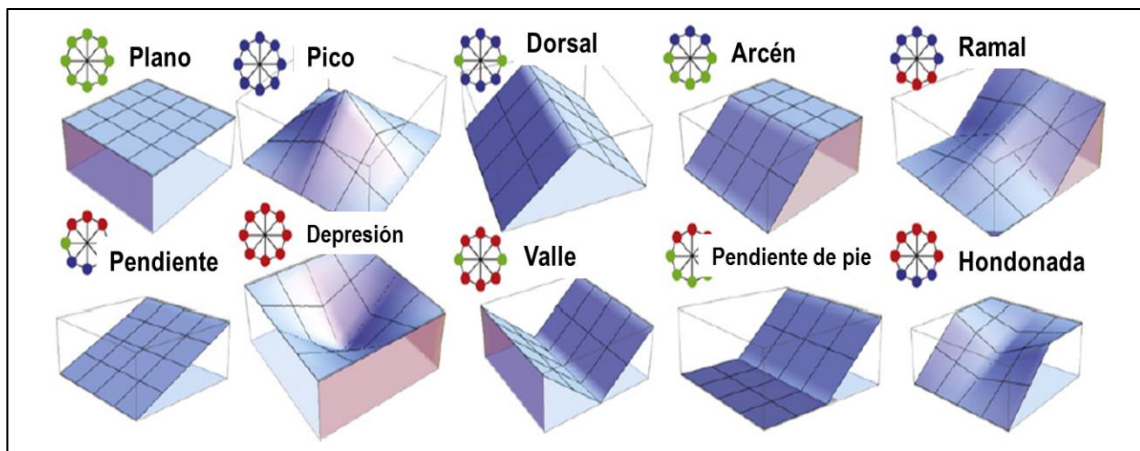


Figura 3.3. Morfología simbólica 3D y sus correspondientes geormas para los 10 elementos de relieve comunes. Fuente: [Jasiewicz y Stepinski \(2013\)](#).

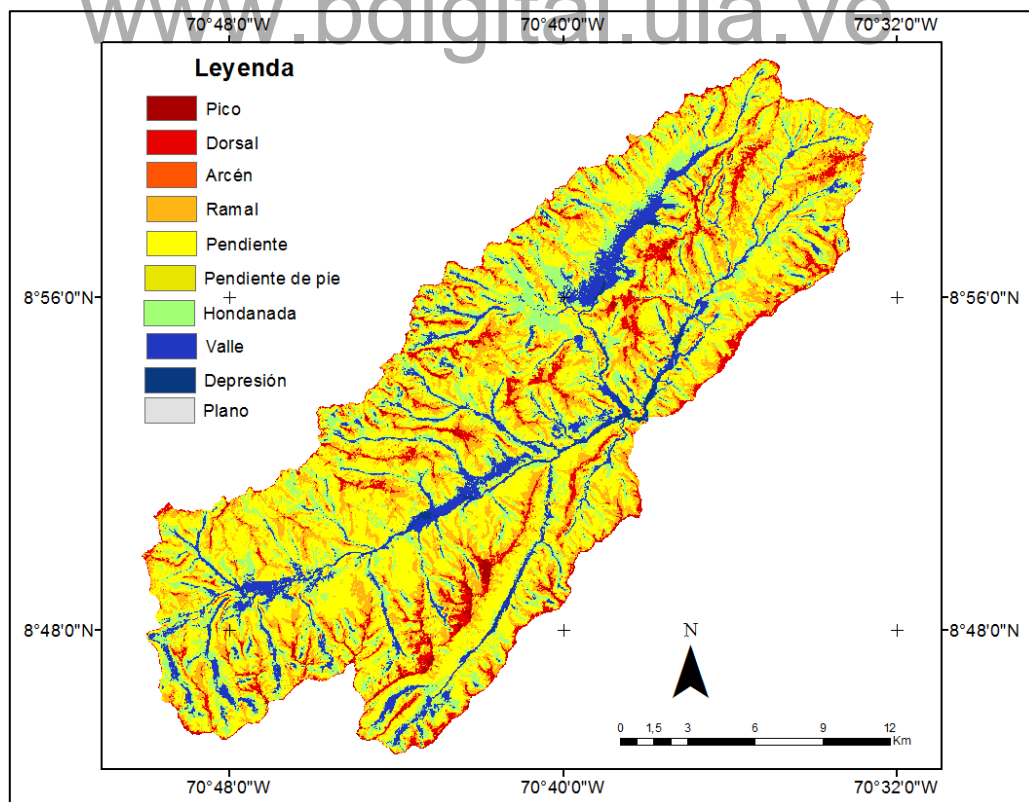


Figura 3.4. Geomorfología de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Mérida. Elaboración propia a partir de la metodología de [Jasiewicz y Stepinski \(2013\)](#).

En otro orden de ideas, la estimación de la pendiente siguiendo la clasificación desarrollada por [FAO – UNESCO \(1976\)](#) permite reconocer tres categorías: la primera, “*Llana a suavemente ondulada (0–8%)*”, que comprendió 996,906 ha (2,39%); la segunda, “*Fuertemente ondulada a colinosa (8–30%)*”, con 9808,06 ha (23,51%); y la tercera, “*Fuertemente socavada a montañosa (>30%)*”, con 30919,1 ha (74,10%) (Figura 3.4). Esta última categoría denota gran cantidad de áreas susceptibles a procesos de erosión, debido a que, cuanto más larga e inclinada es la pendiente, el suelo será más afectado por la erosión y, por otra parte, cuanto mayor sea la capacidad de transporte del escurrimiento bajo una intensa lluvia, ello resultará en una mayor tasa de pérdida de suelo ([Camargo et al., 2017](#)).

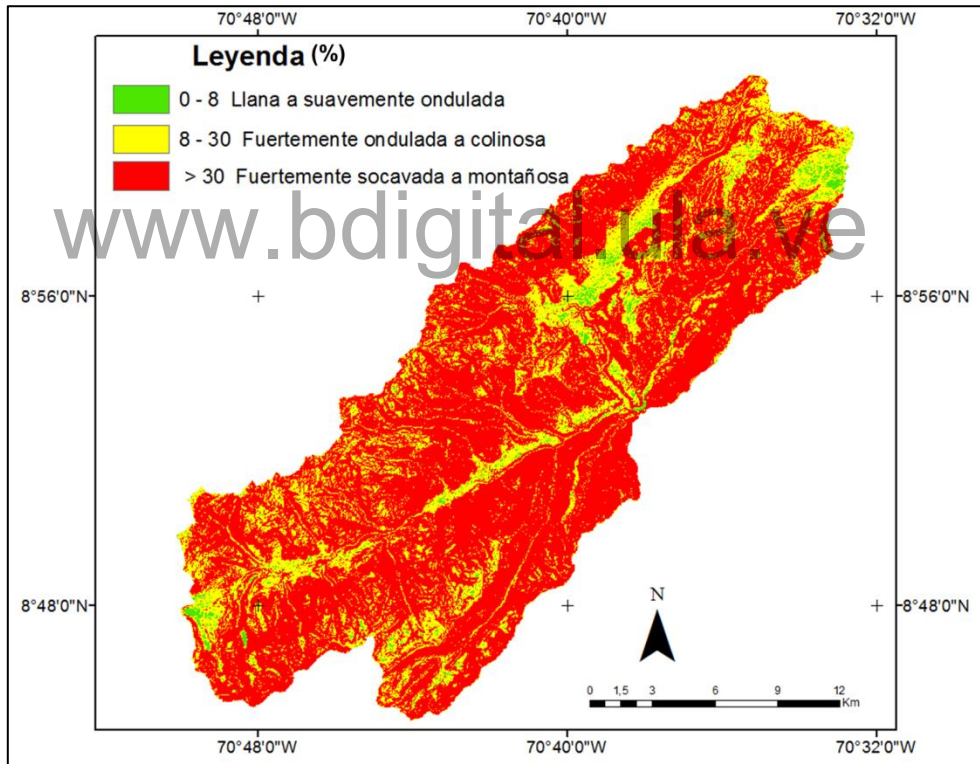


Figura 3.5. Pendiente de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de [FAO – UNESCO \(1976\)](#).

3.1.2.3. Suelos

Los tipos de suelos predominantes en la cuenca, considerando una clasificación taxonómica general, son Inceptisoles y Ultisoles. Los primeros de incipiente o poca

evolución pedogenética (un poco más viejos que los entisoles), presentes comúnmente en las laderas y en los niveles más bajos de terrazas y conos aluviales, bien estructurados, con movimientos de carbonatos en el perfil; y los segundos, ubicados en los piedemontes, en donde pueden encontrarse más abundantemente en abanicos, terrazas y colinas del Cuaternario antiguo, con evidencias de efectos de intensa meteorización, muy evolucionados, baja fertilidad natural, elevada acidez, saturación de bases baja y susceptibilidad a erosionarse (Vivas, 1992; Gutiérrez *et al.*, 1998; Casanova, 2005; FitzPatrick, 2011). De forma más detallada, en cuanto a los suelos del primer grupo, se pueden categorizar en los subordenes Cryumbrepts y Humitropepts; en cuanto al segundo, se hallan los subordenes Haplohumults-Hapludults (Figura 3.5) (ANIH-CGD, 2024)

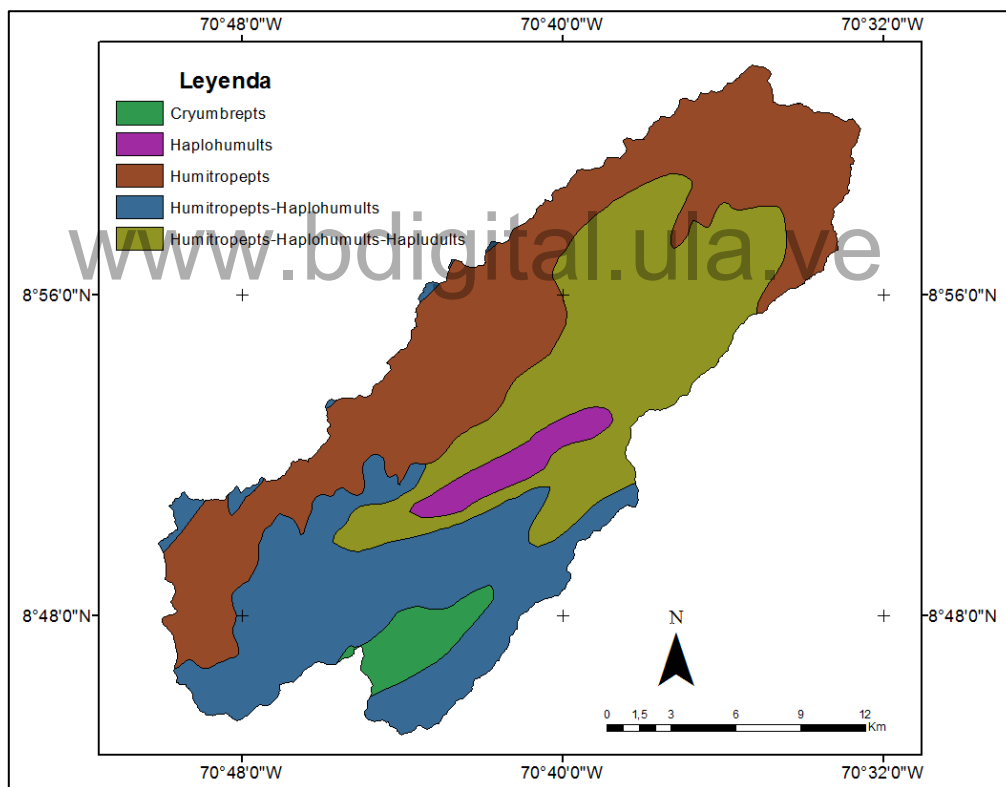


Figura 3.6. Categorías de suelos de la cuenca alta del río Santo Domingo. Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de ANIH-CGD (2024).

De igual modo, Ochoa *et al.* (2000) indican que en la cuenca también se hallan presentes suelos de los órdenes Entisoles y Molisoles, producto de los cambios introducidos por el hombre. En el caso de los primeros, son suelos de poca evolución

(muy jóvenes que se forman sobre sedimentos recientes) sometidos a fuerte erosión a consecuencia de la fuerte inclinación de sus pendientes y a deposiciones continuas por el agua o por el coluvionamiento (vegas de los ríos más próximas a los lechos y al pie de las vertientes); en cuanto a los segundos, presentan abundante acumulación de materia orgánica y alta fertilidad natural, existentes en áreas muy húmedas y/o de menor evaporación (los hay en condiciones de selva nublada y en zonas más altas) (Vivas, 1992a; Gutiérrez *et al.*, 1998; Casanova, 2005; FitzPatrick, 2011). Finalmente, Ochoa *et al.* (2000) detallan que, para el caso de los Entisoles, el suborden presente es Troprothent y, para los Molisoles, se puede encontrar Hapludoll (construidos por el hombre sobre fuertes pendientes); también amplían los subórdenes de Inceptisoles en Cryaquept, Cryochrept, Dystropept y Eutropepts (en lugares reducidos).

Haciendo especial mención al carbono orgánico de los suelos de la cuenca, estos son dependientes en lo fundamental de la capacidad de intercambio catiónico, de la altitud y del calcio, y en menor medida del aluminio intercambiable y el limo (Ochoa *et al.*, 2000). En el caso de la altitud, Ochoa *et al.* (1996) indican correlaciones positivas y altamente significativas entre esta y el carbono, que posibilita el incremento de este último debido a la disminución de la temperatura, fundamentalmente para las áreas superiores a los 3000 m. Según Gutiérrez *et al.* (1998) los valores de carbono oscilan entre 0,28 y 5,8 % en la cuenca.

En lo que respecta a las texturas de suelos, predominan las de tipo franco a franco-arenoso y areno-francosas, con buena permeabilidad (Gutiérrez *et al.*, 1998; Cordova *et al.*, 2016). Por otra parte, el carácter torrencial de los sedimentos origina generalmente alta pedregosidad (Zinck, 1980). Finalmente el pH es ligeramente ácido y tiende a ser más ácido por encima de los 3000 m (Ochoa *et al.*, 1996).

3.1.2.4. Hidrografía

Presenta un patrón de drenaje dendrítico y transversal, con densidad de drenaje moderada, evidentemente más denso en las partes altas, en donde las laderas fuertemente disectadas y el escaso desarrollo evolutivo de los suelos en los estrechos valles facilitan la concentración de escorrentía (Marquina *et al.*, 2025).

La cuenca cuenta con una superficie aproximada de 41.725 ha, dividida en tres subcuencas: la del río Aracay con 8.010 ha, que aporta un caudal de 3,12 m³/s al embalse General José Antonio Páez; la del río Pueblo Llano con 9.535 ha, que contribuye al caudal del río Santo Domingo en su tramo medio con 3,50 m³/s; y la del río Santo Domingo con 24.180 ha, siendo esta última la principal, que nace en las altas montañas de la Sierra de Santo Domingo y fluye hacia el sureste, también alimentando el embalse con 7,79 m³/s (Figura 3.6) (Yanes y Guevara, 1975; Rocha, 1998; Cordova *et al.*, 2016).

La construcción de la Presa José Antonio Páez en la década de los setenta implicó que la la cuenca adquiriese importancia como fuente de generación hidroeléctrica (Marquina *et al.*, 2025). El embalse está situado a 8,5 km de Santo Domingo, es tipo de presa Arco-bóveda, tiene una altura de 70 m, una longitud de cresta de 210 m y una superficie de 12 hectáreas (Yanes y Guevara, 1975). El volumen total del embalse es de 5,0 x 10⁶ m³, siendo el volumen útil 2,6 millones de m³ y el volumen muerto 0,4 millones de m³ (Cordova *et al.*, 2016).

La presencia del Sistema de Fallas de Boconó y las actividades agrícolas han generado sedimentos a través de procesos de erosión que han contribuido con la colmatación de la presa. La alta producción de sedimentos ha causado una significativa reducción de la capacidad de almacenamiento del embalse e incluso daño en las turbinas, con el consiguiente impacto negativo en la generación de energía hidroeléctrica (Córdova *et al.* 2016).

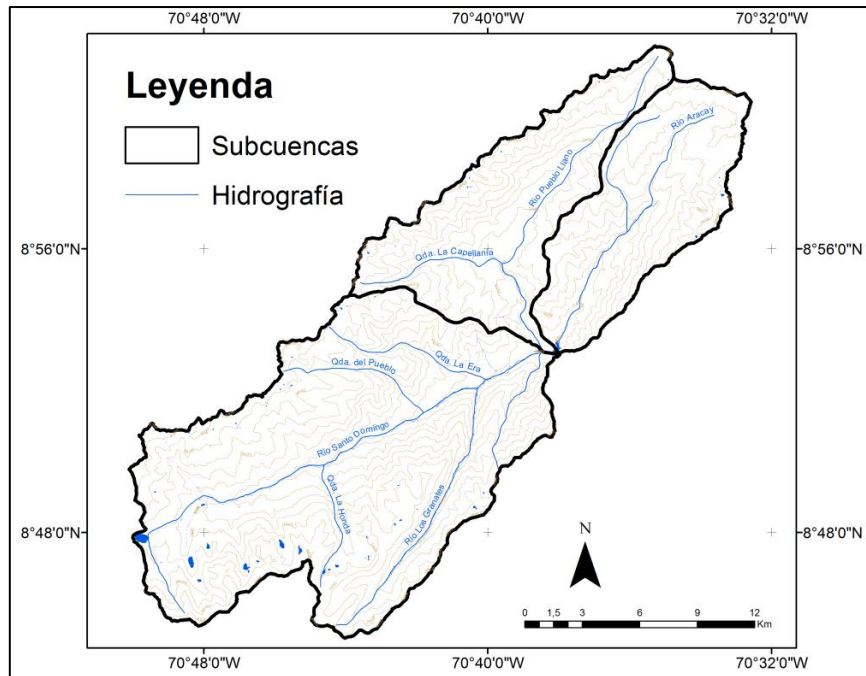


Figura 3.7. Hidrografía de la Cuenca Alta de Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de capas vectoriales de hidrografía, MDE para curvas de nivel e información de Rocha (1998) y Cordova *et al.* (2016).

Otro aspecto importante para destacar es que de la genética orogénica periglacial se deriva una notable abundancia de cuerpos lagunares y humedales altiandinos muy comunes en sus sectores más elevados (Marquina *et al.*, 2025). Lagunas como Mucubají y La Negra, entre otras, juegan un papel importantísimo en la conservación del recurso agua, a lo cual se agrega un innegable atractivo turístico y de esparcimiento de la población regional, nacional y extranjera, en términos escénicos y de pesca deportiva (Vivas, 1992a).

3.1.2.5. Clima

La temperatura promedio es de 11,12° C y sus valores mínimo y máximo está comprendido entre 3,93 y 18,06° C respectivamente; los más bajos se registran en las cercanías del pico Mucuñuque y los más altos en la población de Las Piedras y el embalse General José Antonio Páez (Figura 3.8 y 3.9). En cuanto a precipitación, el total anual promedio está comprendida entre 788 mm en las cercanías a la laguna de Mucubají, páramo de Hato Viejo y Llano Corredor, y los 1251 mm en el punto de cierre de la cuenca, pudiendo disminuir hasta los 12,48 mm como promedio mensual (definidos a partir de los datos de Fick y Hijmans, 2017) (Figuras 3.10 y 3.11). Éstas

están distribuidas en dos periodos estacionales: una estación húmeda larga que va de abril hasta octubre, y un periodo seco corto que va de noviembre a marzo (Marquina *et al.*, 2025), definiendo un régimen pluviométrico biestacional (Chacón-Moreno y Suárez, 2020). El tipo de clima según Köppen es “Templado cálido de invierno seco” (Cwb) comprendida entre el punto de cierre y aproximadamente los 3000 m de altitud, “Tundra alpina o Tundra por efecto de altura” (ETH) entre los 3000 y los 4640 m y “Gélido por efecto de altura” (EFH) (Figura 3.12) (Gobierno de Navarra, 2011; Sánchez, 2016a). En cuanto a pisos térmicos, se encuentra entre los pisos climáticos fríos y gélidos (Marquina *et al.*, 2025).

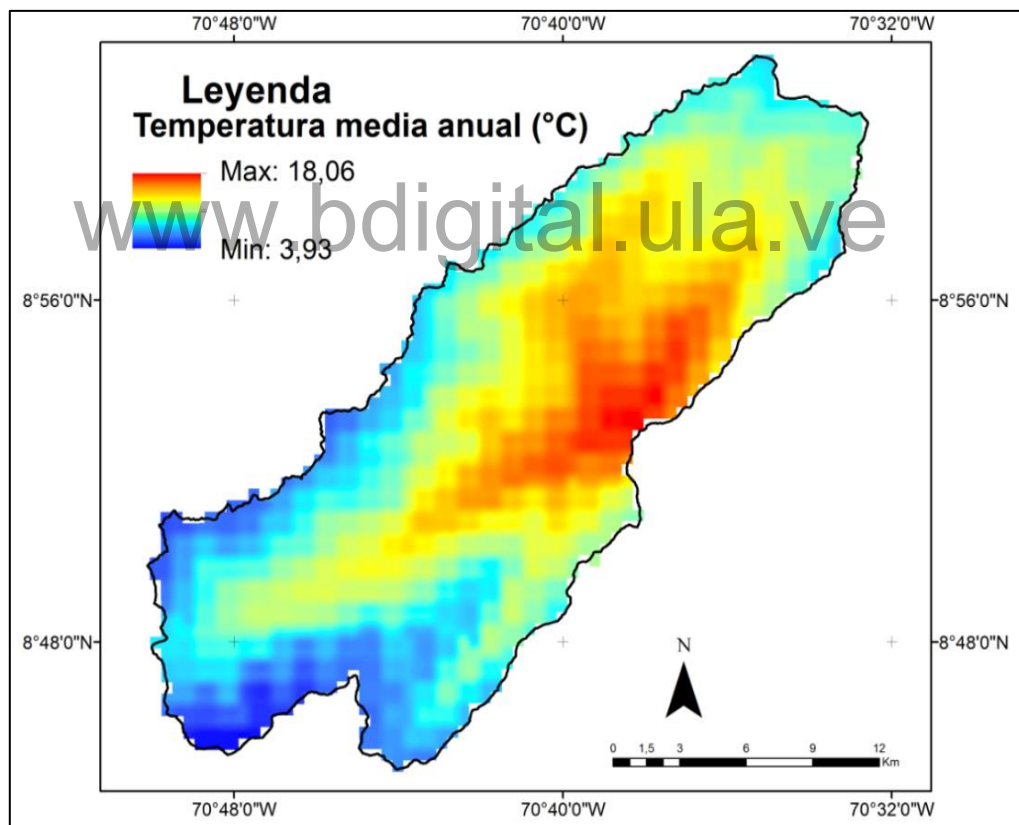


Figura 3.8. Temperatura mínima a máxima de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017).

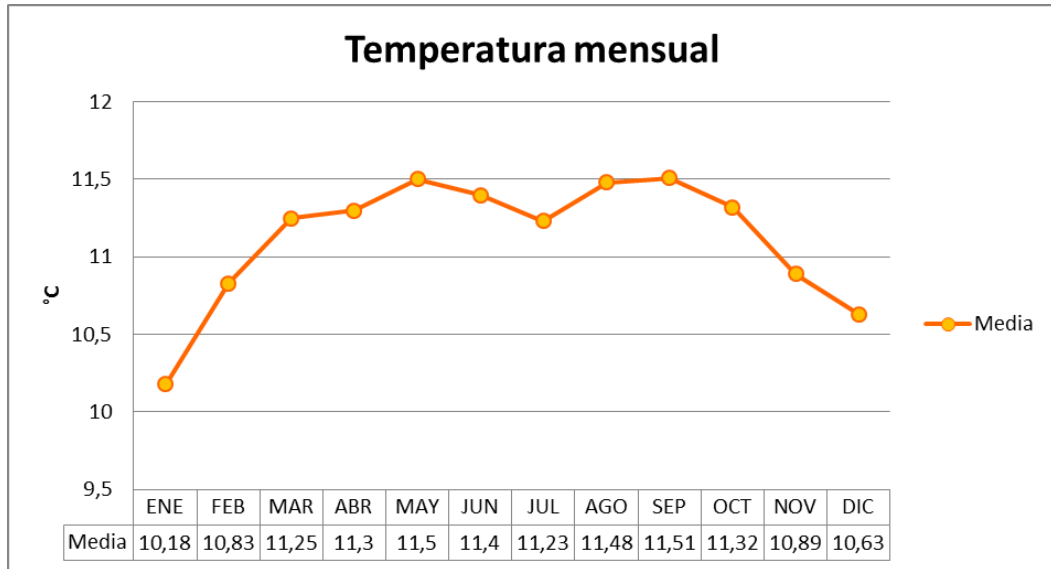


Figura 3.9 Temperatura media mensual de la cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017).

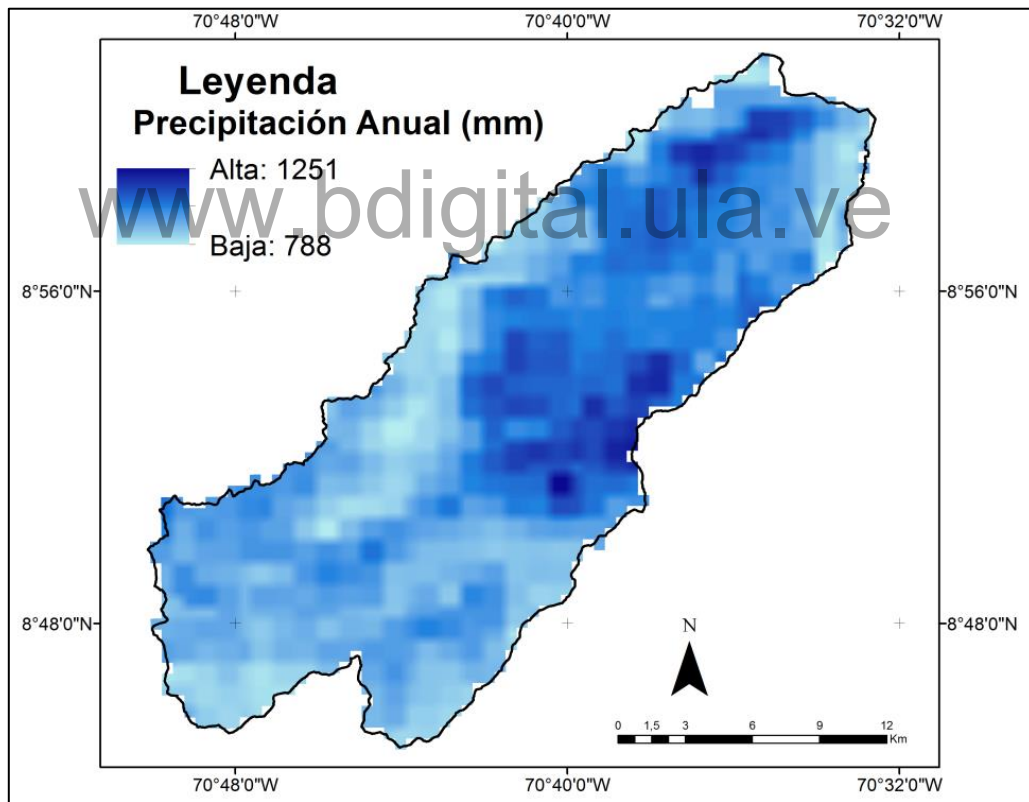


Figura 3.10. Precipitación mínima a máxima anual de la Cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017).

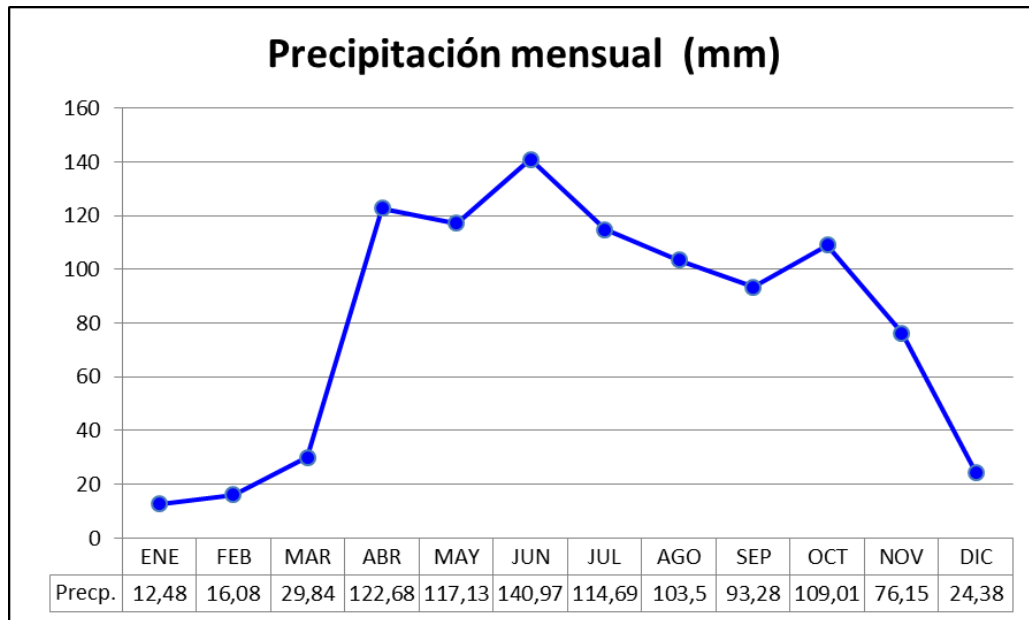


Figura 3.11. Precipitación mensual de la cuenca Alta del río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos WorldClim (Fick y Hijmans, 2017).

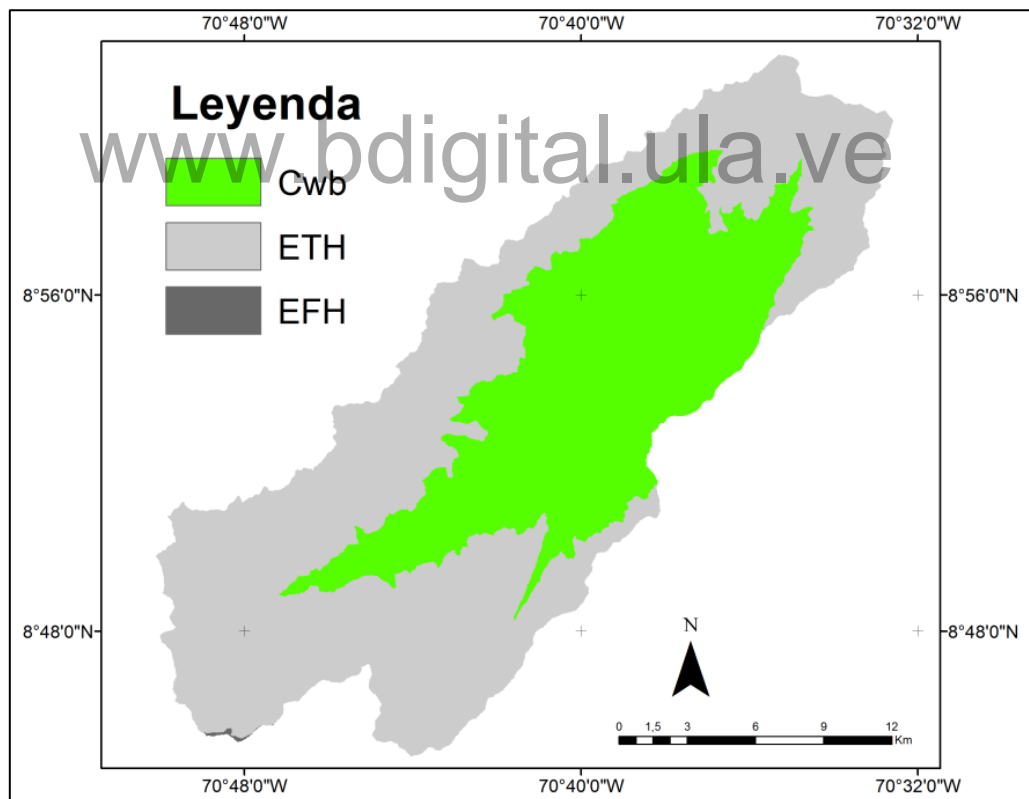


Figura 3.12. Tipos de clima de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo, Mérida según Köppen. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Sánchez (2016a).

