



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CARBONO DEL CAMBIO DE USO DE LA
TIERRA A PARTIR DEL ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES
SATELITALES EN LA PROVINCIA DE MATANZAS, CUBA

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ERNESTO ROLANDO CARRILLO VITALE

TUTORES DE TESIS:
DRA. YAN GAO (CIGA, UNAM)
DR. JEAN FRANCOIS MAS CAUSSEL (CIGA, UNAM)

MORELIA, MICHOACÁN, DICIEMBRE, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

<i>Contenido de tablas</i>	iv
<i>Contenido de ilustraciones</i>	vi
AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO	8
1.1. Efecto invernadero y cambio climático	8
1.1.1 Efecto invernadero	8
1.1.2 Principales gases de Efecto Invernadero	9
1.2. Ciclo del carbono y biomasa vegetal	10
1.2.1 Ciclo del carbono	10
1.2.2 Perspectiva general de las emisiones y absorciones de carbono en el subsector Uso de la Tierra	11
1.2.3 Depósitos de carbono	13
1.3. Cobertura y uso de la tierra	14
1.4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Cuba	15
1.5. Uso de la tierra en Cuba	19
1.5.1 Uso de la tierra en la provincia de Matanzas	21
1.6. Zona de estudio. Provincia de Matanzas	22
1.6.1 Caracterización físico-geográfica	22
2. METODOLOGÍA	28
2.1. Imágenes satelitales y procesamiento digital	28
2.1.1 Características del tipo de sensor	28
2.1.2 Adquisición de datos	30
2.2. Procesamiento de imágenes satelitales	32
2.2.1 Corrección de imágenes satelitales	32
2.3. Métodos de clasificación de imágenes satelitales	33
2.3.1 Método de clasificación de imágenes basada en objetos	34

2.4. Leyenda de uso de la tierra	36
2.5. Clasificación del cambio de uso de la tierra	40
2.6. Evaluación de la confiabilidad temática del mapa	41
2.7. Método para la estimación de carbono	44
2.7.1 Carbono en biomasa aérea y subterránea.....	44
2.7.2 Carbono en suelo.....	46
2.7.3 Conversión de cambios de existencias de carbono a emisiones de CO ₂	48
2.7.4 Análisis de categorías principales	48
3. RESULTADOS: CAMBIOS EN EL USO DE LA TIERRA EN LA PROVINCIA DE MATANZAS	50
3.1. Clasificación del uso de la tierra.	50
3.2. Cambio de uso de la tierra.....	55
3.3.1 Período 1989-1994	55
3.3.2 Período 1994-1999	57
3.3.3 Período 1999-2004	59
3.3.4 Período 2004-2009	61
3.3.5 Período 2009-2014	63
3.3.6 Período 2014-2019	65
3.3 Intensidad del cambio de uso de la tierra.....	67
3.4 Validación del cambio de uso	68
4. ESTIMACIÓN DE CARBONO POR EL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA	75
4.1. Variación del carbono en biomasa.....	75
4.1.1 Emisiones de carbono en biomasa, 1989	75
4.1.2 Emisiones de carbono en biomasa, 1994	77
4.1.3 Emisiones de carbono en biomasa, 1999	79
4.1.4 Emisiones de carbono en biomasa, 2004	81
4.1.5 Emisiones de carbono en biomasa, 2009	83
4.1.6 Emisiones de carbono en biomasa, 2014	85
4.1.7 Emisiones de carbono en biomasa, 2019	87
4.1.8. Validación del carbono por concepto de área estimada	89
4.1.9. Resumen de emisiones de carbono por biomasa.	90

4.2. Variación del carbono en suelo.....	91
4.1.1 Emisiones de carbono en suelo, 1989	91
4.1.2 Emisiones de carbono en suelo, 1994	92
4.2.3 Emisiones de carbono en suelo, 1999	93
4.2.4 Emisiones de carbono en suelo, 2004	95
4.2.5 Emisiones de carbono en suelo, 2009	97
4.2.6 Emisiones de carbono en suelo, 2014	99
4.2.7 Emisiones de carbono en suelo, 2019	101
4.2.8 Resumen de las emisiones de carbono del suelo	103
4.3. Estimación de la variación total de carbono por el cambio de uso de la tierra.....	104
4.3.1 Estimación de dióxido de carbono por cambio de uso de la tierra. Base de datos extendida.	105
4.4. Categorías principales	108
CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA.....	113
Anexo 1.....	125
Anexo 1.....	127
Anexo 2.....	129
Anexo 2.....	131
Anexo 3.....	133

Contenido de tablas

Tabla 1. Promedio mundial anual de abundancias en superficie y tendencias de los principales GEI. Año 2018.	10
Tabla 2. Definiciones de los depósitos de carbono.	13
Tabla 3. Representación de la matriz de transición general de las categorías de uso de la tierra.	15
Tabla 4. Área agrícola y cultivada en miles de hectáreas (Mha). Cuba.	20
Tabla 5. Área agrícola y cultivada en miles de hectáreas (Mha). Provincia de Matanzas.	22
Tabla 6. Características imagen Landsat 5.	29
Tabla 7. Características imagen Landsat 7.	29
Tabla 8. Características imagen de las imágenes Landsat 8.	30
Tabla 9. Resumen de las imágenes a utilizar.	30
Tabla 10. Correspondencia entre categorías generales del IPCC y las empleadas en este estudio.	40
Tabla 11. Ejemplo de matriz de errores ponderados por área de q clases.	43
Tabla 12. Ecuaciones para obtener los distintos índices de confiabilidad.	44
Tabla 13. Valores por defecto utilizados para la estimación de biomasa.	46
Tabla 14. Referencia por defecto de existencias de C orgánico para suelos minerales (t C/ha).	47
Tabla 15. Referencia por defecto de existencias de C orgánico para suelos minerales (t C/ha).	47
Tabla 16. Área ocupada por categorías de uso (miles de ha).	54
Tabla 17. Tasas de cambio expresadas en %.	55
Tabla 18. Puntos de muestreo estratificados.	69
Tabla 19. Coeficientes de índices de confiabilidad y su intervalo de confianza.	70
Tabla 20. Comparación entre el área del mapa y le área estimada según método de Card (1982).	72
Tabla 21. Intervalos de confianza para el área estimada (ha).	73
Tabla 22. Diferencias en el carbono obtenido con el área del mapa y el área estimada. Período 2014-2019.	89

Tabla 23. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1989-2019 (miles de t de C).....	90
Tabla 24. Emisiones de carbono totales por cambio de gestión del suelo.....	103
Tabla 25. Emisiones totales de carbono, Matanzas, 1989-2019 (miles de t de C).	104
Tabla 26. Comparación de emisiones entre Cuba y Matanzas para los años donde coincidían estimaciones reales.....	108
Tabla 27. Categorías principales por el cambio de uso de la tierra en Matanzas, 2019.....	109

Contenido de ilustraciones

Ilustración 1. Principales fuentes de emisión y absorción de GEI en ecosistemas gestionados.....	11
Ilustración 2. Porcentaje de emisiones de gases en Cuba en Cuba (CO ₂ eq). ..	16
Ilustración 3. Porcentaje de emisiones por sectores en Cuba (CO ₂ eq).	17
Ilustración 4. Tendencia de las emisiones por sectores en Cuba, para los años pares del período 1990-2014.	18
Ilustración 5. Tendencia de las emisiones para el subsector FOLU en Cuba, para los años pares del período 1990-2014.	19
Ilustración 6. Área de estudio. Provincia de Matanzas, República de Cuba. ...	23
Ilustración 7. Ejemplos de algunos usos de la tierra en Matanzas.....	26
Ilustración 8. Diagrama de flujo.	28
Ilustración 9. Escenas Landsat utilizadas.	31
Ilustración 10. Segmentación de la imagen, año 2019.	36
Ilustración 11. Uso de la tierra, Matanzas, 2019.....	50
Ilustración 12. Uso de la tierra, Matanzas, 2014.....	51
Ilustración 13. Uso de la tierra, Matanzas, 2009.....	52
Ilustración 14. Uso de la tierra, Matanzas, 2004.....	52
Ilustración 15. Uso de la tierra, Matanzas, 1999.....	53
Ilustración 16. Uso de la tierra, Matanzas, 1994.....	53
Ilustración 17. Uso de la tierra, Matanzas, 1989.....	54
Ilustración 18. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1989-1994.	56
Ilustración 19. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1989-1994.	57
Ilustración 20. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1989-1994.	57
Ilustración 21. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1994-1999.	58
Ilustración 22. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1994-1999.	59
Ilustración 23. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1994-1999.	59
Ilustración 24. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1999-2004.	60
Ilustración 25. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1999-2004.	61
Ilustración 26. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1999-2004.	61
Ilustración 27. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2004-2009.	62
<i>Ilustración 28. Cambio del uso de la tierra, Matanzas, 2004-2009.</i>	<i>63</i>
Ilustración 29. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2004-2009.	63
Ilustración 30. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2009-2014.	64

Ilustración 31. Cambio del uso de la tierra, Matanzas, 2009-2014.	65
Ilustración 32. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2009-2014.	65
Ilustración 33. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2014-2019.	66
Ilustración 34. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2014-2019.	67
Ilustración 35. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2014-2019.	67
Ilustración 36. Áreas de cambio, Matanzas, 1989-2019.	68
Ilustración 37. Carbono en biomasa debido cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1989.	76
Ilustración 38. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1989.	77
Ilustración 39. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1994.	78
Ilustración 40. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1994.	79
Ilustración 41. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1999.	80
Ilustración 42. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1999.	81
Ilustración 43. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2004.	82
Ilustración 44. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2004.	83
Ilustración 45. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2009.	84
Ilustración 46. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2009.	85
Ilustración 47. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2014.	86
Ilustración 48. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2014.	87
Ilustración 49. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2019.	88
Ilustración 50. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2019.	89
Ilustración 51. Crecimiento porcentual de las emisiones de carbono por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994-2019.	91
Ilustración 52. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 1994.	92
Ilustración 53. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994.	93

Ilustración 54. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 1999.	94
Ilustración 55. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1999.	95
Ilustración 56. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2004.	96
Ilustración 57. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2004.	97
Ilustración 58. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2009.	98
Ilustración 59. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2009.	99
Ilustración 60. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2014.	100
Ilustración 61. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2014.	101
Ilustración 62. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2019.	102
Ilustración 63. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2019.	103
Ilustración 64. Crecimiento porcentual de las emisiones de carbono en el suelo por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994-2019.	104
Ilustración 65. Emisiones de carbono y dióxido de carbono totales por cambio y uso de la tierra, Matanzas, 1989-2020.	106
Ilustración 66. Comparación de emisiones de CO ₂ entre Cuba y la provincia de Matanzas en la categoría de bosque.	107

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a CONACYT por la financiación para poder llevar a cabo este posgrado de excelencia.

A mis tutores, Yan Gao y Jean François Mas por su apoyo incondicional y enseñanzas brindadas.

Al proyecto “*Análisis del patrón espacial de la degradación en selvas y bosques de México con percepción remota en múltiples escalas en el tiempo y espacio*” financiado por CONACYT con clave “Ciencia Básica” SEP285349 por la colaboración y apoyo para diversas actividades.

Al gobierno de los Estados Unidos Mexicanos por brindar la oportunidad de realizar estudios de posgrado en la Universidad Nacional Autónoma de México.

A todos los que de una manera u otra han contribuido a alcanzar estos resultados y confiaron en mí en todo momento.

Dedicada a todos esos que no están presentes, pero que contribuyeron a mi formación personal y profesional: Tuto, Magda, Geysa, Quintín, Aldaya y Pepe.

RESUMEN

En los últimos años ha aumentado la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, provocado por las emisiones de carbono proveniente, entre otras fuentes, del cambio de uso de la tierra. Este ha contribuido a una tercera parte de las emisiones globales de dióxido de carbono. A nivel mundial, se realizan estimaciones del cambio de cubierta y uso de la tierra y su correspondiente impacto en las emisiones de carbono, muchas de ellas sin la perspectiva distribución espacial, sino un enfoque dirigido a la sola contabilidad de dichas emisiones. En Cuba por su parte, aunque resalta la importancia de la cobertura boscosa en su Contribución Prevista Determinada rindiendo al Acuerdo Climático de París, hasta la actualidad, no se cuenta con una distribución espacial de las remociones de carbono por la foresta, ni tampoco posee una contabilidad completa de las emisiones netas por concepto de cambio de uso de la tierra, la cual complementaria estudios de mitigación llevados a cabo en la nación. En el presente trabajo, se determinan las emisiones de carbono debido del cambio de la cubierta de la tierra en la provincia de Matanzas, obteniendo la estimación del cambio de cobertura de la tierra mediante un método híbrido que combina procesos automatizados con la clasificación visual a una escala de 1:100 000 para el período 1989-2019; y estimando el carbono a partir de recomendaciones internacionales. Las emisiones netas de carbono en la provincia de Matanzas para el período 1989-2019 producto del cambio de uso de la tierra, oscilan entre un mínimo de 595 toneladas y un máximo de 924 toneladas removidas de la atmósfera. Las emisiones de CO₂ estimadas en este estudio demuestran la subestimación en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en Cuba, por no contar con todas las subcategorías de emisión que se tiene en cuenta para este estudio. La subcategoría de cambio que más influye sobre el balance de dióxido de carbono total de Matanzas es el matorral que sigue siendo matorral con 2/5 partes de las emisiones de la provincia. Se demuestra la capacidad de remoción de carbono del territorio en estudio por el cambio de uso de la tierra, así como las áreas y subcategorías que deben ser priorizadas para el trazo de políticas para el manejo adecuado de las emisiones de carbono, que puedan contribuir a los compromisos de mitigación del país.

ABSTRACT

In recent years the concentration of carbon dioxide in the atmosphere has increased, caused by carbon emissions from land cover and land use change, among other sources. A third of global carbon dioxide emissions has come from changes in land use and land cover. Changes in land cover and use and its corresponding impact on carbon emissions have been estimated at global level, many of them without the spatial distribution perspective, but rather an approach aimed at accounting for these emissions alone. In Cuba, for its part, although it highlights the importance of forest cover in its Determined Expected Contribution yielding to the Paris Climate Agreement, to date, there is no estimation of spatial distribution of carbon removals by the forest, nor does it have a Complete accounting of net emissions from land use and land cover change, which complements mitigation studies carried out in the nation. In this work, the carbon emissions of the land cover in the province of Matanzas are determined through a hybrid method that combines automated processes with visual interpretation at a scale of 1:100 000 for the period 1989-2019, with carbon estimating following international recommendations. The net carbon emissions in the province of Matanzas for the period 1989-2019 as a result of the change in land use, range between a minimum of 595 tons and a maximum of 924 tons as removals from the atmosphere. The CO₂ emissions estimated in this study show an underestimation in the National Inventory of Greenhouse Gases in Cuba, due to not having considered all the emission subcategories that were taken into account in this study. The subcategory of change that most influences the total carbon dioxide balance of Matanzas is the scrub that continues to be scrub with 2/5 of the province's emissions. The carbon removal capacity of the territory under study is demonstrated in this study of land use and land cover change. This study also recommends the subcategories that should be prioritized for the development of policies for the adequate management of carbon emissions, which can contribute to the country's mitigation commitments.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres se pudieran considerar como reservas de carbono importantes que desempeñan un papel crítico en la compensación de las emisiones de carbono antropogénico (Pacala et al., 2001; Y Pan et al., 2011). Por su parte, estas reservas de carbono van a diferir entre los diferentes paisajes terrestres, así como los distintos usos de la tierra. Y tanto el manejo del uso de la tierra, como las medidas para controlar plagas e incendios pueden afectar el almacenamiento de carbono (Lai et al., 2016).

Desde el Tercer Período de sesiones de la Conferencia de las Partes (COP), en 1997, se aprobó el Protocolo de Kioto, y se estableció un programa para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en relación con los niveles de emisión de 1990 para los países del Anexo I¹ de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en el período comprendido entre el año 2008 y el 2012. Pero, a pesar de las medidas de reducción de emisiones y el fortalecimiento de la voluntad política a nivel internacional, las concentraciones atmosféricas globales de CO₂ rompen récord cada año, y alcanzaron en el año 2018 los 407.8 partes por millón (ppm) (WMO, 2019). Al término del período de vigencia de dicho protocolo se puede decir que este no logra los objetivos de reducción de emisiones previstos.

En el año 2011, en la 17° COP celebrada en Durban (Sudáfrica), dando respuesta al acuerdo número 1 de la COP 13 de Bali (Indonesia), se decide iniciar un proceso para elaborar un nuevo protocolo de mitigación que sustituyera al fracasado Protocolo de Kioto, el cual se fue aplazando por la no conciliación entre los Estados miembros, acentuado por la diferencia entre los países desarrollados y los países en vías al desarrollo. Para la COP 19 realizada en Varsovia (Polonia), se traza una hoja de ruta hacia un pacto global y vinculante, la cual culminaría en la adopción del “*Acuerdo de París*” en la COP 21 (París, Francia) adoptado por 197 países. Este acuerdo se presentó a la firma de los

¹ Se entiende una Parte que figura en el anexo I de la Convención, con las enmiendas de que pueda ser objeto, o una Parte que ha hecho la notificación prevista en el inciso g) del párrafo 2 del artículo 4 de la Convención.

gobiernos a partir del 22 de abril de 2016, y entraría en vigor con la ratificación de 55 Estados partes, y que sumen el 55% de las emisiones globales, a partir de 2020. Dicho acuerdo, implica la entrega de las contribuciones determinadas a nivel nacional (INDC, por sus siglas en inglés) cada cinco años, la cual proporcionará información sobre el nivel de ambición en la reducción de GEI. (CMNUCC, 2015).

La CMNUCC estableció la contabilidad de las emisiones de GEI en 4 sectores: 1) Energía, 2) Procesos Industriales y uso de productos (IPPU, por sus siglas en inglés), 3) Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) y 4) Desechos (IPCC, 2006b). Dentro de estos sectores, AFOLU aporta el 24% de las emisiones directas, siendo el segundo sector en importancia después de Energía (49%) (IPCC, 2014) a nivel internacional. El subsector de silvicultura y otros usos de la tierra (FOLU, por sus siglas en inglés), representó por su parte un 12% de las emisiones en el decenio 2000-2009, aunque al mismo tiempo dicho subsector se considera como sumidero neto de CO₂, lo cual ha sido confirmado en diversos estudios de bosques manejados y no manejados en diferentes regiones (Lewis et al., 2009; Luysaert et al., 2008; Yude Pan et al., 2011; Phillips et al., 1998). Por su parte Houghton et al., (1999) hace referencia a que las emisiones antropogénicas por FOLU fue aproximadamente el 33% del total mundial desde 1850 a 1990, las cuales han ido disminuyendo hasta la actualidad, según consta en Friedlingstein et al., (2006, 2019), como resultado del aporte de la quema de los combustibles fósiles en las emisiones globales (Baccini et al., 2012).

Según Tubiello et al., (2014), durante el periodo 2001-2010, las emisiones netas anuales disminuyeron de 3,133 a 2,816 Mt CO₂ equivalente (eq), como resultado del sumidero neto creciente en los países del Anexo I², combinado con una fuente de emisión neta estable y grande, de los países no incluidos en el Anexo I, de 3,690 a 3,676 Mt CO₂ eq. En el periodo comprendido entre la década de los '90 y la primera década del siglo XXI, el sumidero neto en los países del Anexo

² Refiere al Anexo I de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. En ese anexo figura la lista de los 35 países desarrollados (industrializados) que acordaron limitar sus emisiones de gases que incrementan el efecto invernadero.

l aumentó en un 157%, mientras que la fuente neta en los países no incluidos en el Anexo I tuvo un ligero incremento de 0.7%. Por su parte, a nivel regional, el continente americano fue fuente de emisión en el subsector referido de silvicultura y otros usos de la tierra con una tasa de crecimiento medio anual para la década 2001-2011 de alrededor del 0.9%

Las emisiones totales de GEI de Cuba representan tan solo el 0.1% a nivel mundial, y dado que firmó y ratificó el “Acuerdo de París”, este país está obligado a emitir información sobre las acciones de mitigación que serán implementadas. Para lograr lo anterior, Cuba debería poseer información fiable de emisiones de GEI y de esta manera identificar opciones de mitigación, a dónde irán dirigidas, y qué se podrá esperar como resultado, en cuanto a emisiones evitadas y costos unitarios de dichas reducciones (Rey, 2015).

En este contexto, realizar el inventario de emisiones y remociones de GEI en el subsector de FOLU en Cuba, con datos espacialmente explícitos es un método de buenas prácticas y un medio pragmático que garantizará que el mismo sea coherente, comparable, completo, exacto y transparente. Para de esta manera contribuir con la identificación oportuna y precisa de acciones de mitigación en el territorio nacional; y que sirvan para desarrollar estrategias y políticas de intervención en la mitigación de las emisiones buscando opciones de adaptación al cambio climático global empatadas con las metas de desarrollo (IPCC, 2006b).

Por su parte en Cuba, según Carrillo et al. (2017), las absorciones netas de CO₂ en categoría de bosques para el año 2012 sobrepasan las 16 mil toneladas, debido al notable crecimiento de la biomasa en esta categoría, que supera notablemente a las emisiones por extracción de madera e incendios en los bosques cubanos. Las emisiones netas nacionales para Cuba en ese año, representaron el 59.0% de las emisiones totales, lo que significa que el 41% de las emisiones totales de CO₂ eq fueron removidas de la atmósfera por concepto de captación en los bosques cubanos. Esta situación ha sido recurrente en todos los inventarios nacionales de GEI quedando plasmado en diferentes estudios como los de Álvarez et al. (2012); Carrillo et al. (2015); Centella et al. (2001); INSMET (2015); López (2009); Planos et al. (2018) y Valdés et al. (2013).

Para estimar las existencias de carbono y la emisión y absorción de los GEI asociadas con las actividades de silvicultura y otros usos de la tierra, se necesita información, en cuanto a la clasificación, datos de la superficie y muestreo que represente a varias categorías de uso de la tierra, así como factores de emisión que representen lo más cercano posible la situación ambiental del lugar que se esté midiendo (IPCC, 2006a). Son seis categorías de uso de la tierra a declarar: forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras. Las emisiones y absorciones se deben estimar para las tierras que permanecen en la misma categoría, así como para las convertidas a otras categorías (GFOI, 2013).

Es de reconocer que la categoría de tierras forestales es la que mayor importancia posee en cuanto a las emisiones y absorciones para el subsector de FOLU en Cuba; pero, de las categorías a declarar, solo se estiman las absorciones referidas a tierras forestales que permanecen como tal a partir de datos nacionales de área forestal. Es decir, solo se están estimando las emisiones para una ínfima parte del subsector FOLU, dejando de contabilizar las emisiones y remociones de GEI por concepto del cambio de uso de la tierra.

Uno de los inconvenientes dentro de la estimación de las emisiones y absorciones en este subsector FOLU es contar con bases de datos de uso de la tierra de al menos dos tiempos para poder analizar el cambio de biomasa y con ello su repercusión en las emisiones de GEI. El Equipo de Inventario Nacional de GEI de Cuba (INERGEI) no cuenta con esta información, por lo que la evaluación multitemporal espacialmente explícita de uso de la tierra sería un paso de avance en la determinación de emisiones de GEI para el subsector FOLU.