3.1.2.6. Vegetación

Según el sistema de clasificación climática desarrollado por Holdridge, se identifican tres zonas de vida: Bosque Húmedo Montano Bajo, Bosque Muy Húmedo Montano y Páramo (pluvial subalpino) (Figura 3.13) (Yanes y Guevara, 1975).

La primera ha sido sumamente intervenida a tal extremo que el bosque original en su mayoría no existe; solamente en las orillas de las quebradas donde crecen árboles de los géneros *Alnus Acuminata* y *Podocarpus*; en lugares empinados se observa una vegetación más alta, con aislados remanentes al original como *Zanthoxylum rhoifolium*, *Cestrum petiolare*, *Calycolpus moritzianus* (sobre los árboles se notan algunas epifitas, aunque no abundantes), arbustos como *Coriaria ruscifolia* y *Crotalaria pilosa*, y herbáceas como *Melinis minutiflora* y *Viguiera leptodonta* (Ewel y Madriz, 1968; IFLA, 2025). Esta zona de vida corresponde al curso medio e inferior de la cuenca entre los 1500 y 2300 m de altitud (Yanes y Guevara, 1975).

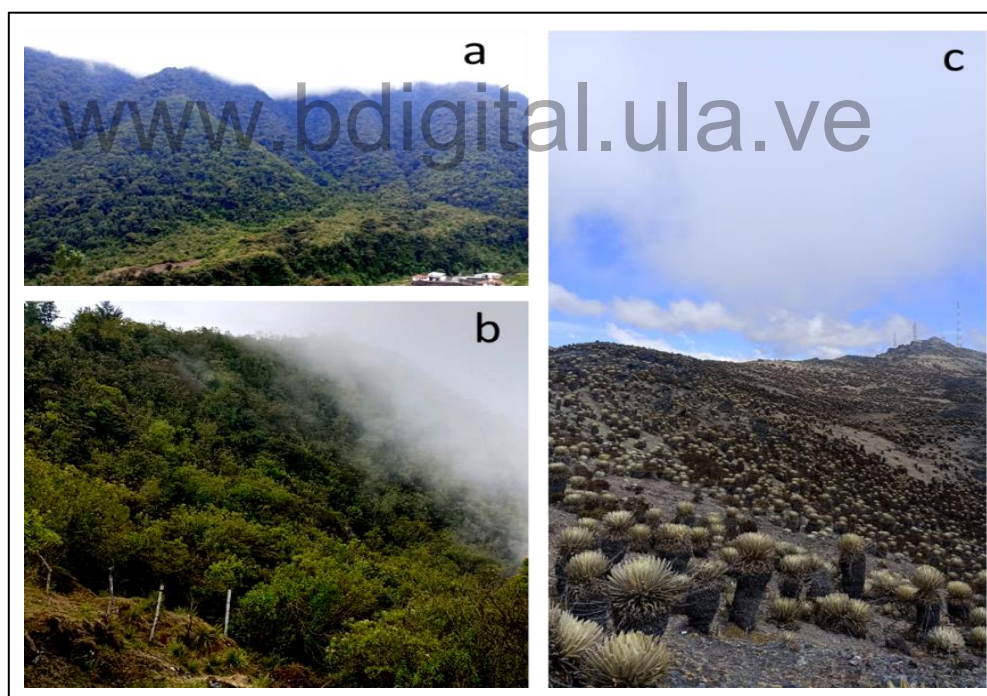


Figura 3.13. Vegetación en las zonas de vida según el Sistema Holdridge, a) Bosque Húmedo Montano Bajo b) Bosque Muy Húmedo Montano y c) Páramo. Fuente: Elaboración propia.

La segunda, en cuanto a su vegetación primaria, se ha conservado casi inalterada en algunas partes y está compuesta por especies como *Oreopanax* sp., *Podocarpus aleifolius*, *Lippia hirsuta*, que forman un dosel superior de 10 a 15 m y arbustos como *Miconia desmantha* y *Hedyosmum racemosum* (el epifitismo es alto, manifestado por la presencia de bromeliáceas, orquídeas, líquenes y musgos); con respecto a la vegetación secundaria, derivada del uso de ciertas áreas para el pastoreo y explotación agrícola, que luego fueron abandonadas, ha permitido la regeneración de un estrato cerrado de plantas de tallos delgados y arbustivos (*Chusquea* sp., *Tibouchina* sp. y *Sobralia violácea*, y helechos como *Elaphoglossum bellermannianum* y *Grammitis moniliformis*, entre otras) y gramíneas como *Geranium meridense* y *Festuca myuros* (Ewel y Madriz, 1968; IFLA, 2025). Esta zona se encuentra entre los 2300 y 3300 metros de altitud (Yanes y Guevara, 1975).

La tercera presenta una capa vegetal que frecuentemente cubre completamente el área y las plantas de mayor porte pasan de dos metros de altura, *Espeletia schultzi* y *timotensis*, son especies características) además otros rosetales como *Espeletias batata*, *E. cristalinensis*, *E. figueirasii*, *E. figueirasii*, *E. floccosa*, *E. jajoensis*, *E. marcescens*, *E. marthae*, *E. occulta* y *E. pannosa* (Ewel y Madriz, 1968; IFLA, 2025). En las altitudes superiores a los 3300 m; es posible encontrar, además, en algunos sitios microambientes que propician el crecimiento de especies arbustivas y hasta arbóreas, como es el caso de los bosquetes de coloradito (*Polylepis sericea*) que es la especie arbórea que vive a mayor altitud y arbustos como *Cavendishia bracteata* y *Arcytophyllum nitidum* (Yanes y Guevara, 1975; IFLA, 2025), y herbáceas como, *Digitalis purpurea* L., *Coespeletia moritziana*, *Coespeletia timotensis*, *Hypericum juniperinum* Kunth, *Euphorbia lasiocarpa*, *Gnaphalium meridanum*, *Acaena cylindristachya* y *Alchemilla moritziana* (IFLA, 2025). Otras especies que se pueden encontrar asociados a los *Polylepis sericea* son los musgos *Drepanocladus polygamus* (Schimp.) Hedenäs, *A. rupestris* Hedw., *B. potosica* Mont., *B. integrifolia* (Taylor) A. Jaeger, *Anomobryum conicum* (Hornsch.) Broth., *Rosulabryum billardierii* (Schwägr.) J.R. Spence, *Aongstroemia julacea* (Hook.) Mitt. (Figura 3.13) (Delgado y León, 2017).

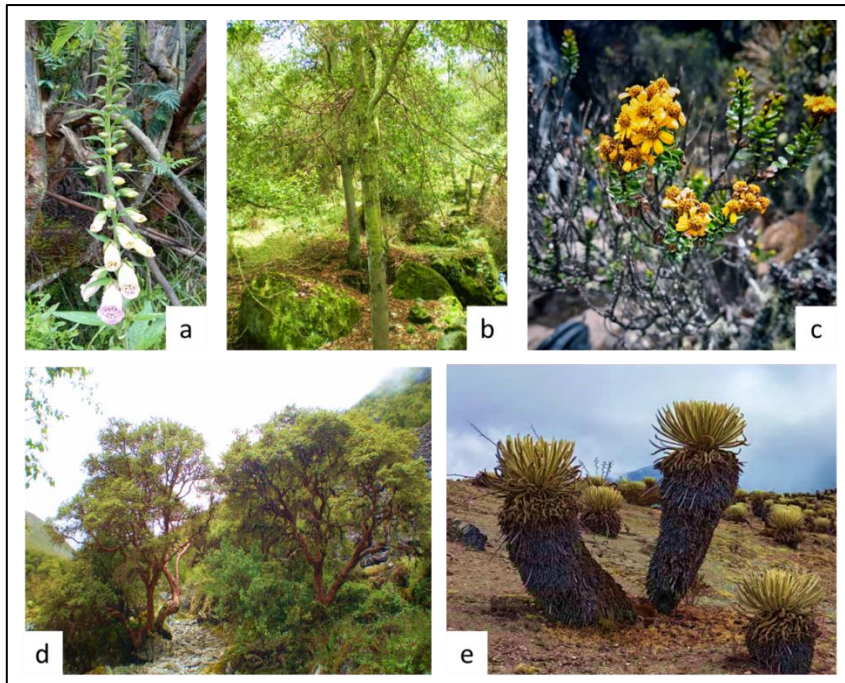


Figura 3.14. Algunas especies vegetales: a) *Digitalis Purpurea L.*, b) *Alnus Acuminata*, c) *Hypericum juniperinum*, d) *Polylepis sericea* y e) *Coespeletia timotensis*. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de (Ewel y Madriz, 1968; Delgado y León, 2017; Araujo, 2024; IFLA, 2025).

3.1.2.7. Fauna

La región es hábitat de varias especies de mamíferos, algunas de ellas endémicas o en peligro de extinción, como el oso frontino (*Tremarctos ornatus*) especie vulnerable, considerada el único oso sudamericano, Venadito de páramo (*Odocoileus lasiotis*), coatí andino (*Nasuella meridensis*) mamífero pequeño y endémico de la cordillera, lapa serranera (*Cuniculus taczanowskii*) y Musaraña de Mérida (*Cryptotis meridensis*), roedores de importancia ecológica en la dispersión de semillas, Paují copete de piedra (*Pauxi pauxi*) ave en peligro de extinción, águila real (*Geranoaetus melanoleucus*) rapaz de gran tamaño presente en zonas abiertas, invertebrados como *Redonda empetrus*, (mariposa endémica) de los páramos de la Sierra de La Culata y *Mannophryne cordilleriana* y *Atelopus mucubajiensis* (Ranita con collar de Mérida y Sapito amarillo de Mucubají, respectivamente) (Figura 19), con poblaciones vulnerables debido a la transformación del hábitat (Rodríguez y Rojas-Suárez, 1995; Rodríguez et al., 2010; Rodríguez et al., 2015; IFLA, 2025).

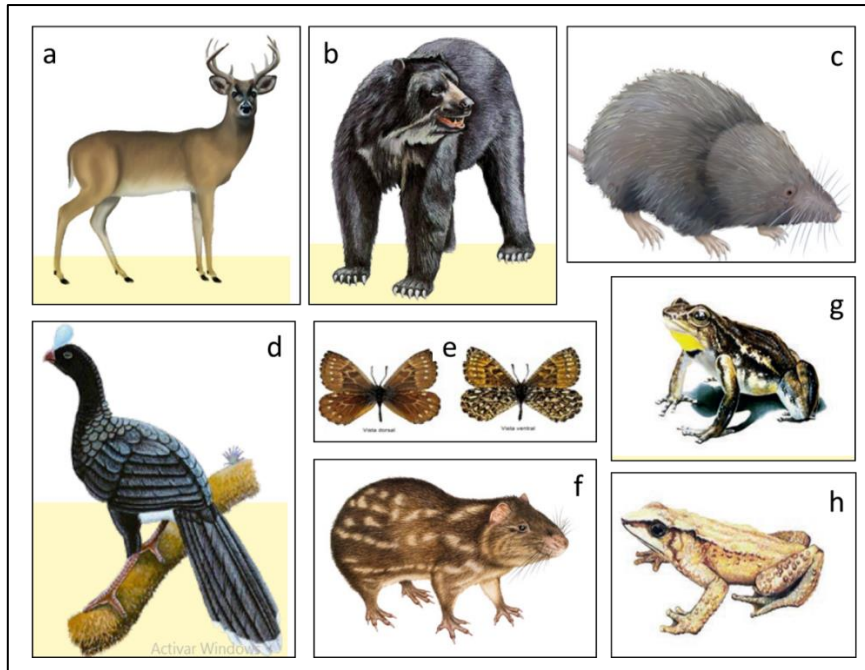


Figura 3.15. Especies: a) *Tremarctos ornatus*, b) *Odocoileus lasiotis*, c) *Cryptotis meridensis*, d) *Pauxi pauxi*, e) *Redonda empetrus*, f) *Cuniculus taczanowskii*, g) *Mannophryne cordilleriana*, h) *Atelopus mucubajiensis*. Fuente: Elaboración propia a partir de datos e imágenes de [Rodríguez et al. \(2015\)](#).

3.1.3. Aspectos socioeconómicos

La población de los municipios Cardenal Quintero y Pueblo Llano para el año 2014 (estimada a partir de los datos del censo de año 2011) fue de 11.153 y 13.782 habitantes respectivamente ([CORPOANDES, 2014a; 2014b](#)). Su distribución espacial se configura a partir del trayecto de la carretera transandina ([Sánchez, 2016b](#)).

En cuanto a la actividad económica, esta está referida principalmente a la horticultura intensiva de riego introducida a partir de los años setenta, la cual cambió radicalmente los sistemas de producción andinos existentes ([Leroy, 2021; Marquina et al., 2025](#)). Los cultivos principales son papa, ajo, cebollín, lechuga, remolacha, repollo y zanahoria ([CORPOANDES, 2014a; 2014b](#)). Otras actividades productivas son la producción de leche, queso y truchas ([CORPOANDES, 2014a; 2014b](#)). El turismo, por su parte, tuvo un auge significativo durante el siglo XX, potencial que sigue manteniendo, dadas las condiciones particulares del entorno y su belleza escénica ([Marquina et al., 2025](#)).

La agricultura y el turismo han desencadenado en el entorno una serie de alteraciones biofísicas, que han transformado el paisaje natural original, moldeando también los modos de vida y las relaciones entre los pobladores locales y diversificando los territorios en toda la cuenca (Marquina *et al.*, 2025). Haciendo especial mención a la primera, prácticas inadecuadas han generado un alto grado de contaminación ambiental, dado que los agricultores, para mejorar las condiciones de fertilidad de los suelos, utilizan el gallinazo de forma indiscriminada, lo que trae como consecuencia la proliferación de moscas que generan un gran número de enfermedades, que afecta sobre todo a la población infantil (CORPOANDES, 2014a; 2014b).



Figura 3.16. Actividades económicas: a) Agricultura tradicional, b) Laguna de Mucubají P.N. Sierra Nevada, c) Parada turística en el sector Baho y d) Centro poblado sector Las Piedras. Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. ABRAE

El territorio de la cuenca se encuentra protegido bajo cuatro tipos distintos de figuras de Área Bajo Régimen de Administración Especial – ABRAE (Sistema de Áreas Protegidas de Venezuela), debido a la existencia de ecosistemas conspicuos y

biodiversos, paisajes con bellezas escénicas y abundancia de humedales y reservorios de agua dulce (Marquina *et al.*, 2025). Siguiendo un orden cronológico de la creación de los decretos, se tienen los siguientes:

- **Parque Nacional Sierra Nevada:** decreto 393 del 02-05-1952 y publicado en Gaceta Oficial 23.821 de la misma fecha (República Bolivariana de Venezuela, 1952). Posteriormente fue modificado según Decreto 777 del 14-08-85, Gaceta Oficial 33.288 del 19-08-85 (República Bolivariana de Venezuela, 1985). Representa un área dentro de la cuenca de 13871,8 ha (33,24%) que protege toda la vertiente derecha del río Santo Domingo e incluye la laguna de Mucubají (Figura 21).

- **Zona Protectora cuenca del río Santo Domingo:** creada mediante Decreto 105 de la Presidencia de la República, del 26-05-74 y publicado un día después en Gaceta Oficial 1.655 Extraordinario (República Bolivariana de Venezuela, 1974). Protege la parte media y baja de la vertiente izquierda del río Santo Domingo; toda la vertiente izquierda y la parte media y baja de la vertiente derecha del río Pueblo Llano y la subcuenca del río Aracay.

- **Parque Nacional Sierra de La Culata:** creado el 07-12-89 según decreto 640, Gaceta Oficial 34.439 de fecha 29-03-90 (República Bolivariana de Venezuela, 1990) y modificado mediante Decreto 670 el 10-05-95, publicado en Gaceta Extraordinaria el 26-05-95 (República Bolivariana de Venezuela, 1995). Dentro de la cuenca alta del Río Santo Domingo tiene un área de 7877,52 ha (18,88%). Esta figura jurídica protege toda la parte alta, tanto de la margen izquierda del río Santo Domingo como de la margen derecha del río Pueblo Llano (áreas de nacientes de los tributarios de estos dos ríos) (Figura 3.17).

- **Monumento Natural Teta de Niquitao - Guirigay:** creado el 04-09-96 mediante el Decreto 1473 de la presidencia de la República publicado el 11-10-96 (República Bolivariana de Venezuela, 1996). Cuenta con un área dentro de la cuenca de 4156,62 ha (9,96%). Su lindero oeste incluye áreas de la vertiente oriental del río Aracay, partes altas de afluentes tributarios del mismo y parte del páramo El Volcán (Figura 3.17).

Adicionalmente se puede mencionar la figura de Área de Protección de Obra Pública “Zona del Astrofísico CIDA” (ubicada en la cuenca del río Chama, próxima a la divisoria de cuencas compartida con el río Santo Domingo), realizada por medio del decreto 631 del 07-12-89 y publicado en Gaceta Oficial 4.158 el 25-01-90 (República Bolivariana de Venezuela, 1990). Esta figura jurídica se sobrepone con una parte del Parque Nacional Sierra Nevada en el sector de las nacientes del río Santo Domingo hasta la laguna de Mucubají.

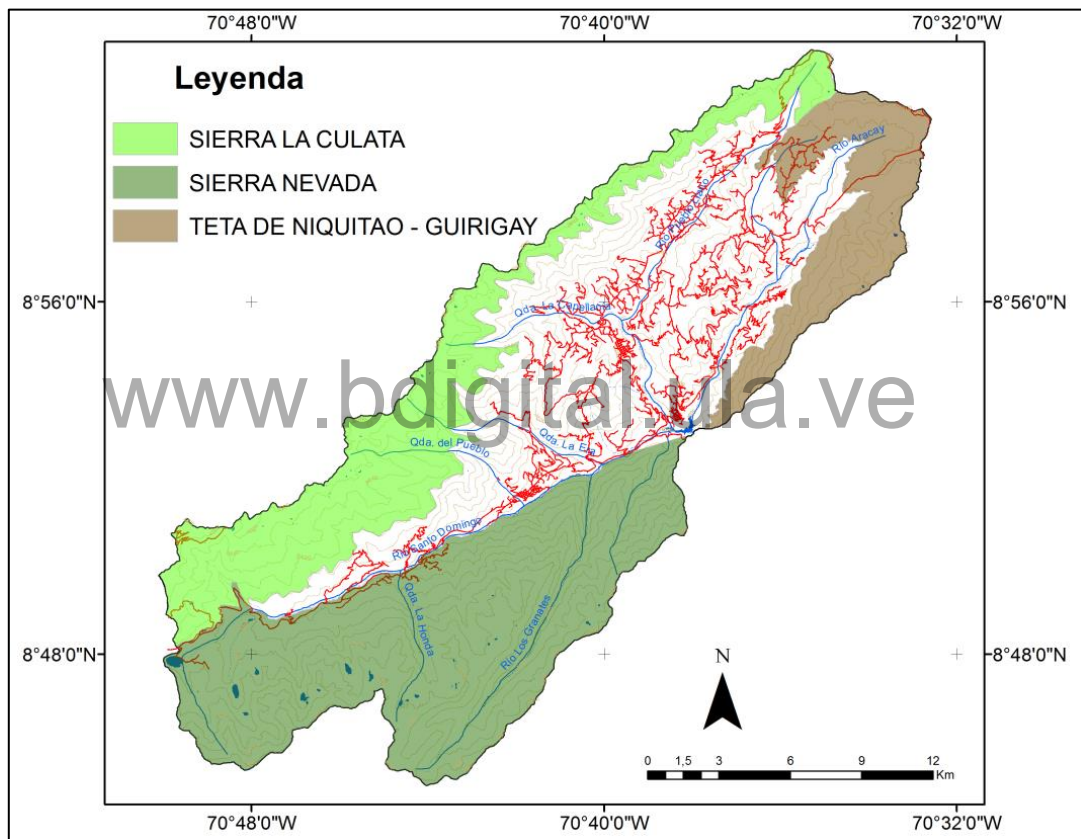


Figura 3.17. Áreas Bajo Régimen de Administración Especial – ABRAE (Sistema de Áreas Protegidas de Venezuela) de la cuenca alta del Río Santo Domingo, Mérida. Fuente: Elaboración propia a partir de las capas vectoriales de IGVSb-SIGOT.

3.2. Análisis de Coberturas y Usos de la Tierra

Para realizar el análisis sobre los cambios en coberturas y usos de la tierra en la cuenca alta del río Santo Domingo, se utilizó una variedad de recursos espaciales para

crear la cartografía necesaria a un nivel semidetallado (Marquina y Mogollón, 2018). A continuación, se define cada uno de ellos.

3.2.1. Imágenes satelitales de SAS Planet y MDE Alos Palsar

Se descargaron imágenes satelitales de muy alta resolución soportadas por los programas SAS Planet, plataforma rusa que utiliza proveedores como Google, Bing y Yandex, entre otros, con sistema de coordenadas y datum WGS 1984 (IDEAM, 2017; SASGIS, 2023). Dichos insumos fueron usados como recursos auxiliares en la interpretación de las imágenes Sentinel 2.

De igual modo, se descargó un modelo digital de elevación ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) con resolución espacial de 12,5 m, producido por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA, por sus siglas en inglés) (JAXA, 2008). Este producto fue empleado en la delimitación de la cuenca, la generación de curvas de nivel y la pendiente, aspectos necesarios en las descripciones de algunas características físico-naturales del área. El mismo fue descargado gratuitamente de la colección del portal Vertex de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) (<https://search.asf.alaska.edu/>) (Código del MDE: AP_09533_FBD_F3440_RT1).

3.2.2. Adquisición de imágenes satelitales Sentinel 2 L2A

Se descargaron imágenes Sentinel 2 de distribución gratuita, pertenecientes al programa financiado por la ESA (European Space Agency) y la UE (Unión Europea) (Copernicus, 2018), tomando en cuenta las que presentaban menores porcentajes de nubosidad en el área de estudio (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>) (tabla 4). Estas cuentan con nivel de corrección L2A que ofrece resoluciones espaciales de 10, 20 y 60 m, derivadas de imágenes con nivel 1C que emplean un DEM de 90 m (PlanetDEM 90) para su corrección geométrica; de igual modo, poseen mediciones de reflectancia en la parte superior de la atmósfera (TOA) (Copernicus, 2018). Las

imágenes se encuentran ubicadas en las zonas mundiales 19PBK y PCK de la cuadrícula UTM (rectangular plana).

Tabla 3.2. Bandas espectrales del sensor Sentinel 2 L2A. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la [ESA \(2015\)](#).

Nombre	Long. de Onda	Resolución		
		10 m	20 m	60 m
Mapa Espesor Óptico de Aerosoles	-	AOT	AOT	AOT
Aerosol	0,433 – 0,453 μm	-	-	B1
Azul	0,458 – 0,523 μm	B2	B2	B2
Verde	0,543 – 0,580 μm	B3	B3	B3
Rojo	0,650 – 0,680 μm	B4	B4	B4
Borde Rojo de Vegetación	0,698 – 0,713 μm	-	B5	B5
Borde Rojo de Vegetación	0,773 – 0,748 μm	-	B6	B6
Borde Rojo de Vegetación	0,773 – 0,793 μm	-	B7	B7
Infrarrojo Cercano	0,785 – 0,900 μm	B8	-	-
Infrarrojo Cercano Estrecho	0,855 – 0,875 μm	-	B8A	B8A
Vapor de agua	0,935 – 0,955 μm	-	-	B9
Infrarrojo de onda corta (SWIR 1)	1,565 – 1,655 μm	-	B11	B11
Infrarrojo de onda corta (SWIR 2)	2,100 – 2,280 μm	-	B12	B12
Mapa de Clasificación de Escenas	-	-	SCL	SCL
Imagen en color verdadero	-	TCI	TCI	TCI
Mapa Vapor de Agua	-	WVP	WVP	WVP

Nota: La banda 10 (Cirros) es omitida en el producto L2A ya que no contiene información de superficie. La banda B8 se omite en las resoluciones de 20 y 60 m, ya que la B8A proporciona información espectral más precisa. Bandas 2, 3, y 4 son remuestreadas a resolución de 20 m a partir de las de resolución de 10 m. Bandas 5, 6, 7, 8A, 11 y 12 son remuestreadas a una resolución de 60 m a partir de las de resolución de 20 m.

3.2.3. Composición de bandas y mejoramiento de imagen satelital

Sentinel 2 cuenta con 13 bandas espectrales (Tabla 3.2) que permiten realizar diversos análisis en teledetección con resoluciones que varían entre 10 y 60 metros ([ESA, 2015](#)). Con el objetivo de crear una composición a color verdadero y otra a falso color, se procedió a realizar las combinaciones de bandas 4-3-2 (color verdadero o natural) y 8-4-3 (color falso estándar). En la primera se asignaron a los canales RGB (rojo, verde y azul, en español), las bandas espectrales rojo (0,65-0,68 μm), verde (0,54-0,57 μm) y azul (0,45-0,52 μm) y en la segunda, se emplearon las bandas del infrarrojo cercano (0,78-0,90 μm), rojo (0,65-0,68 μm) y verde (0,54-0,57 μm) ([Chuvieco, 2016](#)).

La primera combinación se emplea porque es un producto de observación de la Tierra ampliamente utilizado para la visualización de imágenes satelitales. Dado que se utiliza a menudo en la comunicación con públicos no expertos en diversos medios, es deseable que dicho producto se aproxime al color percibido por el ojo humano (Sovdat *et al.*, 2019). En cuanto a la segunda, se utiliza con mayor frecuencia para evaluar la densidad y la salud de las plantas, ya que refleja la luz infrarroja cercana y verde, mientras que absorbe la roja. Debido que reflejan más la luz infrarroja cercana que la verde, las tierras cubiertas de vegetación se ven de un rojo intenso; la vegetación más densa se ve de un rojo más oscuro; las ciudades y el suelo expuesto se ven grises o marrón claro; y el agua se ve azul o negra (Sentinel Hub, 2020).

Posteriormente, se realizaron adaptaciones de las resoluciones radiométricas de las imágenes a la capacidad del monitor de visualización a través de la ecualización de los histogramas sobre los valores de píxeles existentes, lo que generó una mejor distribución de estos (Chuvieco, 2016; ESRI, 2021), optimizando las imágenes para lograr una mayor discriminación entre las categorías de coberturas y usos existentes.

www.bdigital.ula.ve

3.2.4. Cartografía de coberturas y usos de la tierra para los años 2015, 2020 y 2025

3.2.4.1. Definición de Términos de referencia cartográfica de los mapas

La cartografía de coberturas y usos de la tierra para los años 2015, 2020 y 2025, así como también la de cambios suscitados entre los períodos 2015–2020 y 2020–2025, respectivamente (entre otros derivados a partir de estos), fue generada bajo los términos señalados en la tabla 5. La unidad mínima cartografiable se estableció en 0,5 ha, teniendo en cuenta la escala máxima alcanzable con los datos Sentinel 2 (Marquina y Mogollón, 2018). De igual modo, también se incluyeron elementos más pequeños, fácilmente observables e importantes de incluir en la cartografía, como tierras desnudas o degradadas y vialidad (por mencionar algunos ejemplos). Esta acción se apoyó en imágenes de alta resolución obtenidas con los programas SAS Planet (SASGIS, 2023) y Google Earth, que han sido utilizados para la visualización y aplicaciones científicas como la evaluación de la precisión, el reconocimiento y la

determinación de las coberturas y usos de la tierra en diversos estudios (Thenkabail, 2016).

Tabla 3.3. Términos de referencia cartográficos. Fuente: Elaboración propia.

Sistema de coordenadas	WGS 1984
Datum	WGS 1984 (Datum geocéntrico)
Unidad angular	Grados (0,0174532925199433)
Esferoide	WGS 1984
Eje menor del esferoide	6 378 137,0
Eje mayor del esferoide	6 356 752,314245179
Achatamiento	298,257223563
Proyección	Transversal Mercator
Huso cartográfico	19
Escala cartográfica	1:15 000

3.2.4.2. Leyenda de coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover

Se optó, por emplear la leyenda nacional de cobertura de la tierra adaptada para Colombia, que se basa en la metodología CORINE Land Cover (CLC) desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2010). Esta leyenda presenta un sistema de clasificación jerárquico que permite diferenciar la cobertura en diferentes niveles, lo que facilita un análisis más detallado y preciso de las coberturas y usos (IDEAM, 2010).

En esta investigación, se describen a continuación las categorías más relevantes para la cuenca del río Santo Domingo, considerando tanto la presencia real de cada cobertura en el territorio como su importancia para los análisis correspondientes. Estas categorías, junto con sus respectivos códigos, se resumen en la Tabla 3.4.

1. Territorio artificializado: comprende las áreas de las poblaciones y aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

1.1. Zonas urbanizadas: incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran un tejido urbano.

1.1.1. Tejido urbano continuo: espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más del 80% de la superficie del terreno. La vegetación y el suelo desnudo representan una baja proporción del área del tejido urbano.

1.1.2. Tejido urbano discontinuo: espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación.

1.2. Zonas industrializadas o comerciales y redes de comunicación: comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad.

1.2.1. Zonas industriales o comerciales: áreas cubiertas por infraestructura artificial (terrenos cimentados, alquitranados, asfaltados o estabilizados), sin presencia de áreas verdes dominantes, las cuales se utilizan también para actividades comerciales o industriales.

1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados: espacios artificializados con infraestructuras de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexa y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicios, andenes, terraplenes y áreas verdes.

1.2.5. Obras hidráulicas: superficies que corresponden a construcciones consolidadas de carácter permanente, destinadas a instalaciones hidráulicas, y aquellas de pequeña magnitud, generalmente asociadas con infraestructura urbana, tales como acueductos, bocatomas, plantas de tratamiento y pequeñas presas.

1.4.2 Instalaciones recreativas: terrenos dedicados a las actividades de camping, deporte, parques de atracción, golf, hipódromos y otras actividades de recreación y esparcimiento, incluyendo los parques habilitados para esparcimiento, no incluidos dentro del tejido urbano.

2. Territorios agrícolas: terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas.

2.1. Cultivos transitorios: áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de solo unos pocos meses, como por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto.

3. Bosque y áreas seminaturales: comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación.

3.1. Bosques: comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas (bosques naturales y las plantaciones).

3.1.1. Bosque denso: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) más o menos continuo cuya área de cobertura arbórea representa más de 70% del área total de la unidad, y con altura del dosel superior a cinco metros.

3.1.5. Plantación forestal: son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante la plantación y/o la siembra durante el proceso de forestación o reforestación, para la producción de madera (plantaciones comerciales) o de bienes y servicios ambientales (plantaciones protectoras).

3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva: comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de

crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica.

3.2.1 Herbazal: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación) o abierta (30% – 70% de ocupación).

3.2.1.1 Herbazal denso: cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70% de ocupación).

3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado: corresponde a una cobertura natural constituida por un herbazal denso de tierra firme, donde no existe presencia de elementos arbóreos y/o arbustivos, o en caso de existir en ningún caso representarán más de 2% del área total de la unidad. Se localizan principalmente en las zonas de páramo y subpáramo de la alta montaña.

3.2.2. Arbustal: comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos (plantas perennes, con estructura de tallo leñosa, altura entre 0,5 y 5 m, fuertemente ramificado en la base y sin una copa definida).

3.3.2. Afloramientos rocosos: son áreas en las cuales la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas, sin desarrollo de vegetación, generalmente dispuestas en laderas abruptas, formando escarpes y acantilados. Se localizan principalmente en las áreas de fuerte pendiente, donde predominan los sustratos de rocas duras y resistentes.

3.3.3. Tierras desnudas y degradadas: esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema y/o condiciones climáticas extremas. Se incluyen las áreas donde se presentan procesos de erosión que pueden llegar hasta la formación de cárcavas.

4.1 Áreas húmedas continentales: Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente.

4.1.2 Turberas: Son terrenos bajos de tipo pantanoso, de textura esponjosa, cuyo suelo está compuesto principalmente por musgos y materias vegetales descompuestas. Se encuentran frecuentemente en áreas andinas en terrenos situados por encima de los 3.200msnm.

5. Superficies de agua: cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente.

5.1. Aguas continentales: cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales o artificiales de agua dulce (no salina), embalses y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales.

5.1.1. Ríos (50 m): un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Se considera como unidad mínima cartografiada aquellos ríos que presenten un ancho del cauce mayor o igual a 50 metros.

5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales: superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, dulce o salobre, que pueden estar conectados o no con un río o con el mar.

5.1.4. Cuerpos de agua artificiales: esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial, que fueron creados por el hombre para almacenar agua, usualmente con el propósito de generación de electricidad y el abastecimiento de acueductos, aunque también para prestar otros servicios tales como control de caudales, inundaciones, abastecimiento de agua, riego y con fines turísticos y recreativos.

Tabla 3.4. Categorías empleadas en la metodología CORINE Land Cover adaptada a la cuenca alta del río Santo Domingo – Mérida. Fuente: elaborado a partir de IDEAM (2010).

1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
1.1. Zonas urbanizadas	3.1. Bosques
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.2.1 Bosque denso alto de tierra firme
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	3.1.5.1 Plantación de coníferas
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.2.1. Herbazal
1.2.5. Obras hidráulicas	3.2.1.1. Herbazal denso
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.2.1.1.1.2 Herbazal denso de tierra firme no arbolado
1.4.2 Instalaciones recreativas	3.2.2. Arbustal
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
	3.3.2. Afloramientos rocosos
	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	5. SUPERFICIES DE AGUA
2.1. Cultivos transitorios	5.1. Aguas continentales
	5.1.1. Ríos (50 m)
	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
4. ÁREAS HÚMEDAS	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
4.1. Áreas húmedas continentales	
4.1.2 Turberas	

www.bdigital.ula.ve

3.2.4.3. Interpretación visual en pantalla de CUT

Basada en la leyenda adaptada por el IDEAM (2010), la delineación preliminar se basó en patrones identificados y en la revisión previa de cartografía existente (Osorio *et al.*, 2009), complementada con el uso de composiciones en color verdadero y falso color de las imágenes capturadas por el satélite Sentinel 2 para los años 2015, 2020 y 2025, respectivamente. Paralelamente, se construyó una clave de interpretación (tabla 7) para cada categoría de la leyenda, a partir de los criterios señalados por la Junta de Andalucía (2007), Basterda (2011) e INEGI (2015). De igual modo se indica en cada ficha el código y color RGB Corine Land Cover (Franco, 2023).

Tabla 3.5. Ficha para cada categoría Corine Land Cover para constituir la Clave de interpretación. (Fuente. Elaboración propia con la información de [Junta de Andalucía \(2007\)](#), [Basterra \(2011\)](#) e [INEGI \(2015\)](#)).

Unidad de cobertura de la tierra: Nombre y código		RGB: Combinación de color que se establece en la cartografía
Fotografía(s)	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2)	Identificación: Fácil, posible, difícil o muy difícil. Delimitación: Fácil, posible, difícil o muy difícil Tamaño: Pequeño, mediano, grande o variable Textura: Muy uniforme, uniforme, media, rugosa o muy rugosa. Color: El que corresponda a cada clase según la composición evaluada
	Falso Color (8-4-3)	Tono: Muy claro, claro, medio, oscuro, muy oscuro, variable. Manchas: Dispersas, escasas, concentradas, muy concentradas o cualquier variante que caracterice a la clase en este sentido. Forma: Característico, lineal, regular, sin patrón espacial o cualquier otra variante que mejor defina a la clase Contexto: Referido a todo aquello que lo circunda y explica las razones de la presencia del objeto en ese lugar.

3.2.5. Verificación de campo y ajuste de la interpretación preliminar

En la inspección o reconocimiento del área se definieron una serie de puntos de observación dentro de la cuenca (a lo largo de la red vial principal), cuyas coordenadas fueron registradas con apoyo de un sistema de posicionamiento global (GPS) GARMIN GPS map 60CSx. El propósito de cada punto de observación fue realizar fotografías panorámicas y revisar la cartografía preliminar impresa a 1:20.000 e interpretar en pantalla (computador portátil) la capa de coberturas y usos preliminar del año 2025 sobre la imagen satelital, para observar diversas unidades delineadas y determinar algunas áreas que presentaban incertidumbres en su codificación (categorización), lo que facilitó la agrupación o asociación de las mismas ([Pacheco et al., 2006](#)).

3.2.6. Validación topológica de los mapas de coberturas y usos de la tierra

La topología es una colección de reglas que, acopladas a un conjunto de herramientas y técnicas de edición, permite a las geodatabases modelar relaciones geométricas con mayor precisión ([ESRI, 2016](#)). Por ello, se llevó a cabo un proceso de validación topológica en cada una de las capas de polígonos producidas durante la etapa de

digitalización y clasificación de las categorías CLC. Esto se realizó con el propósito de evitar redundancia de polígonos, crear una red de polígonos completamente integrada y libre de errores y asegurar que todos los polígonos son parte de una unidad, que permita el análisis de vecindad (Aldana, 2019).

Para desarrollarla, se utilizó el software ArcGIS 10.5, dado que cuenta con herramientas robustas y optimizadas para la gestión y corrección de errores topológicos, que ofrecen mayor precisión y eficiencia que otros programas como QGIS en este tipo de procesos. Se evaluaron dos reglas topológicas básicas que definen las relaciones espaciales permitidas entre las entidades de polígonos, la primera de ellas “*Must Not Overlap*” (no debe haber superposición, que asegura que dos o más polígonos de una misma capa no se sobrepongan) y “*Must Not Have Gaps*” (no deben existir vacíos, dentro de un polígono simple o entre polígonos adyacentes) (ESRI, 2016).

3.2.7. Validación de la exactitud de los mapas de cobertura y usos de la tierra

El proceso de validación de los mapas de cobertura y usos de la tierra presenta un enfoque muy importante estadísticamente, ya que este proceso viene a aportar transparencia y certidumbre de la información cuantitativa relacionada con la generación de datos cartográficos temáticos (Duarte *et al.*, 2016). Este proceso se realizó para los mapas de los años 2015, 2020 y 2025.

La validación consistió en la extracción de muestras equivalentes entre el 5% y el 10% del área cartografiada total, ajustadas proporcionalmente a cada categoría de cobertura y uso, a fin de que fueran directamente comparables (Congalton y Green, 2009). Las mismas fueron adquiridas según el criterio planteado por Olofsson *et al.* (2014), es decir, por medio del juicio de un experto en interpretación de imágenes satelitales, quien no participó en la elaboración del mapa. Al mismo se le solicitó generar diez (10) muestras verdad-terreno distribuida aleatoriamente para cada una de las categorías consideradas, lo que dio un total de 170 muestras.

Definidas las muestras, por medio del programa SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*) versión 9.3.1, se ejecutó la herramienta “Confusion Matrix” desarrollada por Conrad (2015). Dicha herramienta permitió obtener en tablas la

matriz de confusión, la confiabilidad de las categorías (precisión del productor y usuario) y los valores de precisión global e índice de Kappa.

La matriz de confusión permitió visualizar el resumen de los acuerdos y desacuerdos entre las clases del mapa y del terreno, definidos como errores de omisión, comisión y precisión global (Jensen, 2005; Chuvieco, 2016). El primero es entendido como los elementos que debieron ser clasificados correctamente y fueron incluidos en otras; el segundo, como los elementos que fueron clasificados correctamente y pertenecen a otras; y el tercero, que señala el número de elementos clasificados de forma correcta sobre el número total de unidades estimadas (NV5 Geospatial Solutions, 2018).

En cuanto al índice Kappa (κ) propuesto por Cohen (1960), este mide el grado de coincidencia o concordancia entre la clasificación del mapa y la referencia de terreno y se considera más robusto que la precisión global, ya que tiene en cuenta las probabilidades de coincidencia aleatoria (Olaya, 2011). Su cálculo se desarrolla por medio de la siguiente ecuación:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}$$

Donde:

i = número de clases

N = número total de píxeles clasificados comparados con la verdad terreno

m = número de píxeles correctamente clasificados en la clase i (diagonal de la matriz)

C = número total de píxeles clasificados como clase i

G = número total de píxeles verdad-terreno pertenecientes a la clase i

(NV5 Geospatial Solutions, 2018)

Finalmente, el resultado de precisión global obtenido fue comparado con los estándares establecidos por GOF-C-GOLD (2013), quienes aseguran que los mapas temáticos de coberturas y usos de la tierra deben presentar una precisión global mínima comprendida entre 80% y 100%. De igual modo, los valores de Kappa fueron interpretados según la escala de referencia señalada por Landis y Koch (1977), los cuales deben presentar valores superiores a 0,61 para que sea aceptable la concordancia de la cartografía generada. A continuación se señalan los valores de referencia.

- $\kappa < 0,40$: concordancia pobre
- $0,41 \leq \kappa \leq 0,60$: concordancia moderada
- $0,61 \leq \kappa \leq 0,80$: concordancia sustancial
- $0,81 \leq \kappa \leq 1,00$: concordancia casi perfecta

3.3. Determinación de los cambios de cobertura y uso de la tierra

Para comprender mejor la dinámica espacial y temporal de los cambios de coberturas y usos de la tierra, se utilizó la metodología propuesta por Pontius *et al.* (2004), a partir de la superposición entre las cartografías generadas para los años 2015, 2020 y 2025 con el propósito de obtener los valores de las áreas que fueron modificadas como resultado de las actividades humanas (Cárdenas *et al.*, 2024), y por procesos de erosión (Camargo *et al.*, 2017).

Se procedió a realizar cruces espaciales entre mapas (geoproceso intersección), que permitieron obtener tabulaciones cruzadas o tablas de contingencia (White, 2004), y con ellas elaborar matrices de cambio. Este procedimiento se realizó para dos intervalos de tiempo, el primero comprendido entre 2015 y 2020 y el segundo entre 2020 y 2025, respectivamente.

Las diagonales de las matrices indican los valores que permanecieron sin cambio entre un año y otro, es decir, reflejan la persistencia de cada categoría (ejemplo, bosque denso que siguió siendo bosque). Por otra parte, celdas de las matrices fuera de las diagonales representan cambios o transiciones de una categoría a otra (ejemplo, la transformación de bosque a cultivos). En cuanto a los totales, el de las columnas indica las ganancias y el de las filas señala las pérdidas (Pontius *et al.*, 2004).

La cuantificación de los cambios permitió identificar con precisión áreas (en hectáreas) y porcentajes de ganancias y pérdidas, así como también las principales transiciones entre categorías. Las pérdidas de bosque natural por cambio a usos agrícolas o urbanos y el aumento de las áreas degradadas constituyen aspectos claves en los análisis de flujos de carbono.

3.4. Estimaciones de carbono

El análisis se fundamentó en la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para el sector AFOLU, siguiendo las Directrices del IPCC (2006). Además, la estimación de la biomasa aérea se complementó con dos enfoques: a

partir de un mapa de carbono desarrollado por [Harris et al. \(2021\)](#) y de un modelo alométrico calibrado por [Mora \(2022\)](#), aplicado a índices de vegetación normalizados de los años de estudio.

La metodología del IPCC establece procedimientos estandarizados para calcular las reservas de carbono en distintos "reservorios" o depósitos de carbono del ecosistema terrestre y los flujos de carbono generados por los cambios en el uso del suelo (emisiones o capturas netas de CO₂). Dichas directrices definen y estiman cinco depósitos de carbono (biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y materia orgánica del suelo) ([IPCC 2006](#); [Flores, 2013](#); [Rosentock et al., 2016](#)). De igual modo, también se consideró el refinamiento 2019 de las directrices del IPCC 2006 ([IPCC, 2019](#)).

Las directrices del IPCC integran dos componentes: los datos de actividad (*DA*), que evalúan las actividades del uso de la tierra y sus cambios en las distintas categorías, y los factores de emisión (*FE*) (Tabla 3.6), que evalúan las reservas de C y sus cambios. La integración de estos dos permitió estimar las reservas de C, así como las emisiones y absorciones de CO₂ ([IPCC, 2006](#)). Por consiguiente, la ecuación básica es:

$$Emisiones = DA \times FE \quad (\text{ecuación 1})$$

El cálculo sistemático se llevó a cabo en las principales subclases de cobertura vegetal del mapa. A estas subclases se les asignó un valor de reserva de carbono por hectárea (Mg C ha⁻¹), tomando en cuenta, en la medida de lo posible, los depósitos de carbono en cada estrato (cuyos detalles se explican en apartados posteriores). Con base en lo anterior, la ecuación queda definida como:

$$\text{Reserva de C} = \text{Superficie (ha)} \times FE \text{ (Mg C ha}^{-1}\text{)} \quad (\text{ecuación 2})$$

Los *DA* se obtuvieron en los apartados 3.2 y 3.3 que representan las superficies ocupadas por cada categoría de coberturas y usos y sus transiciones a lo largo del tiempo ([López, 2025](#)), estas categorías se agruparon luego en las clases definidas por el IPCC (Tabla 3.7), constituyendo de esta forma datos de Nivel 3.

Por su parte, los *FE* representan la cantidad de carbono por unidad de superficie (Mg C ha⁻¹) para cada clase, y se derivó a partir de factores de emisión presentes en los diversos capítulos del volumen 4 de las directrices del IPCC.

Definidos los DA y los FE, se estimaron las existencias de C en cada año de estudio para cada una de las categorías (incluyendo tanto las tierras que permanecen en una categoría como las que pasan a otra categoría). Esto se resume con la siguiente ecuación:

$$\Delta C_{AFOLU} = \Delta C_{FL} + \Delta C_{CL} + \Delta C_{GL} + \Delta C_{WL} + \Delta C_{SL} + \Delta C_{OL} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

ΔC = cambio en las existencias de carbono, **FL** = Tierras forestales, **CL** = Tierras de cultivo, **GL** = Pastizales, **WL** = Humedales, **SL** = Asentamientos y **OL** = Otras tierras.

En este estudio no se consideraron las categorías tierras de cultivo, asentamientos y otras tierras. La primera, debido a que se considera que los cambios en la biomasa de los cultivos equivalen a cero porque las ganancias de carbono de la biomasa del crecimiento se compensan con las pérdidas por cosecha. La segunda, por corresponder a vegetación como césped, plantas de jardines, árboles de asentamientos rurales, campos de deportes y parques, los cuales no son de interés en esta investigación. Y la tercera, por corresponder a suelo desnudo, roca, hielo y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras cinco categorías (IPCC, 2006).

Previamente, se definió el valor de existencia de carbono en cada categoría a partir de la subdivisión de las categorías Corine Land Cover (Bosque denso, Plantación de coníferas, Herbazal denso, Herbazal denso de tierra firme no arbolado y Arbustal). Esto se expresa mediante la ecuación siguiente:

$$\Delta C_{LU} = \sum_i \binom{n}{k} \Delta C_{LU_i} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde:

ΔC_{LU} = cambios en las existencias de carbono para una categoría de uso de la tierra.

i = indica un estrato o una subdivisión específicos dentro de la categoría de uso de la tierra. $i = 1 a n$.

De igual modo, se realizó en cada estrato la estimación de los depósitos de carbono (a partir de FE disponibles) (Tabla 8). En general, los cambios en las existencias de carbono dentro de un estrato se estimaron sumando los cambios de todos los depósitos, como se muestra en la Ecuación siguiente:

$$\Delta C_{LU_i} = \Delta C_{BA} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LI} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{PMR} \quad (\text{ecuación 5})$$

Donde:

ΔC_{LU_i} = cambios en las existencias de carbono para un estrato de una categoría de cobertura y uso de la tierra.

Los subíndices se refieren a los siguientes depósitos de carbono: **AB** = biomasa aérea, **BB** = biomasa subterránea, **GL** = Pastizales **DW** = madera muerta, **LI** = hojarasca, **SO** = suelos y **HWP** = productos de madera recolectada. En este estudio no se consideraron los productos de madera recolectada y la materia orgánica muerta dada ausencia de datos. Un resumen de estas tres ecuaciones se presenta en la figura 3.18.

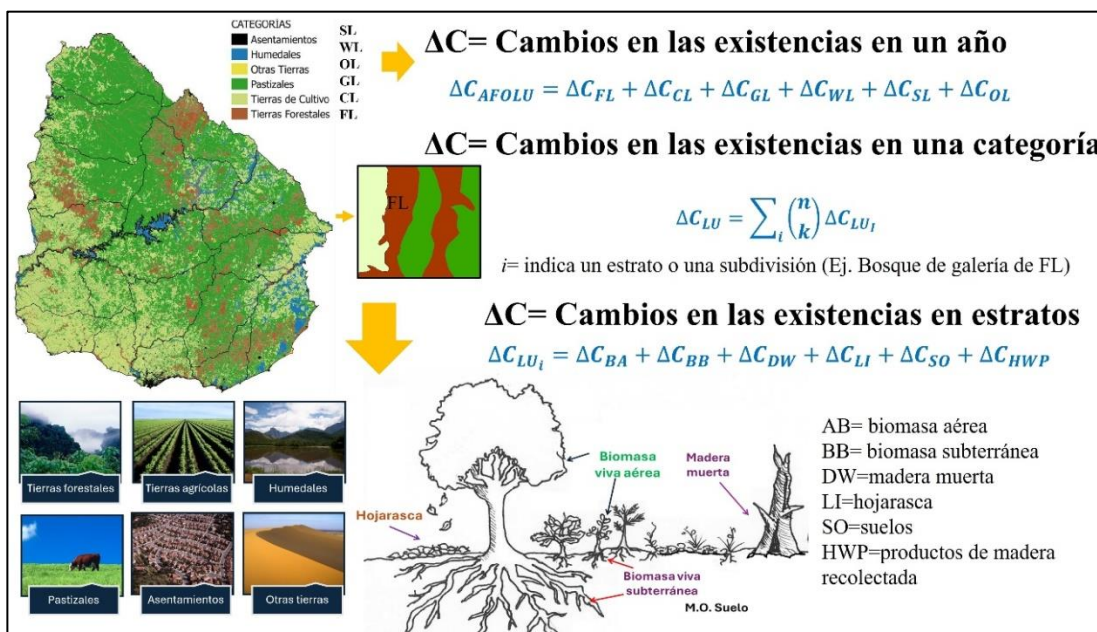


Figura 3.18. Resumen de metodología de cambios de existencias de carbono por año, en una categoría (estrato o subcategorías) y en los depósitos de cada uno de ellos. Elaboración propia a partir de [IPCC \(2006\)](#).

La forma de estimar los cambios en los depósitos y los flujos de carbono depende de la disponibilidad de datos y modelos, así como de los recursos y de la capacidad para recopilar y analizar información adicional. Dadas las limitaciones a la hora de derivar conjuntos de datos por defecto que sirvan de base para la estimación de algunos cambios de existencias, los métodos del Nivel 1 incluyen varias hipótesis con propósitos de simplificación:

- Quizás no puedan estimarse los cambios de las existencias de todos los depósitos que se indican en la Ecuación 3 (no existencia de datos).
- Los cambios en las existencias de C de la biomasa subterránea equivalen a cero bajo el Nivel 1 (no considerado en este estudio).
- A menudo, bajo el Nivel 1, los depósitos de madera muerta y de hojarasca se agrupan como «materia orgánica muerta» y se supone que las existencias de materia orgánica son equivalentes a cero para las categorías de uso de la tierra, a excepción de las forestales, bajo el Nivel 1. Para las tierras forestales convertidas a otros usos, los valores por defecto para estimar las existencias de carbono en la materia orgánica muerta se presentan en el Nivel 1.

Dado que no existen datos para establecer los cambios las existencias en los depósitos en el nivel 1, estos no fueron estimados. Por ello, solo se aplicó el método alternativo basado en las existencias llamado *Método de diferencia de existencias* y se lo puede utilizar cuando las existencias de carbono de depósitos pertinentes se miden en dos momentos diferentes para determinar los cambios en las existencias de carbono, como se representa en la Ecuación siguiente:

$$\Delta C = \frac{(C_{t_2} - C_{t_1})}{(t_2 - t_1)} \quad (\text{ecuación 6})$$

Donde:

ΔC = cambio en las existencias anuales de carbono del depósito, ton C año⁻¹

C_{t_1} = existencias de carbono del depósito en el momento t_1 , ton de C

C_{t_2} = existencias de carbono del depósito en el momento t_2 , ton de C

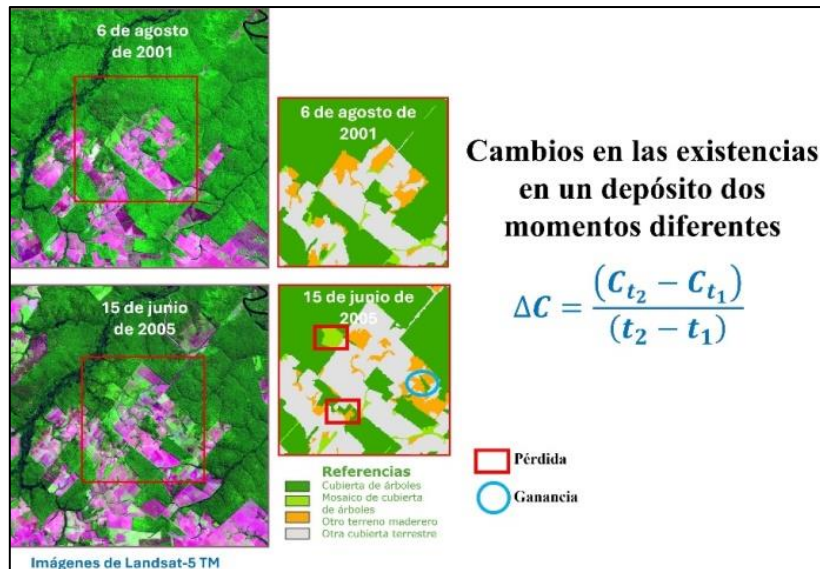


Figura 3.19. Resumen de metodología de cambios de existencias de carbono por año, en una categoría (estrato o subcategorías) y en los depósitos de cada uno de ellos. Fuente: Elaboración propia a partir de IPCC (2006).

Tabla 3.6. Promedios de los diferentes métodos (GEI). Fuente: IPCC (2006)

Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C. Biomasa aérea Mg/ha ⁻¹	F.E.	Prom.	Rango
		Mg/ha ⁻¹ IPCC	Mg/ha ⁻¹ GFW	Mg/ha ⁻¹ NDVI
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	130	170	45 - 270
	Plantación de coníferas (Pc)	105	133	45 - 270
Pastizales (Praderas)	Herbazal denso (Hd)	2,5	-	-
	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	2,5	-	-
	Arbustal (A)	2,8	-	-
C.O.S Mg C ha-1		IPCC	R.F.	WOSIS
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	24	86	80
	Plantación de coníferas (Pc)	24	86	80
Humedales	Turbera (T)	88	-	-
Hojarasca Mg C ha-1		IPCC	-	-
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	28,2	-	-
	Plantación de coníferas (Pc)	20,3	-	-
Biomasa Subterránea Mg C ha-1		IPCC	-	-
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	0,20	-	-
	Plantación de coníferas (Pc)	0,24	-	-

Establecida la metodología para la estimación de las reservas de carbono y sus cambios, se procedió a definir los pasos concretos para la estimación de dicho inventario. Estos se indican a continuación:

1. División de todas las tierras en gestionadas (tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras) y no gestionadas (suelo desnudo, afloramientos rocosos) (Tabla 3.7).
2. Subdivisión de categorías por método *Corine Land Cover* (tabla 3.7). Esta categorización sirvió de base para asignar factores de emisión y de cambio en las existencias que se requieren para el método de estimación de nivel 3 como *DA*.
3. Estimación de las incertidumbres (matriz de confusión e índice de kappa para los *DA*).
4. Determinación cambios en las emisiones y absorciones a partir de los cambios de coberturas y usos de la tierra.
5. Sumar las emisiones y absorciones de CO₂ producidas durante el período del inventario para cada categoría.
6. Transcripción de la información resumida en cuadros para la generación de informes.

Tabla 3.7. Categorías para estimar biomasa aérea y carbono (Fuente. Elaboración propia con la información del [IPCC, 2003](#)).

Clases IPCC 2003	Subclases CLC
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme
	Plantación de coníferas
	Arbustal
Tierras agrícolas	Cultivos transitorios
Pastizales	Herbazal denso
	Herbazal denso de tierra firme no arbolado
Afloramientos	Afloramiento rocoso
Humedales	Ríos
	Turberas
	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
	Cuerpos de agua artificiales
Asentamientos y otras tierras	Tierras desnudas y degradadas
	Tejido urbano continuo
	Tejido urbano discontinuo
	Zonas industriales y comerciales
	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados
	Instalaciones recreativas
	Obras hidráulicas

Calculadas las reservas de carbono para todas las subclases individuales, estas se agruparon por las categorías principales del IPCC. Obtenidas estas para cada año, se calcularon las diferencias entre los años planteados.

En lo que respecta al mapa de densidad de biomasa descrito por [Harris et al. \(2021\)](#), este denota la acumulación de carbono tanto en la biomasa arbórea viva aérea como subterránea asumiendo de igual modo que la captura por madera muerta, hojarasca y Carbono Orgánico del Suelo (COS) es cero (<https://www.globalforestwatch.org/>). A partir de este insumo, se extrajeron los valores de carbono en Mg ha^{-1} para el bosque denso y las plantaciones de coníferas, para obtener de esta manera un segundo resultado de biomasa viva.

Finalmente, para contar con una última estimación de biomasa aérea, se recurrió a un modelo alométrico calibrado por [Mora \(2022\)](#) en bosques andinos cercanos al área de estudio (ecuación 7). Este se aplicó sobre 3 NDVI generados a partir de las bandas espectrales del sensor Sentinel 2 para los años 2015, 2020 y 2025, respectivamente (resolución espacial de 10 m).

$$\text{Biomasa Aérea} = 698,16 (\text{NDVI})^2 - 598,6 (\text{NDVI}) + 174,08 \quad (\text{ecuación 7})$$

Los NDVI ([Rouse et al., 1973](#)) fueron calculados a partir de las bandas Rojas (B4) e Infrarrojas Cercanas (B8) de las imágenes Sentinel-2 descargadas para el área de estudio. La fórmula utilizada, implementada mediante la calculadora ráster de un SIG, fue la siguiente:

$$\text{NDVI} = (\text{B8} - \text{B4}) / (\text{B8} + \text{B4}) \quad (\text{ecuación 8})$$

Posteriormente, de los NDVI fueron extraídos solo los valores mayores a 0, dado que todo número negativo elevado al cuadrado siempre es positivo. De esta manera, al aplicar el modelo alométrico, se evita convertir valores pertenecientes a coberturas como agua y algunos suelos desnudos a biomasa, lo que no sería correcto.

Consecuentemente, se procedió a extraer los valores resultantes de los NDVI calibrados y del modelo alométrico, clasificándolos según las categorías vegetales identificadas en los mapas de coberturas y usos de la tierra.

Otros datos empleados para la estimación de carbono diferentes a los suministrados por el IPCC fueron el mapa de carbono del suelo elaborado por El Servicio Mundial de Información sobre Suelos (WoSIS, por sus siglas en inglés), que cuenta con el portal soilgrids desde el cual se puede realizar la descarga (<https://soilgrids.org/>), y el mapa de reserva de carbono en suelos de Venezuela producido mediante el algoritmo "Random Forest" (RF), creado por [Sevilla et al. \(2021\)](#). Desde ambos insumos, se extrajeron (para las coberturas vegetales principales) las estimaciones de carbono necesarias en este estudio.

www.bdigital.ula.ve

Capítulo IV

4. Resultados

4.1 Imágenes satelitales Sentinel 2 L2A

El análisis de los cambios de cobertura y uso de la tierra se fundamentó en el procesamiento e interpretación de imágenes satelitales correspondientes a los años 2015, 2020 y 2025 obtenidas a través del sensor Sentinel-2 L2A. Las seleccionadas fueron las que presentaron nulo o muy poco porcentaje de nubosidad (menos del 30% en toda la imagen) para así poder identificar adecuadamente cada categoría.

Es perentorio destacar, que la elaboración de la cartografía del año 2020 presentó desafíos particulares debido a la existencia de numerosos incendios en la imagen del 16 de marzo (la de mayor visibilidad disponible), cuyo humo y áreas quemadas dificultaron la interpretación en algunos espacios. Para atenuar este problema y asegurar una interpretación más precisa, se empleó una imagen del 06 de marzo (con menor cantidad y extensión de incendios), lo que permitió abordar las zonas afectadas por el humo y obtener una visión más completa del estado de la cobertura vegetal presente.

De forma complementaria, fueron empleadas dos imágenes del año 2024 como material de apoyo para la interpretación del último período. Esta medida permitió adelantar el trabajo de oficina y de campo (elaboración de cartografía preliminar y validación en el terreno) antes de tener disponibilidad de imágenes pertenecientes al año 2025 captadas por el satélite.