El inventario de GEI en el sector FOLU requiere de dos visiones para la obtención de los datos necesarios. Ambas utilizan métodos de diferentes niveles o complejidad. La primera, se basa en la determinación de las tierras, es decir, en la obtención del cambio, mientras que la segunda de las visiones se basa en la complejidad de la estimación de los GEI (IPCC, 2006b). El nivel 1 es el más simple, mientras que el 3 es el más complejo y certero. Para la determinación de

las tierras se acudió al nivel 3 de representación, dado que se trabajó en la distribución espacial de los cambios de uso de la tierra, mientras que para la estimación de carbono se trabajó con el nivel 1, dado que no se cuenta con factores de emisión determinados a nivel nacional.

Muchos estudios han investigado la perturbación de las reservas de carbono por actividades humanas utilizando modelos de contabilidad, que rastrean los cambios en las áreas de diferentes tipos de uso de la tierra y utilizan curvas estándar de crecimiento y descomposición para calcular los cambios en las reservas de carbón (Dixon et al., 1994; Houghton et al., 1999). Mientras, otros han estimado los efectos del uso y cambio de uso de la tierra utilizando modelos de proceso que calculan internamente el carbono de la vegetación y los suelos en diferentes ecosistemas basados en el clima y otros factores utilizados con los modelos (Shevliakova et al., 2009; Smith et al., 2008).

El gobierno cubano presentó su Contribución Prevista Determinada rindiendo al Acuerdo Climático de París, donde presenta a los bosques como un almacén de remociones de carbono importante para el país. Las investigaciones sobre las reservas de carbono de los ecosistemas forestales son muy importantes para la mitigación de carbono en Cuba (Álvarez & Mercadet, 2012; Centella et al., 2001; INSMET, 2015; Instituto de Ecología y Sistemática, 2007).

Muy pocos estudios han vinculado el uso y cambio de uso de la tierra con el ciclo del carbono en Cuba, y la totalidad de estos están referidos a los ecosistemas forestales, especialmente enfocados a la captación como es el caso de Álvarez et al., (2004); Álvarez & Mercadet, (2012); Toirac Arguelle et al., (2015). Los estudios realizados a escala nacional demuestran que la categoría de bosques es la principal y único sumideros de carbono en Cuba, siendo alrededor de las 16 mil toneladas de carbono para el año 2014 (Carrillo et al., 2017). Pero, las emisiones de carbono desde otros tipos de uso de la tierra no han sido estudiadas, por lo que, hasta la actualidad, siguen siendo desconocidas en el ámbito nacional. Debido a lo anterior, se necesita un análisis exhaustivo de los efectos del cambio de uso de la tierra y la gestión de la tierra en las reservas de carbono para actualizar los datos de carbono para Cuba, por lo que esta tesis

aborda la necesidad de investigar los cambios de carbono en la biomasa impulsados por el cambio del uso de la tierra en la provincia de Matanzas en el período 1989-2019 como caso de estudio, para demostrar la subestimación de las emisiones de carbono en Cuba.

Cuba, país con una gran cultura agrícola, desde inicios de la última década del siglo XX ha venido experimentando cambios bruscos en el uso y cobertura de la tierra debido a la necesidad de introducir cambios radicales en la organización de la agricultura cubana para darle salida a la crisis económica que ha afrontado el país. En el caso de la provincia de Matanzas, el espacio estuvo dominado por la caña de azúcar en su zona centro-norte, contando con 21 centrales azucareros en la década de los '90, y para el año 2002 con la reestructuración de la industria azucarera quedaron en funcionamiento solo 13 de ellos (San Marful, 2008). Matanzas posee un poco más del 10% del territorio nacional, siendo el segundo lugar de Cuba. Ocupa el tercer lugar en cuanto a proporción de su territorio cubierto de bosques (ONEI, 2019), y cuenta con el mayor humedal del país.

A partir de lo anterior se pueden plantear las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuáles han sido los cambios de uso de la tierra que se han experimentado en la provincia de Matanzas, Cuba?
- ¿Cómo repercuten estos cambios de cubierta y uso de la tierra en las emisiones y remociones de carbono en la provincia de Matanzas, Cuba?
- ¿Cuáles son las categorías de uso de la tierra más importantes en cuanto a las emisiones y remociones de carbono en la provincia de Matanzas, Cuba?

Problema de investigación

Hasta la actualidad Matanzas no cuenta con información de las emisiones por el cambio de uso de la tierra, por lo que no se pueden tomar decisiones certeras para programas o proyectos de mitigación de GEI.

Hipótesis de la investigación

Dadas las estadísticas que se reportan a nivel nacional sobre el uso de la tierra, y teniendo en cuenta que la provincia de Matanzas es una de las de mayor

porcentaje de forestación posee en el país, se estima que el cambio de uso en esta provincia favorecerá la remoción de carbono.

Objetivos de la investigación

Objetivo general: Cuantificar las emisiones y remociones de carbono en biomasa, producto del cambio de uso de la tierra en la provincia de Matanzas, Cuba en el período 1989-2019.

Objetivos específicos:

- Determinar la cobertura y uso de la tierra en el área de estudio en el año 2019.
- Construir la serie quinquenal de cambio de uso de la tierra en el área de estudio para el período de estudio 1989-2019.
- Estimar las emisiones de carbono debido al cambio de uso de la tierra del área de estudio en el período 1989-2019.
- Comparar las emisiones de carbono debido al cambio de uso de la tierra en el área de estudio con las estadísticas a nivel nacional.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Efecto invernadero y cambio climático

1.1.1 Efecto invernadero

Para entender el cambio climático, es necesario partir de la definición de efecto invernadero. Este es un fenómeno natural, en el que la radiación solar de onda corta penetra la atmósfera y calienta la superficie de la Tierra. Posteriormente, la energía que desprende la superficie en forma de onda larga (infrarrojo) es absorbida por los GEI contenidos en la atmósfera, y es emitida nuevamente en todas direcciones. Sin este efecto, la temperatura de equilibrio de la Tierra sería de unos -18°C aproximadamente, lo cual haría imposible la vida tal y como se conoce en la actualidad (Benavides et al., 2007).

Sin embargo, en la actualidad se ha visto en peligro el balance natural alcanzado de la temperatura, debido al aumento de la concentración en la atmósfera de distintos gases de invernadero provocados por actividades humanas. Estos cambios en la concentración atmosférica afectan la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y la superficie terrestre. A los resultados de dicha variación en el balance energético se le conoce como forzamiento radiativo (Benavides et al., 2007). Cuando el forzamiento radiativo es positivo, es decir, aumenta la temperatura en las capas bajas de la atmósfera, es lo que se le conoce como efecto invernadero antrópico o ampliado (Oglesby et al., 2010).

Aunque existen varios factores que pueden afectar el clima y que existe una variabilidad climática natural bien documentada, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su quinto informe concluye que, *“La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia”*. Y a continuación confirma que, *“el calentamiento en el sistema climático es inequívoco”* (IPCC, 2014).

A partir de la revolución industrial en el siglo XVIII, y como consecuencia del desarrollo económico y crecimiento demográfico se han alcanzado

concentraciones atmosféricas de GEI inimaginables al menos en los últimos 800 000 años, por lo que según el IPCC (2014), “...es sumamente probable que hayan sido la causa dominante del calentamiento observado hasta la actualidad”.

Por lo tanto, se asume que el cambio climático, definido por la Convención de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), “se entiende un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992).

1.1.2 Principales gases de Efecto Invernadero

Ciertos GEI son de origen natural y entre los principales pueden citar el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃). Además, se encuentran en la atmósfera una serie de gases totalmente producidos por el hombre como son el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFCs). Pero, sobre la base de diversos criterios y basados en la CMNUCC se seleccionaron los gases atmosféricos de mayor relevancia para el clima, por lo que a razón de análisis del cambio climático mundial solo se contabilizan seis de ellos, los cuales son: CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFCs y SF₆, siendo los tres primeros los de mayor relevancia.

El dióxido de carbono es considerado el principal GEI antropógeno de la atmósfera y posee sus orígenes en la actividad de generación de energía, en procesos industriales y en el cambio de uso de la tierra. Según Stuiver et al. (1981), el CO₂ contribuye en alrededor del 66% al forzamiento radiativo positivo actual del planeta, y para el año 2018 mostró un crecimiento de 1,5 veces con respecto a la revolución industrial (tabla 1).

El metano, es el segundo gas de importancia para el estudio del cambio climático. Posee sus orígenes en los desechos orgánicos generados por el hombre, en la ganadería, en humedales, así como en la industria petrolera y gasífera. Según Stuiver et al. (1981), contribuye en alrededor del 17% al forzamiento radiativo actual del planeta, y cerca del 40% procede de fuentes

naturales. Su crecimiento es de 2.5 veces más para el año 2018 con respecto al año 1750 (tabla 1).

Tabla 1. Promedio mundial anual de abundancias en superficie y tendencias de los principales GEI. Año 2018.

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Promedio mundial de la abundancia en 2018	407.8 ppm ³	1,869 ppmm ⁴	331.1 ppmm
Abundancia mundial en 2018 con relación a 1750	147%	259%	123%
Aumento en valor absoluto entre 2017 y 2018	2.3 ppm	10 ppmm	1.2 ppmm
Aumento registrado en valor relativo entre 2017 y 2018	0.57%	0.54%	0.36%

Fuente: WMO (2019).

En cuanto al óxido nitroso posee como fuente la combustión de combustibles fósiles, la fertilización, la industria, el estiércol animal y la quema. Según Stuiver *et al.* (1981), contribuye en alrededor del 6% al forzamiento radiativo actual del planeta, proviniendo tan solo el 40% de las emisiones de actividades humanas. En la actualidad muestra una concentración atmosférica de 123% superior al año 1750 (tabla 1), siendo el que menos aumento ha mostrado desde la época preindustrial.

1.2. Ciclo del carbono y biomasa vegetal

1.2.1 Ciclo del carbono

El ciclo del carbono recoge el flujo del carbono, así como los procesos físicos, químicos y biológicos que lo controlan entre los distintos almacenes en la Tierra (litosfera, atmósfera, biosfera, hidrósfera y suelos), donde el mayor intercambio natural se da entre la atmósfera y la biosfera terrestre (Gallardo *et al.*, 2007; GCE, n.d.). Se pueden diferenciar dos ciclos: “ciclo del carbono de largo plazo” y el “ciclo del carbono de corto plazo” (Martín, 2010; Martínez *et al.*, 2004).

El “ciclo del carbono de largo plazo”, hace referencia a escalas de millones años y, en él se describen la transferencia de carbono entre la litosfera y el resto de los componentes. En este los mecanismos de intercambio del carbono son muy lentos, pero según Martín (2010) “... pueden resultar determinantes en la historia climática”. Por su parte, el que corresponde a este estudio, el “ciclo del carbono

³ Ppm: ppm = número de moléculas de gas por millón (10⁶) de moléculas de aire seco

⁴ Ppmm: número de moléculas de gas por mil millones (10⁹) de moléculas de aire seco.

de corto plazo” es el que está dirigido a la caracterización de los estudios climáticos, así como su evolución futura. El mismo se basa en la cuantificación y entendimiento de los flujos rápidos que se producen en el sistema climático a corto plazo, y que abarcan las fuentes y sumideros de la hidrósfera, atmósfera, biosfera y (Martín, 2010; Martínez et al., 2004).

1.2.2 Perspectiva general de las emisiones y absorciones de carbono en el subsector Uso de la Tierra

El uso de la tierra, para el IPCC (2006), posee su dominio sobre una diversidad de procesos del ecosistema que afectan a los flujos de los GEI (Ilustración 1), tales como la fotosíntesis, la respiración, la descomposición, la nitrificación/desnitrificación, la fermentación entérica y la combustión. Estos procesos incluyen transformaciones del carbono provocadas por los procesos biológicos (actividad de microorganismos, plantas y animales) y físicos (combustión, lixiviación y escurrimiento) (IPCC, 2006a).

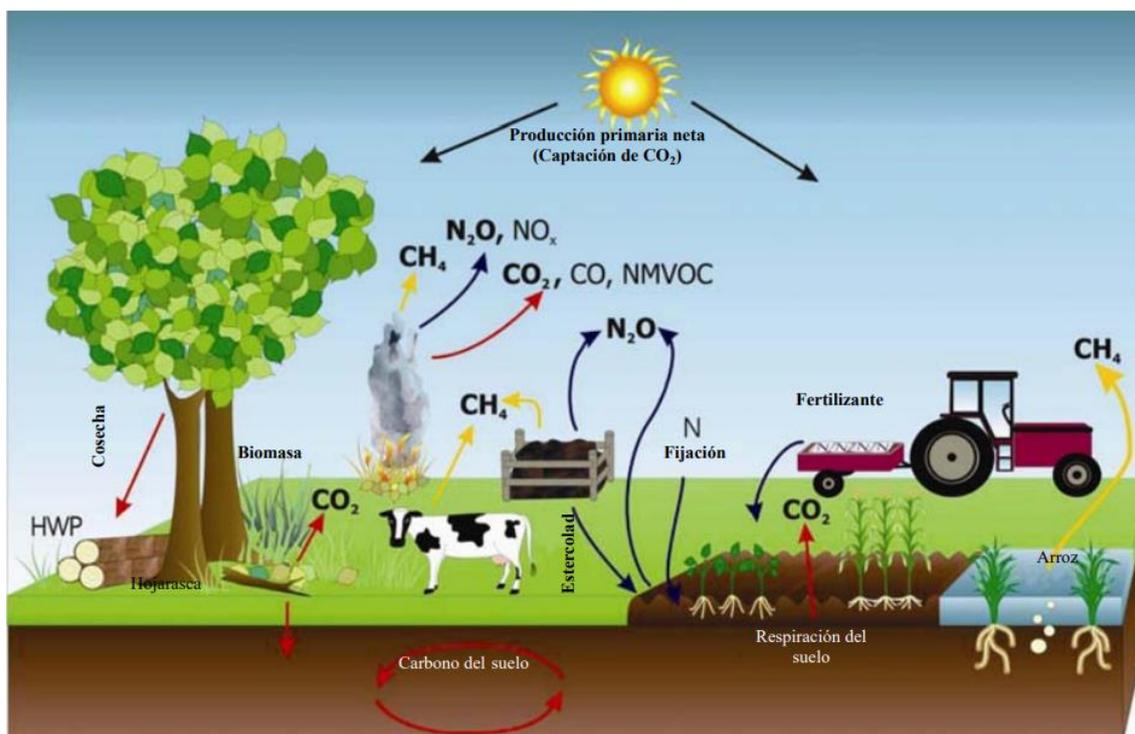


Ilustración 1. Principales fuentes de emisión y absorción de GEI en ecosistemas gestionados.

Fuente: IPCC (2006a)

En el caso de las plantas, estas adquieren el dióxido de carbono (CO_2) atmosférico por difusión a través de pequeños poros de las hojas conocidos como estomas, el cual se transporta a los sitios donde se lleva a cabo la fotosíntesis convirtiéndolo en carbohidratos. A este proceso se le conoce como producción primaria bruta (PPB). Según Martínez et al. (2004), la mitad de la PPB se incorpora a los tejidos vegetales y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO_2 debido a la respiración autotrófica (R_a). A la diferencia entre la PPB y el R_a se le conoce como producción primaria neta (PPN), y es el resultado del crecimiento anual de las plantas (IPCC, 2006a; Martínez et al., 2004).

En un medio natural, en el transcurso de los años, casi todo el carbono fijado por la PPN regresa a la atmósfera por medio de dos procesos: respiración heterótrofa y por la combustión del fuego. Pero, acá también entra a jugar la cosecha de productos de madera, lo cual crea otro almacén artificial, donde el carbono se puede quedar almacenado por más tiempo de lo que lo haría en su medio natural (IPCC, 2006a; Martínez et al., 2004).

La PPN se ve influenciada por el uso y la gestión de la tierra a través de las actividades antropogénicas. Por ejemplo, la cosecha de árboles reduce las existencias en la biomasa de la tierra. En los ecosistemas no forestales, la biomasa está formada por una vegetación no forestal, por lo que sus existencias totales de carbono son menores que en los ecosistemas forestales (IPCC, 2006a).

El carbono en el suelo, se ve influenciado por las diferentes condiciones climáticas que afectan a la actividad de los microorganismos del suelo, así como del tipo de roca del que se forman (Gallardo et al., 2007). Además, también las existencias de carbono en el suelo, se ven afectadas por las actividades humanas, así como del manejo de la tierra. Las entradas de carbono se controlan con la retención de materia orgánica muerta proveniente de los residuos de cosechas; mientras que las salidas se pueden influenciar por decisiones de manejo que afecten la descomposición microbiana y física de la materia. Según el (IPCC, 2006b), *“las interacciones con anteriores usos de la tierra, el clima y las propiedades del suelo, los cambios en las prácticas de gestión pueden*

producir incrementos o reducciones en las existencias de carbono en el suelo". Debido a lo anterior, los cambios de existencias de carbono inducidas se manifestarán pasado un período de varios años, por lo que el IPCC (2006b), tomó como 20 años el margen de tiempo para que el carbono en el suelo se vuelva a estabilizar una vez haya cambiado su gestión y uso.

1.2.3 Depósitos de carbono

Los depósitos de carbono utilizados en el inventario de Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU, por sus siglas en inglés) aparecen en la siguiente tabla 2.

Tabla 2. Definiciones de los depósitos de carbono.

Depósito	Descripción
<i>Biomasa</i>	Biomasa aérea Toda biomasa de la vegetación viva, tanto maderera como herbácea, que se halla por encima del suelo, incluidos tallos, cepas, ramas, corteza, semillas y follaje. Nota: En los casos en los que el sotobosque sea un componente menor del depósito de carbono de la biomasa aérea, es aceptable que se lo excluya para las metodologías y los satos asociados que se utilizan en ciertos niveles, siempre que estos se empleen de manera coherente a lo largo de toda la serie temporal del inventario.
	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.
<i>Materia orgánica</i>	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 (o del diámetro especificado por el país)
	Hojarasca Incluye toda la biomasa no viva con un tamaño mayor que el límite establecido para la materia orgánica de suelo (sugerido 2mm) 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. Las raíces vivas finas por encima del suelo mineral u orgánico (por debajo del diámetro mínimo límite elegido para la biomasa subterránea) se incluyen con la hojarasca cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente.
	Incluye el carbono orgánico contenido en suelos minerales hasta una profundidad dada, elegida por cada país y aplicada coherentemente a lo largo de la serie temporal ² .

Suelo	Materia orgánica del suelo ¹	Las raíces finas vivas y muertas y la DOM que se encuentran dentro del suelo y que miden menos que el límite de diámetro mínimo (sugerido 2 mm) para raíces y DOM se incluyen con la materia orgánica del suelo cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente. El valor por defecto para la profundidad del suelo es de 30 cm.
-------	---	---

¹ Incluye la materia orgánica (viva y no viva) que se encuentra dentro de la matriz del suelo, operativamente definida como una fracción de un tamaño específico (p. ej. Toda la materia que pasa a través de un cedazo de 2 mm). Las estimaciones de las existencias de C en el suelo pueden incluir también C inorgánico del suelo si se emplea un método de Nivel 3. Las emisiones de CO₂ producidas en los suelos por aplicación de encalado y urca se estiman como flujos empleando el método de Nivel 1 o 2.

² Las existencias de carbono en suelos orgánicos no se calculan explícitamente empleando el método de Nivel 1 o 2 (que estiman solamente el flujo anual de C de los suelos orgánicos), sino que se los puede estimar utilizando un método de Nivel 3.

Fuente: IPCC (2006a).

Para el caso de este estudio, solo se tienen en cuenta la biomasa y el suelo, pues no fue posible contar con información para los demás depósitos de C.

1.3. Cobertura y uso de la tierra

El uso de la tierra y los cambios en la cobertura de la tierra contribuyen a los cambios globales y constituyen una de las razones esenciales de afectación al clima (Hao et al., 2009). Las conversiones y modificaciones de la cobertura terrestre que origina la sociedad tienen importancia para el funcionamiento del sistema terrestre, así la conversión de los bosques a cultivos a lo largo de la historia humana ha contribuido a la liberación de CO₂ (Meyfroidt et al., 2010).

En términos metodológicos, la cobertura de la tierra (land cover, por sus siglas en inglés) y sus cambios son visibles a partir de datos de percepción remota o de estadísticas secundarias, como censos agrícolas. En cuanto al uso de la tierra (land use, por sus siglas en inglés), definido por Lambin et al. (2002) como: “...los fines para los cuales los humanos explotan la cobertura terrestre”, y por el contrario de la cubierta, se obtiene principalmente a través de un análisis detallado del terreno, aunque cabe destacar que el uso de la tierra se puede inferir en datos de detección remota en determinadas circunstancias (Lambin et al., 2002).

Un tipo de cobertura puede involucrar diferentes usos, de la misma forma un uso de la tierra puede involucrar diferentes categorías de cobertura. La relación entre el tipo de cobertura y su uso, no es una relación única, puede ser de un tipo de

cobertura a un uso específico, de un tipo de cobertura a diferentes usos, y de diferentes coberturas a diferentes usos (Pineda, 2011).

Las conversiones de cobertura de la tierra constituyen el reemplazo de un tipo de cubierta por otro y son medidos por un cambio de una categoría de cobertura terrestre a otros, como es el caso de la expansión agrícola, la deforestación o cambio en la extensión urbana. Por su parte, la modificación de la cobertura de la tierra, son cambios más sutiles que afectan al carácter de la cobertura terrestre sin cambiar su clasificación (Turner et al. 1995; Lambin et al., 2003) (Tabla 3).

Tabla 3. Representación de la matriz de transición general de las categorías de uso de la tierra.

CATEGORÍAS	Bosque semidecidual	Manglar	Matorral	Plantación latifolia	Plantación pino	Cultivos anuales	Cultivos perennes	Pastizal	Herbazal de ciénaga	Cuerpos de agua	Construida	Otras
Bosque semidecidual			DEGRADACIÓN		DEFORESTACIÓN							
Manglar												
Matorral												
Plantación latifolia	RECUPERACIÓN											
Plantación pino								PÉRDIDA DE CULTIVOS				
Cultivos anuales	REFORESTACIÓN					PERMANENCIA CULTIVOS		PÉRDIDA DE PASTIZALES				
Cultivos perennes						RECUPERACIÓN DE CULTIVOS						
Pastizal								RECUPERACIÓN DE PASTIZALES		OTROS		
Herbazal de ciénaga						RECUPERACIÓN DE PASTIZALES						OTROS
Cuerpos de agua								RECUPERACIÓN DE PASTIZALES		OTROS		
Construida						RECUPERACIÓN DE PASTIZALES						OTROS
Otras	RECUPERACIÓN DE PASTIZALES		OTROS									

Fuente: Elaborado por el autor a partir de (INECC, 2018).

1.4. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Cuba

Las emisiones brutas de Cuba para el 2014 sumaron un total de 40 878.85 gigagramos de CO₂ equivalentes (eq), siendo el gas CO₂ (dióxido de carbono) el más representativo al poseer el 68% de las emisiones totales, relegando el CH₄ (metano) y el N₂O (óxido nitroso), con 23 y 9% respectivamente. Se observa cambios en la proporción de estos gases con respecto a 1990, al disminuir en importancia el porcentaje de N₂O, cuya principal categoría de fuente (emisiones de N₂O de la gestión de suelos) se vio afectada durante todo el período de estudio (INSMET, 2017) (Ilustración 2).