Cabe señalar, que en la elaboración de la cartografía del año 2025, la imagen inicialmente a ser considerada para la interpretación correspondía al mes de enero. Sin embargo, debido al evento meteorológico extremo suscitado en las cuencas de los ríos Chama y Santo Domingo en el mes de julio, se procedió a descargar imágenes posteriores a este período, con el propósito de identificar los cambios acaecidos por este evento. La Tabla 4.1 presenta las imágenes utilizadas para el estudio, detallando las fechas de adquisición y sus códigos.

Tabla 4.1. Imágenes Sentinel 2 empleadas en la identificación de las coberturas y usos de la tierra en La Cuenca Alta del Río Santo Domingo. Fuente: elaboración propia.

Año	Fecha	Código
2015	28 de diciembre	S2A_MSIL2A_20151228T151652_N0500_R125_T19PBK_20231015T103004
	28 de diciembre	S2A_MSIL2A_20151228T151652_N0500_R125_T19PCK_20231015T103004
2020	06 de marzo	S2A_MSIL2A_20200306T151701_N0500_R125_T19PCK_20230410T220743
	16 de marzo	S2A_MSIL2A_20200316T151701_N0500_R125_T19PBK_20230423T084524
	16 de marzo	S2A_MSIL2A_20200316T151701_N0500_R125_T19PCK_20230423T084524
	16 de marzo	S2A_MSIL1C_20200316T151701_N0500_R125_T19PCK_20230422T191509
2024	25 de enero	S2A_MSIL2A_20240125T151711_N0510_R125_T19PCK_20240125T180650
	10 de marzo	S2B_MSIL2A_20240310T151719_N0510_R125_T19PBK_20240310T201139
2025	14 de enero	S2B_MSIL1C_20250114T151719_N0511_R125_T19PBK_20250114T201519
	14 de enero	S2B_MSIL1C_20250114T151719_N0511_R125_T19PCK_20250114T201519
	30 de Julio	S2A_MSIL2A_20250730T151741_N0511_R125_T19PBK_20250731T105914
	30 de Julio	S2A_MSIL2A_20250730T151741_N0511_R125_T19PCK_20250731T105914

4.2 Clave de interpretación de las categorías delimitadas basadas en la Leyenda Corine Land Cover




Para diferenciar y analizar las características de las categorías de cobertura y uso de la tierra, se aplicó una clave de interpretación (explicado en la sección 3.2.4.3). Este instrumento permitió un análisis más detallado y la evaluación individual de cada una de las áreas de la investigación. Las mismas se indican a continuación:

Nombre de la cobertura: Tejido urbano continuo (Tuc)		204-000-000
Código: 1.1.1		
Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil Delimitación: Fácil Textura: Muy Rugosa Tamaño: Mediano
	Falso color (8-4-3) 	Color: Verdadero C: blanco, plateado, gris, beige, rosado y salmón Falso C: Blanco verde, azul, rojo y gris Tono: Claro Manchas: Muy concentrada Forma: Parecido a una cuadrícula Contexto: Edificaciones y espacios artificiales establecidos en las principales poblaciones

Nombre de la cobertura: Tejido urbano discontinuo (Tud)

248-000-000



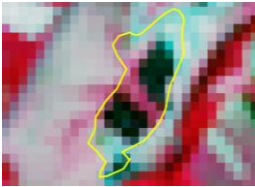
Código: 1.1.2

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Textura: Muy Rugosa
		Tamaño: Pequeño
		Color: Verdadero C: Blanco, plateado, gris, beige y rosado
		Falso C: Rojo, verde, celeste y gris
		Tono: Claro
		Manchas: Dispersas
		Forma: Parecido a una Cuadrícula
		Contexto: Edificaciones rodeadas de vegetación natural y generalmente cultivos, que están dispersas y alejadas entre sí

Nombre de la cobertura: Zonas industriales o comerciales

204-077-042




Código: 1.2.1

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Rugosa
		Color: Verdadero C: Blanco, plateado, gris
		Falso C: Blanco, gris azulado, rosado, beige
		Tono: Medio
		Manchas: Muy concentrada
		Forma: Polígono simple
		Contexto: Edificaciones comerciales ubicadas en el área urbana y rurales

Nombre de la cobertura: Red vial ferroviaria y terrenos asociados

217-101-069



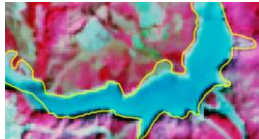
Código: 1.2.2

Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3)	
		Tamaño: Variable
		Textura: Uniforme
		Color: Verdadero C: Gris
		Falso C: Gris – azul metálico
		Tono: Claro
		Manchas: Muy concentrada
		Forma: Líneas angostas
		Contexto: Vías de acceso. Se caracteriza por estar rodeada de tejido urbano y vegetación

Nombre de la cobertura: Obras hidráulicas

238-185-170



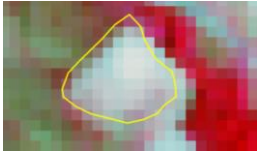
Código: 1.2.5

Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3)	
		Tamaño: Mediano
		Textura: Muy Uniforme
		Color: Verdadero C: Gris, blanco
		Falso C: Cian
		Tono: Claro
		Manchas: Escasas
		Forma: Irregular
		Contexto: Embalse Gral. José Antonio Páez, punto de cierre de la cuenca alta o área de estudio

Nombre de la cobertura: Instalaciones recreativas

255-175-175



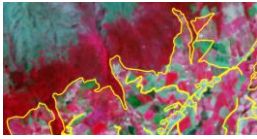
Código: 1.4.2

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Posible
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Media
		Color: Verdadero C: Beige y blanco
		Falso C: Gris
		Tono: Claro
		Manchas: Escasas
		Forma: Irregular
		Contexto: Generalmente son canchas, o complejos turísticos, ubicados en las zonas urbanas

Nombre de la cobertura: Cultivos transitorios

255-255-166



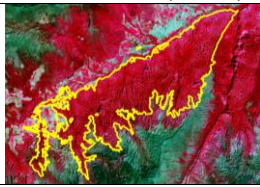
Código: 2.1.1

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Grande o Variable
		Textura: Rugosa
		Color: Verdadero C: verde y marrón.
		Falso C: rojo, rosado y marrón, verde, gris
		Tono: Medio
		Manchas: Concentrada
		Forma: Irregular
		Contexto: Áreas de cultivos de ciclo corto, ubicadas entre las áreas de vegetación natural y áreas urbanas

Nombre de la cobertura: Bosque denso alto de tierra firme

071-143-000



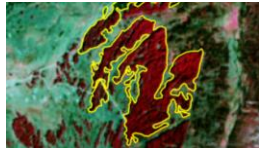
Código: 3.1.1.2.1

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Grande o Variable
		Textura: Media
		Color: Verdadero C: Verde oscuro
		Falso C: Rojo intenso
		Tono: Oscuro
		Manchas: Muy concentrada
		Forma: Irregular
		Contexto: Vegetación natural arbórea con alta densidad

Nombre de la cobertura: Plantación de coníferas



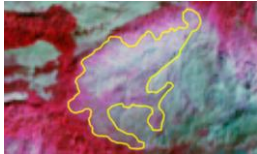
128-255-000

Código: 3.1.5.1

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Mediano
		Textura: Rugosa
		Color: Verdadero C: Verde oscuro y marrón
		Falso C: Rojo y vino tinto
		Tono: Muy Oscuro
		Manchas: Concentradas
		Forma: Irregular
		Contexto: Plantación de variedades de pino y ciprés con fines de protección como estabilización de suelo, prevención de la erosión y fines experimentales, en el caso de Mucubajj





Nombre de la cobertura: Herbazal denso
Código: 3.2.1.1

204-242-078

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Difícil Delimitación: Posible Tamaño: Variable Textura: Media
	Falso color (8-4-3) 	Color: Verdadero C: Marrón y verde Falso C: Rosado y gris Tono: Claro Manchas: Dispersas Forma: Irregular Contexto: Vegetación dominada por gramíneas que puede estar rodeada de otro tipo de vegetación natural o cultivos

Nombre de la cobertura: Herbazal denso de tierra firme no arbolado
Código: 3.2.1.1.1.1.1



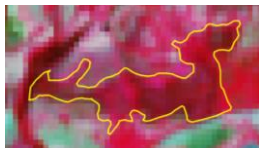
204-242-078

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
 	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil Delimitación: Fácil Tamaño: Grande Textura: Rugosa
	Falso color (8-4-3) 	Color: Verdadero C: marrón, negro, gris Falso C: Verde, marrón Tono: Medio Manchas: Concentradas Forma: Irregular Contexto: Vegetación natural por aspectos climáticos y de altitud generalmente a partir de los 3000msnm

Nombre de la cobertura: Arbustal

172-219-015



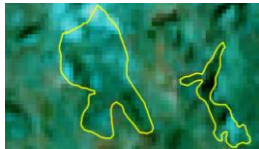
Código: 3.2.2

Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Posible
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Posible
		Tamaño: Variable
		Textura: Uniforme
		Color: Verdadero C: Verde
		Falso C: Rojo y rosado
		Tono: Medio
		Manchas: Concentradas
		Forma: Irregular
		Contexto: Presencia de arbustos ubicados principalmente en el eco-tono de la cuenca

Nombre de la cobertura: Afloramiento rocoso

179-179-179



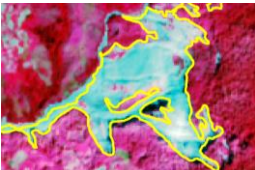
Código: 3.3.2

Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Difícil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Difícil
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Media
		Color: Verdadero C: Marrón gris, blanco
		Falso C: verde, Cian,
		Tono: Medio
		Manchas: Dispersas
		Forma: Irregular
		Contexto: Ubicados generalmente en la divisoria de la cuenca, son exposiciones de rocas subyacentes que han sido expuestas por la actividad tectónica

Nombre de la cobertura: Tierras desnudas y degradadas

158-158-158

Código: 3.3.3



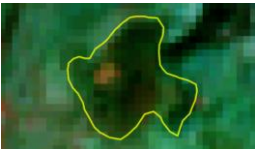
Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3)	
		Tamaño: Variable
		Textura: Uniforme
		Color: Verdadero C: Blanco, gris, beige
		Falso C: Cian, Blanco, gris
		Tono: Claro
		Manchas: Dispersas
		Forma: Irregular
		Contexto: Ubicada en zona de pendientes pronunciadas influenciados por la erosión fluvial, erosión glacial y la erosión por acción de la lluvia

www.bdigital.ula.ve

Nombre de la cobertura: Turberas

077-145-255



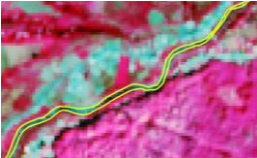
Código: 4.1.2

Fotografía	Imagen Satelital S2 Verdadero Color (4-3-2)	Clave de Interpretación
		Identificación: Posible
	Falso color (8-4-3)	
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Media
		Color: Verdadero C: Marrón, violeta, amarillo
		Falso C: verde, amarillo, marrón,
		Tono: Oscuro
		Manchas: Concentradas
		Forma: Irregular
		Contexto: Ubicados en el páramo, incluye presencia de especies como los musgos y helecho-turberos

Nombre de la cobertura: Ríos

000-000-248



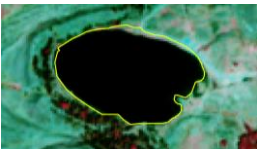
Código: 5.1.1

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Variable
		Textura: Media
		Color: Verdadero C: gris, blanco
		Falso C: gris, añil y negro.
		Tono: Medio
		Manchas: Lineal con meandros
		Forma: Irregular
		Contexto: Presencia de arbustales en las laderas

Nombre de la cobertura: Lagunas, lagos y ciénagas naturales

000-128-255



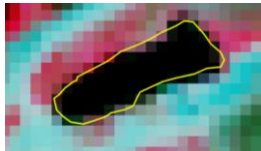
Código: 5.1.2

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Muy uniforme
		Color: Verdadero C: Negro y marrón
		Falso C: negro y gris
		Tono: Muy oscuro
		Manchas: Muy concentrada
		Forma: Irregular
		Contexto: Formado principalmente por procesos de desglaciación, ubicados en la parte más alta de la cuenca

Nombre de la cobertura: Cuerpos de agua artificiales

000-206-242

Código: 5.1.4

Fotografía	Imagen Satelital S2	Clave de Interpretación
	Verdadero Color (4-3-2) 	Identificación: Fácil
	Falso color (8-4-3) 	Delimitación: Fácil
		Tamaño: Pequeño
		Textura: Muy uniforme
		Color: Verdadero C: Negro y verde Falso C: Negro, rosado
		Tono: Muy oscuro
		Manchas: Concentrada
		Forma: Irregular
		Contexto: Esta se presenta como tanque o piscinas para riego de cultivos

4.3 Verificación de campo y ajuste de la interpretación preliminar

En la inspección o reconocimiento del área se definieron 63 puntos de observación registrados con un sistema de posicionamiento global (GPS) marca GARMIN modelo GPS map 60CSx (Figura 4.1). En cada uno de los sitios se realizaron fotografías panorámicas y se revisó la cartografía preliminar impresa del año 2025 (escala 1:20.000). De igual modo, esta fue revisada en pantalla de un computador portátil (cotejo entre la imagen satelital, la capa vectorial y lo observado en el terreno) (Figura 4.2). A partir de estas acciones e insumos, se subsanaron algunas incertidumbres de codificación de polígonos (categorización). Ejemplo de ello, la identificación y delineación de humedales en la parte alta de la cuenca (específicamente en la divisoria del río Pueblo Llano), los cuales no fueron observados con la imagen satelital.

4.4. Coberturas y usos de la tierra de la Cuenca Alta del Río Santo Domingo

Se realizó la interpretación y digitalización del área de estudio siguiendo la metodología CORINE Land Cover, lo que dio como resultado la identificación de cuatro categorías principales de coberturas y usos de la tierra: territorios artificiales, terrenos agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y cuerpos de agua. Estas categorías se dividen en un total de 19 subcategorías (figura 4.3 y tabla 4.2). Esta cartografía sirve como base para cumplir con los objetivos de este estudio, como identificar los cambios en las coberturas y usos de la tierra de la cuenca, calcular el carbono almacenado en la biomasa aérea y estimar sus flujos a partir de la comparación de las reservas en la biomasa aérea.

4.4.1. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2025

La tabla 11 muestra que la categoría con mayor presencia o la más dominante en la cuenca es Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna), representando el 42,319 % del área total. Le sigue el Cultivo transitorio (Ct) con 15,478 % y el Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) con 13,487 %. Estas tres categorías, en conjunto, representan más del 71 % del área analizada, lo que indica que el territorio está predominantemente compuesto por áreas agrícolas y naturales. Por otra parte, la suma de las 16 categorías restantes es del 28,716 % del área total. Donde la Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) es una de las mayores coberturas.

Haciendo especial mención al Tejido urbano discontinuo (Tud) y Tejido urbano continuo (Tuc) (categorías que representan la infraestructura de vivienda y áreas edificadas). La primera tiene un área mayor que la segunda (181,84 y 100,32 ha respectivamente), lo que sugiere un patrón de asentamiento más disperso, característico de áreas suburbanas o rurales con viviendas aisladas. En lo que respecta a las Zonas industriales o comerciales (Zic), estas ocupan una porción muy pequeña, lo que refuerza la idea de un área predominantemente rural o con una economía basada en la agricultura.

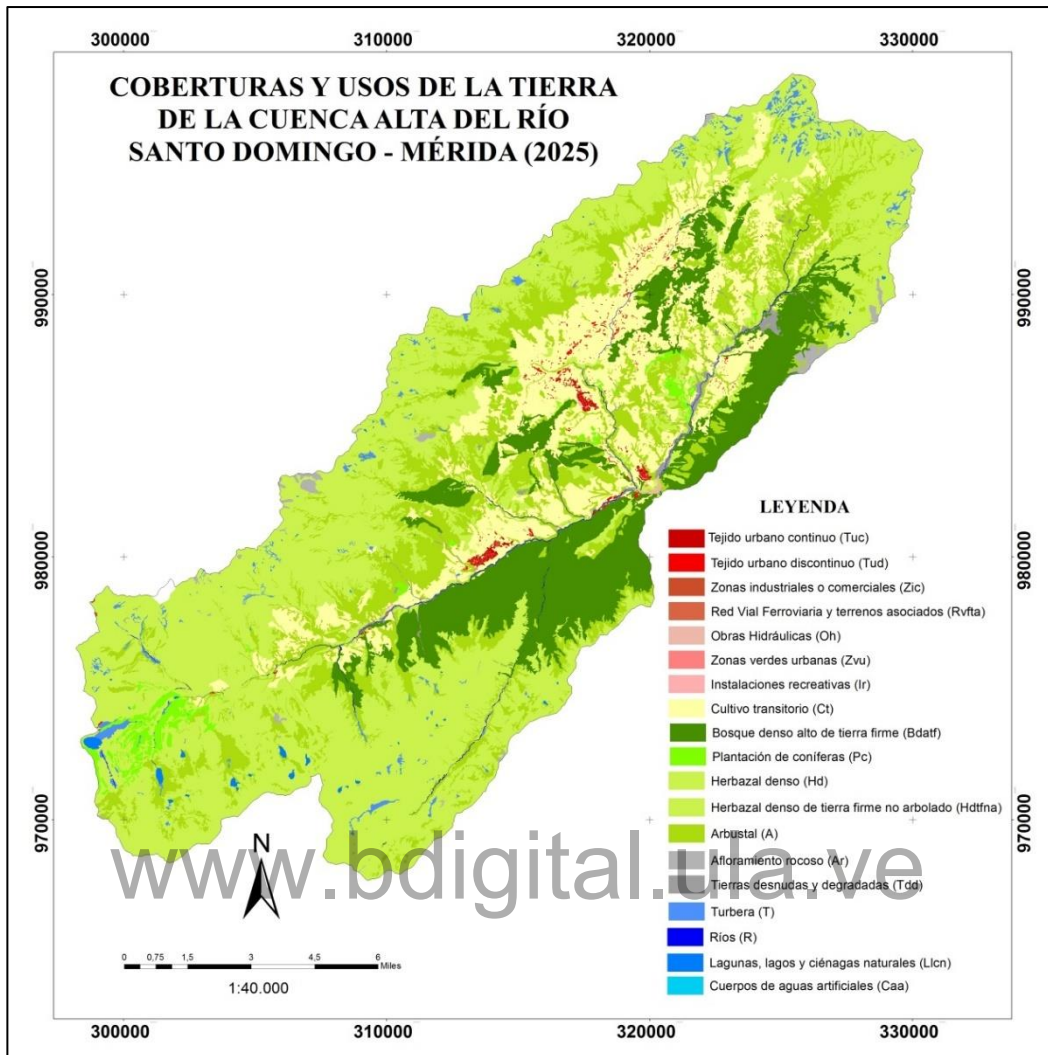


Figura 4.3. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2025. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas 2025. Fuente: Elaboración propia.

Código	Categoría CORINE Land Cover	Área (ha)	A (%)
1.1.1.	Tejido urbano continuo (Tuc)	100,32	0,241
1.1.2.	Tejido urbano discontinuo (Tud)	181,84	0,436
1.2.1.	Zonas industriales o comerciales (Zic)	7,37	0,018
1.2.2.	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta)	228,91	0,549
1.2.5.	Obras Hidráulicas (Oh)	20,43	0,049
1.4.1.	Zonas verdes urbanas (Zvu)	6,24	0,015
1.4.2.	Instalaciones recreativas (Ir)	5,15	0,012
2.1.1.	Cultivo transitorio (Ct)	6452,84	15,478
3.1.1.2.1.	Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf)	5622,94	13,487
3.1.5.1.	Plantación de coníferas (Pc)	580,07	1,391
3.2.1.1.	Herbazal denso (Hd)	1653,97	3,967
3.2.1.1.1.1.1.	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	17643,40	42,319
3.2.2.	Arbustal (A)	7927,45	19,015
3.3.2.	Afloramiento rocoso (Ar)	239,81	0,575
3.3.3.	Tierras desnudas y degradadas (Tdd)	301,48	0,723
4.1.2.	Turbera (T)	523,81	1,256
5.1.1.	Ríos (R)	88,52	0,212
5.1.2.	Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn)	105,86	0,254
5.1.4.	Cuerpos de aguas artificiales (Caa)	1,05	0,003
Total		41691,46	100

4.4.2. Validación de la exactitud cartográfica CUT 2025

Del área total cartografiada, la extracción de muestras al 5% fueron 2084,57 ha y al 10% 4169,15 ha, respectivamente (figura 4.4 y tabla 4.3). Este paso fue necesario para ejecutar el análisis principal de la matriz de confusión y así valorar el acuerdo entre el mapa y las muestras “verdad-terreno”. Con ellas, se obtuvo la precisión global de 0,972 (97,2 %) y el índice de Kappa de 0,963 (96,3 %). Ambos valores indican una concordancia casi perfecta de la cartografía (considerando lo señalado en el apartado 3.2.7).

Al efectuar dicha matriz (Tabla 4.4), se obtuvo que la suma de todas las muestras arrojó un área total evaluada de 2434,53 ha (equivalente al 5,8 %). La categoría de mayor extensión fue el Herbazal denso de tierra firme no arbolado con 2,18 % (910,48 ha) y la menor, los Cuerpos de aguas artificiales con 0,0002 % (0,06 ha).

Las categorías que tuvieron resultados cercanos o iguales a 100 % o que no revelaron errores fueron: Ríos 0,01 % (4,58 ha), Lagos, lagunas y ciénagas naturales 0,0002 % (0,06 ha), Zonas industriales o comerciales 0,001 % (0,69 ha), Obras hidráulicas 0,01

% (2,15 ha) y Turberas con 0,09 % (9,01 ha), donde se muestran resultados confiables tanto de la precisión del experto como del productor.

Mientras que entre las categorías menos acertadas se encuentra el arbustal, donde de las 443,42 ha muestreadas, 389,53 ha fueron acertadas, confundiéndose mayormente con Cultivos transitorios, Herbazales y Bosque denso alto de tierra firme. En este mismo orden de ideas, la categoría Cultivos transitorios, de 333,84 ha, obtuvo un error de 3,29 ha, confundiéndose mayormente con Herbazal denso. En cuanto al Herbazal denso, de 90,83 ha, fueron acertadas 87,71 ha, confundiéndose 3,12 ha con Cultivos transitorios, Bosque denso alto de tierra firme y Arbustal. Le sigue la categoría Tejido urbano discontinuo con 10,50 ha, de las cuales se acertaron 7,84 ha, confundiéndose las 2,66 ha restantes con categorías como Red vial, principalmente. Categorías menos relevantes como Tejido urbano continuo, Red vial ferroviaria y terrenos asociados, Plantación de coníferas, Tierras desnudas y degradadas y Turberas tuvieron errores comprendidos entre 0,13 ha y 1,64 ha.

Tabla 4.3. Áreas establecidas para el tamaño de las muestras independientes de cada categoría, comprendidas entre el 5 y el 10% del total de cada una de ellas, necesaria para la validación cartográfica según Congalton y Green (2009). Fuente: elaboración propia.

Código	Categoría CORINE Land Cover	Área (ha)	Área 5% ha	Área 10% ha
1.1.1.	Tejido urbano continuo (Tuc)	100,32	5,016	10,032
1.1.2.	Tejido urbano discontinuo (Tud)	181,84	9,092	18,184
1.2.1.	Zonas industriales o comerciales (Zic)	7,37	0,368	0,737
1.2.2.	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta)	228,91	11,446	22,891
1.2.5.	Obras Hidráulicas (Oh)	20,43	1,021	2,043
1.4.1.	Zonas verdes urbanas (Zvu)	6,24	0,312	0,624
1.4.2.	Instalaciones recreativas (Ir)	5,15	0,258	0,515
2.1.1.	Cultivo transitorio (Ct)	6452,84	322,642	645,284
3.1.1.2.1.	Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf)	5622,94	281,147	562,294
3.1.5.1.	Plantación de coníferas (Pc)	580,07	29,004	58,007
3.2.1.1.	Herbazal denso (Hd)	1653,97	82,699	165,397
3.2.1.1.1.1.1	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	17643,40	882,170	1764,340
3.2.2.	Arbustal (A)	7927,45	396,373	792,745
3.3.2.	Afloramiento rocoso (Ar)	239,81	11,990	23,981
3.3.3.	Tierras desnudas y degradadas (Tdd)	301,48	15,074	30,148
4.1.2.	Turbera (T)	523,81	26,190	52,381
5.1.1.	Ríos (R)	88,52	4,426	8,852
5.1.2.	Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn)	105,86	5,293	10,586
5.1.4.	Cuerpos de aguas artificiales (Caa)	1,05	0,052	0,105
TOTAL		41691,45	2084,57	4169,15

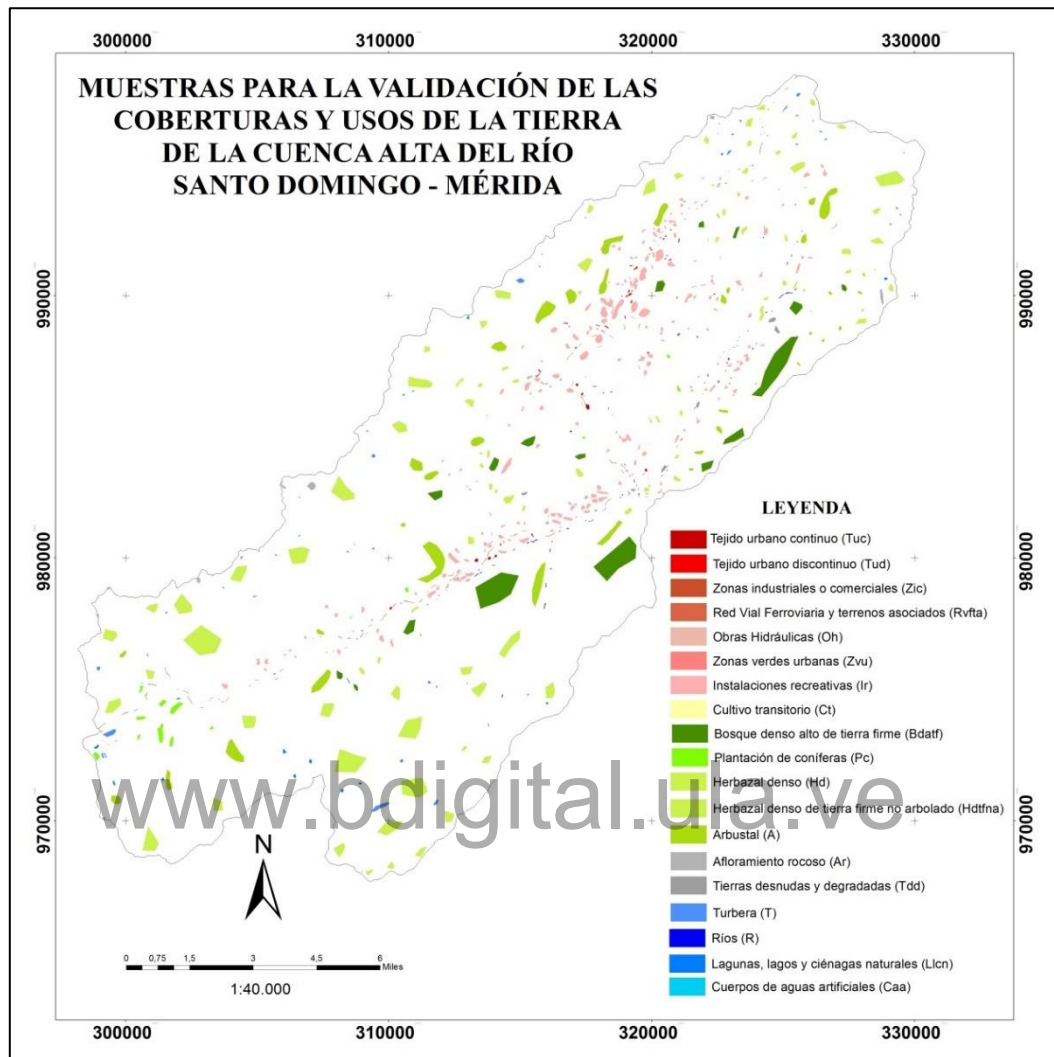


Figura 4.4. Muestras para validar el mapa de cobertura y uso de la cuenca (Fuente: elaboración propia a partir de la edición del experto).

Tabla 4.4. Matriz de confusión basada en el mapa de coberturas y usos de la tierra de la parte alta del río Santo Domingo, junto con las muestras "verdad-terreno" establecidas por un experto externo para el año 2025 (en hectáreas). **Fuente: elaboración propia.**

CLC	CATEGORIAS DEL MAPA DE COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA																			Total (ha)	Muestra %	Error de Comisión
	111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512	514			
CATEGORIAS VERIFICADAS	111	4,64	0	0	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,68	0,01	0,04
	112	0,18	7,84	0	0,09	0	0	0	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,35	0,02	0,51
	121	0	0,06	0,61	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	0,001	0,08
	122	0,98	1,16	0	10,53	0	0	0	1,28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,95	0,03	3,42
	125	0	0	0	0	2,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,15	0,01	0
	141	0,37	0,02	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0,0008	0,38
	142	0	0,53	0	0	0	0	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,81	0,00064	0,53
	211	0,08	0,89	0	0,44	0	0	0	330,55	0	0	2,02	0	0,33	0	0	0	0	0	334,31	0,79	3,76
	31121	0	0	0	0,002	0	0	0	0,03	496,91	0	0,06	0	40,98	0	0	0	0	0	537,98	1,19	41,07
	3151	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	42,41	0	0	0	0	0	0	0	0	42,42	0,10	0,01
	3211	0	0	0	0,04	0	0	0	1,07	0	0	87,71	0	12,46	0	0	0	0	0	101,29	0,21	13,57
	3211111	0	0	0	0,23	0	0	0	0	0	0,20	908,12	0,118	0,69	0	1,13	0	0	0	910,48	2,18	2,36
	322	0,02	0	0	0,11	0	0	0	0,47	0	0,13	0,85	0	389,54	0,06	0,07	0,02	0	0	391,26	0,93	1,73
	332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,77	0	0	0	0	0	17,77	0,04	0
	333	0	0	0	0,01	0	0	0	0,17	0	0	0	0	0	0	16,10	0	0	0	16,28	0,04	0,18
	412	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37,69	0	0	37,73	0,09	0,05
	511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,58	0	4,58	0,01	0
512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,01	9,01	0,02	0	
514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,0002	0	
Total (ha)	6,28	10,50	0,61	11,54	2,15	0,34	0,27	333,84	496,91	42,53	90,83	908,12	443,42	18,52	16,17	38,83	4,58	9,01	0,06	2434,53	5,7	67,70
Muestra %	0,02	0,03	0	0,028	0	0	0	0,80	1,19	0,10	0,22	2,18	1,06	0,04	0,04	0,09	0,01	0,02	0	5,84	Kappa	0,964
Error de omisión	1,64	2,66	0	1,01	0	0	0	3,29	0	0,13	3,12	0	53,89	0,75	0,07	1,15	0	0	0	67,70	Precisión global	0,972

Abreviaturas: 1.1.1. Tejido urbano continuo (Tuc) - 1.1.2. Tejido urbano discontinuo (Tud) - 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (Zic) - 1.2.2. Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) - 1.2.5. Obras Hidráulicas (Oh) - 1.4.1. Zonas verdes urbanas (Zvu) - 1.4.2. Instalaciones recreativas (Ir) - 2.1.1. Cultivo transitorio (Ct) - 3.1.1.2.1. Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) - 3.1.5.1. Plantación de coníferas (Pc) - 3.2.1.1. Herbazal denso (Hd) - 3.2.1.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) - 3.2.2. Arbustal (A) - 3.3.2. Afloramiento rocoso (Ar) - 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas (Tdd) - 4.1.2. Turbera (T) - 5.1.1. Ríos (R) - 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) - 5.1.4. Cuerpos de aguas artificiales (Caa).