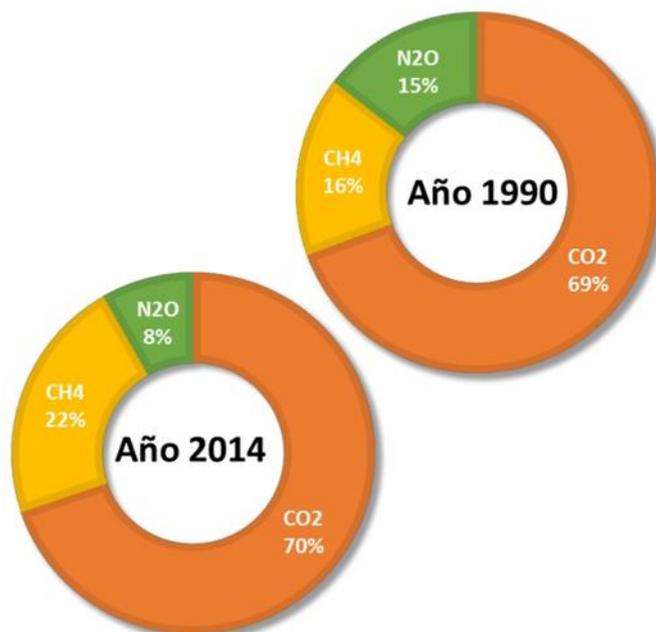


Ilustración 2. Porcentaje de emisiones de gases en Cuba en Cuba (CO₂ eq). Fuente: INSMET (2017).

En cuanto a la distribución de los sectores en el total de emisiones brutas, se observa como en el año 1990, el mayor peso lo representaba el sector Energía (65%), seguido AFOLU (24%), IPPU (6%) y Desechos (5%). En el año 2014, aunque no hubo grandes transformaciones económicas, es necesario destacar la depresión del sector industrial en Cuba, lo que repercutió en las emisiones del sector Energía aumentara en 4 puntos porcentuales con respecto a 1990 que disminuyó a su vez IPPU y Desechos incrementó 2%, y el sector AFOLU culminó con un 22% (INSMET, 2017) (Ilustración 3).

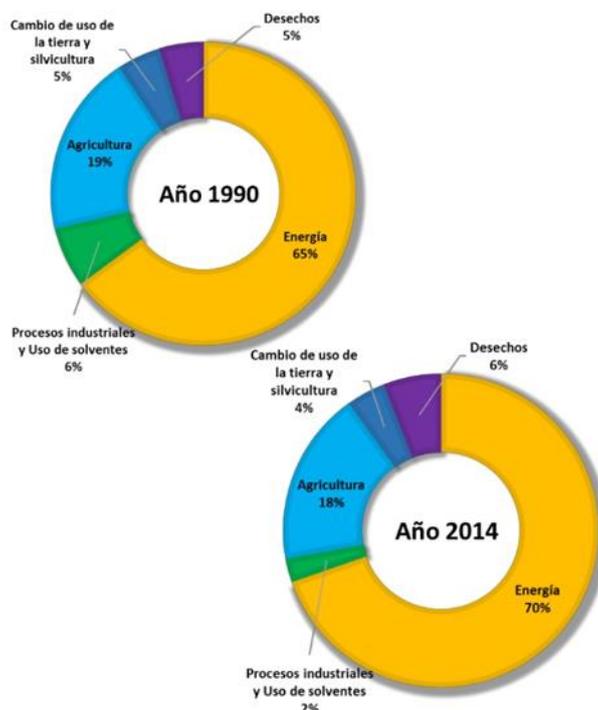


Ilustración 3. Porcentaje de emisiones por sectores en Cuba (CO₂ eq).
Fuente: INSMET (2017).

En el análisis del período 1990-2014 se observa como las emisiones brutas de CO₂ eq han disminuido (ilustración 5), aunque luego del año 1990 ha existido una tendencia al aumento, y estabilización para los últimos 3 años analizados. Es de destacar, el aumento de las remociones de CO₂ por concepto de crecimiento del área forestal. En total el monto de emisiones brutas en 2014 disminuyó un 15% con respecto a 1990, mientras que las emisiones netas también disminuyeron un total de 45% con respecto al año base 1990. Para el año 2014, las emisiones netas representaron el 52% de las emisiones brutas (INSMET, 2017) (Ilustración 4).

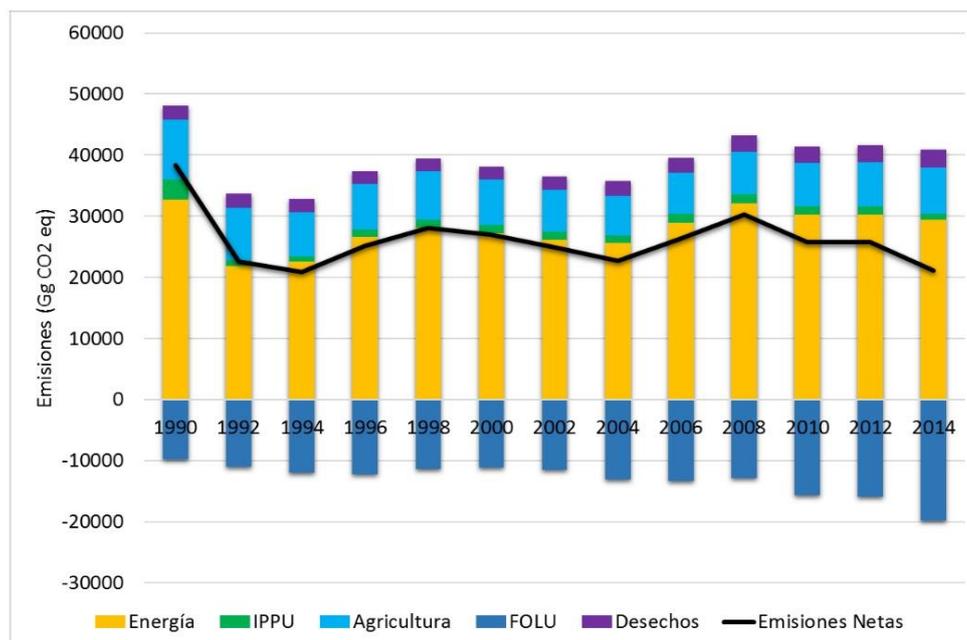


Ilustración 4. Tendencia de las emisiones por sectores en Cuba, para los años pares del período 1990-2014.
Fuente: INSMET (2017).

Para el caso de la estimación de las emisiones y absorciones de carbono en los bosques, así como del uso y el cambio de uso de la tierra, son complejas y a menudo una fuente de controversia debido a factores biológicos, ausencia de datos (o de datos confiables), así como por los impactos humanos adversos sobre los recursos forestales que requieren ser evaluados.

En IPCC-OECD-IEA (1997) se da prioridad a los cálculos de las emisiones producidas por el cambio del uso de la tierra y los bosques en cinco actividades principales que son fuentes o sumideros de CO₂ y constituyen categorías dentro del reporte del inventario: cambios en bosques y otras reservas de biomasa leñosa, conversión de bosques y pastizales, abandono de tierras manejadas, encalado de los suelos y tierras sumergidas. En esas actividades ocurren, a escala mundial, los cambios más importantes respecto al uso de la tierra y las prácticas de manejo que redundan en la emisión y absorción de CO₂. Debe señalarse que aún los cálculos de las emisiones y absorciones en este sector, llevan aparejados, intrínsecamente, incertidumbres o errores elevados.

Como se observa en la ilustración 5, las remociones del subsector FOLU crecieron para el período (1990-2014) en 176%, mientras que las emisiones

provenientes de los incendios forestales y el encalado de los suelos decrecieron drásticamente. Las remociones netas del subsector FOLU, crecieron hasta 19,77 Gg de CO₂ eq., lo que representó el 201% para el año 2014 con respecto a 1990. Este crecimiento de las remociones está respaldado por una política gubernamental de recuperación de áreas forestales y cuidado de la foresta nacional (INSMET, 2017).

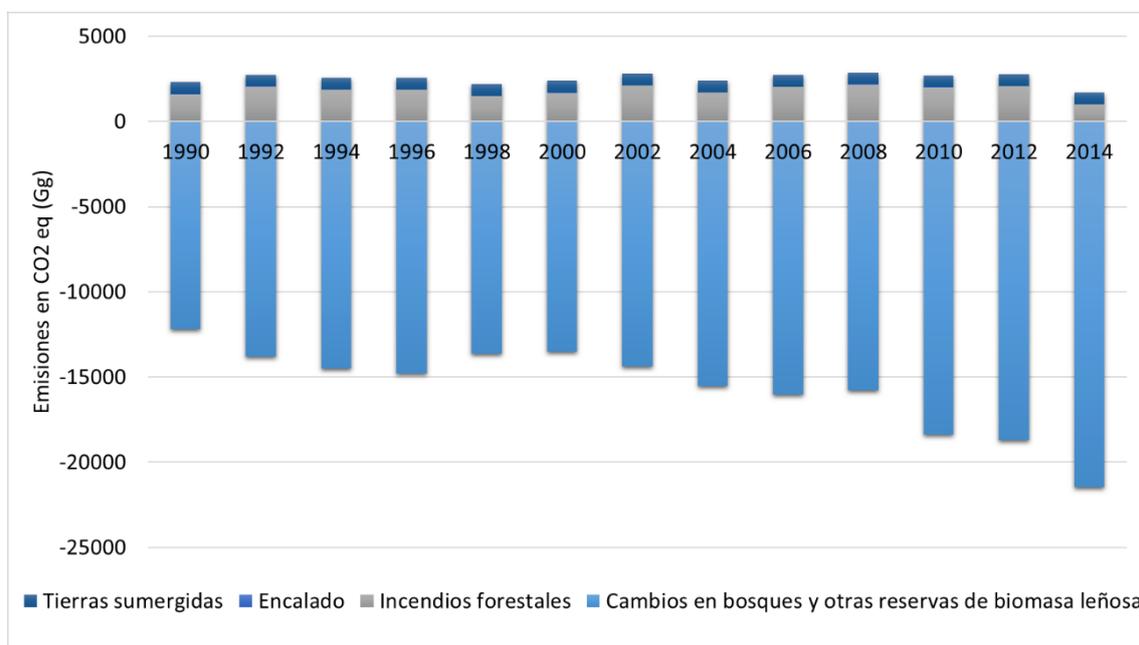


Ilustración 5. Tendencia de las emisiones para el subsector FOLU en Cuba, para los años pares del período 1990-2014.

Fuente: INSMET, 2017.

1.5. Uso de la tierra en Cuba

Ante la crisis económica generada por la desintegración del campo socialista en Europa Oriental, en 1990, comienza la descapitalización del campo cubano, lo cual generó tierras ociosas o deficientemente explotadas, en su mayoría cubiertas por especies exóticas invasoras, como marabú (*dichrostachys cinérea*) y aroma blanca (*leucaena leucocephala*). Para 1993, comienza una etapa en el perfeccionamiento del modelo económico cubano, lo que trajo aparejado otro cambio en el uso de la tierra al autorizarse la entrega de tierras a personas naturales con el objetivo de autoabastecimiento familiar, y ampliarse esta entrega de tierras en usufructo, en 1994. El modelo agrario cubano inicia su transformación paulatina hacia un modelo agroecológico y toman auge algunas

formas de gestión no estatal. Dentro de esta transformación se reestructura y redimensiona la agroindustria azucarera en el año 2002, hasta entonces uno de las principales líneas de exportación en la agricultura cubana (Mármol, 2015).

Ya para el año 2011, con la actualización del modelo económico cubano, y tras la culminación del VI Congreso del Partido Comunista de Cuba (PCC) se plantean una serie de lineamientos, como son retomar la ampliación del proceso de entrega de tierras y la estimulación de la actividad agrícola a partir de la venta de insumos y equipamiento, así como mayor remuneración al productor (PCC, 2011).

La superficie agrícola de Cuba para el 2017 era de un poco más de 6 millones de hectáreas, lo que representaba 57.3% de la superficie total. En la estructura de la superficie agrícola la representatividad de la superficie cultivada del país se ha reducido durante el período 1990 a 2017, especialmente dado por la disminución de los cultivos permanentes y pese al aumento de los cultivos temporales (ONEI, 2019a), lo cual trajo una revegetación con plantas invasoras, tal y como se mencionó antes, lo cual implicaría una remoción de CO₂. Las mayores áreas con potencial agrícola se han orientado al uso de la ganadería. Según Mármol (2015), existe una disminución de las áreas cañeras, los pastos cultivados y el aumento de la superficie no cultivada (pastos naturales y tierra ociosas), lo cual no responde a un aumento de la actividad pecuaria, sino que se produce como el resultado de la restauración natural de áreas que en su momento fueron cultivadas y al dejar de ser atendidas, se convirtieron en pastos naturales y tierras ociosas (Tabla 4).

Tabla 4. Área agrícola y cultivada en miles de hectáreas (Mha). Cuba.

Años	Superficie Agrícola	Superficie Cultivada	%
1997	6,687	3,701	0.55
1999	6,660	3,648	0.55
2000	6,553	3,600	0.55
2003	6,638	3,469	0.52
2005	6,637	3,224	0.49
2006	6,630	3,124	0.47
2007	6,619	2,988	0.45
2013	6342	2646	0.42
2014	6279	2669	0.43

2015	6240	2734	0.44
2016	6227	2733	0.44
2017*	6300	2765	0.44

Fuente: ONEI (2019).

*Las cifras de este año son del 30 de junio.

La disminución de las tierras cultivadas de caña de azúcar fue mayor a partir del 2002 con la “Tarea Álvaro Reynoso”, proceso que tuvo como objetivo principal lograr un redimensionamiento de las áreas cañeras en búsqueda de una mejor eficiencia productiva a partir de la selección de las mejores áreas para su cultivo y la reducción de los costos por transportación a los centrales azucareros. No obstante, la ruptura de la tendencia al decrecimiento en el año 2007 podría indicar una reanimación de este cultivo y su procesamiento industrial asociado. Además, el arroz, que es un cultivo muy importante para la alimentación de la población y su dinámica ha sido variable en el tiempo. Los cultivos varios, referidos a cultivos de ciclo corto y otros como café, plátano y tabaco, aumentan su peso porcentual en los campos cubanos, a pesar de la disminución experimentada en los dos últimos años (Mármol, 2015).

1.5.1 Uso de la tierra en la provincia de Matanzas

Matanzas fue el corazón azucarero cubano desde mediados del siglo XIX, con una rica trayectoria en este sector económico. Además, de la caña de azúcar, el henequén tuvo un importante papel en la economía matancera, y en la ocupación de la tierra que, junto a la ganadería, se posicionaron por mucho tiempo como las actividades prominentes de la provincia (San Marful, 2008).

La crisis del azúcar a nivel nacional también afectó a Matanzas, y con el redimensionamiento de la industria azucarera se efectúa el cierre total de 8 de los 21 centrales existentes en la provincia (San Marful, 2008). Otro rubro destacado en la actualidad es el cultivo de cítricos, que ganó auge a finales de la década de los '70 para el abastecimiento del desaparecido campo socialista⁵, pero, en la actualidad está en decadencia total dado la desaparición del campo socialista a inicios de la década de los '90. En la actualidad, dado el deterioro de

⁵ Es la denominación dada a los estados agrupados en el sistema socialista de distribución de las riquezas en la sociedad, surgido al término de la Segunda Guerra Mundial.

la industria de la caña de azúcar y los cítricos, la provincia ha diversificado su producción agrícola en producción de viandas, granos, hortalizas y madera.

La superficie agrícola de Matanzas para el año 2017, según cifras oficiales, era de 510.67 Mha, lo que representaba 43% de la superficie total de esta provincia. Como se evidencia en la tabla 5, en la estructura de la superficie agrícola la representatividad de la superficie cultivada de la provincia, se ha mantenido durante el período 2013-2017, aunque con un ligero aumento para el último año de la serie.

Tabla 5. Área agrícola y cultivada en miles de hectáreas (Mha). Provincia de Matanzas.

AÑOS	AGRÍCOLA	CULTIVADA	NO CULTIVADA	OCIOSA
2013	479.23	206.67	272.56	53.40
2014	487.87	196.66	291.21	39.45
2015	491.30	200.30	291.00	50.60
2016	489.88	194.88	295.01	54.69
2017*	510.67	220.03	290.65	48.47

Fuente: ONEI (2019).

*Las cifras de este año son del 30 de junio.

Las tierras no cultivadas han tenido una tendencia al aumento entre los años 2013-2017, representando casi 20 Mha. Mientras que para el año 2017, una quinta parte de las tierras no cultivadas estaban ociosas.

1.6. Zona de estudio. Provincia de Matanzas

1.6.1 Caracterización físico-geográfica

El área de estudio es la provincia de Matanzas (Ilustración 6). Abarca un área de 11 741 kilómetros cuadrados de extensión. Dado lo anterior, el área del territorio yumurino⁶, es del 10.8% del territorio cubano. Limita al norte con el estrecho de la Florida, al sur con el Mar Caribe, al este con la provincia de Villa Clara y Cienfuegos y, al oeste con la provincia de Mayabeque y el Golfo de Batabanó. Sus extremo más septentrional y meridional lo constituye Punta de Hicacos, Varadero y Punta Haristizabel en la Ciénaga de Zapata respectivamente, así

⁶ Se dice del territorio de Matanzas, haciendo referencia a uno de los ríos que pasa por la ciudad de Matanzas.

como el extremo más oriental Camino Voladora-Santiago en los Arabos y el más occidental Punta Gorda en la Ciénaga de Zapata.

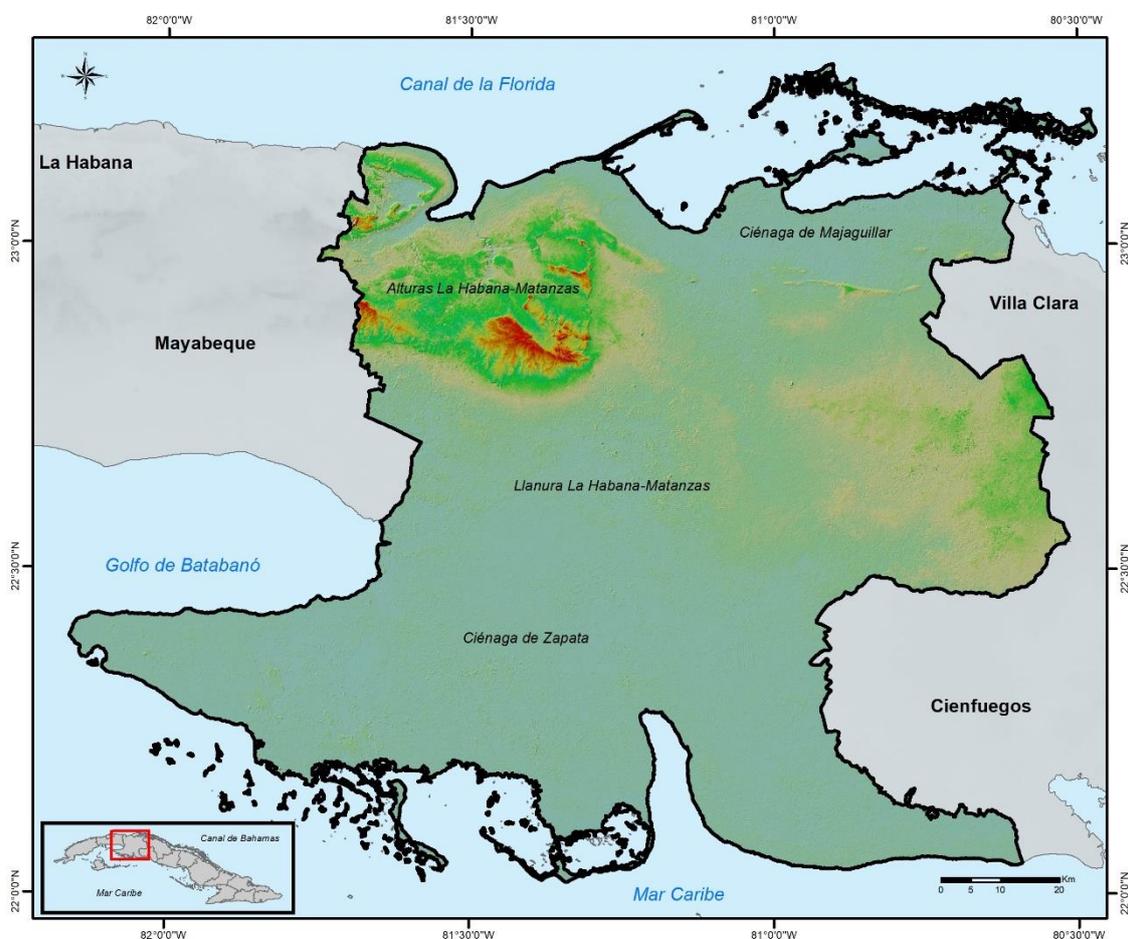


Ilustración 6. Área de estudio. Provincia de Matanzas, República de Cuba.
Fuente: Elaborado por el autor.

Geología

La provincia se caracteriza por la presencia de rocas del substrato plegado y el neo-autóctono. El primero presenta una complicada estructura interna que incluye rocas de la etapa pre-orogénica y orogénica de la evolución geológica de Cuba. El neo-autóctono está integrado por los depósitos de la etapa post-orogénica, que se comienza a desarrollar a partir del Eoceno Medio e incluye varias formaciones geológicas, entre las que sobresalen por su distribución las formaciones Güines, Cojímar, Colón y Jaruco (Mosquera, 2012).

Relieve

Esta provincia pertenece al Distrito físico-geográfico Habana-Matanzas (Colectivo de autores, 1989), y destaca al Norte en la orografía, las alturas de La Habana-Matanzas con apenas 200 metros de altura promedio, llegando a 381 msnm en el Pan de Matanzas formado por calizas. En el centro de la provincia se ubican las alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo. El resto del territorio se caracteriza por el predominio de llanuras formada por distintas rocas carbonatadas, las cuales facilitan el desarrollo de procesos cárnicos. Estas se dividen en dos: la llanura de La Habana-Matanzas, las cuales son ideales para el cultivo, y ocupado, hasta hace unos años, en casi toda su extensión, por la caña de azúcar (Vilamajó et al., 2010). Y la llanura de Zapata al sur de la provincia, la cual está ocupado por la mayor ciénaga del país (Colectivo de autores, 1989), y del Caribe (Mosquera, 2012).

Clima

El clima es tropical estacionalmente húmedo con dos estaciones bien definidas; un período poco lluvioso (noviembre-abril) y uno lluvioso (mayo-octubre). La temperatura media anual oscila los 24 °C. Las variaciones de la precipitación llegan hasta los 1400 mm anuales, con los mayores acumulados hacia zonas del interior y disminuyendo hacia las costas (Lecha et al., 1994). Los sistemas meteorológicos más peligrosos para la provincia son las tormentas y huracanes tropicales, ya que a las fuertes lluvias se agrega el incremento de la intensidad del viento, muy destructivo, con fuertes marejadas y penetraciones del mar (ONEI, 2019b).

Hidrografía

Los ríos de Matanzas son cortos y presentan escurrimiento en el período lluvioso siendo de muy escaso caudal. Dentro de los ríos destacan: el Hanábana San Juan, Hatiguanico y Canímar. La mayoría de las cuencas de la vertiente norte desembocan en la franja marina costera, mientras los ríos de la vertiente sur en su mayoría se pierden en los accidentes cárnicos. Además, existe una red

bastante extensa de canales de drenaje, ubicados fundamentalmente en áreas cenagosas. El déficit de aguas superficiales en esta provincia se ve compensada por la existencia de siete cuencas subterráneas (Mosquera, 2012; ONEI, 2019b).

Suelo

En la provincia existen, según la clasificación genética, diez agrupamientos de tipo de suelos, con mayor representación de los ferralíticos, fersialíticos, pardos, húmicos calcimórficos y cenagosos (Colectivo de autores, 1989). En cuanto a su representatividad geográfica, al sur están presentes los suelos cenagosos, hidromórficos y húmicos calcimórficos coincidiendo con la llanura de Zapata, igual ocurre al norte, desde el sur de la península de Hicacos hasta la ciénaga de Majaguillar. Coincidiendo con las alturas Habana-Matanzas y las alturas Bejucal-Madruga-Coliseo, los suelos más extensos son los húmicos calcimórficos y fersialíticos. Mientras, que al centro y centro-sur, comprendiendo la llanura cársica Habana-Matanzas, predominan los ferralíticos con intercalaciones de oscuros plásticos, húmicos calcimórficos y fersialíticos (Colectivo de autores, 1989; Mosquera, 2012; ONEI, 2019b).

Vegetación

Se delimitaron 11 formaciones vegetales naturales y secundarias, cultivos varios (caña de azúcar, cultivos de ciclo corto y cítricos), pastos y plantaciones forestales (Ilustración 7). La de mayor representatividad es el bosque semideciduo mesófilo, el cual presenta diferentes grados de modificación y reducción. Esta reducción de la cobertura vegetal natural se debe al histórico proceso de antropización que data desde la colonización, donde la agricultura e industria azucarera se mantienen como actividades fundamentales, junto al incremento de la actividad turística que ha devenido en importante factor de transformación socioeconómica, cultural y natural de la provincia (Vilamajó et al., 2010).

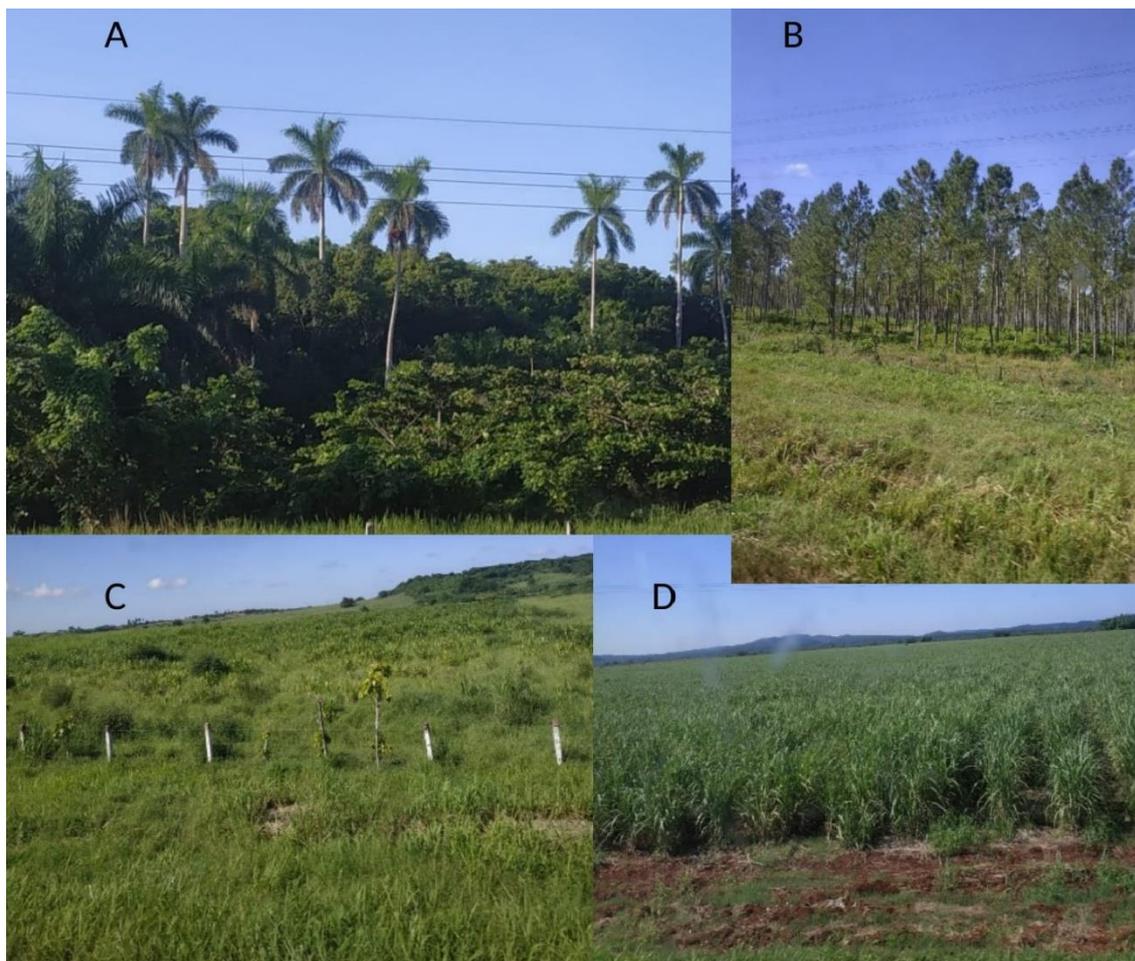


Ilustración 7. Ejemplos de algunos usos de la tierra en Matanzas.

A) Bosque semideciduo, B) Plantación de pino, C) Pastizal, D) Cultivos anuales (Cultivo de caña).
Fuente: Fotos del autor (2019).

Fauna

Los mayores valores faunísticos de la provincia se localizan en dos áreas fundamentales del territorio: sur y norte, coincidiendo con los humedales. En la Ciénaga de Zapata, se encuentra la mayor población silvestres del cocodrilo cubano (*Cocodrilos rhombifer*, endémico, y *Cocodrilos acutus*, especie autóctona), así como importantes poblaciones de jutía conga (*Capromys pilorides*) y de aves silvestres, entre ellas, tres endémicas y amenazadas por su escasa distribución (la gallinuela de Santo Tomás (*Cyanolimnas cerverai*), la Fermina (*Ferminia cerverai*) y el cabrerito de la ciénaga (*Torreornis inexpectata*). También destaca la existencia del manjuarí (*Atractosteus tristoechus*), así como del manatí (*Trichechus manatus*), en peligro de extinción (Mosquera, 2012; ONEI, 2019b).

Por su parte, al norte de la provincia, incluyendo la cayería, se encuentran varias especies de aves migratorias que utilizan el sitio para descanso, nidificación y alimentación (Mosquera, 2012).

2. METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se especificará la metodología que se empleó para la obtención de la información necesaria en la elaboración del presente estudio, y es la que nos da paso a poder llevar a cabo el análisis y dar respuesta a los objetivos planteados anteriormente.

Para esto se siguió el siguiente diagrama de flujo, el cual queda explicado en su totalidad en la metodología planteada (Ilustración 8).

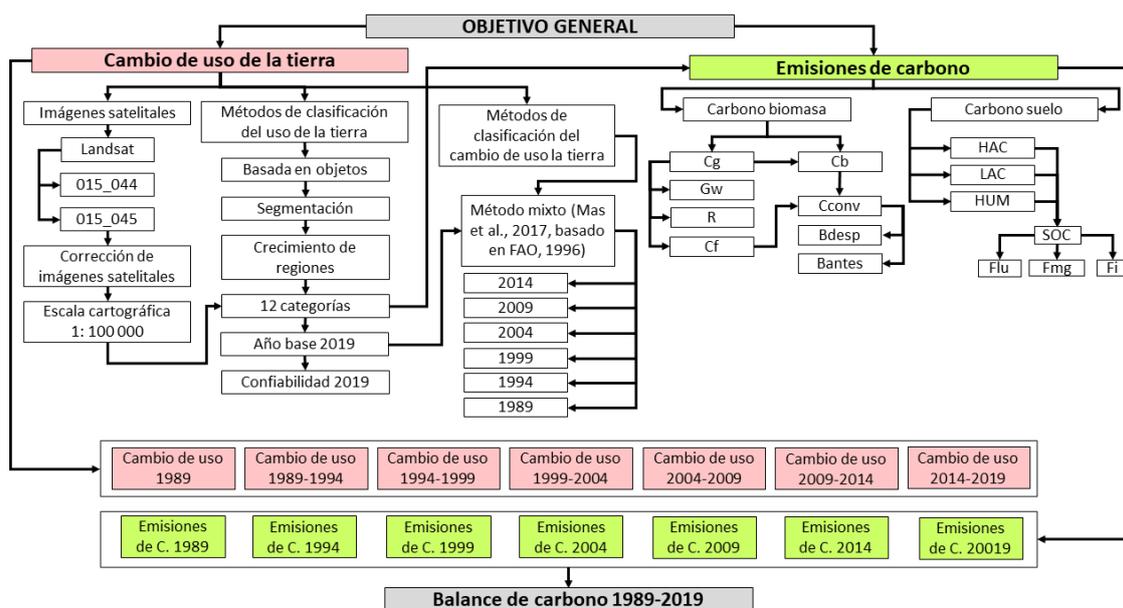


Ilustración 8. Diagrama de flujo.
Fuente: Elaborado por el autor.

2.1. Imágenes satelitales y procesamiento digital

2.1.1 Características del tipo de sensor

El programa Landsat, el cual se basa en una serie de misiones de observación de la Tierra administrados conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de EE.UU. Este programa satelital posee la serie más extensa de información de imágenes de la Tierra desde 1972 hasta la actualidad.

De estos satélites se utilizaron los últimos 3 que han estado en servicio, los cuales tienen en común una resolución espacial de 30 metros en la mayoría de sus bandas espectrales, y un tamaño de la escena de aproximadamente 170 km

de norte a sur y 183 km de este a oeste. Mientras que la resolución temporal es de 16 días.

Lo sensores a utilizar son, el Thematic Mapper (TM) a bordo del satélite Landsat 5, el Enhanced Thematic Mapper (ETM+) a bordo del satélite Landsat 7, con ocho bandas espectrales, y la Imagen Operacional de la Tierra (OLI) a bordo del satélite Landsat 8. Las características de cada uno de estos se presentan en los cuadros siguientes (tablas 6, 7 y 8).

Tabla 6. Características imagen Landsat 5.

	NÚMERO	BANDA	LONGITUD DE	RESOLUCIÓN
	DE		ONDA	(METROS)
	BANDA		(MICRÓMETROS)	
LANDSAT 5 - THEMATIC MAPPER™	1	Azul	0.45-0.52	30
	2	Verde	0.52-0.60	30
	3	Rojo	0.63-0.69	30
	4	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76-0.90	30
	5	Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.55-1.75	30
	6	Thermal	10.40-12.50	120 * (30)
	7	Onda corta infrarroja (SWIR) 2	1.08-2.35	30

Fuente: Chuvieco et al. (2016).

Tabla 7. Características imagen Landsat 7.

	NÚMERO	BANDA	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCIÓN
	DE		(MICRÓMETROS)	(METROS)
	BANDA			
LANDSAT 7- ENHANCED THEMATIC MAPPER PLUS (ETM+)	1	Azul	0.45-0.52	30
	2	Verde	0.52-0.60	30
	3	Rojo	0.63-0.69	30
	4	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76-0.90	30
	5	Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.55-1.75	30
	6	Thermal	10.40-12.50	60 * (30)
	7	Onda corta infrarroja (SWIR) 2	1.08-2.35	30
	8	Pancromática	0.52-0.90	15

Fuente: Chuvieco et al. (2016).

Tabla 8. Características imagen de las imágenes Landsat 8.

	NÚMERO DE BANDA	BANDA	LONGITUD DE ONDA (MICRÓMETROS)	RESOLUCIÓN (METROS)
LANDSAT 8- OPERATIVA IMAGER TIERRA (OLI)	1	Ultra azul (costero/aerosol)	0.43-0.45	30
	2	Azul	0.45-0.51	30
	3	Verde	0.53-0.59	30
	4	Rojo	0.64-0.67	30
	5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85-0.88	30
	6	Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.57-1.65	30
	7	Onda corta infrarroja (SWIR) 2	2.11-2.29	30
	8	Pancromática	0.50-0.68	15
	9	Cirrus	1.36-1.38	30

Fuente: Chuvieco et al. (2016).

2.1.2 Adquisición de datos

Para la obtención de la distribución espacial de los tipos de cobertura se utilizaron imágenes de los satélites de la plataforma Landsat, por ser esta una plataforma libre y tener una secuencia temporal de imágenes (1972-actualidad) mayor que la que se utilizará para este trabajo (1989-2019). Los años elegidos para la selección de las imágenes de satélite estarán en dependencia de la disponibilidad, y teniendo en cuenta que la estimación en el inventario de GEI en Cuba es a partir de 1990. Se escoge la serie 1989-2019 haciendo cortes temporales cada 5 años (5 años es la resolución temporal recomendada por el IPCC para los trabajos de cambio de uso de la tierra), por lo que se obtendrán 6 cortes del uso de la tierra para el área de estudio (tabla 9). Se necesitan dos escenas de Landsat para cubrir la totalidad de la zona a estudiar (Ilustración 9).

Tabla 9. Resumen de las imágenes a utilizar.

		1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019
Path_Row	015_044	Abril	Enero	Enero	Marzo*	Enero	Febrero	Febrero
	015_045	Febrero°	Enero	Enero	Enero	Enero	Abril	Febrero
Sensor		TM	TM	TM	ETM	ETM	OLI	OLI

Fuente: Elaborada por el autor.

* Cobertura nubosa entre 10-19%

° Cobertura nubosa mayor a 20%

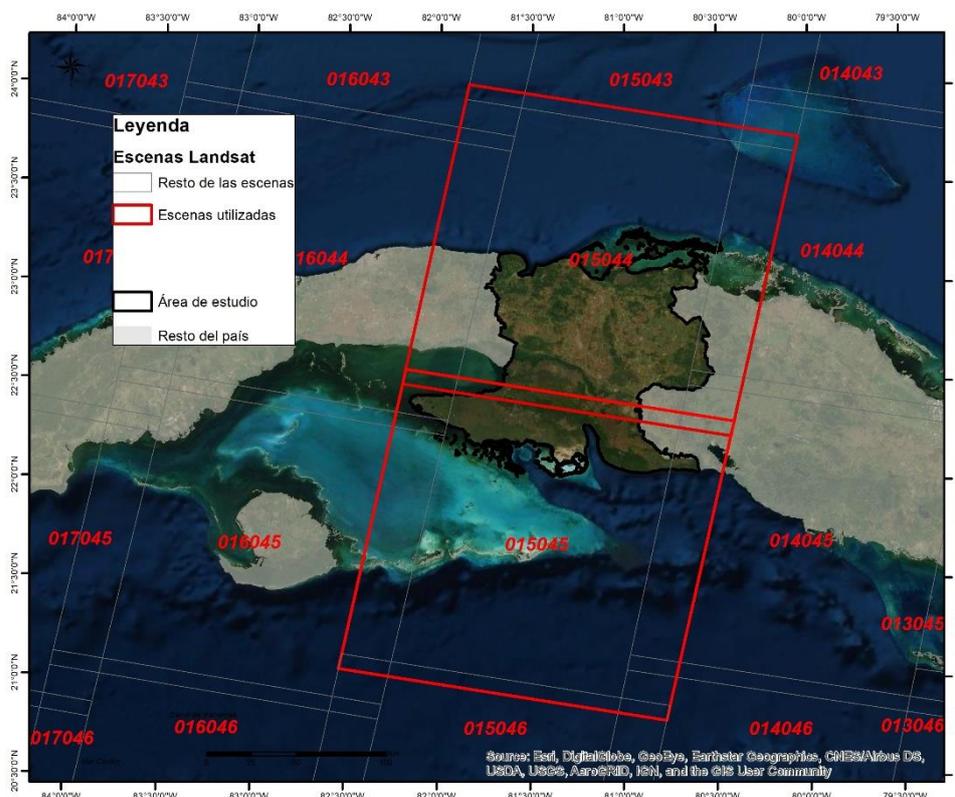


Ilustración 9. Escenas Landsat utilizadas.

Fuente: ESRI.

Las imágenes fueron elegidas en épocas similares del año y que tengan menor porcentaje de cobertura nubosa, con el objetivo de obtener imágenes más nítidas, más precisas y disminuir la cantidad de errores en los procesamientos posteriores. La metodología parte del análisis del mosaico, formado de dos imágenes de satélite, adquirido en tiempos distintos sobre una misma área geográfica, creándose mapas clasificados en dos tiempos. A través de la comparación de las imágenes clasificadas en dos fechas, se construye una matriz de transición, y se analiza la transición de una categoría a otra, en la cual también se generan los mapas de cambio donde indican la pérdida y la ganancia de cada categoría (GFOI, 2013).

Se escogió la fecha de obtención de las imágenes entre los meses de enero y abril, al coincidir esto con el período poco lluvioso (noviembre-abril), pero cuando la imagen no cumplía con el 10% menor en cobertura nubosa entonces se acudía al año anterior en los meses entre octubre y diciembre, esto con la intención de hacer coincidir el período seco.

En total se procesaron 14 escenas, de las cuales solo 1 presenta un por ciento mayor al 20 en cuanto a cobertura nubosa.

2.2. Procesamiento de imágenes satelitales

2.2.1 Corrección de imágenes satelitales

El procesamiento digital de imágenes satelitales, recoge un conjunto de operaciones que están destinadas a la realización de filtrajes, clasificaciones, extracción y modificaciones de las características de la información de la imagen, todo esto apoyados con de un ordenador y software (Bosque, 1992).

Según Hewson et al. (2014), algunos autores asumen que, los enfoques de clasificación basado en la creación de subclases para uso y cambio de la tierra pueden generar mapas precisos sin corrección atmosférica, debido a que las subclases pueden explicar distintas condiciones atmosféricas. Sin embargo, este autor, coincide con Song et al., (2001), mencionando que cuando se requiere realizar comparaciones entre distintas fechas, de la misma área, será necesario realizar las correcciones de los datos para que estos sean comparables.

Como primer paso se hace la selección de las imágenes a procesar, partiendo de la disponibilidad y cobertura nubosa. Posteriormente se realizan las correcciones de la imagen que constituye el proceso de arreglar errores o algún defecto presente en la misma, procedentes de errores de los sensores en la adquisición, emisión o recepción de la imagen (Chuvienco, 1996).

- *Corrección radiométrica*: técnicas destinadas a modificar los niveles digitales originales del pixel, con el objeto de acercarlos a los que había presentes en la imagen en caso de una recepción ideal.
- *Corrección geométrica*: se le aplica una "deformación" a la imagen para hacerla coincidir con un Sistema Geodésico de Referencia (datum) y Proyección Cartográfica determinados.

Algunas técnicas que se aplican en la corrección radiométrica son:

I) Restauración de líneas o píxeles

II) Conversión de ND a parámetros físicos

En el caso de la restauración de líneas, y debido al problema del bandeo que presentan las imágenes del Landsat 7 se utilizó la herramienta de Fix Landsat 7 Scanline Error, implementado en ARCMAP (ESRI, 2016) que permite identificar el bandeo de las líneas e interpola valores, de esta manera se corrige la banda original.

Luego, se utilizó la corrección atmosférica por el método Dark Object Subtraction mejor conocido como "método de Chávez DOS1", con el software R (R Core Team, 2019). Este método, se considera de tipo absoluto, y asume que, si hay áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia; cualquier reflectancia aparente es producto de la dispersión atmosférica, por lo que con esta información se puede calibrar la imagen (Chavez, 1988). Es probable que la mayoría de las imágenes contengan píxeles que sean verdaderamente negros, por lo que se aplica la corrección asumiendo un porcentaje de reflectancia del 1% en esas áreas; y luego se convierten los valores de radianza calculados, en reflectancias en el sensor, los cuales se sustraen de la imagen completa (Chavez, 1996).

2.3. Métodos de clasificación de imágenes satelitales

La clasificación de imágenes satelitales es un proceso complejo y requiere la consideración de muchos factores. Lu et al. (2007) y Chuvieco (1996) la definen como el proceso por el que se asigna un píxel de una imagen satelital a una de las categorías de la leyenda.

Para Lu et al. (2007), existen distintos métodos de clasificación de imágenes satelitales según varios criterios. Los mismos pueden ser clasificadores paramétricos o no paramétricos, clasificadores duros o suaves y clasificadores por píxel y objeto. Pero tradicionalmente, estos métodos se dividen en dos categorías: supervisados y no supervisados. En los métodos supervisados, se seleccionan un conjunto de píxeles o áreas de interés representativas de las distintas clases que conformaran la leyenda del mapa. Mientras que, en los métodos no supervisados, los algoritmos determinan las categorías resultantes de la clasificación por medio del análisis digital de los píxeles de la imagen (Recio, 2009).

En cuanto a los clasificadores divididos en pixel u objeto (consiste en tomar como unidad de análisis grupos de píxeles, que corresponden a objetos reales en el terreno, en vez de píxeles aislados (Mora & Mas, 2008)), los últimos poseen una serie de ventajas que los hacen ver apreciados para la clasificación de imágenes, y se ha visto un aumento de estudios en este sentido. Para Hay et al. (2006), la división de una imagen en objetos es un proceso similar a la forma en que las personas tienden a organizar el paisaje para su posterior comprensión, los objetos poseen propiedades como son la forma y textura, los mismos pueden integrarse rápidamente a un sistema de información geográfica (SIG) vectorial, y la utilización de objetos como elementos mínimos en la clasificación permite utilizar técnicas más complejas de clasificación posterior al reducir el coste computacional de la misma, dado que el tamaño de los objetos iría en correspondencia directa a la escala geográfica de trabajo.

2.3.1 Método de clasificación de imágenes basada en objetos

Entre los métodos clasificadores que consideran la distribución espacial existente en una imagen satelital hay que incluir los clasificadores orientados a objetos. El análisis de imágenes basado en objetos es una disciplina que está recibiendo una gran atención por parte de numerosos investigadores (Ardila et al., 2005; Benz et al., 2004; Blaschke et al., 2004; Cronemberger, 2014; Galli et al., 2001; Mas et al., 2015; Mas, 2017; Mas et al., 2017; Ramiro, 2014; Recio Recio, 2009; Vicens et al., 2020).