4.4.3. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2020

La cartografía de coberturas y usos de la tierra de la cuenca del año 2020 arroja que la categoría con mayor presencia es Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) con 42,335 % (17649,90 ha) del área total. Le siguen el Arbustal que representa el 19,156 % (7986,42 ha), los Cultivos transitorios (Ct) con 15,642 % (6521,24 ha) y el Bosque denso con 13,570 % (5657,72 ha), respectivamente.

En el mismo orden de ideas, el Herbazal denso se halla presente con 3,935 % (1640,53 ha), las Tierras desnudas o degradadas con 0,575 % (301,48 ha), la Plantación de coníferas con 1,395 % (581,73 ha) y las Turberas con 1,256 % (523,81 ha). El resto de las categorías no superan el 1%.

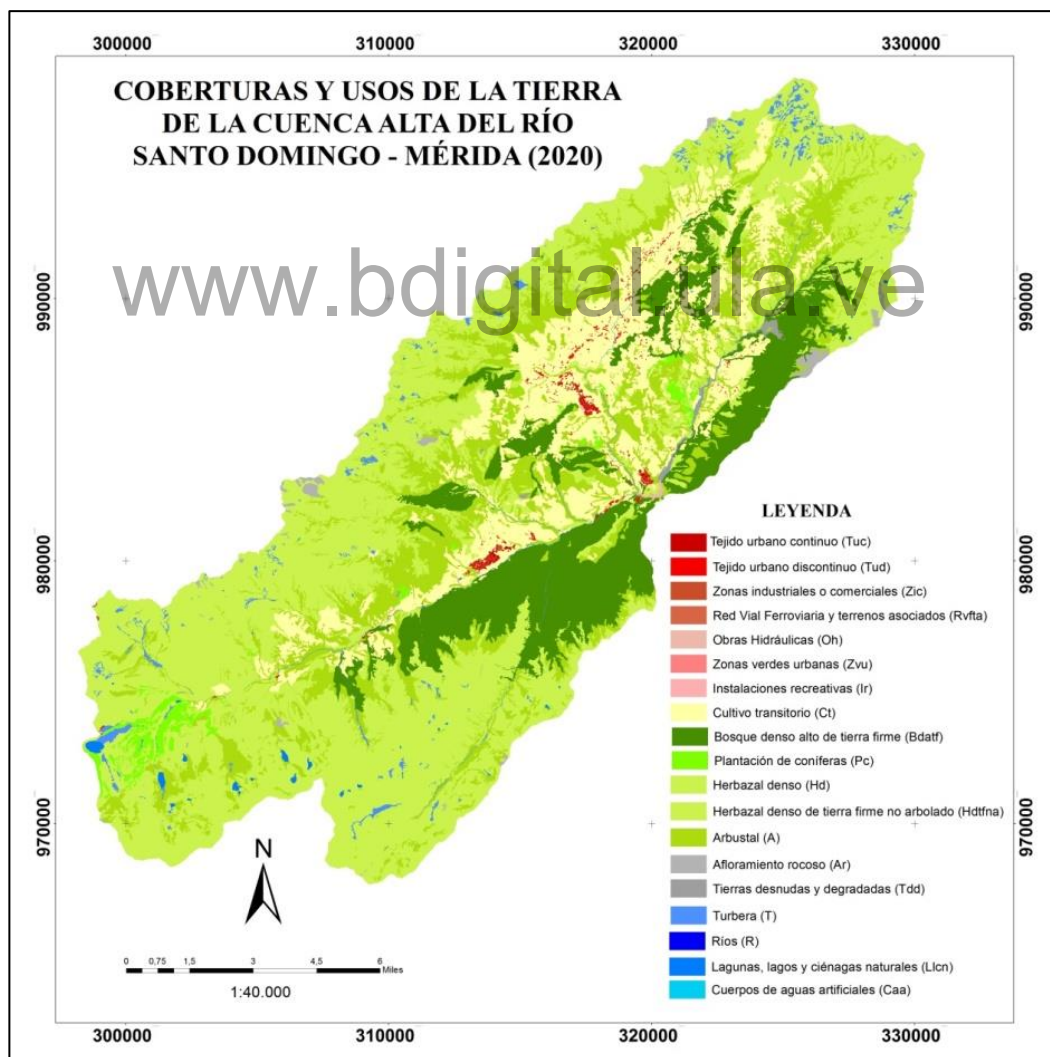


Figura 4.5. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2020 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas y usos de la tierra 2020. Fuente: elaboración propia.

Código	Categoría CORINE Land Cover	Área (ha)	Área (%)
1.1.1.	Tejido urbano continuo (Tuc)	100,32	0,241
1.1.2.	Tejido urbano discontinuo (Tud)	180,72	0,433
1.2.1.	Zonas industriales o comerciales (Zic)	7,37	0,018
1.2.2.	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta)	228,91	0,549
1.2.5.	Obras Hidráulicas (Oh)	20,39	0,049
1.4.1.	Zonas verdes urbanas (Zvu)	6,24	0,015
1.4.2.	Instalaciones recreativas (Ir)	5,15	0,012
2.1.1.	Cultivo transitorio (Ct)	6521,24	15,642
3.1.1.2.1.	Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf)	5657,72	13,570
3.1.5.1.	Plantación de coníferas (Pc)	581,73	1,395
3.2.1.1.	Herbazal denso (Hd)	1640,53	3,935
3.2.1.1.1.1.1.	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	17649,90	42,335
3.2.2.	Arbustal (A)	7986,42	19,156
3.3.2.	Afloramiento rocoso (Ar)	239,81	0,575
3.3.3.	Tierras desnudas y degradadas (Tdd)	145,76	0,350
4.1.2.	Turbera (T)	523,81	1,256
5.1.1.	Ríos (R)	88,52	0,212
5.1.2.	Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn)	105,86	0,254
5.1.4.	Cuerpos de aguas artificiales (Caa)	1,05	0,003
TOTAL		41691,46	100

www.bdigital.ula.ve

4.4.4. Validación de la exactitud cartográfica CUT

La suma de todas las muestras arrojó un área total evaluada de 2084,571 ha, que equivalen al 5,8 %. Cabe acotar que la extensión de las muestras no varía con respecto a las muestras del 2025; no obstante, las mismas fueron reubicadas por el experto en función de lo observado en las imágenes de 2020 (idéntica estrategia fue empleada para el año 2015).

A partir de estas muestras se encontró que el Arbustal es la categoría con el mayor error total en área (54,19 ha). Esto significa que se omitió una parte importante de las muestras de Arbustal real, que fueron clasificadas incorrectamente en otras categorías, como cultivos transitorios, bosques y herbazales.

De igual modo, se halló que Cultivos Transitorios y Herbazal Denso se confunden mutuamente. Esto es común, ya que el Cultivo Transitorio puede tener una apariencia similar a un Herbazal denso, o viceversa, dependiendo de la época del año o del estado fenológico de los cultivos.

En lo que respecta al Tejido Urbano Discontinuo, 2,85 ha fueron confundidas, principalmente con Red Vial. Esto sugiere que ambas categorías tienen características espectrales similares, que generaron la subestimación de la superficie de esta clase.

Clases con menos imprecisiones relevantes (pese a tener muestras de menor proporción) mostraron un error de clasificación baja de áreas (entre 0,015 ha y 1,19 ha), lo que indica un rendimiento aceptable. Estas fueron Tejido urbano continuo, Red vial ferroviaria y terrenos asociados, Plantación de coníferas, Tierras desnudas y degradadas y Turberas. Aunque estas categorías tienen menos impacto en la precisión global debido a sus menores áreas muestreadas, el error en su clasificación es menor, lo que implica que el proceso de interpretación visual logró separarlas de modo eficiente.

Finalmente, la tabla 4.6 muestra que el valor de precisión global fue de 0,972 (97,2 %) y el índice de Kappa de 0,958 (95,8 %). Ambos indican una concordancia casi perfecta, al igual que el arrojado por la matriz de confusión para el año 2020.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.6. Matriz de confusión basada en el mapa de coberturas y usos de la tierra de la parte alta del río Santo Domingo, junto con las muestras "verdad-terreno" establecidas por un experto externo para el año 2020 (en hectáreas). Fuente: elaboración propia

CLC	CATEGORIAS DEL MAPA DE COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA																		Total (ha)	Muestra %	Error de Comisión	
	111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3E+06	322	332	333	412	511	512				514
CATEGORIAS VERIFICADAS	111	4,732	0	0	0,041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,773	0,011	0,041
	112	0,187	7,656	0	0,090	0	0	0	0,264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,196	0,018	0,540
	121	0	0,059	0,608	0	0	0	0	0,023	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,690	0,001	0,083
	122	0,970	1,154	0	10,526	0	0	0	1,327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,976	0,025	3,451
	125	0	0	0	0	2,153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0	0	2,156	0,005	0,004
	141	0,368	0,015	0	0	0	0,344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,727	0,001	0,383
	142	0	0,534	0	0	0	0	0,268	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,802	0,001	0,534
	211	0	1,083	0	0,445	0	0	0	328,524	0	0	4,235	0	0,334	0	1,084	0	0,0001	0	335,704	0,788	7,180
	31121	0	0	0	0,002	0	0	0	0,204	496,910	0	0,066	0	40,949	0	0,510	0	0	0	538,640	1,192	41,730
	3151	0	0	0	0	0	0	0	0,010	0	42,406	0	0	0	0	0	0	0	0	42,416	0,102	0,010
	3211	0	0,001	0	0,039	0	0	0	2,318	0	0	83,951	0	12,485	0	0,548	0	0,0004	0	99,973	0,201	15,391
	3211111	0	0	0	0,233	0	0	0	0,316	0	0	0,196	908,117	0,420	0,691	0	1,126	0	0	911,098	2,178	2,980
	322	0,024	0	0	0,112	0	0	0	0,849	0	0,127	2,377	0	389,234	0,059	0,885	0,022	0	0	393,689	0,934	4,455
	332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,775	0	0	0	0	13,138	0,043	0
	333	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	13,138	0	0	0	13,145	0,032	0,007
	412	0	0	0	0,047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37,686	0	0	37,733	0,090	0,047
	511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002	0	4,575	0	4,577	0,011	0,002
	512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,006	9,006	0,022	0
514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,064	0,06	0,0002	0
Total (ha)	6,281	10,501	0,608	11,535	2,153	0,344	0,268	333,834	496,910	42,533	90,830	908,117	443,422	18,524	16,169	38,833	4,576	9,006	0,064	2434,51	5,7	76,84
Muestra %	0,015	0,025	0,001	0,028	0,005	0,001	0,001	0,801	1,192	0,102	0,218	2,178	1,064	0,044	0,039	0,093	0,011	0,022	0,000	5,84	Kappa	0,959
Error de omisión	1,55	2,85	0	1,01	0	0	0	5,31	0	0,13	6,88	0	54,19	0,75	3,03	1,15	0	0	0	76,84	Precisión global	0,968

Abreviaturas: 1.1.1.Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2.Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1.Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2.Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5.Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1.Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2.Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1.Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1.Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1.Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1.Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1.1.Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2.Arbustal (A) - 332.Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3.Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2.Turbera (T) – 5.1.1.Ríos (R) - 5.1.2.Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Lcn) – 5.1.4.Cuerpos de aguas artificiales (Caa).

4.4.5. Coberturas y usos de la tierra CORINE Land Cover 2015

En general, el 80% del territorio está dominado por coberturas vegetales, principalmente por el herbazal denso de tierra firme no arbolado con 17681,90 ha (42,411% del área), y una baja proporción de zonas artificiales. La tabla 4.7 y figura 4.5 detallan los porcentajes y áreas en hectáreas de cada categoría.

En este orden de ideas, el Arbustal representa la segunda cobertura con mayor extensión, con 19,309 % (8,050,15 ha), que, aunado al Herbazal no arbolado, indica un vasto paisaje de matorral y vegetación baja. Por su parte, el Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) cubre 13,647 % (5,689,77 ha). Constituyendo de esta forma la principal cobertura forestal de la cuenca.

En cuanto a los Cultivos transitorios, estos ocupan una porción menor de 15,559 % (6,486,67 ha). Por su parte, Plantación de coníferas representa el 1,39 % (583 ha) y el Herbazal denso (Hd) el 3,79 % (1,580,49 ha).

En lo que respecta a los territorios artificializados (los cuales representan menos del 2 % del territorio), cabe indicar que las áreas directamente construidas o modificadas por el ser humano ocupan una proporción muy baja del total. Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados es la mayor categoría artificial, que cubre 0,549 % (228,91 ha), y Tejido urbano discontinuo, 0,426 % (177,47 ha). Esta última categoría es el área residencial con mayor extensión. De modo similar, el Tejido urbano continuo se halla presente en un 0,241 % del área (100,32 ha), que representa las áreas de alta densidad de construcción. Las otras categorías urbanas (Zic, Zvu, Ir) son marginales, las cuales suman menos del 0,05 %.

Para culminar, las Turberas representan el 1,256 % (523,8 ha); los Ríos (R) y Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) y Obras hidráulicas (Oh) en conjunto representan menos del 0,5 del área, y las Tierras desnudas y degradadas (Tdd) cubren solo 0,279 % (116,17 ha).

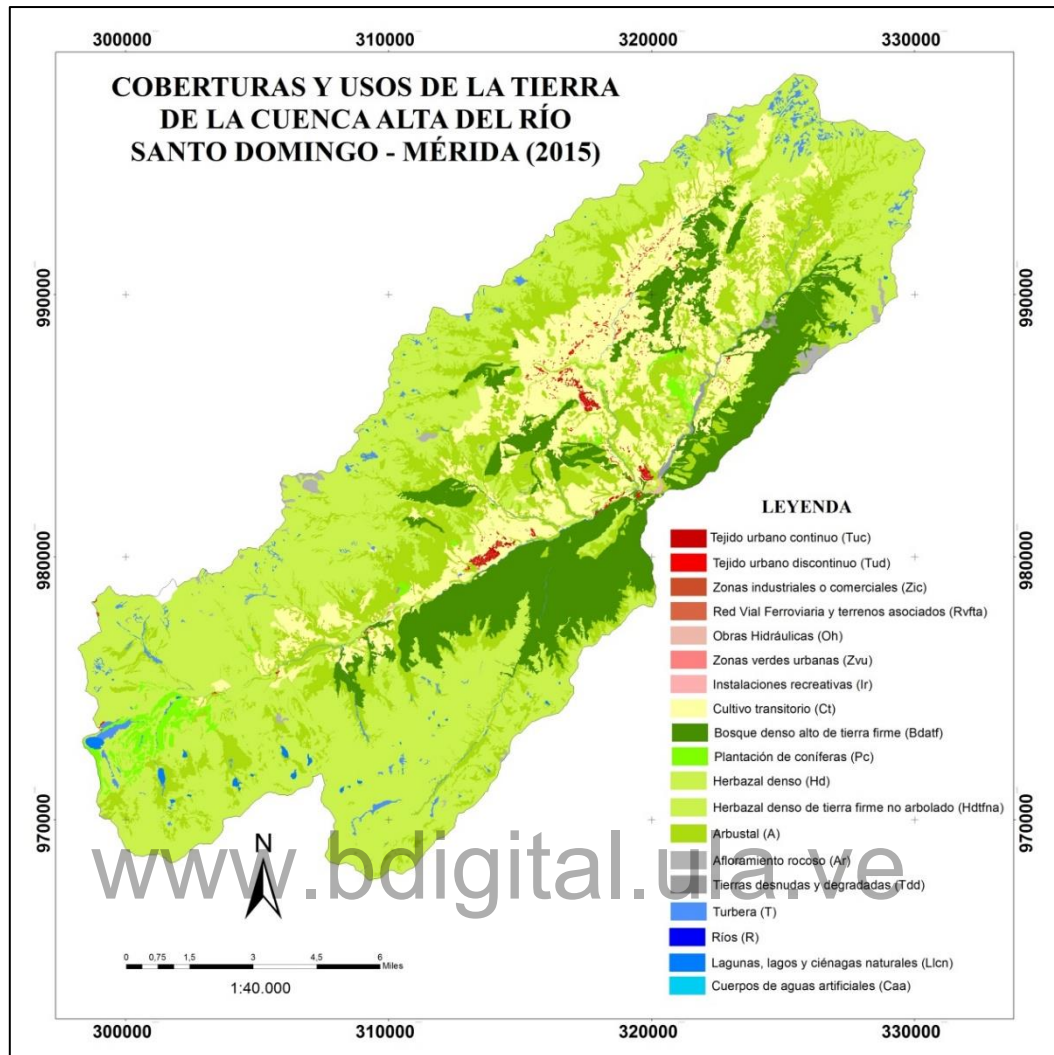


Figura 4.5. Mapa de cobertura y usos de la tierra de la cuenca alta del Río Santo Domingo – Mérida 2015. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7. Áreas y porcentajes de las diferentes coberturas y usos de la tierra 2015. Fuente: elaboración propia.

Código	Categoría CORINE Land Cover	Área (ha)	(%)
1.1.1	Tejido urbano continuo (Tuc)	100,32	0,241
1.1.2	Tejido urbano discontinuo (Tud)	177,47	0,426
1.2.1	Zonas industriales o comerciales (Zic)	7,37	0,018
1.2.2	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta)	228,91	0,549
1.2.5	Obras Hidráulicas (Oh)	18,81	0,045
1.4.1	Zonas verdes urbanas (Zvu)	6,24	0,015
1.4.2	Instalaciones recreativas (Ir)	5,15	0,012
2.1.1	Cultivo transitorio (Ct)	6486,67	15,559
3.1.1.2.1	Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf)	5689,77	13,647
3.1.5.1	Plantación de coníferas (Pc)	583,00	1,398
3.2.1.1	Herbazal denso (Hd)	1580,49	3,791
3.2.1.1.1.1.1	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	17681,90	42,411
3.2.2	Arbustal (A)	8050,15	19,309
3.3.2	Afloramiento rocoso (Ar)	239,81	0,575
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas (Tdd)	116,17	0,279
4.1.2	Turbera (T)	523,81	1,256
5.1.1	Ríos (R)	88,52	0,212
5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn)	105,86	0,254
5.1.4	Cuerpos de aguas artificiales (Caa)	1,05	0,003
TOTAL		41691,46	100

www.bdigital.ula.ve

4.4.6. Validación de la exactitud cartográfica CUT 2015

Al igual que los mapas de 2020 y 2025, este presenta una alta precisión global de 0,964 o 96,4 %. Además, señaló una concordancia casi perfecta al presentar un índice de kappa de 0,953. La tabla 4.8 detalla la precisión y confusión de cada categoría.

Las categorías con una precisión del 100% fueron Ríos (511), Lagunas y Ciénagas (512) y Cuerpos de Aguas Artificiales (514). En el caso de Tierras desnudas y degradadas, el error de omisión es 0,75, y el error de comisión es 0,05, lo que demuestra una alta confianza en la identificación de estas áreas. De igual modo, Turberas muestran una buena clasificación con un error de omisión de 0,05.

Las categorías con mayor error o confusión son: 1) Herbazal denso con error de omisión de 12,51 y de comisión de 17,87 %, confundiéndose con Herbazal denso de tierra firme no arbolado; 2) Bosque denso con error de comisión de 43,70 al confundirse con arbustales en 40,95 ha (principalmente); 3) Arbustales con un error de comisión de 7,91 y de omisión de 56,22 al confundirse con 5,64 ha de Herbazal

denso y 1,04 ha de cultivos (como las más destacables); y 4) Cultivos transitorios, con error de comisión de 9,35 % y de omisión de 4,53 al ser confundidos principalmente por herbazal denso en 6,58 ha.

Se concluye el análisis de validación del año 2015 con la categoría Tejido urbano discontinuo. Esta presentó un error de omisión de 2,97 % al ser erróneamente clasificadas 4,73 ha como Tejido urbano continuo y 0,26 ha como Cultivos transitorios.

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.8. Matriz de confusión representada en hectáreas, para el análisis del Mapa de cobertura y usos de la tierra de La Cuenca Alta del Río Santo Domingo 2015. Fuente: elaboración propia.

CLC	CATEGORIAS DEL MAPA DE COBERTURAS Y USOS DE LA TIERRA																			Total (ha)	Muestra %	Error de Comisión
	111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512	514			
CATEGORIAS VERIFICADAS	111	4,73	0	0	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,77	0,01	0,04
	112	0,19	7,33	0	0,09	0	0	0	0,26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,87	0,02	0,54
	121	0	0,06	0,61	0	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,69	0,001	0,08
	122	0,97	1,15	0	10,53	0	0	0	1,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13,98	0,03	3,45
	125	0	0	0	0	2,15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,004	0	0	0	2,16	0,01	0,0035
	141	0,37	0,02	0	0	0	0,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73	0,0008	0,38
	142	0	0,53	0	0	0	0	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,81	0,00064	0,53
	211	0	1,20	0	0,44	0	0	0	329,31	0	0	6,58	0	0,34	0	0,89	0	0	0	338,76	0,79	9,45
	31121	0	0	0	0,002	0	0	0	0,20	496,91	0	0,10	0	40,95	0	2,45	0	0	0	540,61	1,19	43,70
	3151	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	42,41	0	0	0	0	0	0	0	0	42,42	0,10	0,01
	3211	0	0	0	0,04	0	0	0	1,34	0	0	78,32	0,69	14,51	0	1,28	0	0,0005	0	96,40	0,19	17,87
	3211111	0	0	0	0,23	0	0	0	0,32	0	0	0,20	907,42	0,42	0,69	0	1,16	0	0	910,44	2,18	3,01
	322	0,02	0	0	0,12	0	0	0	1,04	0	0,13	5,64	0	387,21	0,06	0,88	0,02	0	0	395,12	0,93	7,91
	332	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17,78	0	0	0	17,78	0,04	0
	333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0	0	0	10,66	0	0	0	10,67	0,03	0
	412	0	0	0	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37,65	0	0	37,70	0,09	0,05
	511	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0021	0	4,58	0	4,58	0,01	0,0021
512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,01	9,01	0,02	0	
514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,0002	0	
Total (ha)	6,28	10,50	0,61	11,54	2,15	0,34	0,27	333,83	496,91	42,53	90,83	908,12	443,42	18,52	16,17	38,83	4,58	9,01	0,06	2434,52	5,6	87,04
Muestra %	0,02	0,03	0	0,028	0	0	0	0,80	1,19	0,10	0,22	2,18	1,06	0,04	0,04	0,09	0,01	0,02	0	5,84	Kappa	0,953
Error de omisión	1,55	2,97	0	1,01	0	0	0	4,53	0	0,13	12,51	0,69	56,22	0,75	5,51	1,18	0,0005	0	0	87,04	Precisión global	0,964

Abreviaturas: 1.1.1.Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2.Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1.Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2.Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5.Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1.Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2.Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1.Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1.Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1.Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1.Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1.1.Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2.Arbustal (A) – 3.3.2.Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3.Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2.Turbera (T) – 5.1.1.Ríos (R) - 5.1.2.Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) – 5.1.4.Cuerpos de aguas artificiales (Caa).

4.5. Determinación de los cambios de cobertura y uso de la tierra

4.5.1. Cambios de cobertura y uso de la tierra 2015-2020

Un análisis de la matriz de tabulación cruzada correspondiente al período 2015-2020 mostró una dinámica significativa en cuanto a coberturas y usos. Se registraron 41 cruces (Tabla 4.9), de los cuales 22 constituyeron transiciones efectivas (Tabla 4.10 y figura 4.6). Estas generaron un cambio total de 315,93 hectáreas (ha) entre las diferentes categorías.

En primer lugar, se observan cambios de Cultivos transitorios, Bosques densos y Herbazales a Tejido urbano discontinuo. De forma más específica, los que eran cultivos en el año 2015, en el año 2020 pasaron a ser Herbazales y Tierras degradadas. A su vez, esta misma categoría (cultivos) aumentó al incluir áreas de Bosque denso, Arbustal y Herbazales.

En segundo lugar, el Bosque denso tuvo pérdidas considerables al pasar a categorías como Obras hidráulicas (1,35 ha), Tejido urbano discontinuo (0,24 ha), Herbazal (3,10 ha), Cultivos transitorios (7,27 ha) y Tierras desnudas y degradadas (20,08 ha). Del mismo modo, las Coníferas tuvieron pérdidas al cambiar a Herbazales o Tierras desnudas y degradadas.

En tercer lugar, la categoría de Herbazal denso perdió extensión al pasar a Cultivos y Tejido urbano discontinuo. No obstante, esta clase ganó área por cultivos abandonados y algunas Tierras desnudas y degradadas que presentaron su colonización por hierbas. En este análisis, resulta necesario señalar que 0,21 hectáreas pasaron a Obras hidráulicas. Finalmente, el análisis revela que 0,21 hectáreas de Herbazal denso se transformaron en Obras hidráulicas. Este cambio se evidencia por una modificación en la respuesta espectral de los píxeles, la cual es atribuible a la posible senescencia de la vegetación herbácea. En lo que respecta al Herbazal denso de tierra firme no arbolado, esta categoría perdió área debido a su cambio a Cultivos transitorios, Herbazal denso y Tierras desnudas o degradadas.

Finalmente, es necesario mencionar que algunas áreas de Arbustales se perdieron al pasar a Cultivos transitorios y Herbazales densos.

Tabla 4.9. Matriz de cambio de cobertura (ha), en el período 2015-2020 en la cuenca alta Del Río Santo Domingo.

Fuente: elaboración propia.

		CLC 2020																		Total	Perdidas		
		111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512			514	
CLC 2015	111	100,32																			100,32	0	
	112		177,47																			177,47	0
	121			7,37																		7,37	0
	122				228,91																	228,91	0
	125					18,82																18,82	0
	141						6,24															6,24	0
	142							5,15														5,15	0
	211		2,67						6396,03			87,89					0,09					6486,67	90,65
	31121		0,24			1,35			7,27	5657,72		3,10					20,08					5689,77	32,05
	3151									581,73		0,83					0,44					583,00	1,27
	3211		0,35			0,21			64,58			1499,84					15,52					1580,49	80,65
	3211111								27,73			1,67	17649,90				2,55					17681,85	31,95
	322								25,64			37,56		7983,42			3,52					8050,15	66,73
	332														239,81							239,81	0
	333										9,63		3,00			103,55						116,18	12,63
	412																523,81					523,81	0
	511																	88,52				88,52	0
	512																		105,86			105,86	0
514																					1,05	0	
Total	100,32	180,72	7,37	228,91	20,39	6,24	5,15	6521,24	5657,72	581,73	1640,53	17649,90	7986,42	239,81	145,75	523,81	88,52	105,86	1,05		41691,43		
Ganancias	0	3,26	0	0	1,56	0	0	125,22	0	0	140,69	0	3,00	0	42,21	0	0	0	0			315,93	

Abreviaturas: 1.1.1.Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2.Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1.Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2.Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5.Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1.Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2.Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1.Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1.Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1.Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1.Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1.1.Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2.Arbustal (A) – 3.3.2.Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3.Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2.Turbera (T) – 5.1.1.Ríos (R)- 5.1.2.Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) – 5.1.4.Cuerpos de aguas artificiales (Caa).

Tabla 4.10. Resumen de cambios encontrados para el periodo 2015 – 2020. Fuente: elaboración propia.

Cambios de Cobertura Y Usos		Área (ha)
2015	2020	
Cultivo transitorio	Tejido urbano discontinuo	2,67
Cultivo transitorio	Tierras desnudas y degradadas	0,09
Cultivo transitorio	Herbazal denso	87,89
Arbustal	Cultivo transitorio	25,64
Arbustal	Tierras desnudas y degradadas	3,52
Arbustal	Herbazal denso	37,56
Tierras desnudas y degradadas	Arbustal	3,00
Tierras desnudas y degradadas	Herbazal denso	9,63
Plantación de coníferas	Tierras desnudas y degradadas	0,44
Plantación de coníferas	Herbazal denso	0,83
Herbazal denso	Tejido urbano discontinuo	0,35
Herbazal denso	Obras Hidráulicas	0,21
Herbazal denso	Cultivo transitorio	64,58
Herbazal denso	Tierras desnudas y degradadas	15,52
Bosque denso alto de tierra firme	Tejido urbano discontinuo	0,24
Bosque denso alto de tierra firme	Obras Hidráulicas	1,35
Bosque denso alto de tierra firme	Cultivo transitorio	7,27
Bosque denso alto de tierra firme	Tierras desnudas y degradadas	20,08
Bosque denso alto de tierra firme	Herbazal denso	3,10
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	Cultivo transitorio	27,73
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	Tierras desnudas y degradadas	2,55
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	Herbazal denso	1,67
Total		315,93

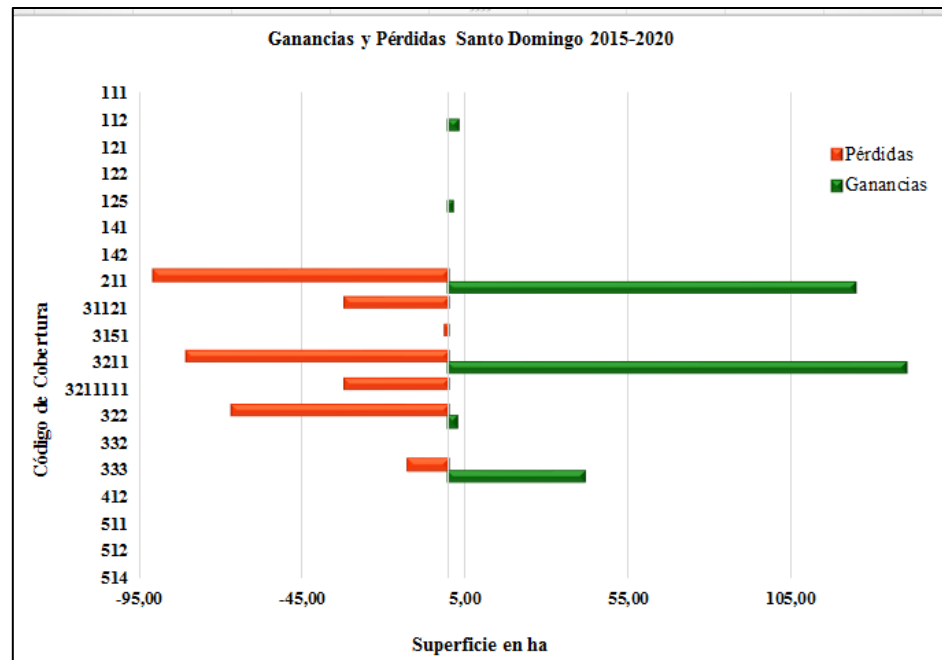


Figura 4.6. Cambios netos entre 2015-2020 para la cuenca alta del Río Santo Domingo. Fuente: elaboración propia.