Hay et al. (2006) definen el Análisis de Imágenes Basado en Objetos como subdisciplina de los SIG que se dedica a dividir las imágenes en objetos y con ello, obtener sus características desde un punto de vista espacial y espectral. Esta metodología considera la forma, la textura y las propiedades espectrales de los objetos que forman la imagen, lo cual aumenta las características descriptivas de los mismos; siendo estos los que se clasifican y no los píxeles individualmente (Recio, 2009). Según Lizarazo et al. (2008) "...el análisis de imágenes basado en objetos está apoyado en los datos captados por sensores y produce resultados en formato vectorial. Por tanto, puede considerarse como el puente

entre el dominio ráster de las imágenes y el dominio predominantemente vectorial de los SIG”.

Esta clasificación parte de la creación de objetos, definidos como agrupaciones de píxeles contiguos con niveles digitales similares que poseen tamaño, forma y relación geométrica con el componente del mundo real que modela (Hay et al., 2004), siendo de esta manera mucho mejor su clasificación tomando como unidad grupos de píxeles en vez de píxeles individuales.

Al proceso de extracción de objetos se denomina segmentación, de manera tal que cuando se refieren a segmentos y objetos, lo hacen como sinónimos dentro de este contexto.

La segmentación de la imagen se realizó teniendo en cuenta la resolución de la imagen y el tamaño de los objetos a identificar (Ilustración 10). La segmentación posee dos tipos de algoritmos, orientado a regiones (utilizada para este estudio) y orientado a bordes. La primera intenta detectar las regiones ocupadas por los objetos presentes en una imagen satelital y cada región está compuesta por píxeles con propiedades homogéneas y diferentes a las del resto de las regiones. Mientras que, la segmentación orientada a bordes trata de extraer los objetos de la imagen localizando sus contornos o fronteras (Castelltort, 2012).

Los algoritmos para la segmentación orientada a regiones, se subdividen principalmente en tres, 1) umbralización de regiones, 2) crecimiento de regiones y 3) participación y fusión de regiones cada una con sus propias características. En nuestro caso, se utilizó el algoritmo de segmentación de Shepherd implementado dentro de RSGISLib (Shepherd et al., 2019). Este utiliza una implementación de agrupamiento de Kmeans para generar las semillas de la segmentación (crecimiento de regiones), el cual posee como ventaja la robustez, pues ofrece una mejor respuesta de ruido (Castelltort, 2012; Clewley et al., 2014; Rafael C. Gonzalez, 1996). El algoritmo tiene dos parámetros claves, el número de grupos y el tamaño del objeto; para esto se utilizó 12, coincidiendo con las clases a clasificar, y 178, coincidiendo con el área mínima, respectivamente (Clewley et al., 2014). Las 12 categorías finales alcanzadas, fueron resultado de las diversas corridas realizadas con el objetivo de obtener la mejor segmentación

posible. Se segmenta el mosaico Landsat correspondiente al año 2019 con una resolución espacial de 30 metros.

La escala de trabajo para el mapa de cubierta y uso de la tierra es de 1:100 000, por lo que para cumplir con el requisito del área mínima cartografiable se asumen 178 píxeles, o 160 200 m² (pixel de área 900 m²), o su equivalente, 16 hectáreas (Salitchev, 1979).

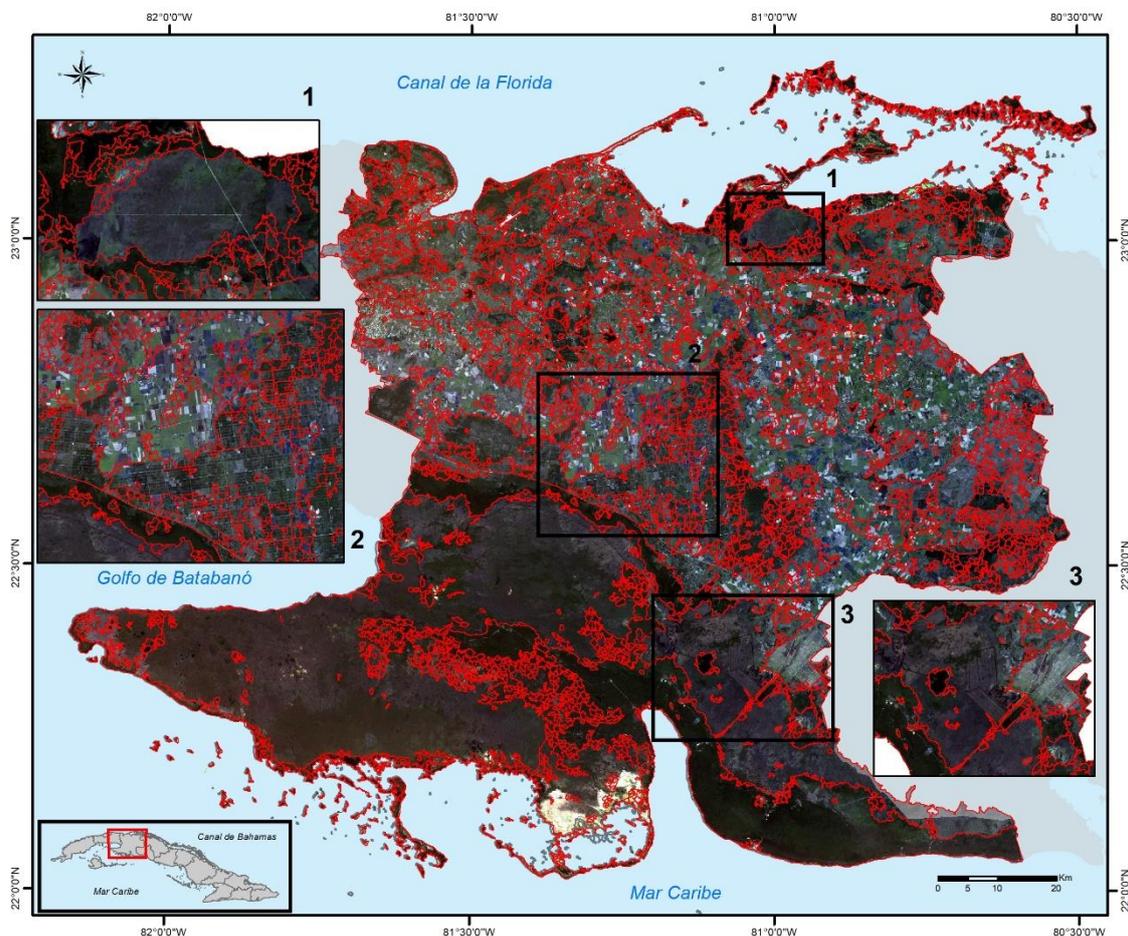


Ilustración 10. Segmentación de la imagen, año 2019.
Fuente: Elaborado por el autor.

2.4. Leyenda de uso de la tierra

La mayoría de las clasificaciones de la tierra, sean cualitativas o cuantitativas, además, son jerárquicas, lo cual indica que se organizan en niveles de creciente complejidad a medida que se incrementa la resolución espacial o el nivel de detalle (Matteucci et al., 2016). En Cuba existen varios intentos para categorizar la tierra, y que haya una leyenda única de la misma, pero hasta la actualidad,

ninguno de estos se ha establecido oficialmente, por lo que nos remitimos al IPCC (2006b) para lograr construir la leyenda de uso de la tierra a utilizar en este estudio.

Se parte de las categorías de uso de la tierra recomendadas por el IPCC (2006b), donde los usos se pueden considerar categorías y los mismos contienen subcategorías, de manera que se clasifican jerárquicamente. Las categorías de uso de la tierra se dividen en: a) tierras forestales, b) tierras de cultivo, c) pastizales, d) humedales, e) asentamientos y f) otras tierras; cada una de ellas pueden contener subcategorías a su interior para una mejor estimación de los GEI.

Partiendo de esta clasificación se clasificó el territorio de estudio en 12 subcategorías de uso de la tierra, las cuales se describen a continuación (Tabla 10).

Las subcategorías dentro de *tierras forestales* son:

Aunque Cuba posee una definición de bosque a nivel nacional, se decidió utilizar la definición mostrada por Vilamajó et al., (2010), dado que su concepto se basa en el de bosque a nivel nacional y es especificado para la provincia de Matanzas.

Bosque semideciduo. Se presenta con emergentes que alcanzan de 15 a 18 m, un estrato arbóreo de 10 a 15 m, un estrato arbustivo denso con diámetros finos, de hasta 3 m de altura y un estrato herbáceo de 1 m, abundante en plántulas de las especies de los estratos superiores. La cobertura promedia entre 60 y 70%. Es abundante en lianas y epífitas con la presencia de: *Eugenia axillaris*, *Exothea paniculata*, *Cupania macrophylla*, *Prunus occidentalis*, *Bursera simaruba*, *Mastichodendrom foetidissimum*, *Simaruba glauca*, *Celtis trinervia*, *Erythroxylon havanense*, *Gymnanthes lucida*, *Comocladia dentata*, *Metopium toxiferum*, *Drypetes alba*, *Allophylus cominia*, *Trichilia havanensis*, *Adelia ricinella*, *Coccoloba diversifolia* y *Pisonia aculeata*. Se encuentra en alturas y sierras calizas. Áreas representativas de esta formación vegetal lo constituyen el Refugio de Fauna Sierra de Bibanasí y la Reserva Ecológica de Bacunayagua,

ambas con diferentes grados de antropización. Esta última abarca la zona limítrofe entre las provincias de La Habana y Matanzas (Vilamajó et al., 2010).

Manglar. Esta formación se encuentra bien representada en los cayos al norte de la provincia, la Ciénaga de Majagüillar y tiene su máxima representación en el área de Zapata, donde se localizan los mayores manglares, con una altura de 15 a 17 m. Además de las cuatro especies arbóreas típicas de los manglares cubanos: *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus*, se registra la presencia de otras especies asociadas como el helecho *Acrostichum aureum*; para la cayería al norte de la provincia nos hablan de la presencia de tres variantes de manglar: de franja, mixto y achaparrado; compuestas en general por 6 familias botánicas y más de 10 especies acompañantes (Vilamajó et al., 2010).

Matorral. Complejo caracterizado por una vegetación dominada por arbustos y matas. Los arbustos madereros perennes, generalmente de más de 0.5 metros y menos de 5 metros de altura a su madurez y sin copa definida. Los límites de altura para árboles y arbustos deben interpretarse con flexibilidad, particularmente la altura mínima de los árboles y la máxima de los arbustos, las que pueden variar entre 5 y 7 metros. Para el área de estudio generalmente, este es resultado de la actividad humana, aunque también existen parches de origen natural.

Plantación latifolia. Plantaciones totales o parciales, que se realizan en terrenos abiertos, y son con especies de árboles cuyas hojas son de tipo laminar pudiendo ser caducas o perennes.

Plantación pinar. Plantaciones totales o parciales, que se realizan en terrenos abiertos, y son con especies de árboles cuyas hojas son de consistencia dura, escamosa y en forma de aguja, siendo en su mayoría de carácter perennes, contando con un alto porcentaje de resina tanto en sus hojas como sus tallos. Sus frutos poseen forma de cono y cuentan con semillas en su interior.

Las subcategorías dentro de *tierras de cultivo* son:

Cultivos anuales. Son cultivos que incluyen cereales, oleaginosas, legumbres, raíces y tubérculos, y forrajes. Estos son de períodos cortos, y generalmente, se obtienen varias cosechas al año. En este también se contabilizan las tierras en barbecho (IPCC, 2006a).

Cultivos permanentes. Son cultivos que incluyen árboles y arbustos, en combinación con cultivos herbáceos (p. ej., agroforestación) o en forma de huertos, viñas y plantaciones, como los de cacao, café, té, palma noli, coco y árboles de caucho. Estos son de larga duración, o se desmontan en un período largo de tiempo mayor a un año (IPCC, 2006a).

Las subcategorías dentro de *pastizales* son:

Pastizal. Esta categoría incluye las tierras donde predomina la vegetación herbácea de origen natural o la intervenidos por el hombre con el fin de pastoreo (IPCC, 2006a).

Herbazal de ciénaga. Es abundante en zonas inundadas del norte de la provincia y del área de Zapata, con acumulación de turba, alternando con manglares y bosques de ciénaga. Entre las especies vegetales más abundantes tenemos a: *Cladium jamaicense*, *Typha domingensis*, *Paurotis wrightii* y otras (Vilamajó *et al.*, 2010).

Humedales o cuerpos de agua. Esta categoría incluye las zonas de extracción de turba y la tierra que está cubierta o saturada de agua durante todo el año o durante parte de éste (por ejemplo, las turberas) y que no está dentro de las categorías de tierras forestales, tierras de cultivo, pastizal o asentamientos (IPCC, 2006a).

Asentamientos o construida. Esta categoría incluye toda la tierra desarrollada, incluidas las infraestructuras de transporte y los asentamientos humanos de cualquier tamaño (IPCC, 2006a).

Otras tierras. Esta categoría incluye el suelo desnudo, roca, arenas y todas aquellas zonas que no estén incluidas en ninguna de las otras cinco categorías. Permite que el total de las superficies de tierra identificadas coincida con la superficie nacional de la que se tienen datos (IPCC, 2006a).

Tabla 10. Correspondencia entre categorías generales del IPCC y las empleadas en este estudio.

IPCC	Estudio
Tierras forestales (Forestry land)	Bosque semideciduo
	Manglar
	Plantación latifolia
	Plantación pino
	Matorral
Tierras de cultivos (Cropland)	Cultivos anuales
	Cultivos permanentes
Pastizales (Grasslands)	Pastizal
	Herbazal de ciénaga
Humedales (Wetland)	Cuerpos de agua
Asentamientos (Settlements)	Construida
Otras tierras (Other land)	Otras tierras

Fuente: Elaborado por el autor a partir de IPCC (2006a).

2.5. Clasificación del cambio de uso de la tierra

La detección de cambios es una técnica de uso muy habitual en teledetección, la misma se usa comúnmente para calcular los cambios de cobertura del suelo a través del tiempo (Fernández, 2007). Caracterizar los patrones de cambio es un instrumento esencial y posee diversas aplicaciones como, identificación de áreas deforestadas, evaluación de áreas afectadas por procesos (remoción, inundación, etc...), seguimientos de cultivos, estimar productividad agrícola, entre otros (Ojeda, 2016; Morales, 2019). También, funge como instrumento de la planificación territorial, y para este caso específico, podría servir para el diseño de políticas de bajo carbono, o medidas de mitigación de emisiones de carbono.

Martínez (2014) divide a las técnicas de detección de cambios en cinco. La técnica basada en interpretación visual, álgebra matricial, transformaciones en el dominio espectral, clasificación de las imágenes y enfoque SIG. Cada una con sus características y ventajas específicas. Según Morales (2019), el análisis solamente de la respuesta espectral digital de las imágenes, genera muchos errores de clasificación a no ser que se combine con la clasificación orientada a objeto. Mientras que, la interpretación visual de las imágenes puede ser mucho más precisa, pero representa una tarea muy tardada.

Dicho lo anterior nos acotamos a una variante de método mixto planteada por Mas et al. (2017), donde después de la segmentación de la imagen satelital de

2019 se hace etiquetado visual de este año. A continuación, se aplica el método de actualización propuesto por donde se realiza la sobreposición entre la imagen clasificada y el mapa desactualizado y segmentado para asignar una categoría a cada segmento. Dado lo anterior, para cada categoría, se elabora una “función de densidad” que indica cual es la respuesta, en niveles digitales, más frecuente de los segmentos de dicha categoría; por lo tanto, permite identificar aquellos segmentos que tienen menos probabilidad de pertenecer clases, en otras palabras, nos ayuda a obtener posibles errores de etiquetado (Mas et al., 2015; Mas et al., 2017; Morales, 2019).

Se realiza una clasificación digital de cada segmento con el fin de asignar una categoría a cada segmento, esta vez con base en la respuesta espectral de la imagen a clasificar. A continuación, se inspeccionan y corrigen visualmente los segmentos atípicos (Morales, 2019).

Para calcular las tasas de cambio se utilizó la fórmula propuesta por FAO (1996) (Ecuación 1).

Ecuación 1. Tasa de cambio expresada en porciento.

$$S_n = \left(\left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right) * 100$$

S_n = Tasa de cambio (%)

S_1 = Superficie del mapa en la fecha 1

S_2 = Superficie del mapa en la fecha 2

n = número de años entre ambas fechas

2.6. Evaluación de la confiabilidad temática del mapa

A pesar de que en la actualidad se genera mucha información derivada de los sensores remotos, tales como mapas ambientales y cobertura de la tierra, no es habitual que se les realicen las validaciones correspondientes a los productos obtenidos. En muchos casos se acepta que la información de los mapas temáticos es confiable, por lo que no se cuestionaba la calidad de los mismos. Sin embargo, se considera que existen tres tipos de errores en las imágenes clasificadas o mapas, errores temáticos (etiqueta), errores geométricos (de

posición) y error potencial (heterogeneidad en el polígono) (Mas et al., 2003); aunque este último posee mucha relación con el error temático.

Para Mas et al.(2003), *“la evaluación de la confiabilidad temática de los mapas consiste en comparar la información del mapa con información de referencia considerada muy confiable”*. Esto, se basa en un muestreo de sitios de verificación, para lo cual se parte de observaciones de campo, y más en la actualidad se utilizan imágenes de más alta resolución o más detalladas que las utilizadas para la confección de la capa temática del mapa (Mas et al., 2003).

El proceso de evaluación de la confiabilidad de los mapas temáticos, se pudiera dividir en tres etapas (Stehman et al., 1998):

- 1) El diseño de muestreo, el cual radica en la selección de las unidades de muestreo.
- La evaluación del sitio de verificación, lo que consiste en obtener la clase a dicho muestreo.
- El análisis de los datos, lo cual se fundamenta en la elaboración de la matriz de confusión y el cálculo de los índices de confiabilidad.

Se evaluó la confiabilidad del mapa de cambio. Para esto, se determinó la unidad de muestreo, la cual consistió en un radio de 100 metros, lo que determinó un área de 31,400 m² o 3,14 ha. El método de muestreo que se utilizó fue el aleatorio estratificado, ya que se muestrea dividiendo los datos en estratos, con base al cambio de uso, lo cual permite tener control sobre la distribución de las áreas de muestreo y obtener información de sus subconjuntos (Stehman et al., 1998).

De acuerdo a lo sugerido por Olofsson et al. (2014) se determinó el tamaño de la muestra partiendo de la precisión de usuario esperada en cada categoría de cambio y de la precisión global (Ecuación 2).

Ecuación 2. Tamaño de muestra (Olofsson et al., 2014).

$$n = \left(\frac{\sum W_i * S_i}{S_o} \right)^2$$

n = tamaño de la muestra.

W_i = ponderación según porcentaje de áreas.

S_i = desviación estándar de precisión usuario estimado.

S_o = error standard de la precisión global estimada.

A partir del tamaño de muestra determinado, se ajustan los puntos de muestreo a una cantidad fija (30) o el 25% (para categorías pequeñas) dado la cantidad de área mínima mapeable que poseía cada categoría de cambio. La suma de esos puntos se le resta al tamaño de la muestra obtenido (n), y el resto se distribuye en proporción al área. La suma de estos dos resultados por categoría de cambio, es el total de puntos de muestreo por categoría.

El análisis de los datos de confiabilidad se hizo a través de una matriz de confusión, la cual permite comparar los sitios de verificación con el mapa temático que se desea evaluar (Tabla 11). Normalmente, las filas representan las clases de referencia y las columnas las clases del mapa. La diagonal, por su parte, expresa la concordancia entre los sitios de verificación y los datos de referencia, mientras que las demás intersecciones de la matriz, expresa errores de asignación (Chuvieco et al., 2016; Mas et al., 2014; Mas et al., 2003).

Cuando esta matriz no incorpora el error estándar basado en el área total de cada clase clasificada, la evaluación puede tener sesgo, por lo que se acudió al análisis de la matriz de confusión a partir del método sugerido por (Card, 1982) (Tabla 11).

Tabla 11. Ejemplo de matriz de errores ponderados por área de q clases.
Referencia

		Clase1	Clase2	...	j	...	q	Total
Mapa	Clase1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1j}	...	P_{1q}	P_{1+}
	Clase2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2j}	...	P_{2q}	P_{2+}

	i	P_{i1}	P_{i2}	...	P_{ij}	...	P_{iq}	P_{i+}

	q	P_{q1}	P_{q2}	...	P_{qj}	...	P_{qq}	P_{q+}
	Total	P_{+1}	P_{+2}	...	P_{+j}	...	P_{+q}	1

Fuente: Congalton et al. (2019).

En la matriz de error ponderado de proporción de área, cada celda entre P_{ij} representa la probabilidad de que un área aleatoria sea de clase i en el mapa y de clase j en el conjunto de datos de referencia. La suma de las entradas de

celda en cada fila (P_{i+}) representa la proporción del mapa de la categoría i (Chuvienco. 2016, Congalton et al., 2019) (Tabla 12). La precisión del usuario y el error de comisión son complementarios. El error de comisión de la clase i es $(1 - U_i)$ y el error de omisión de la clase j es $(1 - P_j)$ (Janssen et al., 1994, en Mas et al., 2003).

Tabla 12. Ecuaciones para obtener los distintos índices de confiabilidad.

Índice	Ecuación	Descripción
Ecuación (3) Fiabilidad global	$O = \sum_{i=1}^q p_{ii}$	Basándonos en la matriz de errores ponderados por área, calculamos la precisión general, que es la proporción de los cambios totales predichos correctamente en el mapa.
Ecuación (4) Medio intervalo e confianza	$O'' = z * \sqrt{\sum_{i=1}^q \frac{(W_i P_{ii} - P_{ii}^2)}{n_{i+1} - 1}}$	Los errores estándar también se informan para reflejar la variabilidad muestral asociada con las estimaciones de precisión. El error estándar para la precisión general. z es el percentil de la distribución normal; para un 95% de confianza, $z = 1,96$.
Ecuación (5) Precisión del usuario	$U_i = \frac{P_{ii}}{P_{i+}}$	La precisión del usuario representa la proporción de cierta categoría de mapa (i) que es correcta en la predicción del mapa.
Ecuación (6) Precisión del productor	$P_j = \frac{P_{jj}}{P_{j+}}$	La precisión del productor muestra que la proporción de una determinada categoría (j) en el conjunto de datos de referencia está clasificada correctamente en el mapa.

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Congalton et al. (2019).

2.7. Método para la estimación de carbono

2.7.1 Carbono en biomasa aérea y subterránea

En la estimación del carbono en biomasa por el cambio de uso de la tierra se siguió la metodología del IPCC (2006a).

Para estimar el incremento anual de las existencias de carbono en la biomasa se utiliza el Método de pérdidas y ganancias, el cual utiliza la superficie e incrementos medios anuales de biomasa por cada tipo de categoría de la tierra. Esta biomasa estimada solo es para el depósito de biomasa viva.

Primeramente, se estima el carbono para las tierras que siguen en la misma categoría.

Ecuación 7. Incremento anual de las existencias de carbono en biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría (Ecuación 2.9 en IPCC, 2006a).

$$\Delta C_G = \sum_i (A_i * G_{TOTALi} * CF)$$

ΔC_G = incremento anual de las existencias de carbono en biomasa debido a crecimiento de la biomasa en tierras que permanecen en la misma categoría de uso de la tierra por categoría, ton C año⁻¹

A = superficie de tierra que permanece en la misma categoría de uso de la tierra, ha.