4.5.2 Cambios de cobertura y uso de la tierra 2020-2025

El análisis de la matriz de tabulación cruzada para el período 2020-2025 reveló una dinámica significativa en la cobertura y uso de la tierra. Se registraron 36 cruces (Tabla 4.11), de los cuales 17 constituyeron transiciones efectivas (Tabla 4.12 y figura 4.7), generándose así un cambio total de 267,34 hectáreas (ha). Los cambios más significativos se evidencian gráficamente en la Figura 4.10

Se destaca un evento hidrometeorológico ocurrido en junio de 2025 de repercusiones notables en algunos sectores del área de la cuenca (principalmente en las adyacencias de los ríos Santo Domingo y Aracay). Este provocó una pérdida considerable de algunas coberturas y usos de la tierra. Categorías como Tejido urbano discontinuo, Cultivos transitorios, Arbustal, Plantación de coníferas, Herbazal denso y Bosque denso de tierra firme registraron de forma conjunta la mayor pérdida. Las pérdidas totalizaron 159,60 ha que cambiaron a Tierras desnudas y degradadas (deslizamientos y otros movimientos en masa).

Un análisis pormenorizado de los Cultivos transitorios indica que esta categoría experimentó la mayor pérdida (57,7 ha), cambiando principalmente a herbazal denso. No obstante, también se registró una ganancia de 23,53 ha proveniente de la transición inversa (herbazal denso a cultivos transitorios).

En lo referente al Bosque denso, durante el período evaluado, estos cambiaron principalmente a cultivos transitorios y herbazal denso, con una pérdida de 2,43 ha. De igual modo, los Arbustales cambiaron a Cultivos transitorios (4,73 ha) y Herbazal denso (7,51 ha).

Finalmente, el Herbazal denso de tierra firme no arbolado cambió de 6,53 ha a Cultivos transitorios.

Tabla 4.11. Matriz de cambio de cobertura (ha), en el período en la cuenca alta Del Río Santo Domingo 2020-2025.

Fuente: elaboración propia.

		CLC 2025																		Total	Perdidas	
		111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512	514		
CLC 2020	111	100,32																			100,32	0
	112		180,45													0,27					180,72	0,27
	121			7,37																	7,37	0
	122				228,91																228,91	0
	125					20,39															20,39	0
	141						6,24														6,24	0
	142							5,15													5,15	0
	211		1,39						6416,36			57,70				45,79					6521,24	104,88
	31121				0,04				1,63	5622,94		0,80				32,30					5657,71	34,77
	3151										580,07					1,66					581,73	1,66
	3211								23,53			1584,14				32,86					1640,53	56,39
	3211111								6,53				17643,40								17649,93	6,53
	322								4,73			7,51		7927,45		46,73					7986,42	58,97
	332														239,81						239,81	0
	333								0,05			3,82				141,88					145,75	3,87
	412																523,81				523,81	0
511																	88,52			88,52	0	
512																		105,86		105,86	0	
514																			1,05	1,05	0	
Total		100,32	181,84	7,37	228,91	20,43	6,24	5,15	6452,84	5622,94	580,07	1653,97	17643,40	7927,45	239,81	301,48	523,81	88,52	105,86	1,05	41691,45	
Ganancias		0	1,39	0	0	0,04	0	0	36,48	0	0	69,83	0	0	0	159,60	0	0	0	0		267,346

Abreviaturas: 1.1.1.Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2.Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1.Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2.Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5.Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1.Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2.Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1.Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1.Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1.Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1.Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1.1.Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2.Arbustal (A) – 3.3.2.Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3.Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2.Turbera (T) – 5.1.1.Ríos (R) - 5.1.2.Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) – 5.1.4.Cuerpos de aguas artificiales (Caa).

Tabla 4.12. Resumen de cambios encontrados para el periodo 2020-2025. Fuente: elaboración propia.

Cambios de cobertura y usos		Área (ha)
2020	2025	
Tejido urbano discontinuo	Tierras desnudas y degradadas	0,27
Cultivo transitorio	Tejido urbano discontinuo	1,39
Cultivo transitorio	Tierras desnudas y degradadas	45,79
Cultivo transitorio	Herbazal denso	57,70
Arbustal	Cultivo transitorio	4,73
Arbustal	Tierras desnudas y degradadas	46,73
Arbustal	Herbazal denso	7,51
Tierras desnudas y degradadas	Cultivo transitorio	0,05
Plantación de coníferas	Tierras desnudas y degradadas	1,66
Herbazal denso	Cultivo transitorio	23,53
Herbazal denso	Tierras desnudas y degradadas	32,86
Bosque denso alto de tierra firme	Obras Hidráulicas	0,04
Bosque denso alto de tierra firme	Cultivo transitorio	1,63
Bosque denso alto de tierra firme	Tierras desnudas y degradadas	32,30
Bosque denso alto de tierra firme	Herbazal denso	0,80
Herbazal denso de tierra firme no arbolado	Cultivo transitorio	6,53
Total		267,34

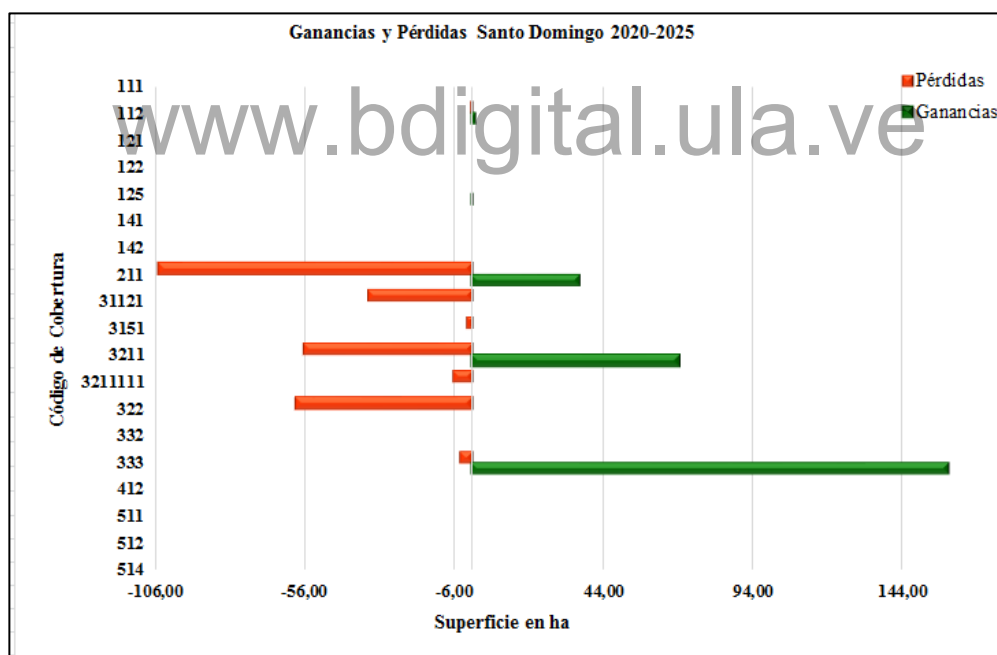


Figura 4.7. Cambios netos entre 2020-2025 para la cuenca alta del rio Santo Domingo. Fuente: elaboración propia.

4.5.3. Resumen de los dos periodos estudiados

Un resumen de los periodos 2015-2020 y 2020-2025 (Tabla 4.13 y figuras 4.8 y 4.9), reveló un patrón de actividad antrópica y degradación ambiental. A continuación se detallan los mismos:

- El Tejido urbano discontinuo muestra un crecimiento constante, ya que aumentó de 177,47 ha en 2015 a 181,84 ha en 2025. Esto sugiere una expansión de las áreas residenciales, principalmente dentro de fincas o áreas categorizadas como cultivos transitorios.
- Obras Hidráulicas presenta un ligero aumento, pasando de 18,81 ha a 20,43 ha. Este cambio puede estar asociado a las zonas del embalse que no se observaron en la imagen satelital del 2015 (Posible presencia de nube o su sombra o un nivel ligeramente menor de agua en este año, que influyó en la interpretación visual en pantalla).
- Tejido urbano continuo (Tuc), Zonas industriales o comerciales (Zic), Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta), Zonas verdes urbanas (Zvu) e instalaciones recreativas (Ir) se mantienen estables durante todo el periodo.
- Cultivo transitorio (Ct) presenta una variación ligera entre 2015 y 2020 (6486,67 ha a 6521,24 ha) que luego disminuye notablemente para 2025 (6452,84 ha). Esta disminución puede atribuirse al periodo de pandemia COVID-19 y a la crisis económica presente en el país (disminución de oferta y financiamiento a productores de la zona).
- Tierras desnudas y degradadas presentó un aumento significativo en el segundo intervalo con respecto al primero, ya que tenía 116,17 ha en 2015, 145,75 ha en 2020 para pasar a 301,48 ha en 2025. Este aumento de más del 150 % en 10 años es un indicador de procesos de erosión, provocado principalmente por el evento hidrometeorológico del 24 de junio de 2025.
- Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf), Plantación de coníferas (Pc) y Arbustal (A) presentan una disminución constante a lo largo del período 2015-2025. La primera pasó de 5689,77 ha a 5622,94 ha, la segunda de 583 ha a 580,07 ha y la tercera de 8050,15 ha a 7927,45 ha. Tales reducciones ocasionadas por procesos de deforestación con fines agrícolas, procesos de

erosión (deslizamientos) y conversión de una pequeña área a Obra hidráulica (detectado en la tabulación cruzada, ver tabla 4.12)

- Herbazal denso muestra un crecimiento constante (de 1580,49 ha a 1653,97 ha), lo que podría ser resultado de la degradación de zonas de Arbustales o Bosques que se convirtieron en Herbazales, además se evidencia el abandono de cultivos que se transformaron en herbazales.
- Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) presenta una ligera disminución (cambio a cultivos agrícolas), la cual fue observada en campo.
- Categorías como cuerpos de agua (Ríos, lagunas, lagos y ciénagas naturales y Cuerpos de aguas artificiales), Afloramientos rocosos y Turberas, se mantienen invariables en el tiempo.

Tabla 4.13. Resumen de Áreas en hectáreas de las diferentes coberturas y usos en los tres períodos. Fuente: elaboración propia.

Código	Categoría CORINE Land Cover	2015 (ha)	2020 (ha)	2025 (ha)
1.1.1	Tejido urbano continuo (Tuc)	100,32	100,32	100,32
1.1.2	Tejido urbano discontinuo (Tud)	177,47	180,72	181,84
1.2.1	Zonas industriales o comerciales (Zic)	7,37	7,37	7,37
1.2.2	Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta)	228,91	228,91	228,91
1.2.5	Obras Hidráulicas (Oh)	18,81	20,39	20,43
1.4.1	Zonas verdes urbanas (Zvu)	6,24	6,24	6,24
1.4.2	Instalaciones recreativas (Ir)	5,15	5,15	5,15
2.1.1	Cultivo transitorio (Ct)	6486,67	6521,24	6452,84
3.1.1.2.1	Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf)	5689,77	5657,71	5622,94
3.1.5.1	Plantación de coníferas (Pc)	583,00	581,73	580,07
3.2.1.1	Herbazal denso (Hd)	1580,49	1640,53	1653,97
3.2.1.1.1.1.1	Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna)	17681,90	17649,93	17643,4
3.2.2	Arbustal (A)	8050,15	7986,42	7927,45
3.3.2	Afloramiento rocoso (Ar)	239,81	239,81	239,81
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas (Tdd)	116,17	145,75	301,48
4.1.2	Turbera (T)	523,81	523,81	523,81
5.1.1	Ríos (R)	88,52	88,52	88,52
5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn)	105,86	105,86	105,86
5.1.4	Cuerpos de aguas artificiales (Caa)	1,05	1,05	1,05
		41691,46	41691,46	41691,46

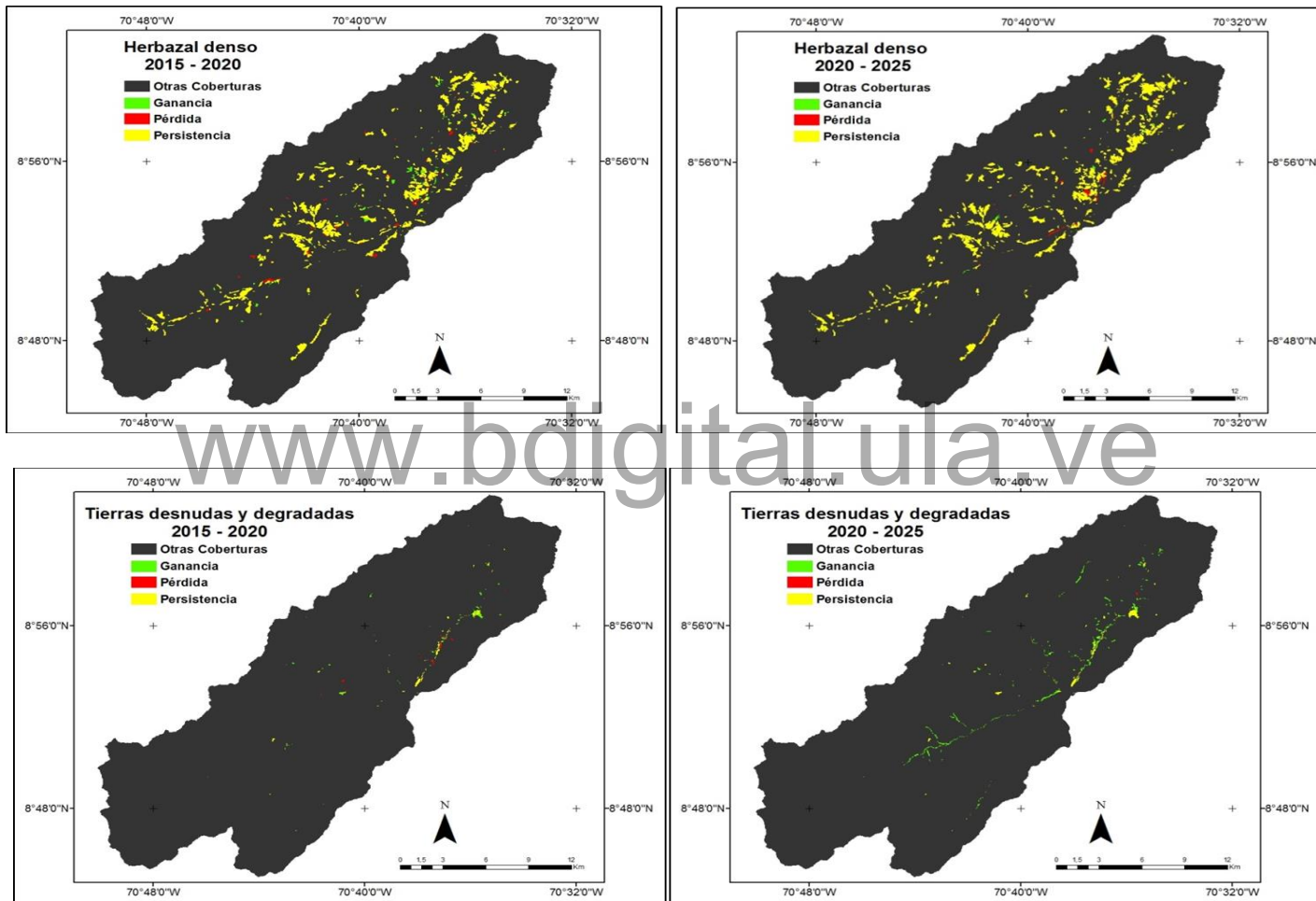


Figura 4.8. Mapas de cambios netos de 8 categorías resaltantes.

Fuente: Elaboración propia

4.6 Reservas de Carbono almacenado para los años 2015, 2020 y 2025.

4.6.1 Biomasa Aérea para los años 2015, 2020 y 2025 estimado por metodología del IPCC

El análisis se enfocó solo en cinco tipos de cobertura vegetal para luego calcular los reservorios de carbono: Bosque denso alto de tierra firme, Plantación de coníferas, Herbazal denso, Herbazal denso de tierra firme sin árboles y Arbustal. Asimismo, se estudió la evolución de cada una de ellas en los lapsos 2015-2020 y 2020-2025. (Tabla 4.14).

Resulta pertinente aclarar, que las tierras agrícolas (cultivos transitorios) fueron excluidas de las estimaciones de carbono dada la corta temporalidad de sus ciclos productivos (generalmente inferiores a un año). En el sector AFOLU, para los productos de vida corta, se presupone que se equilibra la emisión mediante la absorción de carbono antes de la cosecha, por lo que la emisión neta es cero (IPCC, 2006). En otras palabras, el CO₂ absorbido de la atmósfera durante el crecimiento de los cultivos es liberado nuevamente al ambiente tras la cosecha y la descomposición de los residuos, situaciones que generan un balance neto de carbono cercano a cero en el ciclo anual. Por ello, estos no representan un almacenamiento de carbono significativo o permanente a largo plazo a ser considerado en este estudio.

La tabla 4.14 ilustra los cambios en la biomasa aérea calculados a partir de la extensión de las cinco subcategorías definidas. En el caso del bosque denso alto de tierra firme, muestra una tendencia general a la disminución en el período observado. De modo más específico, para el año 2015 se estimó un total de 739670,1 Mg, cantidad que en 2020 disminuyó a 735503,6 Mg, y en 2025 a 730982,2 Mg, respectivamente. Esta reducción es el resultado evidente de la disminución de esta cobertura por conversión a herbazales, áreas agrícolas y tierras desnudas y degradadas.

De igual modo, las plantaciones de coníferas también muestran una reducción progresiva de su reserva de carbono a lo largo del tiempo, aunque en una escala mucho menor que el bosque denso. En este caso, el almacén máximo se registra en

2015, con aproximadamente 61215 Mg; en 2020, disminuye a 61081,65 Mg y en 2025, el descenso continúa, quedando en 60907,35 Mg.

En lo que respecta al herbazal denso, este presenta un aumento constante y significativo desde el año 2015 (de 3951,225 Mg). El aumento se evidenció en 2020 al alcanzar 4101,325 Mg y luego 4134,925 Mg en 2025. En contraste con estos resultados, el Herbazal denso de tierra firme no arbolado exhibió una clara tendencia a disminuir: en 2015 evidenció 44204,75 Mg, en 2020 presentó 44124,75 Mg y en 2025 indicó 44108,5 Mg.

En cuanto a los Arbustales, estos muestran un patrón de reducción constante (similar a las dos primeras categorías). En 2015, el reservorio fue de 22540,42 Mg; para 2020, se presenta una disminución a 22361,976 Mg y la reserva mínima se registra en 2025 con 22196,86 Mg.

En cuanto al almacén de carbono, la tabla 4.15 muestra por categorías para cada periodo en la cuenca los depósitos de carbono, y observando el total se evidencia una tendencia general de disminución de carbono almacenado en las coberturas analizadas; en 2015 un total de 435790,75 Mg C, 2020: 433586,65 Mg C observando una reducción de 2204,10 Mg C respecto a 2015. 2025: 431164,92 Mg C reducción de 2421,73 Mg C respecto a 2020 y una reducción total de 4625,83 Mg C desde 2015. El bosque denso alto de tierra firme, Plantación de coníferas, Herbazal denso de tierra firme no arbolado y arbustales tuvieron una disminución constante en los periodos estudiados, por el contrario el herbazal tuvo un incremento del almacén de carbono.

Tabla 4.14 Biomasa Aérea de las categorías y subcategorías para los años 2015, 2020 y 2025 de la cuenca alta del río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia.

Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	Mg		
		2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	739670,10	735503,60	730982,20
	Plantación de coníferas (Pc)	61215,00	61081,65	60907,35
Pastizales (Praderas)	Herbazal denso (Hd)	3951,23	4101,33	4134,93
	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	44204,75	44124,75	44108,50
	Arbustal (A)	22540,42	22361,98	22196,86
Total		871581,5	867173,31	862329,84

Tabla 4.15 Depósitos de carbono en las categorías y subcategorías para los años 2015, 2020 y 2025 de la cuenca alta del río Santo Domingo. Fuente: Elaboración propia.

Clases IPCC 2006	Depósitos de Carbono Subclases C.L.C.	2015 Mg C	2020 Mg C	2025 Mg C
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	369835,05	367751,80	365491,10
	Plantación de coníferas (Pc)	30607,50	30540,83	30453,68
Pastizales (Praderas)	Herbazal denso (Hd)	1975,61	2050,66	2067,46
	Herbazal denso de tierra firme no arbolado	22102,38	22062,38	22054,25
	Arbustal (A)	11270,21	11180,99	11098,43
Total		435790,75	433586,65	431164,92

4.6.2 Biomasa subterránea, biomasa muerta (hojarasca) y carbono en el suelo (COS) para tierras forestales en los años 2015, 2020 y 2025 estimados por la metodología del IPCC.

Para estas estimaciones solo se tomaron en cuenta las tierras forestales debido a que en las Directrices del IPCC de 2006 (volumen 4, capítulo 2, cuadro 2.3) se señala que no se dispone de datos para estimar la existencia de C en el suelo en otras coberturas. De igual modo, estas asumen que los datos existentes son solo aplicables en regiones templadas.

Un análisis de la tabla 4.17 permite observar que el COS presenta una tendencia de disminución de la cantidad existente en 2015 de 75273,24 Mg C a 74436,12 Mg C en 2025 (bosques y plantaciones). Esto significa una disminución de 837,12 Mg C en todo el intervalo de tiempo estudiado.

De la misma manera, la tabla 4.16 muestra evidencia de una dinámica significativa de la hojarasca. Esta pasó de 80225,757 Mg C en 2015 a 79773,852 Mg C en 2020 (reducción de 451,90 Mg C) y a 79283,454 Mg C en 2025 (disminución de 490,40 Mg C).

Con relación a la biomasa subterránea, esta constituye el reservorio de menor proporción de los tres analizados, con solo 568,98 Mg C en 2015. Este disminuye en 2015 a 565,77 Mg C y en 2025 a 562,29 Mg C (disminuciones de 3,21 Mg C para el primer intervalo y de 3,48 Mg C para el segundo).

Finalmente, la tabla 4.16 muestra las reservas de carbono en Mg C de los diferentes depósitos del Bosque denso alto de tierra firme a lo largo de un periodo de diez años (2015-2025), utilizando la metodología IPCC (no se incluye madera muerta y productos de madera recolectada). Las estimaciones indican que el carbono en esta cobertura se concentra predominantemente en la biomasa aérea, seguida por la hojarasca y el COS. Estas en conjunto por año se han reducido, al pasar de 518907,024 Mg C en 2015 a 512812,128 Mg C en 2025 (disminución de 6094,90 Mg C).

Tabla 4.16: Biomasa subterránea, biomasa muerta (hojarasca) y COS solo para la categoría de tierras forestales para los años 2015, 2020 y 2025. Fuente: Elaboración propia.

		COS		
		Mg C		
Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	68277,24	67892,64	67475,28
	Plantación de coníferas (Pc)	6996,00	6980,76	6960,84
		Hojarasca		
		Mg C		
Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	80225,757	79773,852	79283,454
		Biomasa Subterránea		
		Mg C		
Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	568,977	565,772	562,294

Tabla 4.17. Total de Reservas de Carbono en el Bosque Denso Alto (Método IPCC). Fuente: Elaboración propia.

Bosque denso alto de tierra firme (Mg C)			
	2015	2020	2025
Biomasa Aérea	369835,05	367751,80	365491,10
COS	68277,24	67892,64	67475,28
Hojarasca	80225,76	79773,85	79283,45
Biomasa Subterránea	568,98	565,77	562,29
Total	518907,02	515984,06	512812,13

4.6.2.1. Carbono en Humedales por medio de metodología IPCC

Áreas dentro de la cuenca significativas a considerar en la estimación de carbono son los humedales (presentes principalmente en las partes altas de la cuenca). Aunque estos constituyen espacios de poca extensión, representan un almacenamiento de 23047,64 Mg de C (resultado obtenido a partir del factor de emisión de primer nivel señalado por la metodología del IPCC).

4.6.2.2. Biomasa Aérea para los años 2015, 2020 y 2025 estimado por modelo alométrico calibrado aplicados sobre NDVI y mapa de biomasa GFW

A partir del modelo alométrico planteado por Mora (2022) (ver metodología), se generaron las estimaciones de biomasa aérea en el bosque denso y las plantaciones de coníferas (uno para cada año de estudio) (Figura 4.12). Es importante destacar que, a pesar de que el modelo no fue diseñado para esta última categoría, se optó por su aplicación con el fin de obtener resultados comparables con los métodos del IPCC y los datos de GFW (ver Tabla 4.17.)

Los resultados para el bosque denso indican una estimación en biomasa aérea de 500699,76 Mg para el año 2015, de 497879,36 Mg para el 2020 y de 494818,72 Mg para el 2025. Esto significó una reducción de 2820,4 Mg para el primer intervalo y de 3060,64 Mg para el segundo (similar análisis se puede realizar para las plantaciones).

En cuanto a los resultados extraídos del mapa de biomasa aérea GFW, para la misma cobertura indican una mayor proporción con 967260,9 Mg para el año 2015, 961812,4 Mg para el 2020 y 955899,8 Mg para el 2025. Estos resultados señalan una reducción de 5448,5 Mg para el primer intervalo y de 5912,6 Mg para el segundo (El mismo tipo de análisis puede llevarse a cabo para las plantaciones).

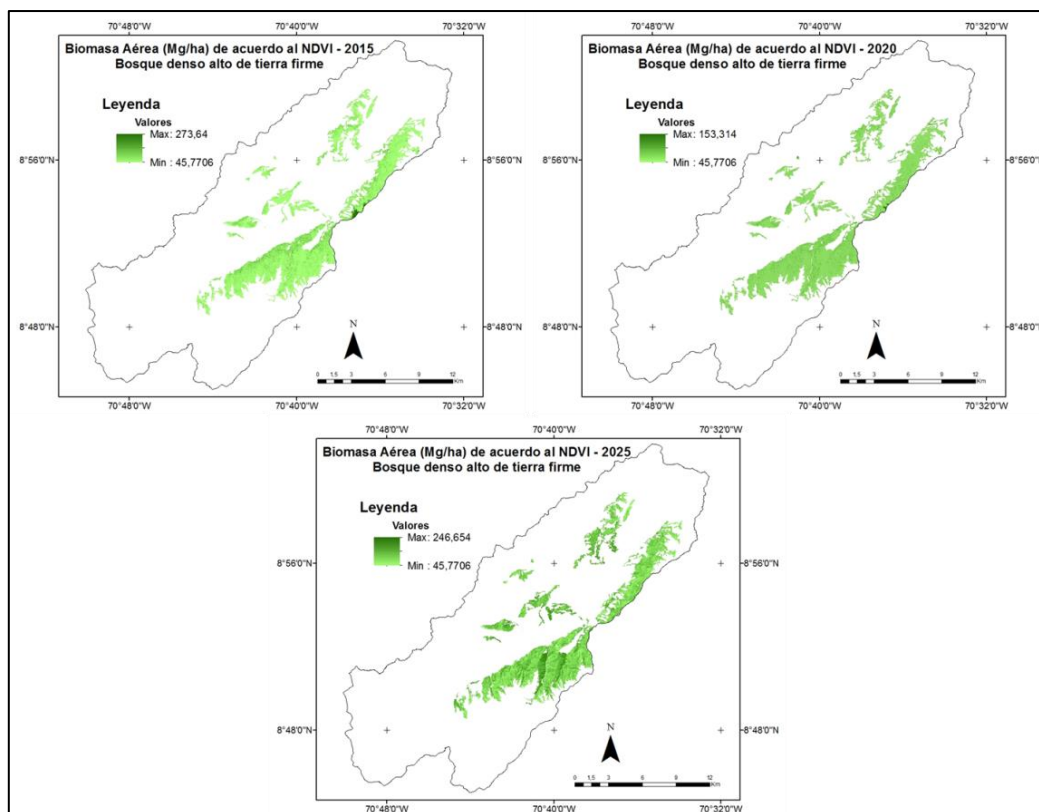


Figura 4.10. Mapas de Biomasa aérea para Bosque denso de tierra firme 2015 – 2020 – 2025 calculado a partir de NDVI. Fuente: Elaboración propia.

4.6.3 Análisis Comparativo de Metodologías para la Estimación de Reservas de Carbono en la biomasa aérea

Obtenidas las biomazas vivas a partir de la metodología del IPCC (2006), del mapa de carbono de Harris *et al.* (2021) y del modelo calibrado por Mora (2022) y aplicado sobre NDVI de los tres años de estudio, se procedió a realizar la comparación de los resultados.

En primera instancia, se encontraron diferencias significativas entre los resultados de los métodos presentados (Tabla 4.18). El mapa de biomasa (obtenido del portal Global Forest Watch, en adelante GFW) denotó la estimación más alta para los bosques (promedio: 480828,85Mg C), seguido por los del IPCC (promedio: 367692,65Mg C), y luego por los de NDVI (promedio: 248899,64Mg C). Similar tendencia se puede observar para las plantaciones de coníferas

GFW (Global Forest Watch) y NDVI son métodos basados en productos de sensores remotos. El primero muestra la biomasa aérea solo de sumideros forestales y forma

parte de un modelo de flujo de carbono forestal, y el segundo se centra en la respuesta espectral al momento de la captura del sensor, donde influyen aspectos como fenología, época del año, nubosidad, radiación (lo que podría subestimar los resultados de la biomasa aérea). A diferencia de estos, el método IPCC (Nivel 1) utiliza factores de emisión (FE) por defecto que se multiplican directamente por datos de actividad (cartografía de las coberturas vegetales).

A partir de la aplicación de estos enfoques, las estimaciones para el Bosque denso alto de tierra firme y la Plantación de coníferas muestran una disminución constante entre 2015 y 2025 en las tres metodologías. Esto sugiere una pérdida neta de carbono en la biomasa aérea ocasionada por cambios de coberturas y usos de la tierra.

En el caso del COS (Carbono Orgánico del Suelo), se comparan también tres resultados: IPCC, Random Forest (R.F.) y WOSIS (World Soil Information Service). Para los bosques, el COS obtenido por IPCC tiene la estimación más alta (utilizando FE de nivel 1) con un promedio para los tres años de 67881,72 Mg C, seguido por R.F., que presenta un valor promedio de 80192,63 Mg C, y finalmente por WOSIS con 72468,33 Mg C. En cuanto a coníferas, el resultado del IPCC arrojó un promedio de 13958,4 Mg C, estimación mayor a la de R.F. de 8081,8 Mg C y de WoSIS de 7694 Mg C.

Estas diferencias estriban en la forma de obtención de los resultados. IPCC establece un valor constante de factor de emisión para toda el área de una cobertura de interés (que se traduce en una cartografía sin cambio de COS). Por el contrario, los obtenidos por R.F. y WoSIS implican el uso de datos continuos que introducen variabilidad espacial del COS. Dicha variación de los datos empleados permite inferir una sobrestimación de los resultados del IPCC sobre los dos restantes.

Finalmente, se puede deducir que en los tres métodos existe una tendencia de disminución tanto en la biomasa aérea como en COS en las categorías analizadas. Esta es generada por el cambio de estas coberturas a otras categorías a lo largo del tiempo.