G_{TOTAL} = crecimiento medio anual de la biomasa, ton d. m. há⁻¹ año⁻¹

i = categoría

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton m.s.⁷)⁻¹

Ecuación 8. Crecimiento medio anual de la biomasa (Ecuación 2.10 en IPCC, 2006a).

$$G_{TOTAL} = \sum \{G_W * (1 + R)\}$$

G_{TOTAL} = crecimiento promedio anual de la biomasa aérea y subterránea, ton d. m. ha⁻¹ año⁻¹

G_W = promedio del crecimiento anual de la biomasa aérea para un tipo específico de vegetación boscosa, ton d. m. ha⁻¹ año⁻¹

R = relación entre la biomasa subterránea y la aérea para un tipo específico de vegetación en ton m.s. de biomasa subterránea (ton m.s. de biomasa aérea)⁻¹.

En cuanto a la biomasa en bosques el error que se puede asumir es del 30%, mientras que en la biomasa de los cultivos el error se incrementa hasta el 75%.

Luego, se estima el carbono en las tierras que se convierten a una nueva categoría.

Ecuación 9. Cambio anual en las existencias de carbono en biomasa de tierras convertidas a otra categoría de tierra (Ecuación 2.15 en IPCC, 2006a).

$$\Delta C_B = \Delta C_G + \Delta C_{CONVERSIÓN}$$

ΔC_B = cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año⁻¹

ΔC_G = incremento anual en las existencias de carbono de la biomasa debido a crecimiento en tierras convertidas a otra categoría de uso de la tierra, en ton C año⁻¹

$\Delta C_{CONVERSIÓN}$ = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra, ton C año⁻¹

Ecuación 10. Cambio inicial en las existencias de carbono en biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra (Ecuación 2.16 en IPCC, 2006a).

$$\Delta C_{CONVERSIÓN} = \sum_i (B_{DESPUÉS} - B_{ANTES}) * \Delta A_{A_OTRAS} * CF)$$

$\Delta C_{CONVERSIÓN}$ = cambio inicial en las existencias de carbono de la biomasa en tierras convertidas a otra categoría de tierra, ton C año⁻¹

$B_{DESPUÉS}$ = existencias de biomasa en el tipo de tierra i inmediatamente después de la conversión, ton m.s. há⁻¹

B_{ANTES} = existencias de biomasa en el tipo de tierra i antes de la conversión, ton m.s. há⁻¹

⁷ Materia seca.

ΔA_{A_OTRAS} = superficie de uso de la tierra convertida a otra categoría de uso de la tierra en un año dado, há año⁻¹

CF = fracción de carbono de materia seca, ton C (ton m.s.)⁻¹

Dado la poca información que se tiene, se utilizaron los siguientes valores por defecto de la tabla 13:

Tabla 13. Valores por defecto utilizados para la estimación de biomasa.

Categoría	CF	G_w	R	B
Bosque semideciduo	0.47 (044-049)	2.00	0.20	220.00 (210-280)
Manglar	0.47 (044-049)	2.00	0.20	220.00 (210-280)
Plantación latifolia	0.47 (044-049)	13.00 (6-20)	0.20	100.00
Plantación de pino	0.47 (044-049)	5.00	0.20	270.00
Matorral	0.47 (044-049)	7.00 (4-10)	0.20	80.00 (40-90)
Cultivos anuales	0.50	-	-	10.00
Cultivos permanentes	0.50	2.60*	-	42.00
Pastizal	0.50	-	-	16.10
Herbazal de ciénaga	0.50	-	-	16.10
Construida	-	-	-	-
Cuerpos de agua	-	--	-	-
Otras	-	-	-	-

Fuente: Elaborado por el autor a partir de IPCC (2006a).

*Tasa de acumulación de biomasa (t C/ha al año).

2.7.2 Carbono en suelo

Primero se subdividen los suelos según el tipo, y se toman las existencias de carbono orgánico por defecto brindadas por el IPCC (2006a) (Tabla, 13).

Para el caso que nos concierne, se utilizaron los mencionados a continuación:

Los suelos con minerales arcillosos de alta actividad (HAC, por sus siglas en inglés) son entre leve y moderadamente erosionados, dominados por minerales silicato-arcillosos 2:1 en la clasificación de la Base Mundial de Referencia para los Recursos de Suelos (WRB, por sus siglas en inglés): Leptosoles, Vertisoles, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisoles, Alisoles, Albeluvisoles, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Umbrisoles, Cambisoles, Regosoles.

Los suelos con minerales de arcilla de baja intensidad (LAC, por sus siglas en inglés) son muy erosionados, con predominio de minerales arcillosos 1:1, hierro amorfo y óxidos de aluminio (en la clasificación de la WRB: Acrisoles, Lixisoles, Nitisoles, Ferralsoles, Durisoles).

Suelos con drenaje limitado, lo que trae acarreadas periódicas inundaciones y condiciones anaeróbicas (en la clasificación de la WRB: Gleysoles).

Los valores de existencias de carbono orgánico se muestran a continuación en la tabla 14:

Tabla 14. Referencia por defecto de existencias de C orgánico para suelos minerales (t C/ha).

Suelos HAC	Suelos LAC	Humedales
65	47	86

Fuente: Elaborado por el autor a partir del Cuadro 2.3 del IPCC (2006a).

El error asumido en las existencias de carbono en los suelos es del 90%.

Para la estimación del carbono en el suelo por el cambio de uso de la tierra se siguió la metodología del IPCC (2006a).

Ecuación 11. Cambio anual en las existencias de carbono orgánico en el suelo. (Ecuación 2.25 en IPCC (2006a).

$$\Delta C_{Suelo} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{T}$$

$$SOC = \sum (SOC_{REF} * F_{LU} * F_{MG} * F_I * A)$$

ΔC_{Suelo} = cambio anual en las existencias de carbono de los suelos, ton C año⁻¹

SOC_0 = existencias de carbono orgánico en el suelo en el último año de un período de inventario, ton C

$SOC_{(0-T)}$ = existencias de carbono orgánico en el suelo al comienzo de un período de inventario, ton C

T = cantidad de años de un período de inventario dado, año

SOC_{REF} = las existencias de carbono de referencia, ton C ha⁻¹

SOC = existencias de carbono, ton C ha⁻¹

F_{LU} = factor de cambio de existencias para sistemas de uso de la tierra o subsistemas de un uso de la tierra en particular, sin dimensión

F_{MG} = factor de cambio de existencias para el régimen de gestión, sin dimensión

F_I = factor de cambio de existencias para el aporte de materia orgánica, sin dimensión

A = superficie de tierra del estrato que se estima, ha

Los valores de los factores de cambio de existencias de carbono orgánico en el suelo se obtuvieron del IPCC (2006a), y se exponen a continuación (Tabla 15).

Tabla 15. Referencia por defecto de existencias de C orgánico para suelos minerales (t C/ha).

Categoría	F_{LU}	F_{MG}	F_I
Bosque semideciduo	1.00	1.00	1.00
Manglar	1.00	1.00	1.00
Plantación latifolia	1.00	1.00	1.00
Plantación de pino	1.00	1.00	1.00
Matorral	1.00	1.00	1.00
Cultivos anuales	0.48	1.00	1.00
Cultivos permanentes	1.00	1.00	1.00
Pastizal	1.00	0.97	1.00

<i>Herbazal de ciénaga</i>	1.00	1.00	1.00
<i>Construida</i>	0.80	0.80	0.80
<i>Cuerpos de agua</i>	0.00	0.00	0.00
<i>Otras</i>	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaborado por el autor a partir de IPCC (2006a).

2.7.3 Conversión de cambios de existencias de carbono a emisiones de CO₂.

Los cambios de las categorías de existencias de C (que impliquen transferencias a la atmósfera) se pueden convertir en unidades de emisión de CO₂ multiplicando el cambio en las existencias de C por $-44/12$. A destacar que no todos los cambios de existencias se corresponden con una emisión. La conversión de C en CO₂ se basa en la relación de pesos moleculares (44/12). El cambio de signo (-) se debe a la convención de que los aumentos de existencias de C, es decir los cambios de existencias positivos (+), representan una absorción (o emisión «negativa») de la atmósfera, mientras que las reducciones en las existencias de C, es decir los cambios negativos (-) en existencias, representan una emisión positiva a la atmósfera.

2.7.4 Análisis de categorías principales

Una categoría principal es una categoría prioritaria en el sistema nacional del inventario de GEI de cada país, porque su estimación influye significativamente sobre el total del inventario de GEI. Esta importancia puede ser en cuanto a nivel absoluto, tendencia o la incertidumbre (IPCC, 2006b).

Para el caso de este estudio, se utilizó este análisis para poder comparar la importancia de las categorías en cuanto a nivel absoluto, es decir, en cuanto a emisiones totales.

Para su identificación se usa un umbral predeterminado de emisiones acumulativas, y donde las categorías principales son aquellas que, al sumarse juntas en orden de magnitud descendente suman el 95 por ciento del total (IPCC, 2006b).

Para ello, el aporte de cada categoría se calcula según la ecuación 12 (obtenida de la ecuación 4.1 del IPCC, 2006b).

Ecuación 12. Evaluación de nivel.

$$L_{x,t} = \frac{|E_{x,t}|}{\sum_y |E_{y,t}|}$$

$L_{x,t}$ = Evaluación de nivel para x categoría del último año del inventario (año t)

$|E_{x,t}|$ = valor absoluto de la estimación de emisión de la categoría x

$\sum_y |E_{y,t}|$ = aporte total, que es la suma de los valores absolutos de emisiones del año t

3. RESULTADOS: CAMBIOS EN EL USO DE LA TIERRA EN LA PROVINCIA DE MATANZAS

3.1. Clasificación del uso de la tierra.

A partir de la digitalización y categorización de las imágenes satelitales utilizadas, se obtuvo la clasificación del área de estudio para los siete años seleccionados. Dentro de la clasificación destacan las categorías de matorral, bosque semidecíduo, cultivos anuales, herbazal de ciénaga y manglar como las de principales cantidades de polígonos clasificados para el año base 2019 (Ilustración 11).

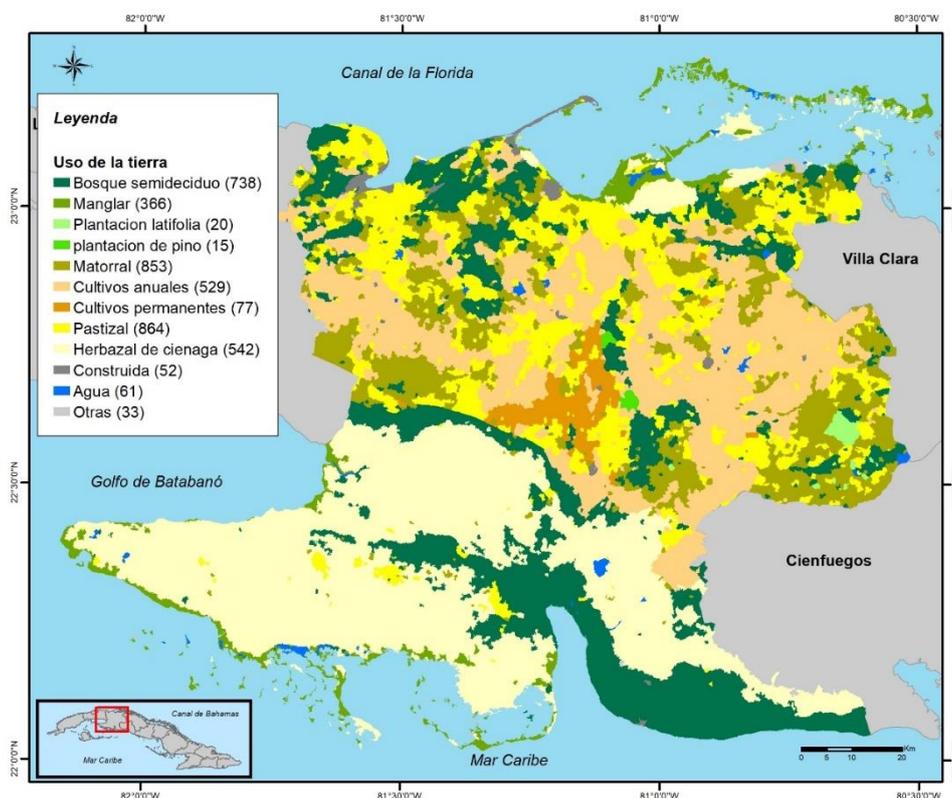


Ilustración 11. Uso de la tierra, Matanzas, 2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

El uso de la tierra posee una distribución espacial muy similar en todos los años de estudio. En la parte más septentrional se observa grandes extensiones de tierra con presencia de manglar, herbazal de ciénaga y bosque semidecíduo, lo cual coincide con la Ciénaga de Zapata en casi la totalidad de su extensión. En el interior de la provincia, sobresalen los cultivos anuales, y en el centro los cultivos perennes, representados en este caso por los cítricos. El matorral, está

mejor representado en los bordes de los cultivos, pues en su generalidad han sido áreas de cultivo que se han abandonado, pero que en la actualidad representan grandes extensiones de tierras de la provincia. En la parte noreste del territorio también aparecen porciones de herbazal de ciénaga y bosque semidecuido que coinciden con la Ciénaga de Majaguillar, mientras que en el noroeste predominan los pastizales y los bosques semidecuido (Ilustraciones 12-17).

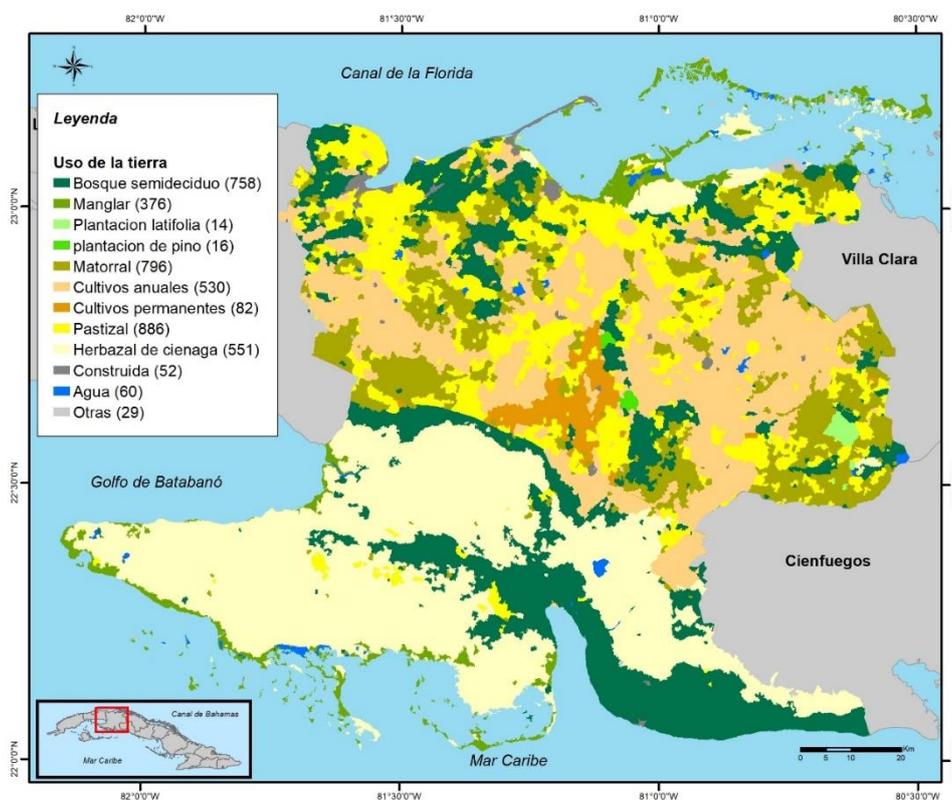


Ilustración 12. Uso de la tierra, Matanzas, 2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

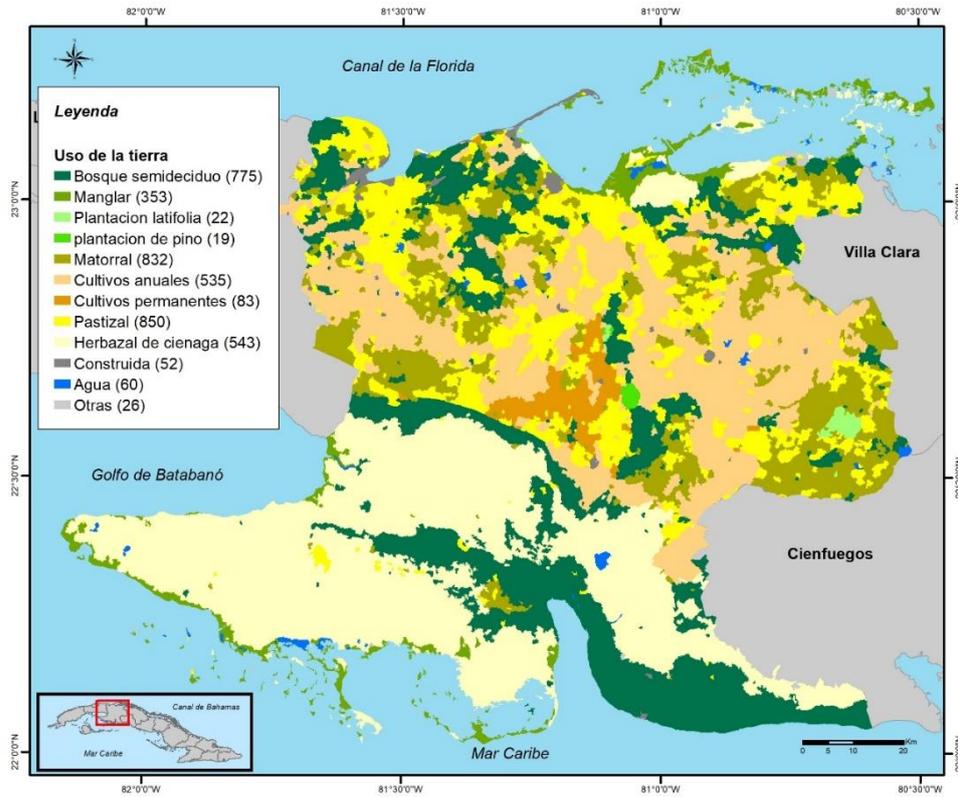


Ilustración 13. Uso de la tierra, Matanzas, 2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

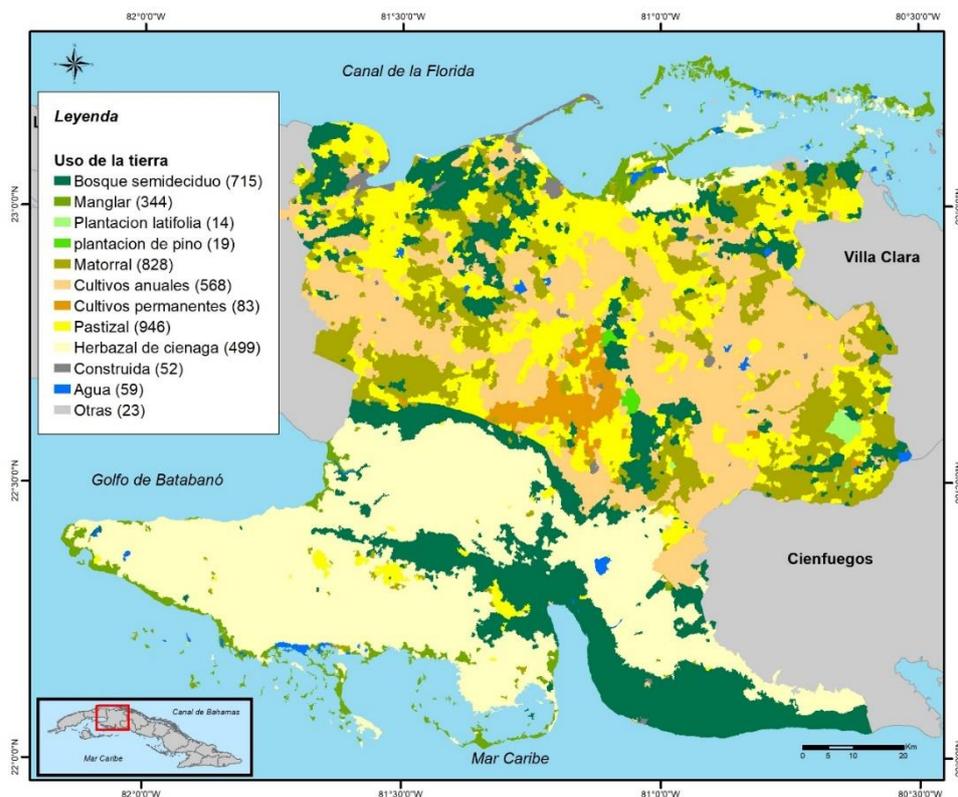


Ilustración 14. Uso de la tierra, Matanzas, 2004.

Fuente: Elaborado por el autor.