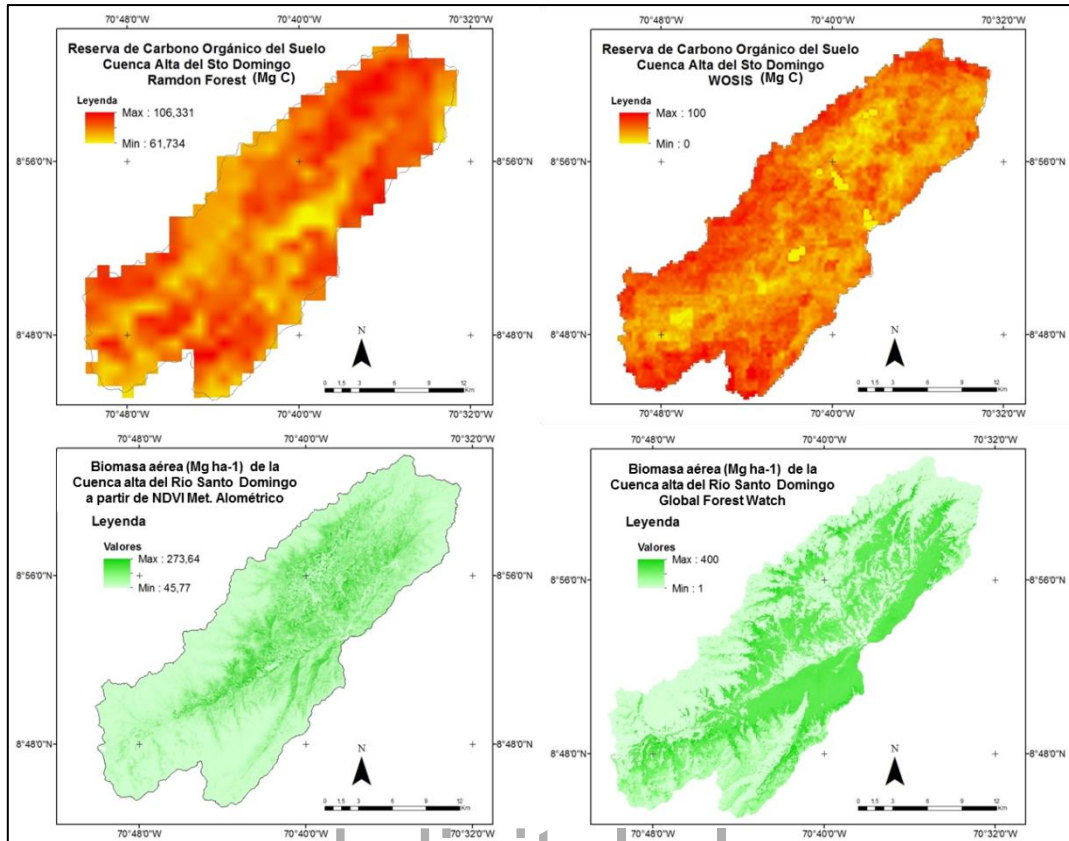


Figura 4.11. Mapas de los diferentes métodos de estimación de carbono para toda cuenca

Tabla 4.18. Comparación de resultados de acuerdo con las tres metodologías aplicadas para la determinación de biomasa aérea y carbono orgánico en el suelo. Fuente: Elaboración propia.

Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	IPCC Mg C			GFW Mg C			NDVI Mg C		
		2015	2020	2025	2015	2020	2025	2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	369835,05	367751,8	365491,1	483630,45	480906,2	477949,9	250349,88	248939,68	247409,36
	Plantación de coníferas (Pc)	30607,5	30540,825	30453,675	38769,5	38685,045	38574,655	21862,5	21814,875	21752,625
Clases IPCC 2006	Subclases C.L.C.	IPCC Mg C			R.F. Mg C			WOSIS Mg C		
		2015	2020	2025	2015	2020	2025	2015	2020	2025
Tierras forestales	Bosque denso alto de tierra firme	136554,48	135785,28	134950,56	80578,7	80300,3	79698,9	72864.0	72576.0	71965.0
	Plantación de coníferas (Pc)	13992	13961,52	13921,68	8108	8108	8029,4	8045.0	8045.0	6992.0

Abreviaturas: IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. GFW-Datos arrojados de la plataforma Global Forest Watch. NDVI- Datos de carbono calculados con Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada. COS-Carbono Orgánico del Suelo. R.F.-Datos del Random Forest. WOSIS- World Soil Information Service (Servicio Mundial de Información sobre Suelos)

4.7. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra

El análisis de Tablas 4.19 y 4.20 cuantifica las emisiones y absorciones de carbono (Mg C) resultantes de los cambios en las coberturas y usos de la tierra entre los periodos 2015–2020 y 2020–2025. Las celdas marcadas en morado indican emisiones de carbono (pérdidas), y en verde indican la absorción de este (ganancias).

Los resultados más significativos del análisis de flujos en 2015–2020 fueron, en primer lugar, la emisión del Bosque denso, con un total de 2083,12 Mg C, generadas por las transiciones a Tierras desnudas y degradadas con 1305,31 Mg C, a Cultivos transitorios con 472,63 Mg C, a Herbazal denso con 201,70 C y a Tejido urbano discontinuo con 15,81 Mg C; en segundo lugar, la conversión de cultivos a herbazal denso que resultó en la mayor absorción individual registrada, con un total de 109,86 Mg C capturados; y en tercer lugar, las plantaciones de coníferas que contribuyeron a las emisiones por su cambio a herbazales y tierras degradadas, sumando una pérdida total de 66,89 Mg C.

En el mismo orden de ideas, las categorías de tierras no forestales o pastizales también contribuyeron significativamente a las emisiones totales (Mg C). Los Herbazales liberaron 100,81 Mg de C procedentes principalmente de la transición a cultivos (80,72 Mg C), a tierras degradadas (19,39 Mg C) y a tejido urbano discontinuo (0,43 Mg C). De igual forma, el Herbazal denso de tierra firme no arbolado emitió 39,94 Mg C por el cambio a cultivos transitorios (34,66 Mg C), a tierras degradadas (3,19 Mg C) y a herbazales (2,09 Mg C). En cuanto a los Arbustales, estos emitieron 40,83 Mg C; la pérdida de carbono se debió a la conversión a cultivos (35,90 Mg C) y a tierras degradadas (4,93 Mg C).

Finalmente, para el periodo 2020–2025, la única categoría que contribuyó en la absorción neta de carbono fue la transición a herbazales densos, sumando un total de 76,91 Mg C capturados. Esta absorción se debió principalmente a cultivos transitorios que aportaron la mayor ganancia, con 72,13 Mg C, y a Tierras degradadas que contribuyeron con 4,78 Mg C. Las categorías restantes muestran emisiones, destacándose la del Bosque denso como la principal fuente de pérdida de carbono, con un total de 2260,25 Mg C, generadas por el cambio a Tierras degradadas

(2099,35 Mg C), a Cultivos transitorios (106,19 Mg C) y a Herbazal denso (51,75 Mg C).

En cuanto a las categorías restantes: plantaciones de coníferas tuvieron una pérdida de 86,94 Mg de C; Herbazales de 70,49 Mg C, debido a la transición a cultivos (29,42 Mg C) y a tierras degradadas (41,07 Mg C); Herbazal denso de tierra firme no arbolado de 8,16 Mg C, originados por el cambio a cultivos transitorios; y Arbustales de 82,56 Mg C, debido a la conversión a cultivos (6,63 Mg C), a herbazales (10,51 Mg C) y a tierras degradadas (65,42 Mg C).

www.bdigital.ula.ve

Tabla 4.19. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra para 2015 – 2020. Fuente: Elaboración propia.

		CLC 2020																	Emisión			
		111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512	514	Mg C	
CLC 2015	111	100,32																			0	
	112		177,47																			0
	121			7,37																		0
	122				228,91																	0
	125					18,82																0
	141						6,24															0
	142							5,15														0
	211								6396,03			109,86										0
	31121		15,81			87,67			472,63	5657,72		201,70				1305,31						2083,12
	3151										581,73	43,76				23,13						66,89
	3211		0,43			0,26			80,72			1499,84				19,39						100,81
	3211111								34,66			2,09	17649,90			3,19						39,94
	322								35,90					7983,42		4,93						40,83
	332														239,81							0
	333															103,55						0
	412																	523,81				0
	511																		88,52			0
512																			105,86		0	
514																				1,05	0	
Absorción Total Mg C		0	0	0	0	0	0	0	0	0	109,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2331,60	

Abreviaturas: 1.1.1. Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2. Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2. Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5. Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1. Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2. Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1. Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1. Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1. Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1. Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2. Arbustal (A) – 3.3.2. Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2. Turbera (T) – 5.1.1. Ríos (R) - 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) – 5.1.4. Cuerpos de aguas artificiales (Caa)

Tabla 4.20. Emisiones y absorción de Carbono por cambios en las coberturas y uso de la tierra para el 2020 – 2025. Fuente: Elaboración propia.

		CLC 2025																		Emisión Mg C	
		111	112	121	122	125	141	142	211	31121	3151	3211	3211111	322	332	333	412	511	512		514
CLC 2020	111	100,32																		0	
	112		180,45																		0
	121			7,37																	0
	122				228,91																0
	125					20,39															0
	141						6,24														0
	142							5,15													0
	211								6416,36			72,13									0
	31121					2,95			106,19	5622,94		51,75				2099,35					2260,25
	3151										580,07					86,94					86,94
	3211								29,42			1584,14				41,07					70,49
	3211111								8,16				17643,40								8,16
	322								6,63			10,51		7927,45		65,42					82,56
	332														239,81						0
	333											4,78				141,88					0
	412																523,81				0
	511																	88,52			0
512																		105,86		0	
514																			1,05	0	
	Absorción Total Mg C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76,91	0	0	0	0	0	0	0	0	2508,39	

Abreviaturas: 1.1.1. Tejido urbano continuo (Tuc) – 1.1.2. Tejido urbano discontinuo (Tud) – 1.2.1. Zonas industriales o comerciales (Zic) – 1.2.2. Red Vial Ferroviaria y terrenos asociados (Rvfta) – 1.2.5. Obras Hidráulicas (Oh) – 1.4.1. Zonas verdes urbanas (Zvu) – 1.4.2. Instalaciones recreativas (Ir) – 2.1.1. Cultivo transitorio (Ct) – 3.1.1.2.1. Bosque denso alto de tierra firme (Bdatf) – 3.1.5.1. Plantación de coníferas (Pc) – 3.2.1.1. Herbazal denso (Hd) – 3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado (Hdtfna) – 3.2.2. Arbustal (A) – 3.3.2. Afloramiento rocoso (Ar) – 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas (Tdd) – 4.1.2. Turbera (T) – 5.1.1. Ríos (R) – 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales (Llcn) – 5.1.4. Cuerpos de aguas artificiales (Caa)

Capítulo V

5. Conclusiones

La combinación de imágenes Sentinel-2 L2A y la metodología CORINE Land Cover (CLC) resulta fundamental para generar cartografía de coberturas precisa y confiable. Adicionalmente, el desarrollo y aplicación rigurosa de fichas o claves de interpretación es crucial, ya que estas organizan detalladamente las características de cada categoría de cobertura y uso de la tierra. A su vez, guían de manera consistente el proceso de interpretación y generación de los mapas.

Resulta importante destacar, la necesidad de desarrollar visitas a campo y el registro de coordenadas con GPS en el cotejo visual entre lo observado en sitio y la cartografía generada (impresa y digital). Esta medida permitió, identificar confusiones recurrentes entre categorías vegetales espectralmente similares; ejemplos: Arbustales con Cultivos transitorios, Herbazales y Bosque denso, y Cultivos transitorios (Ct) con Herbazales densos (o viceversa). Este último caso, debido al estado fenológico de los primeros o la época del año en que se encontraban los segundos. Otras confusiones dilucidadas fueron algunas relacionadas con la categoría Turberas, que permitieron precisar esta última. En síntesis, este paso fue crucial para mejorar la calidad de la cartografía definitiva al garantizar una interpretación más precisa.

El predominio de coberturas en la cuenca alta del río Santo Domingo, que comprende un área total de 41691,46 ha, está compuesto principalmente por vegetación natural y agrícola. El Herbazal denso de tierra firme no arbolado representa el 42,3 % del área total, es decir, es la cobertura más extensa, seguido por los Cultivos transitorios (15,5 %) y el Bosque denso alto de tierra firme (13,5 %). Estas tres categorías abarcan más del 71 % del área total.

Se identificaron cambios relevantes en las coberturas y usos de la tierra durante los tres periodos analizados. Entre 2015 y 2020, se registraron 315,93 ha de transición entre categorías. Las más destacadas incluyen la conversión de Cultivo transitorio a

Herbazal denso (87,89 ha) y viceversa (Herbazal denso a Cultivo transitorio, 64,58 ha), lo que puede reflejar la rotación o abandono temporal de las tierras agrícolas.

Se registró un cambio total de 267,34 hectáreas para el periodo 2020-2025, donde las transiciones más significativas evidencian una vulnerabilidad de la cuenca ante procesos de erosión y deslizamientos (conversiones a Tierras desnudas y degradadas). En este orden de ideas, la categoría Cultivo transitorio perdió 45,79 ha, Arbustal 46,73 ha, Bosque denso alto de tierra firme 32,30 ha y Herbazal denso 32,86 ha. A partir de ello, se demuestra que esta metodología puede generar resultados con prontitud y precisión tras un evento climático (siempre y cuando se disponga de imágenes satelitales libres de nubes). Dicha versatilidad es fundamental para la evaluación inmediata de zonas afectadas, especialmente aquellas que presenten dificultad de acceso o alto riesgo.

Coberturas como Tejido urbano continuo, Zonas industriales, Cuerpos de agua naturales y artificiales, Afloramientos rocosos y Turberas se mantuvieron estables durante los tres periodos. Esto sugiere una baja intervención o transformación en estas áreas.

La validación de los mapas mediante matrices de confusión arrojó valores de precisión global superiores al 96 % y coeficientes de Kappa cercanos al 0,96 para los años 2015, 2020 y 2025. Esto confirma la fiabilidad del proceso de interpretación visual y la utilidad de las imágenes Sentinel-2 L2A en estudios de cobertura y uso de la tierra.

La disminución progresiva del bosque denso y el aumento de tierras degradadas reflejan la necesidad de implementar estrategias de conservación, restauración ecológica y manejo sostenible. El estudio proporciona una base técnica para la toma de decisiones orientadas a mitigar la pérdida de cobertura vegetal y promover prácticas agrícolas compatibles con la conservación del ecosistema.

El análisis multitemporal, permitió calcular las reservas de carbono en biomasa aérea y suelos entre los periodos 2015-2020 y 2020-2025. Se evidenció una disminución en las reservas de coberturas como los bosques y plantaciones de coníferas y un aumento en pastizales que podría deberse al avance de la sucesión vegetal en áreas antes

dedicadas a otros usos, o la degradación de bosques que pasan a este tipo de cobertura.

Las tres metodologías para la biomasa aérea y las tres para el COS, junto con la hojarasca y la biomasa subterránea, indican una pérdida neta de carbono en el "Bosque denso alto" entre 2015 y 2025. Esto es una fuerte evidencia de degradación o pérdida forestal.

Para minimizar las incertidumbres en las estimaciones de los stocks de carbono, en primer lugar hay que mejorar la conceptualización de las estimaciones (por ejemplo, tomar en cuenta los efectos estacionales de las emisiones y absorciones en el AFOLU), en segundo lugar, mejorar los modelos a utilizar (parametrización), en tercer lugar, estratificar mejor el muestreo y si es posible, los sistemas de monitoreo, en cuarto lugar, recurrir a métodos más precisos de medición (evitar la simplificación), en quinto lugar, recabar más datos, en sexto lugar, seguir las sugerencias de los árboles de decisiones que indica el IPCC en sus documentos y finalmente, mejorar la comprensión de las categorías para así superar la falta de exhaustividad del conocimiento.

Metodológicamente, se pueden aplicar varias técnicas para la elaboración de la cartografía de la cobertura y uso de la tierra, dentro de estas se puede mencionar la clasificación No Supervisada que no requiere toma de muestras por tipo de cobertura, y, la clasificación Supervisada que si requiere toma de muestras de tipos de coberturas. A pesar de que estas metodologías son prácticas y rápidas para elaborar la cartografía de cobertura y uso, la exactitud de los resultados con respecto a la realidad, no son muy precisos por lo que se requiere un post procesamiento detallado de los mismos. En este sentido, para la elaboración de la cartografía de la cobertura y uso de la tierra, se recomienda la metodología de interpretación visual en pantalla, que a pesar de que llevaría más tiempo en comparación de los métodos comentados anteriormente, la exactitud de los resultados va a ser mucho mayor, como lo requirió esta investigación para estimar a partir de estas los stocks de carbono existente en las coberturas vegetales del área de estudio.

Los resultados de los Índices de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), derivado de las bandas 8 y 4 de las imágenes satelitales, pueden ser reclasificados en un sistema de información geográfica. A través de este proceso, los valores continuos se transforman en conjuntos discretos de clases o categorías. Esta operación, constituye una herramienta analítica fundamental, ya que permite agrupar rangos de valores altos y bajos, asignar colores diferenciados a cada categoría y, de este modo, identificar las zonas con mayor acumulación de carbono y biomasa aérea densa. La reclasificación facilita la toma de decisiones estratégicas al resaltar de manera rápida y precisa los sumideros de carbono más valiosos y vulnerables dentro de la cuenca. Con ello, se optimiza la focalización de acciones de mitigación, conservación forestal y restauración de ecosistemas, en función de su capacidad de almacenamiento de carbono y de su papel en el balance de flujos de CO₂ en la cuenca alta del río Santo Domingo.

La plataforma Global Forest Watch (GFW), coordinada por el World Resources Institute (WRI), constituye una herramienta esencial de monitoreo forestal de código abierto basada en tecnología satelital. En este estudio, se cargó mediante archivos geojson (vectorial), la poligonal correspondiente a la cuenca alta del Río Santo Domingo, lo que permitió obtener de manera inmediata información y análisis preliminar sobre la pérdida y ganancia de cobertura arbórea (Tree Cover Loss) desde el año 2000 hasta la actualidad, esta puede ser comparable con la matriz de cambios elaborada en esta investigación. Asimismo, GFW genera valores de densidad de carbono en la biomasa forestal (Mg C/ha) para la región tropical, lo que ofrece un insumo valioso para validar, contextualizar y contrastar los factores de biomasa y carbono calculados bajo las directrices del IPCC, proporcionando un mapa de referencia que fortalece la consistencia de los resultados. La plataforma también permite superponer capas temáticas que evidencian la relación entre la pérdida de cobertura forestal y las emisiones de carbono asociadas, lo cual amplía las posibilidades de análisis y contribuye a la identificación de patrones espaciales relevantes para la gestión y conservación de los bosques.

La selección de la ecuación de biomasa aérea propuesta por Mora (2022) se fundamentó en la similitud estructural y fisionómica de los bosques entre el área de

estudio, la cuenca alta del río Santo Domingo y los tres sectores de la Selva Nublada de La Mucuy analizados en dicho trabajo. Esta decisión metodológica respondió a la necesidad de aplicar una herramienta previamente validada y disponible para la estimación a escala regional, considerando las restricciones logísticas y temporales propias de un estudio de esta magnitud. No obstante, para reducir la incertidumbre en los inventarios de GEI y obtener estimaciones de biomasa aérea con la mayor precisión posible, resulta imprescindible que futuras investigaciones desarrollen trabajo de campo intensivo. Ello implica, el establecimiento de parcelas permanentes en los distintos ecosistemas de la cuenca, con el fin de generar ecuaciones alométricas propias y locales, ajustadas a las condiciones específicas de la región.

En este estudio, no se consideró el crecimiento de los individuos arbóreos, dado que se asume que dicho crecimiento ocurre a una tasa muy lenta e insignificante dentro del tiempo analizado (2015–2025). Esta condición se explica por factores ambientales asociados al gradiente altitudinal elevado, donde las bajas temperaturas, los períodos de heladas y la alta nubosidad ralentizan de manera significativa los procesos fotosintéticos y el metabolismo de las plantas. Como consecuencia, el incremento anual en diámetro y altura resulta mínimo, lo que justifica la exclusión de esta variable en el análisis.

Con la información obtenida en este estudio, se sugiere desarrollar metodologías como el modelo InVEST de almacenamiento y secuestro de carbono, el cual utiliza mapas de uso de la tierra junto con las existencias de cuatro reservas de carbono (biomasa aérea y subterránea, suelo y materia orgánica muerta) para estimar la cantidad de carbono actualmente almacenada en un paisaje o la cantidad de carbono secuestrado a lo largo del tiempo. Este modelo, además (de forma opcional), puede utilizar el valor social o de mercado del carbono secuestrado, su tasa de cambio anual y una tasa de descuento para estimar el valor de este servicio ecosistémico para la sociedad.

Referencias citadas

- Achard, F., Eva, H. D., Mayaux, P., Stibig, H. J. y Belward, A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2). <https://doi.org/10.1029/2003GB002142>
- Al-doski, J., Mansor, S. B., San, H. P. y Khuzaimah, Z. (2020). Land Cover Mapping Using Remote Sensing Data. *American Journal of Geographic Information System*, 33-45.
- Al Kafy, A., Saha, M., Fattah, M. A., Rahman, M. T., Duti, B. M., Rahaman, Z. A., ... y Sattar, G. S. (2023). Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions. *Ecological Indicators*, 152, 110374. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110374>
- Alva, M. y León, A. (2017). Diseño e implementación de un catálogo de objetos geográficos para la cobertura de la Tierra mediante la leyenda Corine Land Cover, para el departamento de Ancash – Perú. *Revista UD y la geomática*, 11: 55-62.
- Anderson, J., Hardy, E., Roach, J. y Witmer, R. (1976). A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data. USGS. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp964>
- Ataroff, M. (2000). Selvas y bosques de montaña. Mérida: ICAE, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes.
- Aparicio, F. (2011). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa. 304 p.
- Audemard, F. (2009). FALLA DE BOCONÓ (VE -06b y VE -06c). Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- Audemard, F. (2014). Segmentación sismogenética de la falla de Boconó a partir de investigaciones paleosísmicas por trincheras, Venezuela occidental: ¿Migración de la ruptura hacia el noreste en tiempos históricos? *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71, 247-259.
- Avalos, A., Flores, F., Nájera, O. y Marcelleño, S. (2018). Analysis of the Land Use and Cover Changes in the Metropolitan Area of Tepic-Xalisco (1973–2015) through Landsat Images. *Sustainability*, 10, 1860. <https://doi.org/10.3390/su10061860>

- Ballut-Dajud, G., Sandoval, L., Osorio, I., Baez, W., Marin, J. y Betanzo, E. (2024). Comparison of Carbon Storage in Forested and Non-Forested Soils in Tropical Wetlands of Caimanera, Colombia, and Llano, Mexico. *Sustainability*, 16, 4966. <https://doi.org/10.3390/su16124966>
- Baret, F., G. Guyot, y D. J. Major. 1989. TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'89. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing. International*, p. 1355- 1358.
- Bareth, G. y Waldhoff, G. (2018). Gis for mapping vegetation. *Comprehensive Geographic Information Systems*. 1 – 27. Doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09636-6>
- Barragán, M., Daza, N., Calderón, Y., Navarro, L. y Tosse, O. (2018). Guía metodológica para la formulación de los planes de manejo ambiental de microcuencas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.andi.com.co/Uploads/GU%C3%8DA%20METODOL%C3%93GICA%20FORMULACI%C3%93N%20PMA%20MICROCUENCAS.pdf>
- Bastidas, J. (2007). *Nociones de hidrografía*. Consejo de publicaciones. Universidad de Los Andes.
- Belenguer, M. 2016. Detección de problemas en la localización de usos del suelo mediante SIG y AHP: El caso de riba-roja de Túria (Valencia). *GeoFocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. (18): 3-24.
- Bellizzia, A. Pimentel, N. y Bajo, R. (1976). *Mapa Geológico Estructural de Venezuela escala 1:500.000*. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. FONINVES. Ed. 1-DG. Caracas
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G. y Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2. Recuperado el 16 de Abril de 2025, de *Revista de Teledetección*, 48, 55-66. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7133>
- Büttner, G., Kosztra, B., Maucha, G., Pataki, R., Kleeschulte, S., Hazeu, G. y Littkopf, A. (2021). CORINE Land Cover Product User Manual (Version 1.0). Copernicus Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/en/technical-library/clc-product-user-manual/@@download/file>

- Camargo, C., Pacheco, C. y López, R. (2017). Erosión hídrica, fundamentos, evaluación y representación cartográfica: una revisión con énfasis en el uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica. *Gestión y Ambiente*. Vol. 20(2), 265-280.
- Camargo, C., Calderón, A., Lobo, J. y Ovalles, Y. (2020). Identificación de conflictos y propuesta de asignación de usos de la tierra en la subcuenca quebrada Mejías, municipio Antonio Pinto Salinas, estado Mérida, Venezuela. *Revista de Topografía Azimut*, 46-65.
- Canadell, J., P.M.S. Monteiro, M., Costa, L., Cotrim da Cunha, P., Cox, A., Eliseev, S. y otros. (2021). Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. In *Climate Change. En J. Canadell, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (págs. 673–816). United Kingdom and New York: Cambridge University Press Cambridge.
- Cárdenas et al., (2024). Cambios en las coberturas del suelo en Mocoa, Putumayo y su relación con la intensificación de los efectos de las crecidas torrenciales. DOI: <https://doi.org/10.15446/ga.v27n2.105057>
- Carlowicz, M. (2012). Seeing Forests for the Trees and the Carbon: Mapping the World's Forests in Three Dimensions. Disponible en: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/ForestCarbon/page1.php>
- Cartografía Nacional. 1976. Mapas escalas: 1:100.000. Ed. 1-DCN. Caracas.
- Casanova, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. 2da edición. Universidad Central de Venezuela. Consejo de desarrollo científico y humanístico.
- CEPAL. (2003). La pobreza rural en América Latina Lecciones para una reorientación de las políticas. Santiago de Chile: FAO - RIMISP.
- Chacón, E., Ulloa, A., Tovar, W., Márquez, T., Sulbarán, E. y Rodríguez, M. (2013). Sistema de clasificación ecológico y mapas de ecosistemas: enfoque conceptual-metodológico para Venezuela. *Ecotrópicos*, 26(1-2):1-27.
- Chacón, E. y Suarez, P. (2020). Mapa bioclimático de la Cordillera de Mérida. *Ecotrópicos*, Revista de la Sociedad Venezolana de Ecología, 1-14.
- Chazdon, R. y Montgomery, R. 2002. La adquisición de carbono en plantas. *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. LUR, Cartago, Costa Rica, 225 – 250.

- Chuvienco, E. 2008. Teledetección Ambiental. La observación de La Tierra desde el Espacio. Ariel Ciencia. Barcelona-España. 583 p.
- Chuvienco, E. 2016. Fundamentals of Satellite Remote Sensing an environmental Approach (2nd ed.). CRC Press Taylor and Francis Group. <https://doi.org/10.1111/phor.12184>
- Centro De Investigación Y Desarrollo De Información Geográfica - CIAF. (2005). Interpretación visual de imágenes de sensores remotos y su aplicación en levantamientos de coberturas y usos de la tierra. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Cifuentes, M., Romero, T., Brenes, C. y Velásquez, S. (2018). Manual Centroamericano para la medición de carbono azul en manglares. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Disponible en: <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8719>
- CIIFEN. (2022). Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. Recuperado el 28 de Marzo de 2025, de Escenarios y Proyecciones: <https://ciifen.org/escenarios-y-proyecciones/#>
- Clemente-Arenas, E. (2022). Carbono almacenado en la biomasa aérea y su valoración económica en los sistemas agroforestales de la EEA San Bernardo, Madre de Dios - Perú. Revista Forestal del Perú, 37, 54-68.
- Conrad (2015). Confusion Matrix (Polygons / Grid). SAGA
- Cordova, J., Artigas, J. y López, J. (2016). Producción de sedimentos en la cuenca del embalse Santo Domingo. Caracas: Universidad Central de Venezuela, Universidad Simón Bolívar. XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICALIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SETIEMBRE DE 2016
- COPERNICUS. (2018). El programa Copernicus aplicado a la producción y gestión de la información geoespacial. Proyecto cofinanciado por la Comisión Europea mediante acuerdo 2018/SI2.810140/04. https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/Copernicus_FPCUP_IGNCNIG.pdf
- CORPOANDES. 2014a. Dossier municipal, Cardenal Quintero. Directorio de la Corporación de los Andes. Mérida.
- CORPOANDES. 2014b. Dossier municipal, Pueblo Llano. Directorio de la Corporación de los Andes. Mérida.