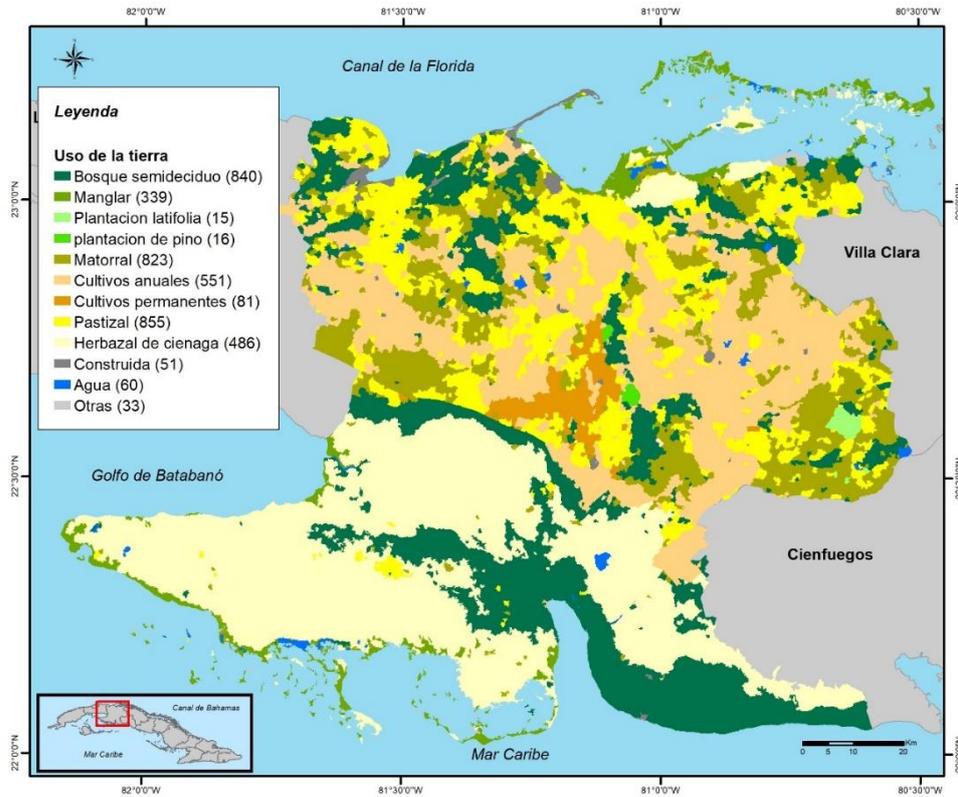


Ilustración 15. Uso de la tierra, Matanzas, 1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

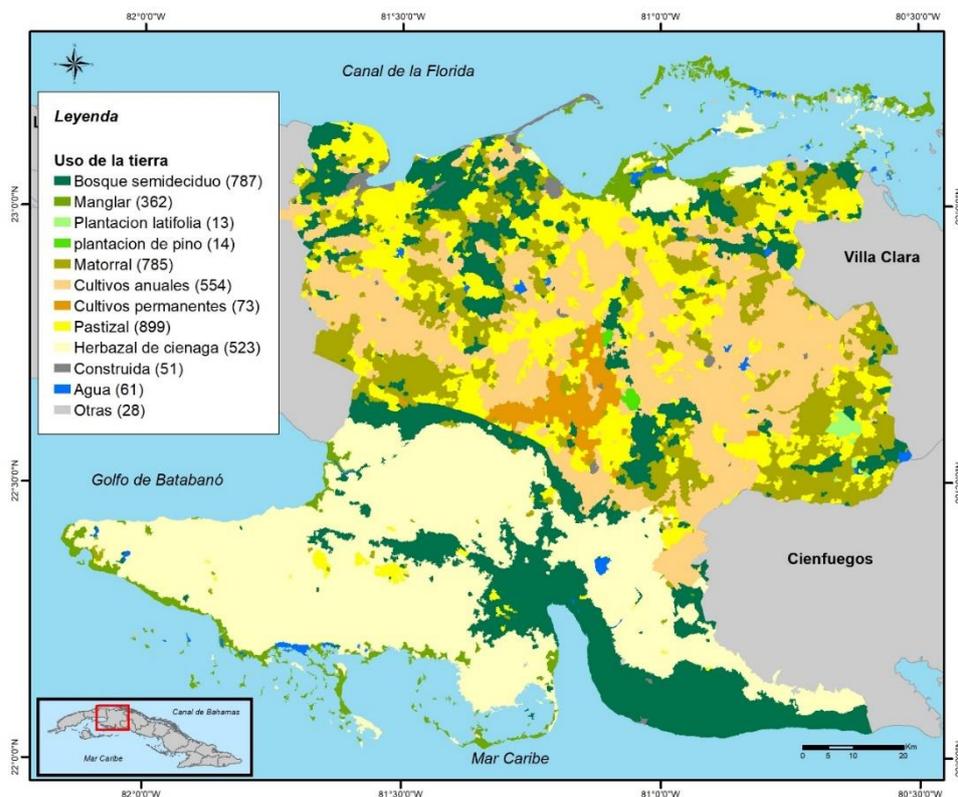


Ilustración 16. Uso de la tierra, Matanzas, 1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

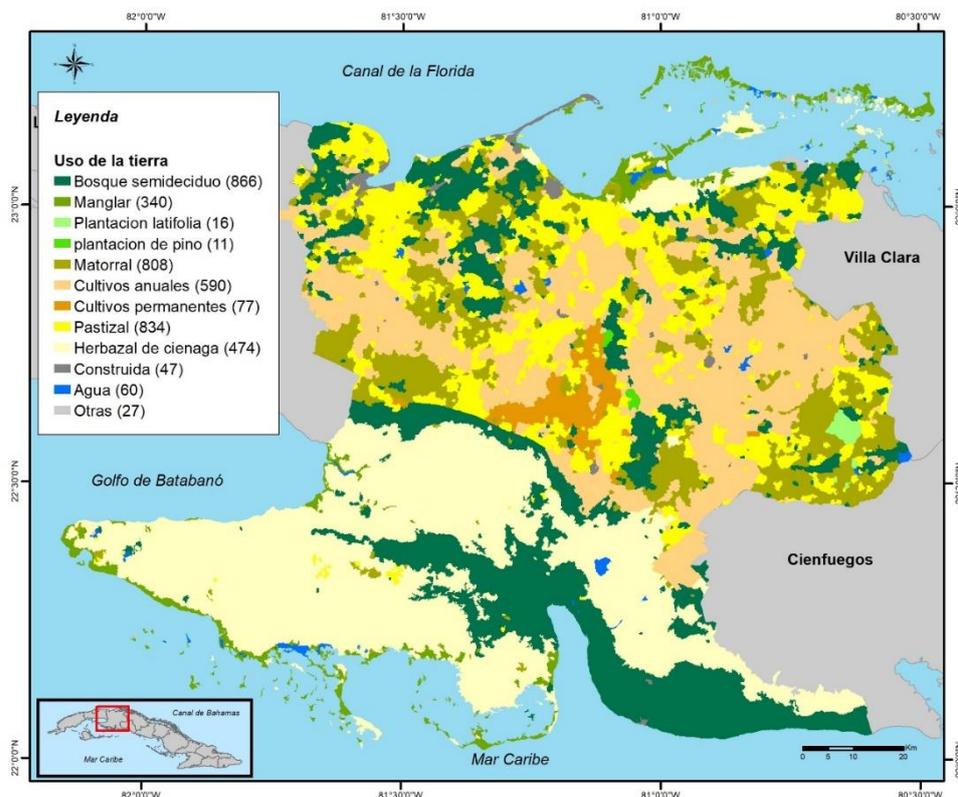


Ilustración 17. Uso de la tierra, Matanzas, 1989.

Fuente: Elaborado por el autor.

En cuanto al área ocupada por cada una de las categorías, sobresalen las categorías de herbazal de ciénaga, cultivos anuales, bosque semideciduo y matorral, agrupando estas aproximadamente entre el 78 y 79% de toda el área de la provincia para todo el período de estudio (Tabla 16).

Tabla 16. Área ocupada por categorías de uso (miles de ha).

Categorías de uso	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019
Bosque semideciduo	220.79	210.72	218.74	208.12	214.19	211.24	209.46
Manglar	35.01	36.50	34.77	35.05	36.09	37.17	36.62
Matorral	139.07	138.00	141.58	138.99	142.27	138.46	141.62
Plantación latifolia	3.23	2.75	3.13	3.01	3.75	3.13	3.68
Plantación pino	1.35	1.66	1.78	2.05	1.77	1.83	1.78
Cultivos anuales	231.56	231.26	230.42	230.85	228.13	228.53	228.68
Cultivos perennes	22.93	22.82	23.17	23.18	23.51	23.49	23.08
Pastizal	166.37	170.87	165.66	175.12	165.21	169.22	168.30
Herbazal de ciénaga	342.28	347.73	342.40	345.73	347.31	348.80	348.42
Agua	6.80	6.80	6.87	6.83	6.83	6.87	6.93
Construida	8.03	8.23	8.23	8.25	8.25	8.25	8.25
Otras	1.81	1.90	2.48	2.04	1.91	2.24	2.40
TOTAL				1179.23			

Fuente: Elaborado por el autor.

3.2. Cambio de uso de la tierra

Una manera clara de mostrar las tasas de conversión es comparar las tasas de cambio entre los diversos usos de la tierra. Las que se disponen negativas indican las categorías que están perdiendo y las positivas son las que están ganando superficie (Tabla 17).

Tabla 17. Tasas de cambio expresadas en %.

Usos	1989-1994	1994-1999	1999-2004	2004-2009	2009-2014	2014-2019
<i>Bosque semideciduo</i>	-0.93	0.75	-0.99	0.58	-0.28	-0.17
<i>Manglar</i>	0.84	-0.97	0.16	0.59	0.59	-0.30
<i>Matorral</i>	-0.15	0.51	-0.37	0.47	-0.54	0.45
<i>Plantación latifolia</i>	-3.15	2.62	-0.75	4.46	-3.56	3.29
<i>Plantación pino</i>	4.22	1.35	2.94	-2.89	0.61	-0.46
<i>Cultivos anuales</i>	-0.03	-0.07	0.04	-0.24	0.04	0.01
<i>Cultivos perennes</i>	-0.10	0.31	0.01	0.29	-0.02	-0.34
<i>Pastizal</i>	0.53	-0.62	1.12	-1.16	0.48	-0.11
<i>Herbazal de ciénaga</i>	0.32	-0.31	0.19	0.09	0.09	-0.02
<i>Agua</i>	0.00	0.22	-0.13	0.01	0.12	0.18
<i>Construida</i>	0.49	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
<i>Otras</i>	1.00	5.50	-3.90	-1.25	3.25	1.32

Fuente: Elaborado por el autor.

En cuanto a las tasas de cambio, sobresalen las tasas de las plantaciones tanto, latifolia como de pinos, obteniendo las tasas más altas y bajas para todo el período de estudio, a excepción de la categoría “otras”. Pero, teniendo poca repercusión en las áreas de cambio debido a la poca área existente de estas categorías. Además, se observa lo cíclico de las mismas, pues se alternan en los períodos con tasas negativas y positivas, demostrándose el carácter comercial de las mismas.

3.3.1 Período 1989-1994

En la siguiente ilustración se observan las áreas de cambio que se dieron para el período 1989-1994. En total varió un 6.4% del área total del territorio, observándose las mayores áreas en el centro de la Ciénaga de Zapata (centro-sur del territorio), así como grandes porciones en la Ciénaga de Majaguillar al noreste del territorio, mientras que el resto se distribuye en la zona centro y noroeste, siendo polígonos muy dispersos (Ilustración 18).

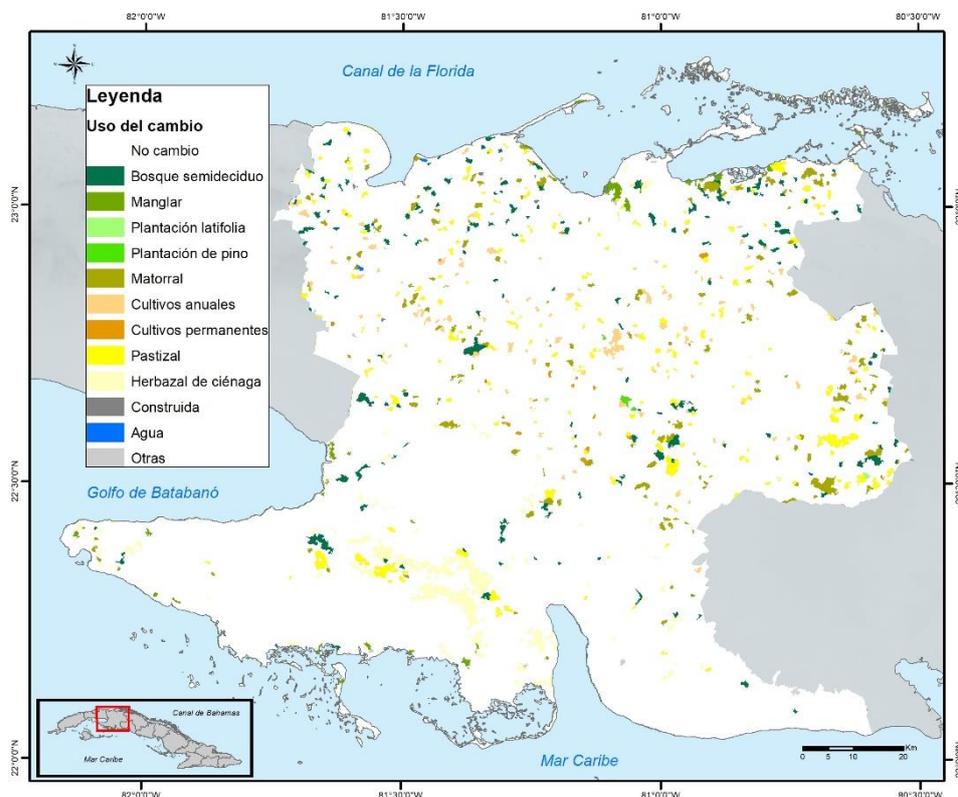


Ilustración 18. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1989-1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

En todas las categorías de uso se presentaron cambios, sobresaliendo en disminuciones las categorías de bosque semidecidual, matorral, pastizal y herbazal de ciénaga. Mientras que en ganancias sobresalen pastizal, herbazal de ciénaga, matorral y bosque semidecidual. Como se observa, sobresalieron las mismas categorías, pero en distinto orden. En cuanto al cambio neto, solo cinco categorías obtuvieron decrecimiento, sobresaliendo el bosque semidecidual, con un decrecimiento de 10 mil hectáreas. Mientras que de las de cambio neto positivo, sobresalen el herbazal de ciénaga y el pastizal, ambas con más de 4 mil hectáreas de crecimiento (Ilustraciones 19 y 20).

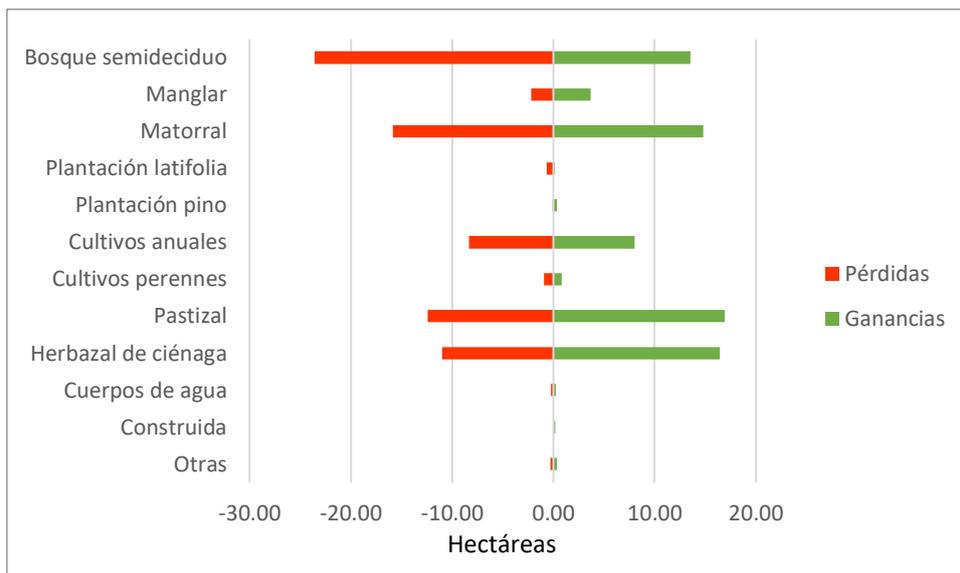


Ilustración 19. Cambio de uso de la tierra, matanzas, 1989-1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

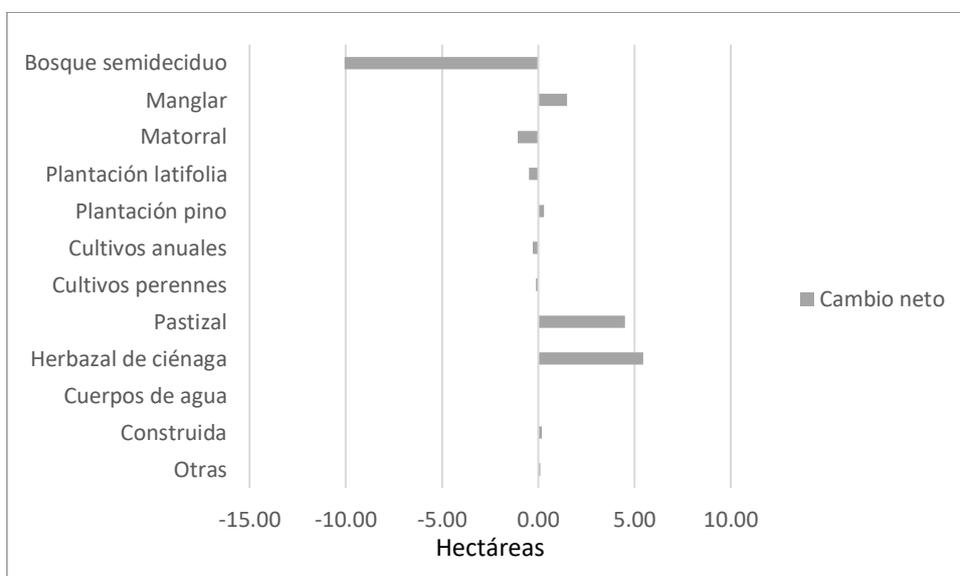


Ilustración 20. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1989-1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.2 Período 1994-1999

Las áreas de cambio para este período no son tan diferentes del primero, solo que varían en tamaño y están más dispersas en el territorio. El área total de cambio fue de un poco más de 64 mil hectáreas, lo que representó el 5.4% del territorio (Ilustración 21).

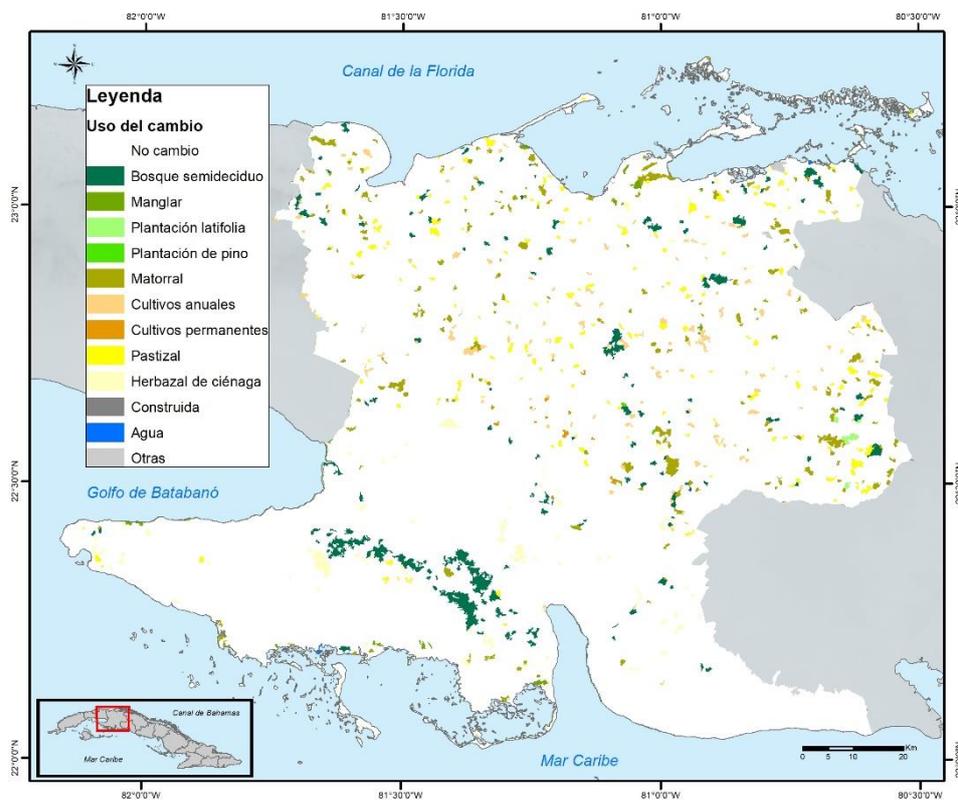


Ilustración 21. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1994-1999.
Fuente: Elaborado por el autor.

En todas las categorías de uso se presentaron cambios, a excepción de la construida y la plantación de pinos, donde estas no decrecieron. Las categorías que sobresalen por pérdidas son: pastizal, herbazal de ciénaga, matorral y bosque semidecidual. Mientras que, en cuanto a ganancias las más importantes son bosque semidecidual, matorral y pastizal. Por su parte, el cambio neto muestra decrecimientos importantes en del pastizal y el herbazal de ciénaga, mientras el bosque semidecidual cuenta con un crecimiento de un poco más de 8 mil hectáreas (Ilustraciones 22 y 23).

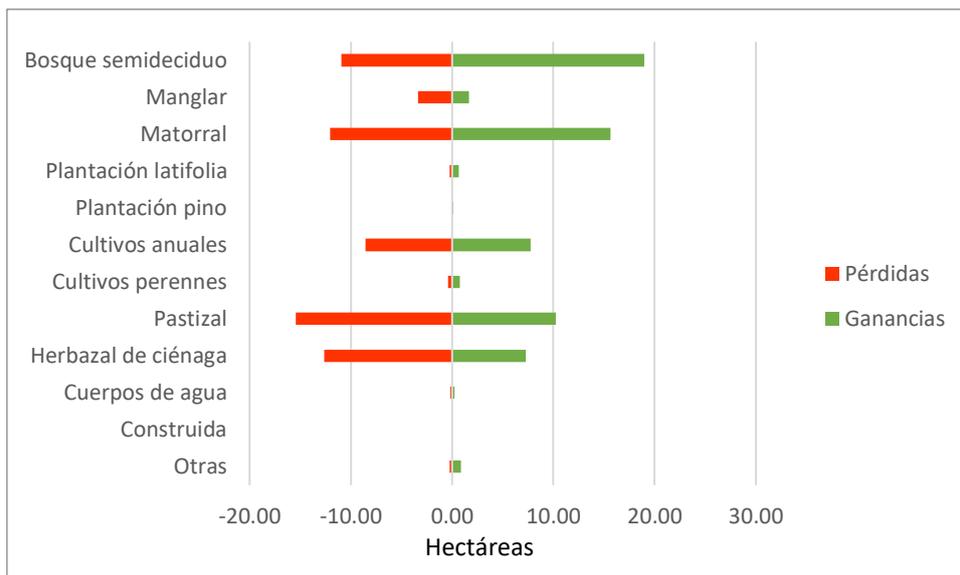


Ilustración 22. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1994-1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

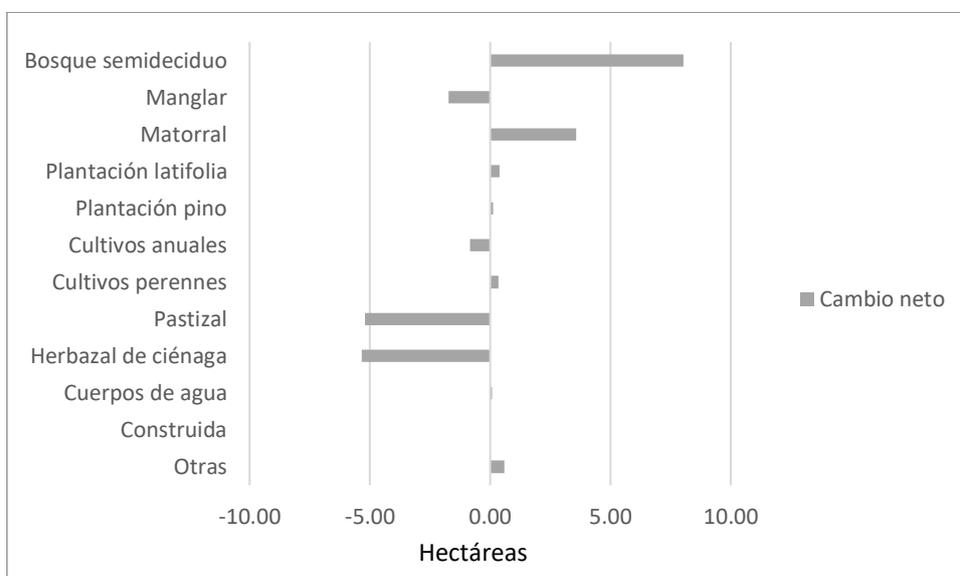


Ilustración 23. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1994-1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.3 Período 1999-2004

El cambio de área para este período es el segundo más importante para los años de estudio, llegando a superar las 79 mil hectáreas y representado el 6.73% del área de estudio. En cuanto a su distribución, se dispersan aún más las áreas de cambio sobre todo en el centro del área de estudio, a recordar acá, que en el año 2002 comienza la “Tarea Álvaro Reinoso”, lo cual repercute en la disminución de las áreas de cultivos de caña de azúcar, que sobre todo se

concentraban en la región central de la provincia. Aunque en el centro de la Ciénaga de Zapata también se presentan grandes proporciones de cambio de uso de la tierra (Ilustración 24).