- Corrales, R. 2010. Estimación de cambios en la cobertura y uso del suelo de un sector de la zona sur de Honduras. *Revista Ciencias Espaciales*, 2(3):25-38.
- Crespo, X., Monge, L., Sancho, J. y Hernandez, O. (2024). Calculation of carbon sequestered through remote sensing in a metropolitan park in the city of Quito, Ecuador. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 5(1), e24021. <https://doi.org/10.51798/sijis.v5i1.743>
- Cuchiatti, A., Marcotti, E., Conti, G., Casanoves, F., Mazzarino, M., Varieretti, M., Díaz, S. y Pérez, N. (2017). Uso de la tierra y ambiente local de descomposición en el Chaco Semiárido de Córdoba, Argentina. *Ecología Austral*, 27: 326 – 339. <https://doi.org/10.25260/EA.17.27.3.0.434>
- Darvishzadeh, R., Atzberger, C. y Skidmore, A. 2006. Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index. *Proceedings of ISPRS Commission VII Mid-term Symposium, Enschede, the Netherlands (8–11 Mayo 2006)*
- De la Colina, A. J., Marmol, E., Morales, G., Temarit, I., Roffe, T., Oliveros, A., y otros. (2015). *Cartografía De La Cobertura Y El Uso De La Tierra A Escala Municipal. Propuesta Metodológica*. ResearchGate.
- De la Rosa, D. (2008). *Evaluación Agro-Ecológica de Suelos para un desarrollo rural sostenible*. Madrid - España: Mundi-Prensa.
- Rincón, I. (2011). *Análisis espacial de la cobertura del bosque en Venezuela*. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Tesis. Reubicar o sacar
- Delgado, L. (2018). Heterogeneidad del paisaje y diversidad de especies arbóreas en un bosque tropical. *Desarrollo y validación de una propuesta metodológica*. *Ecosistemas*, 27(1): 105-115.
- Delgado, J. y León, Y. (2017). Musgos (Bryophyta) de bosques de *Polylepis sericea* (Rosaceae) del estado Mérida (Venezuela). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 52(2), 295-313.
- Duarte, E., Emmanuelli, P., Milla, F. y Orellana, F. (2016). *Validación del mapa de cobertura forestal y uso de la tierra del año 2012. Sitio piloto Cantón de Puriscal*. Costa Rica. República Federal de Alemania: Ministerio Federal del Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Obras Públicas y Seguridad Nuclear.
- European Food Safety Authority – EFSA. 2025. El papel de las plantas. <https://www.efsa.europa.eu/es/plh4l/role-plants>

- Ellis, E., Goldewijk, K. K., Siebert, S., Lightman, D., y Ramankutty, N. (2010). Anthropogenic Transformation of the Biomes, 1700 to 2000. *Global Ecology and Biogeography*, 589–606.
- EOS - EOS Data Analytics. (2025a). Agricultura Intensiva: Propiedades e Impacto Ambiental.. Recuperado el 20 de Diciembre de 2023, de: <https://eos.com/es/blog/agricultura-intensiva/>
- Earth Observing System - EOS. (2025b). Reforestación: Una Nueva Oportunidad Para La Tierra. Recuperado el 19 de Abril de 2025, de <https://eos.com/es/blog/reforestacion/>
- Earth Observing System - EOS. (2025c). Drones Y Satélites En El Sector Agrícola. Recuperado el 16 de Abril de 2025, de <https://eos.com/es/blog/drones-y-satelites-para-agricultura/>
- ESRI. 2021. Mejorar la visualización de datos ráster. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/enhancing-rasters-based-on-the-values-in-the-display.htm>
- Ewel, J. y Madriz, A. (1968). Zonas de Vida de Venezuela, memoria explicativa del mapa ecológico . Caracas, Venezuela : Ministerio de Agricultura y Cria, Dirección de Investigación.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (1976). Mapa mundial de suelos 1:5.000.0000. Food & Agriculture Organization.
- FAO - Food and Agriculture Organization. (2000). Sistema de Clasificación de la Cobertura Terrestre (LCCS): Conceptos de Clasificación y Manual del Usuario. Recuperado el 18 de Abril de 2025, de https://www-fao-org.translate.goog/4/x0596e/X0596e01.htm?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- FAO - Food and Agriculture Organization. (2002a). Captura de Carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Paris, Francia : Institut national de recherche agronomique, FAO.
- FAO - Food and Agriculture Organization. (2002b). Capítulo 46. Estudio sobre los cambios de la cubierta forestal en los países tropicales 1980-2000. Recuperado el 15 de Abril de 2025, de <https://www.fao.org/4/y1997s/y1997s1i.htm>

- FAO - Food and Agriculture Organization. (2025). REDD+ Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación de los bosques. Recuperado el 14 de Abril de 2025, de <https://www.fao.org/redd/initiatives/es/>
- FAO - PNUMA. (2020). El estado de los bosques del mundo. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación EL ESTADO DEL MUNDO.
- FAO y Ministerio del Poder Popular para el Ecosocialismo - MINEC. 2022. Boletín Informativo-Ordenación forestal sustentable y conservación de bosques en la perspectiva ecosocial. GCP/VEN/011/GFF, Año 2022 | N° 2. Caracas.
- Fan, L., Cai, T., Wen, Q., Han, J., Wang, S., Wang, J. y Yin, C. (2023). Scenario simulation of land use change and carbon storage response in Henan Province, China: 1990–2050. *Ecological Indicators*, 154, 110660. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110660>
- Fick, S.E. y R.J. Hijmans. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37 (12): 4302-4315.
- Fitzpatrick, E. (2011). Introducción a la ciencia del suelo. Editorial Trillas.
- Flores, J. (2013). Propuesta metodológica para la estimación espacio-temporal de la biomasa aérea a partir de imágenes de satélite en un bosque tropical de Los Llanos Occidentales De Venezuela . Merida: CEFAP - Universidad De Los Andes.
- Franco, R. (2023). CLC Colores RGB. Recuperado de: <https://rodolfofrancoweb.com/p-remota/corine-land-cover/clc-colores-rgb/>
- Fonseca, L. (13 de 06 de 2016). Humedales en los Andes Merideños, una visión sedimentológica y geomorfológica. Recuperado el 09 de 05 de 2025, de [wordpress.com: https://luisfonsecablog.wordpress.com/2016/06/13/humedales-en-los-andes-meridenos-una-vision-sedimentologica-y-geomorfologica/?utm_source=chatgpt.com](https://luisfonsecablog.wordpress.com/2016/06/13/humedales-en-los-andes-meridenos-una-vision-sedimentologica-y-geomorfologica/?utm_source=chatgpt.com)
- Formaggio, L. (2024). ¿Qué es una cuenca hidrográfica? *Revista Ciencias de La Tierra*. Recuperado el 16 de Abril de 2025, de <https://revistacienciasdelatierra.com/geociencias/que-es-una-cuenca-hidrografica/10500/>
- Fu, H., Zhao, H., Liu, G., Zhang, Y., Huangfu, X. y Jiang, J. (2025). Forest aboveground carbon storage estimation and uncertainty analysis by coupled

multi-source remote sensing data in Liaoning Province. *Ecological Indicators*, 176, 113729. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113729>

Gasparri, N., Parmuchi, M., Bono, J., Karszenbaum, H. y Montenegro, C. 2007. Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina. En XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección (pp. 19-21).

GEDI Ecosystem Lidar. (2025). Mission Overview. <https://gedi.umd.edu/mission/mission-overview/>

GFW - Global Forest Watch. (2014). Monitoreo de bosques diseñado para la acción. Disponible en: <https://www.globalforestwatch.org/>

Gobierno de Navarra. (2011). Clasificación climática de Köppen. <https://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>

Guevara, P. (2000). Sistemas de conservación y rehabilitación de cuencas. Valencia, Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico, Universidad de Carabobo.

Gutiérrez, N., Gärtner, S., López, J., Pacheco, C. y Reif, A. (2013). The recovery of the lower montane cloud forest in the Mucujún watershed, Mérida, Venezuela. *Reg Environ Change* 13, 1069–1085. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0413-y>

Gutiérrez, D., Ochoa, G., Oballos, J., y Velásquez, J. C. (1998). Suelos de la Cuenca del Santo Domingo Sector Las Mesas, Caracterización fisicoquímica, Mérida Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 42(2), 141-147.

Gutiérrez, J. y Osorio, R. (2019). Detección de Cambios y Análisis de la fragmentación de la cobertura forestal, Cuenca del Mucujún, Estado Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, 2-29.

Hansen, MC. (2018). Vegetation Continuous Fields. *Comprehensive Remote Sensing*. 6: 4-12. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10378-1>

Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century carbon forest fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240

Hernández, C., J. Escribano y A. Tarquis. 2014. Comparación del índice de vegetación de diferencia Normalizada obtenido a diferentes escalas en pastos De Dehesa. 53ª Reunión Científica de la SEEP (9-12 junio 2014).

- Hernández, L., Delgado, L., Meier, W. y Durán, C. 2012. Empobrecimiento de bosques fragmentados en el norte de la gran sabana, Venezuela. *Interciencia*, 37(12): 891-898.
- Hoyo, S., Pacheco, C., bustillos, L. y Lopez, R. (2013). Cambio de cobertura y uso de la tierra en la microcuenca El Valle, estado Táchira-Venezuela. Períodos: 1991-2003 y 2003-2013. *Revista Forestal Latinoamericana*, 57-77.
- Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*: 25: 295-309.
- IDEAM, 2010. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM. (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá D.C. Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Disponible en: https://www.corpocesar.gov.co/files/Ref_UnicoyPersistente/Corine_Land_Cover.pdf
- Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales - IDEAM. (2017). Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación. Bogotá, D.C. 110 p.
- Instituto Forestal Latinoamericano – IFLA. (2025). SINIIF Datos de Flora y Fauna.
- IGN. (2020). Teledetección. Instituto Geográfico Nacional - Madrid España. Recuperado el 28 de Noviembre de 2023, de: <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>
- INEGI. (Febrero de 2025). INEGI. Recuperado el 15 de Abril de 2025, de <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imglandsat/#documentacion>
- INPARQUES. (1958). Decreto de Creación Parque Nacional “Sierra Nevada”. Caracas: ESTADOS UNIDOS DE VENEZUELA JUNTA DE GOBIERNO DECRETO N° 398 .
- IPCC (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volumes 1, 2 and 3. Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D.J. and Callander, B.A. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA, Paris, France.

- IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Penman, J., Kruger, D., Galbally, I., Hiraishi, T., Nyenzi, B., Enmanuel, S., Buendia, L., Hoppaus, R., Martinsen, T., Meijer, J., Miwa, K. and Tanabe, K. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/OECD/IEA/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC (2003). Good Practice Guidance for Land Use, land-Use Change and Forestry. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. and Wagner, F. (Eds). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC/IGES, Hayama, Japan.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). Guidelines For National GreenHouse Gas Inventories- Volumen 1- 4: Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU). Hayama, Kanagawa JAPAN: Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. (2021). Cambio Climático Bases Físicas. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Jackson, R. y A. Huete. (1991). Interpreting vegetation índices. Preventive Veterinary Medicine. 11:185 – 200.
- Jaramillo, V. (2004). El Ciclo Global del Carbono. En J. Martínez, & A. Fernández, Cambio Climático: Una visión desde México (págs. 77-86). Coyoacán, Mexico: Instituto Nacional de Ecología - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- JAXA. (2008). ALOS Data Users Handbook Revision C. Earth Observation Research and Application Center Japan Aerospace Exploration Agency. 158 p.
- Karnieli, A., Bayarjargal, Y., Bayasgalan, M., Mandakh, B., Dugarjav, C.; Burgheimer, J., Khudulmur, S., Bazha, S. y Gunin P. 2013. Do vegetation indices provide a reliable indication of vegetation degradation? A case study in the Mongolian pastures. International Journal of Remote Sensing. 34 (17): 6243-6262, DOI: 10.1080/01431161.2013.793865
- Keller, E. y Blodgett, R. (2007). Riesgos Naturales - Procesos de la tierra como riesgos, desastres y catástrofes . Madrid - España: Pearson Educación.
- Kerry, R., Pérez, F., Das, R., y Patra, S., et al. (2022). An overview of remote monitoring methods in biodiversity conservation. Environmental Science and Pollution. 29, 80179–80221. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23242-y>

- Laclau, P. (2006). Fijación de Carbono en Ecosistemas Boscosos y Herbaceos del Norte de la Patagonia. San Martín de Los Andes, Argentina: Universidad Nacional del Comahue.
- Lefebvre, D., Williams, A. G., Kirk, G. J., Burgess, P., Meersmans, J., Silman, M., Román-Dañobeytia, F., Farfan, J. y Smith, P. (2021). Assessing the carbon capture potential of a reforestation project. *Scientific reports*, 11(1), 19907. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99395-6>
- Leroy, D. (2021). La agricultura de los Andes venezolanos: De la intensificación a la crisis, 1960-2019. *Historia Agraria - Revista de agricultura e historia rural*, 173-207.
- Leung, L., Joseph, R., Tselioudis, G., Bruhwiler, L., Cook, B., Hall, A., y otros. (2023). La Quinta Evaluación Nacional del Clima - Capítulo 3. Procesos de los Sistemas de La Tierra . Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration.
- Li, Z., y Fang, H. (2016). Impacts of climate change on water erosion: A review. *Earth-Science Reviews*, 163, 94-117.
- Liborius, A. (2012). Geología y modelo petrogenético de los granitoides que afloran en la zona de pico El Águila – Piñango. Mérida estado Mérida, Venezuela. Mérida - Venezuela: Universidad de Los Andes.
- Londoño, C. (2001). Cuencas Hidrográficas: Bases Conceptuales- Caracterización - Planificación - Administración. Ibagué: 2001.
- López, N. (2025). Determinación de cambios de cobertura y uso de la tierra para la estimación de flujos de Carbono en Biomasa en las Áreas Mayor Anaco y Mayor Oficina de PDVSA Gas, S.A., Distrito Anaco. Los Teques, Estado Miranda: Universidad Venezolana de Hidrocarburos.
- Lozano, E. (2006). Análisis de Cambio Multitemporal de uso de la Tierra en la Cuenca Alta del Río Sto Domingo, Estado Mérida, Venezuela. Mérida - Venezuela: Universidad de Los Andes FCFA - CEFAP Programa de Manejo de Cuencas.
- Madi, Y., Noite, R., Rivas, E., Vázquez, J., Rodríguez, J., Valdés, L. y otros. (2014). Ecosistemas de Venezuela . Caracas - Venezuela : FONACIT - Ministerio del Poder Popular para El Ambiente - Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras.

- Madugundu, R., Al-Gaadi, K. A., Patil, V. C. y Tola, E. (2014). Detection of Land Use and Land Cover changes in Dirab region of Saudi Arabia using remotely sensed imageries. *American Journal of Environmental Science*, 10 (1): 8-18.
- Malaver, R. Z., Camargo, R. C., Osorio, M. A., y Andrades, G. J. (2023). Cambios En Lacobertura Y Usos De La Tierra En El Municipio De Antolín Del Campo, Estado De Nueva Esparta – Venezuela, Durante Los Períodos 2015 – 2018 Y 2018 – 2022. *Revista de Ciencias*, Vol26 Num 1.
- Marquina, A., Badia, A., Romagosa, F. y Mejía, J. (2024). Una metodología para la identificación y caracterización del paisaje en la cuenca alta del río Santo Domingo - Venezuela. *Cuadernos de Geografía Revista Colombiana de Geografía* 33 (2), 369-392. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n2.104052>
- Marvel, K., W. Su, R., Delgado, S., Aarons, A., Chatterjee, M., Garcia, Z., y otros. (2023). Cap. 2. Tendencias climáticas En: *La Quinta Evaluación Nacional del Clima*. Washington, DC, USA: Global Change Research Program.
- Medina Silva, S.; Gutierrez Cedillo, J.; Balderas Plata, M.; Perez, J. (2023). Fragmentación forestal y captura de carbono en un Parque Nacional del Estado de México. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*. 15(27) Sección I: 1-21. On-line: www.revistageosig.wixsite.com/geosig
- Mercy, M. (2017). Assessment of the effects of climate change on land use and land cover using remote sensing: A Case Study from Kenya. United Nations University Institute for Integrated Management of Material Fluxes and of Resources (UNU-FLORES). Disponible en: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:5940/DNC_WorkingPaper_No3.pdf
- MINEC. (2019). Cambio Climático. Caracas - Venezuela: Fundambiente.
- MINISTERIO DEL PODER POPULAR PARA EL ECOSOCIALISMO, HABITAT Y VIVIENDA - MINEVH. (2014). Mapa de cobertura vegetal de Venezuela. Caracas – Venezuela.
- Mogollón, J. P., Fernández, T., Garrido, H., Quintero, D., Cordero, A., Castillo, Y., Veliz, T. y Alejos, I. (2022). Captura y emisión de carbono en suelos de cafetales bajo diferentes tipos de sombra en Venezuela. *Suelos Ecuatoriales*, 52(1), 71-91.
- Monasterio, M. (1980). Estudios Ecológicos en Los Páramos Andinos. Mérida. Mérida - Venezuela: Universidad de Los Andes - Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales.

- Montanarella, L., Pennock, D. y McKenzie, N. (2016). Estado Mundial del Recurso Suelo. Roma, Italia: FAO.
- Montero, A. y Viales, R. (2015). La teoría del cambio en el paisaje a partir del cambio del uso de la tierra y la cobertura del suelo (Enfoque LUCC). Su utilidad para la historia ambiental. *Revista Reflexiones*, 94 (2), 25 – 33.
- Mora, M. (2022). Análisis de la dinámica arbórea en tres sectores de la Selva Nublada de la Mucuy (Mérida, Venezuela). Mérida - Venezuela: Universidad de Los Andes - FCFA.
- Mróz, M. y Sobieraj, A. 2004. Comparison of several vegetation indices calculated on the basis of a seasonal spot Xs time series, and their suitability for land cover and agricultural crop identification. *Technical sciences*. (7): 39 – 66.
- Naranjo, M. E. y Duque, R. (2004). Estimación de la oferta de agua superficial y conflictos de uso en la cuenca alta del río Chama, Mérida Venezuela . *Interciencia*, vol. 29, núm. 3, 130-137.
- NASA. 2025. Landsat Science. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- NV5 Geospatial Solutions. (2018, 20 de mayo). Calculate Confusion Matrices. <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/CalculatingConfusionMatrices.html>
- Ochoa, G., Oballos, J., Sánchez, J., Sosa, J., Manrique, J. y Velásquez, J. C. (2000). Variación del carbono orgánico en función de la altitud. Cuenca del río Santo Domingo, Mérida-Barinas, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 79-87.
- Ometto, J. P., Gorgens, E. B., de Souza Pereira, F. R., Sato, L., de Assis, M. L. R., Cantinho, R., y Keller, M. (2023). A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. *Scientific Data*, 10, 668. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02575-4>
- Organización de Estados Americanos - OEA. 1977. El Salvador - Zonificación Agrícola - Fase II - Sistema de Información para el Desarrollo. Organización de los Estados Americanos Washington, D.C. Metodologías basadas en interpretación aérea. <https://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea35s/oea35s.pdf>
- Organización Meteorológica Mundial – OMM. (2021). Guía de la OMM sobre el Cambio Climático para Observadores del Clima. ONU.

- Osorio, R., Lozano, E. y Graterol, G. (2009). Cartografía de la cobertura y uso de la tierra en la cuenca Alta del Río Santo Domingo, Estado Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 183-190.
- Orr, B.J., A.L. Cowie, V.M. Castillo Sánchez, P. Chasek, N.D. Crossman, A. Erlewein, G. Louwagie, M. Maron, G.I. Metternicht, S. Minelli, A.E. Tengberg, S. Walter y S. Welton. (2017). *Scientific Conceptual Framework for Land Degradation Neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Bonn, Germany.
- Ovalles, Y., Méndez, E., Ripanti, F., Ramírez, G. y León, J. (2012). El plan de ordenación y desarrollo de cuencas hidrográficas en la construcción de futuro. *Revista Forestal Venezolana*, 56(1), 83-94.
- Pacheco, C., Mollicone, D. y Aguado, I. (2011). Identificación de las áreas “hot spot” de deforestación en Venezuela. *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.2779.
- Pacheco, C. E. y Pozzobon, E. N. (2006). *Manual de Ejercicios de Laboratorio Fotogrametría y Fotointerpretación* Publicaciones Vicerrectorado Académico CODEPRE Universidad de Los Andes. 86 p.
- Pacheco-Angulo, C., Plata-Rocha, W., Serrano, J., Vilanova, E., Monjardin-Armenta, S., González, A. y Camargo, C. A Low-Cost and Robust Landsat-Based Approach to Study Forest Degradation and Carbon Emissions from Selective Logging in the Venezuelan Amazon. *Remote Sens.* 2021, 13, 1435. <https://doi.org/10.3390/rs13081435>
- Pan, S., Tian, H., Lu, C., Dangal, S. y Liu, M. 2015. Net primary production of major plant functional types in China: Vegetation classification and ecosystem simulation. *Acta Ecologica Sinica*, 35: 28–36. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.03.001>
- Panda, S. S., Ames, D. P. y Panigrahi, S. 2010. Application of vegetation indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*. 2(3): 673-696.
- Parlamento Europeo. (23 de Marzo de 2023). Cambio climático: gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Recuperado el 28 de Marzo de 2025, de <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>

- PCNCC. (2005). Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela. Caracas: MARN, PNUD, GEF.
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madriral, M. A. (2021). Estimación de biomasa aérea y carbono con Teledetección en bosques alto Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque. *Revista cartográfica*, (102), 99-123. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Pérez, B., Serna, A., Delgado, J., Caballero, M. y Villa, G. (2020). El Programa Copernicus Aplicado a La Producción y Gestión de La Información Geoespacial. https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/9_Corine_Land_Cover.pdf
- PETRÓLEOS DE VENEZUELA S. A. - INTEVEP. (1999). Léxico Estratigráfico Electrónico de Venezuela. <https://labgeomucv.ing.ucv.ve/dist/Lexico/index.html>
- Pineda, O. (2011). Analisis de Cambio de uso del Suelo mediante percepción remota en el Municipio Del Valle de Santiago. Mexico, D. F.: Centro de Investigaciones en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo A.C. CentroGeo.
- Pincay, M. (2024). Pérdida de cobertura arbórea (período 2008–2018) a través de la herramienta Global Forest Watch en la parroquia Noboa. UNESUM-Ciencias. *Revista Científica Multidisciplinaria*, 8(2), 96-105. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v8.n2.2024.96-105>
- Pinto, R. (1979). Estudio Fisio-Geografico de la Cuenca Alta del Rio Santo Domingo con fines de Planificación Conservacionista. Mérida - Venezuela: Universidad de Los Andes - Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales - Escuela de Geografía.
- Pontius, R.G., Shusas, E y Mceachern, M. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268.
- Posada, E. y Salvatierra, H. (2016). Análisis comparativo de las metodologías de los sistemas de clasificación de la cobertura de la tierra LCCS y CORINE, para mapeo de coberturas terrestres. *Revista Geográfica*, 157, 135-160.
- Pool-Novelo, L., Kú-Quej, V., Chi-Quej, J. y Mendoza-Vega, J. 2019. Estimación del contenido de carbono orgánico en suelos y vegetación del estado de

Campeche. Propuesta metodológica. Terra Latinoamericana, 37, 317-328.
<https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.461>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. 2023. Cómo pueden ayudarnos los bosques a limitar los impactos del cambio climático. <https://climatepromise.undp.org/es/news-and-stories/como-pueden-ayudarnos-los-bosques-limitar-los-impactos-del-cambio-climatico#:~:text=Un%20bosque%20saludable%20es%20un,m%C3%A9trica%20de%20CO2%20al%20a%C3%B1o>.

Raffay, M. R. M., Bagheri, M., Marzuki, A., Gholami, I. y Anuar, M. A. K. (2025). Monitoring and analyzing land use changes for sustainable development in Teluk Bahang, Penang, Malaysia: a GIS-based approach. Journal of Engineering and Applied Science, 72(1), 1-41. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00601-3>

Ramírez, G., Mendez, J., Vilanova, E., Gutierrez, N., Andrades, J., Gamez, L. (2016). Almacenamiento de Carbono y Captura de CO₂ como Servicios Ecosistemicos de la Cuenca del Río Mucujúm . Revista Forestal Venezolana vol.60, 7-16. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/45192>

RBV. (2017). Segunda Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela. Caracas: Fundación de Educación Ambiental.

Reef Resillience Network. (2023). Accelerating Learning & Action to Protect Coral Reefs Globally. The Nature Conservancy.

Riverí, L., y Ginarte, M. (Septiembre de 2023). EL CAMBIO CLIMÁTICO: SUS EFECTOS A NIVEL MUNDIAL Y SU REGULACIÓN EN EL DERECHO INTERNACIONAL. Revista ELectronica de derecho Ambiental N° 41.

Rocha, A. (1998). Introducción a la Hidráulica Fluvial. Perú: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

Rodríguez, V. y S. Bullock. 2013. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 4 (4): 611 – 623.

Rodríguez, J. y Rojas-Suarez, F. (1995). Libro Rojo de la Fauna Venezolana. Fundación Polar y Provita. Caracas, Venezuela.

- Rodríguez, J., García-Rawlins, A y Rojas-Suárez, F. (eds.). (2015). Libro Rojo de la Fauna Venezolana. Cuarta edición. Provita y Fundación Empresas Polar, Caracas, Venezuela.
- Rodríguez, J., Rojas, F. y Hernandez, D. (2010). Libro Rojo de los Ecosistemas Terrestres de Venezuela. Caracas - Venezuela: Lenovo Venezuela, Fundación Empresas Polar, PROVITA.
- Rodríguez-Morales, M., Chacón-Moreno, E. y Ataroff, M. (2009). Transformación del paisaje de selvas de montaña en la cuenca del Río Capaz, Andes Venezolanos. *Ecotropicos*, 22(2), 64-82.
- Rosales, A. (2016). Leyenda CLC-CR para la generación de/para uso/cobertura de la tierra de Costa Rica (Leyenda Corine Land Cover versión Costa Rica v 1.0). Recursos digitales. San José, Costa Rica: MAG/INAT.
- Rosales, A. y García, P. (2015). La cuenca hidrográfica y su gestión integral. En A. Gabaldón, A. Rosales, E. Buroz, J. Córdova, G. Uzcátegui y L. Iskandar (Eds.), *Agua en Venezuela: Una Riqueza Escasa* (pp. 867-914). Fundación Polar.
- Rosenstock, T., Rufino, M., Butterbach-Bahl K., Wollenberg, E., Richards M. (2016) *Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture* Gund Institute for Ecological Economics University of Vermont Burlington, VT, USA. DOI 10.1007/978-3-319-29794-1.
- Rouse, J., R. H. Haas, J. A. Schell, y D. W. Deering. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with erts. In *Proceeding of the Third ERTS Symposium*, NASA SP-351 I, 309-317.
- Sánchez, G. (2016a). Köppen climate types of Venezuela. DOI: 10.13140/RG.2.2.19227.58408
- Sánchez, G. (2016b). La sierra de Santo Domingo: reconstrucciones biogeográficas para el cuaternario de una antigua cadena montañosa nevada
- Sánchez, M., Llambí, L., Gámez, L., Rodríguez, G., Pelayo, R., Ataroff, M., y otros. (2024). Diversity, structure and dynamics of tropical montane forests: Insights from permanent-plot monitoring in the Venezuelan Andes. *Ecología Austral* 34, 286-304. <https://doi.org/10.25260/EA.24.34.2.0.2349>

- Schubert, C., y Vivas, L. (1993). El Cuaternario de La Cordillera de Mérida - Andes Venezolanos. Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes / Fundación POLAR.
- Sentinel Hub. (6 abril, 2020). False color infrared product. https://custom-scripts.sentinel-hub.com/custom-scripts/airbus_pleiades/false_color/
- Sevilla, V., Vilorio, J., Rey, J., Comerma, J. (2021). Reserva de Carbono Orgánico del Suelo en Venezuela: Ensayo de Cartografía Digital.
- Soria, J. y Granados, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del Landsat. *Ciencia Ergo Sum.* 1(2): 167 – 174.
- Silleos, N., Alexandridis, T., Gitas, I. y Perakis, K. (2006). Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years. *Geocarto International.* 21(4): 21-28.
- Sovdat, B., Kadunc, M., Batič, M. y Milčinski, G. (2019). Natural color representation of Sentinel-2 data. *Remote sensing of environment*, 225, 392-402.
- Suárez-Parra, K. V., Cély-Reyes, G. E. y Forero-Ulloa, F. E. (2016). Validación de la metodología Corine Land Cover (CLC) para determinación espacio-temporal de coberturas: caso microcuenca de la quebrada Mecha (Cómbita, Boyacá), Colombia. *Biota Colombiana*, 17(1), 1-15. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21068/C2016v17r01a01>
- Tafur, E., Veneros, J., García, L., Gamarra, Ó., Farje, J. y Santistevan, M. (2022). Técnicas no destructivas para la estimación de la biomasa forestal aérea. *IDESIA*, 40 (3), 7 – 17. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000300007>
- Thenkabail, P. S. (2016). Remotely sensed data characterization, classification, and accuracies. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton – United States of America. 712 p.
- Thornton, P., Reed, G., Xian, L., Chini, A., East, J., Field, C., Hoover, C., Poulter, B., Reed, S., Wang, G y Zhu, Z. (2023). Cap. 6. Cambios en la cobertura terrestre y en el uso de la tierra. En: Washington, DC,USA: U.S. Global Change Research Program.
- Torrice, M., Sayra, E., Siles, D., Limache, F. y Mamani, F. (2019). Caracterización de Cuencas. Tacna, Perú: Universidad Nacional Jorge Basadre - Facultad de Ciencias Agropecuarias.

- UFORGA-ULA (Unidad de prestación de servicios y proyectos forestales, geográficos, agropecuarios y ambientales de la Universidad de Los Andes). (2015). “Plan de Desarrollo Urbano Local (PDUL) Barinas, estado Barinas (2015-2030). Mérida, Venezuela”. Asesoría Técnica. Mérida: Universidad de Los Andes.
- U.S. Global Change Research Program – USGCRP. 2023. Terrestrial Carbon Storage. <https://www.globalchange.gov/indicators/terrestrial-carbon-storage>
- U.S. Environmental Protection Agency - EPA. (07 de Noviembre de 2024). United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 29 de Marzo de 2025, de <https://www.epa.gov/climatechange-science/basics-climate-change>
- UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025). ¿Qué es el Protocolo de Kyoto? Recuperado el 15 de Abril de 2025, de: https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- United States Environmental Protection Agency - EPA. (15 de Enero de 2025). United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 29 de Marzo de 2025, de b: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-length-growing-season>
- United States Environmental Protection Agency EPA. (26 de Marzo de 2025). United States Environmental Protection Agency. Recuperado el 29 de Marzo de 2025, de a: <https://www.epa.gov/climate-indicators/ecosystems>
- Vargas, Y. 2020. Revisión de metodologías de clasificación para la clasificación de las coberturas de la tierra. Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, Antioquia. Medellín, Colombia.
- Vásquez, A., Mejía, A., Manco, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J. y otros. (2016). Manejo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. La Molina - Perú: Universidad Nacional Agraria de Molina.
- Vásquez, J., Alvarado, M. y Pineda, M. (2024). Revisión cuantitativa (1990-2022) del ciclo del carbono y los flujos de CO₂ y CH₄ de manglares. Madera y Bosques 30(04).
- Velázquez, A., Medina, C., Durán, E., Amador, A. y Gopar, L. (2016). Standardized Hierarchical Vegetation Classification. Mexican and Global Patterns. Springer International. Switzerland, AG. 161 pp.
- Vivas, L. (1992a). Los Andes Venezolanos. Universidad de Los Andes, Consejo de Publicaciones.

- Vivas, L. (1992b). El Cuaternario. Universidad de Los Andes, Consejo de Publicaciones.
- Vivas, L. (2015). La megadiversidad físico-natural del territorio venezolano. Mérida: Editorial Gráficas el Portatítulo.
- White, D. (2004). A Student's Guide to Statistics for Analysis of Cross Tabulations. *World Cultures*, 14(2),179-193.
- World Resources Institute – WRI. (2 de Septiembre de 2021). Cuatro gráficos que explican las emisiones de gases de efecto invernadero por país y por sector. Recuperado el 29 de Marzo de 2025, de <https://es.wri.org/insights/cuatro-graficos-que-explican-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-por>
- Yanes, A. y Guevara, J. (1975). Complejo Hidroelectrico Gral José Antonio Páez-Sedimentos en el Embalse. Caracas: CADAPE, Empresa Nacioanl de Energía Electrica.
- Yang, J. G. (2013). El papel de la teleobservación por satélite en los estudios sobre el cambio climático. *Naturaleza Cambio climático*, vol. 13, 875 - 883.
- Young, A (ed). 1997. *Agroforestry for soil management*. 2 ed. Nairobi, Kenya, CAB international. ICRAF. Consultado 15 mar. 2021. Disponible en <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19971913255>
- Zafar, Z., Zubair, M., Zha, Y., Mehmood, M. S., Rehman, A., Fahd, S. y Nadeem, A. (2024). Predictive modeling of regional carbon storage dynamics in response to land use/land cover changes: An InVEST-based analysis. *Ecological Informatics*, 82, 102701. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102701>
- Zhang, D., Wang, H., Wang, X. y Lü, Z. (2020). Accuracy assessment of the global forest watch tree cover 2000 in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 87, 102033. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102033>
- Zinck, A. (1980). Valles de Venezuela. Caracas, Venezuela: Cuadernos LAGOVEN, El Hombre y su ambiente