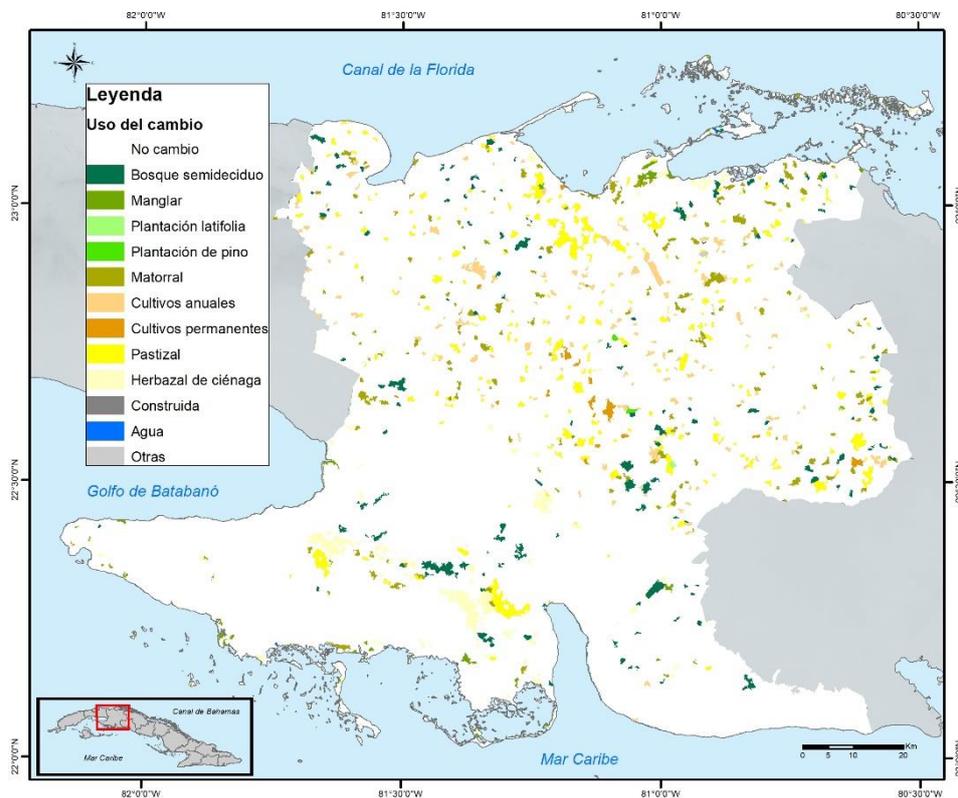


Ilustración 24. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 1999-2004.
Fuente: Elaborado por el autor.

Al igual que el ciclo anterior, todas las categorías tuvieron cambios en sus áreas, aunque la plantación de pino y construida no presentaron pérdidas en el mismo. En las pérdidas sobresalen las categorías de bosque semideciduo, matorral, pastizal y cultivos anuales. En cuanto a las ganancias, el pastizal, matorral, bosque semideciduo, herbazal de ciénaga y los cultivos anuales, poseyeron crecimiento importante en cuanto a área total. El balance neto muestra como importantes cambios solo la categoría de bosque semideciduo con una pérdida neta de más de 10 mil hectáreas, mientras que el pastizal poseyó un crecimiento neto de casi 10 mil hectáreas. Lo curioso es que los cultivos anuales, aunque perdieron mucha área, ganaron la suficiente área como para quedar con balance positivo. Y la ganancia absoluta de pastizales, pueden ser el resultado del

abandono de áreas cultivables, anteriormente destinadas a la industria azucarera (Ilustraciones 25 y 26).

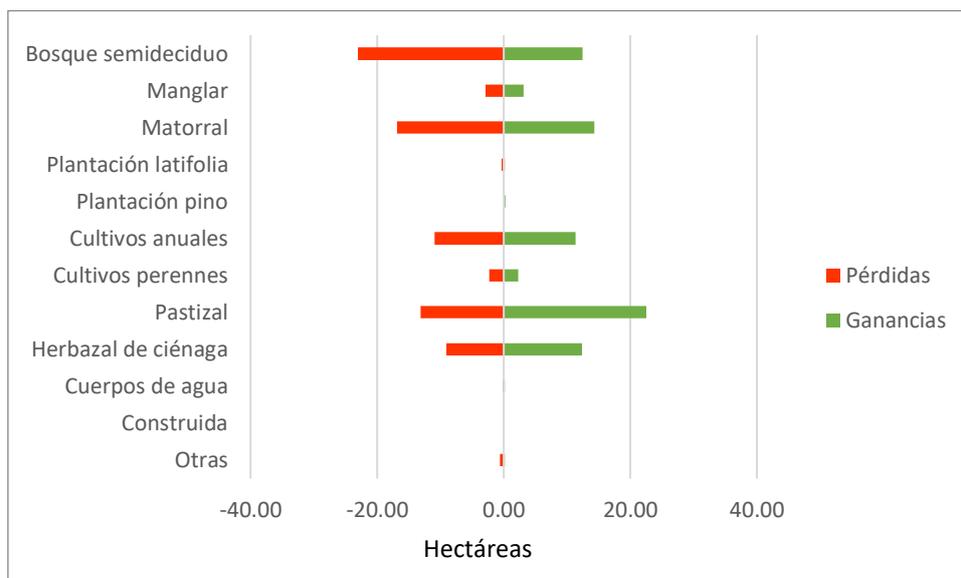


Ilustración 25. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1999-2004.
Fuente: Elaborado por el autor.

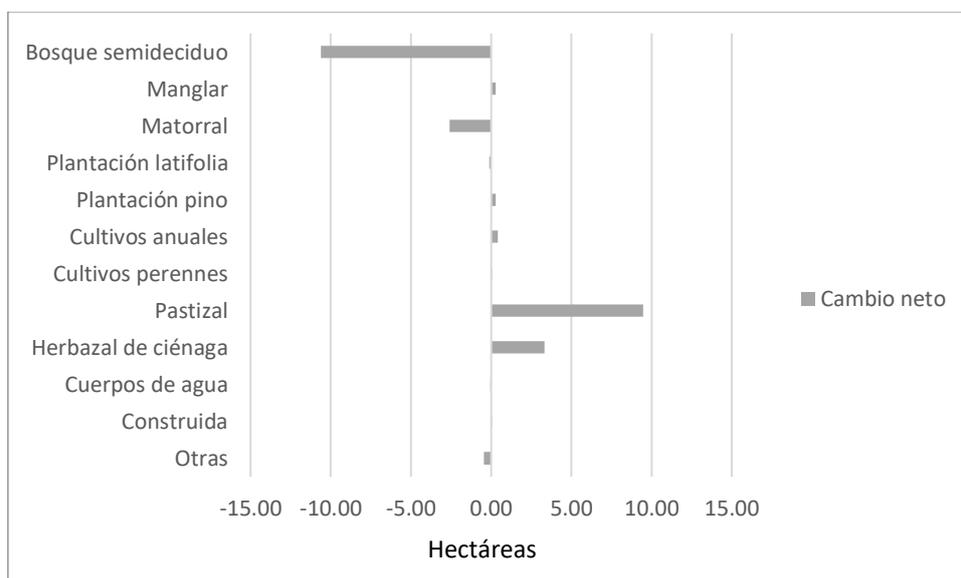


Ilustración 26. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 1999-2004.
Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.4 Período 2004-2009

En cuanto al período 2004-2009 fue el de mayores cambios de uso para toda la serie de estudio, llegando a ser de 7.42% el cambio con respecto al área total del territorio, lo cual equivale a 87.5 mil hectáreas. Su expresión espacial muestra una mayor diseminación en el territorio, pero además se pueden observar

grandes áreas de cambio en el centro norte de la provincia. Esto último demuestra que se prosiguió la desactivación de los centrales azucareros, con el respectivo abandono de las áreas de cultivo anual (Ilustración 27).

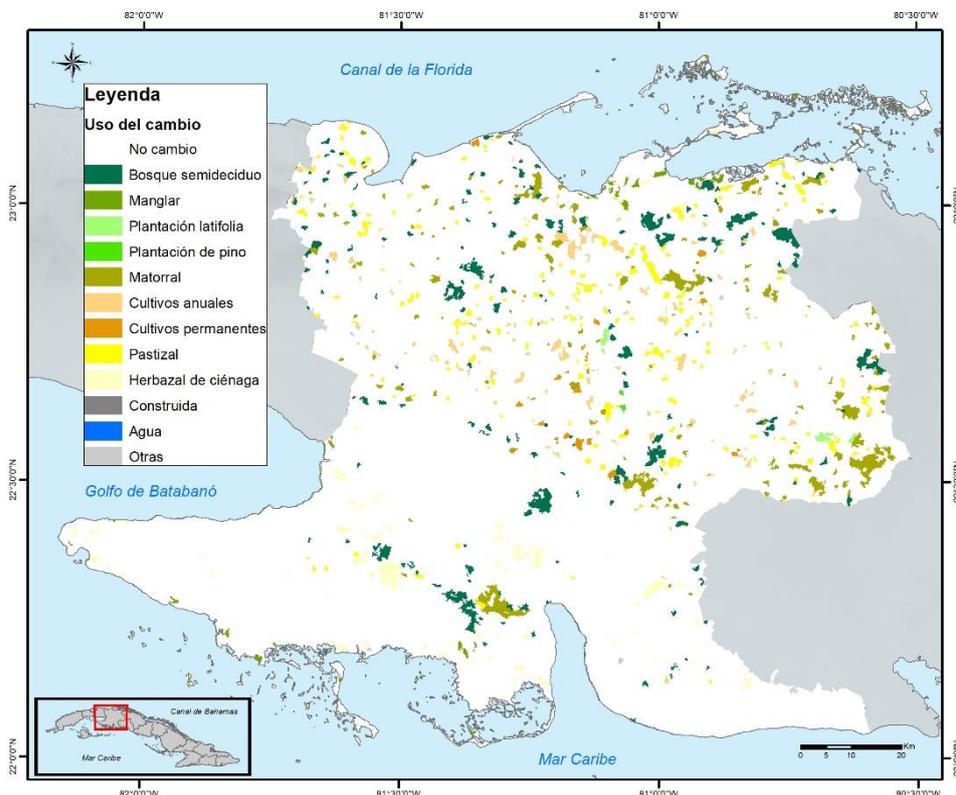


Ilustración 27. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2004-2009.
Fuente: Elaborado por el autor.

En cuanto a las pérdidas ocurridas, logran resaltar las categorías de pastizal, matorral, bosque semideciduo y cultivos anuales, con pérdidas que oscilan las -24, -18, -16 y -12 mil hectáreas respectivamente. En cuanto a las ganancias, sobresalen las categorías de bosque semideciduo, matorral, pastizal y herbazal de ciénaga, dando como resultado que el balance neto favorezca a la mayoría de las categorías, a excepción de pastizal, cultivos anuales, plantación de pino y otras. Entre las categorías de mayor aumento se encuentra el matorral, lo cual coincide con la evolución de los pastizales a matorrales con el curso del tiempo. Dejando en entredicho la política de cambio del cultivo de la caña hacia otros de ciclo corto (Ilustraciones 28 y 29).

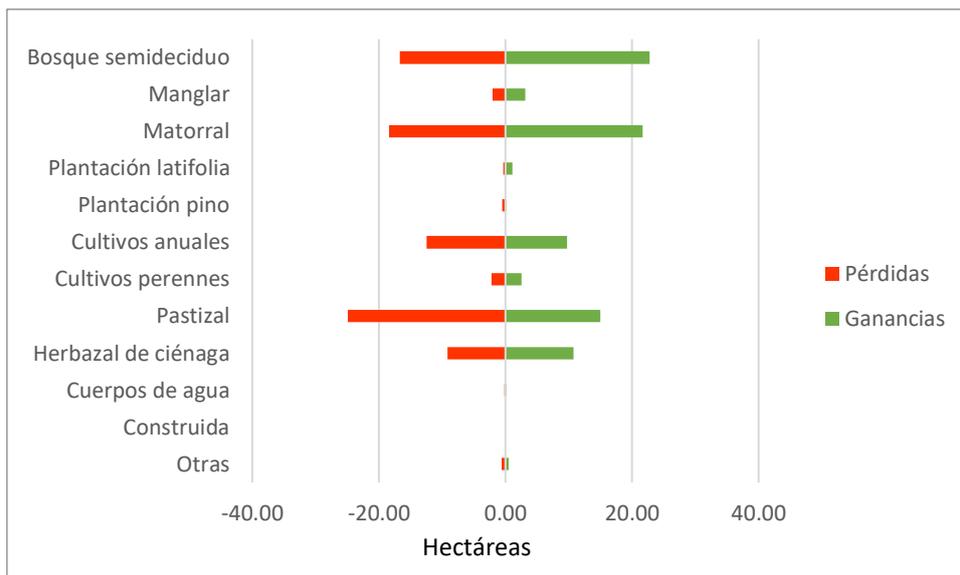


Ilustración 28. Cambio del uso de la tierra, Matanzas, 2004-2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

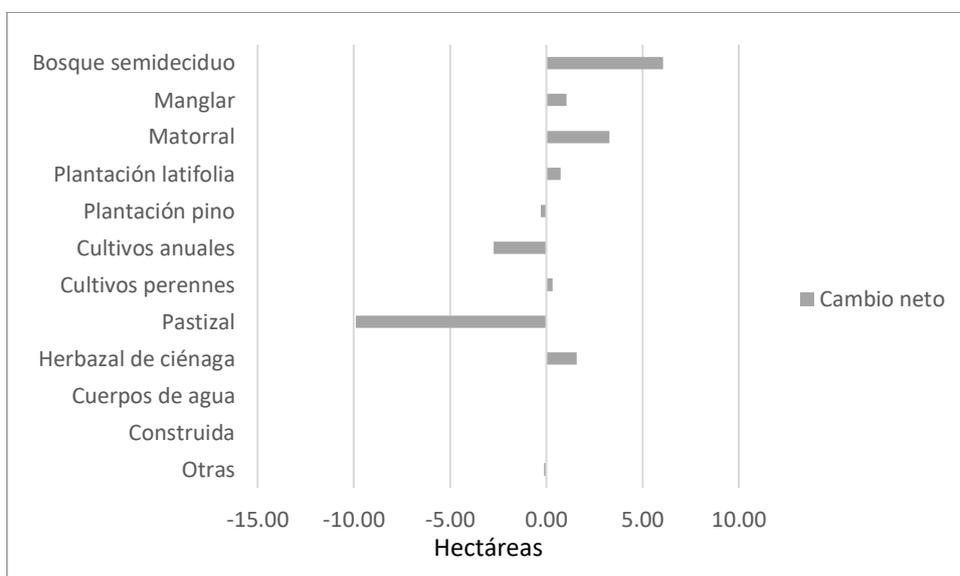


Ilustración 29. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2004-2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.5 Período 2009-2014

El cambio para este período de estudio llegó a ser de un poco más de 63 mil hectáreas, lo que representó un 5.35% del área provincial de estudio. Su representación espacial muestra menos dispersión de las áreas de cambio para todo el territorio, aunque quedando grandes áreas de cambio en el centro de la Ciénaga de Zapata, así como en la porción centro este y centro norte del territorio yumurino (Ilustración 30).

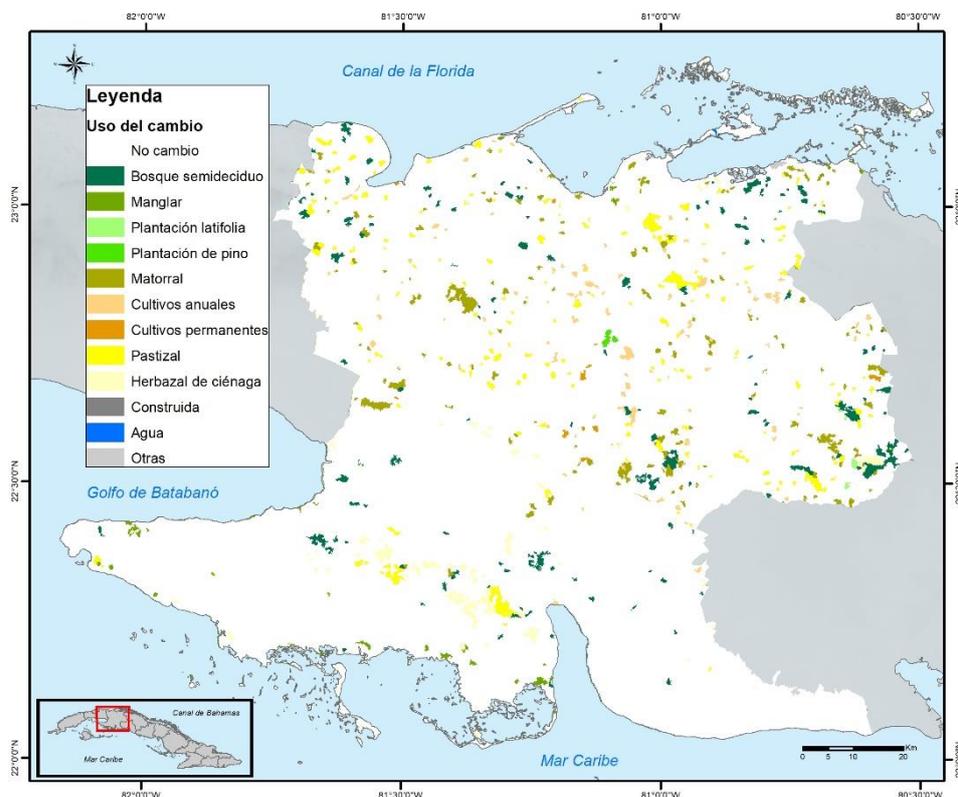


Ilustración 30. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2009-2014.
Fuente: Elaborado por el autor.

Las pérdidas fueron mayores en las categorías de matorral, bosque semideciduo y pastizal, mientras que las ganancias son mayores en el pastizal, bosque semideciduo y matorral. Esto mostró un cambio neto que perjudicó a las categorías de matorral, bosque semideciduo, plantación latifolia y cultivos perennes. Por su parte, el crecimiento se observó favorecido en el resto de las categorías, a excepción de la construida, sobresaliendo el pastizal que ganó hasta 4 mil hectáreas. Acá los cultivos y los pastizales vuelven a ganar terreno, al implementarse a partir del año 2011, políticas de entrega de tierras en usufructo para la producción de alimentos y ganadería, pero esto no conllevó un cambio drástico del uso de la tierra, lo cual era lo esperado por el gobierno (Ilustraciones 31 y 32).

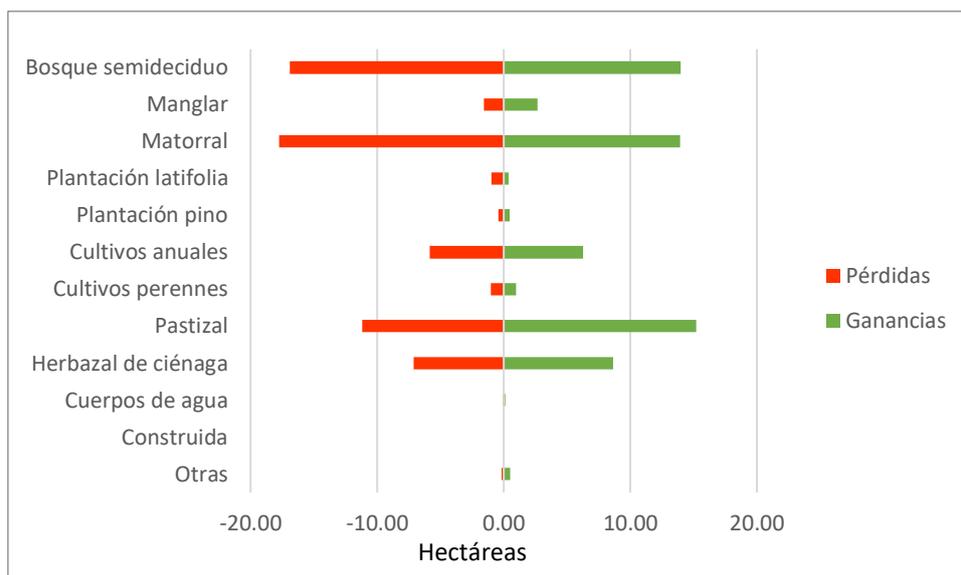


Ilustración 31. Cambio del uso de la tierra, Matanzas, 2009-2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

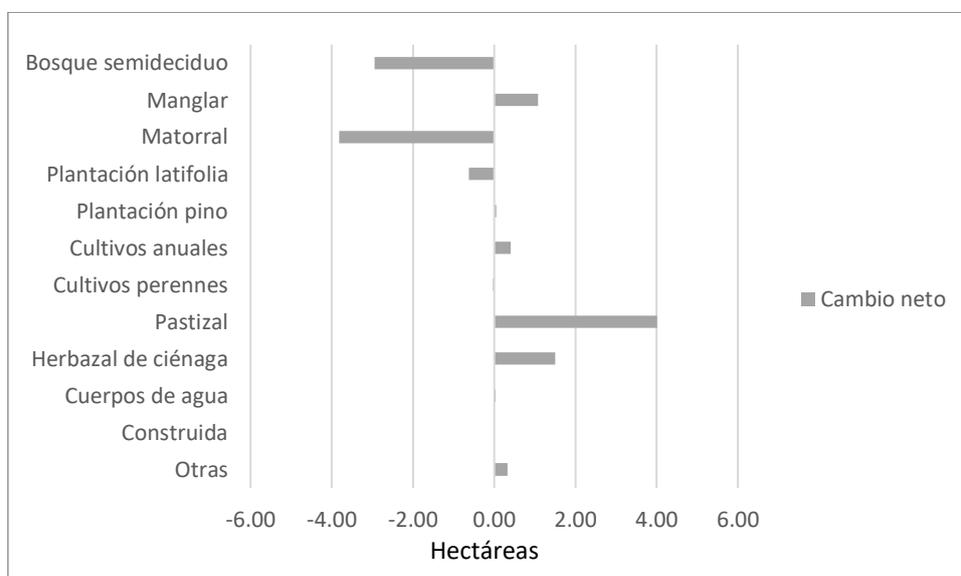


Ilustración 32. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2009-2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3.6 Período 2014-2019

Este período de estudio, fue el que menos cambio mostró en los años de estudio, solo variando el 3% del área de la provincia, lo que representó solo un poco más de 35 mil hectáreas de cambio. Esto tuvo una componente espacial, donde no se mostraron grandes áreas de cambio en el territorio, y la densidad de áreas de cambio también disminuyó drásticamente. De todos los períodos de estudio, este fue el de menos polígonos de cambio mostró (Ilustración 33).

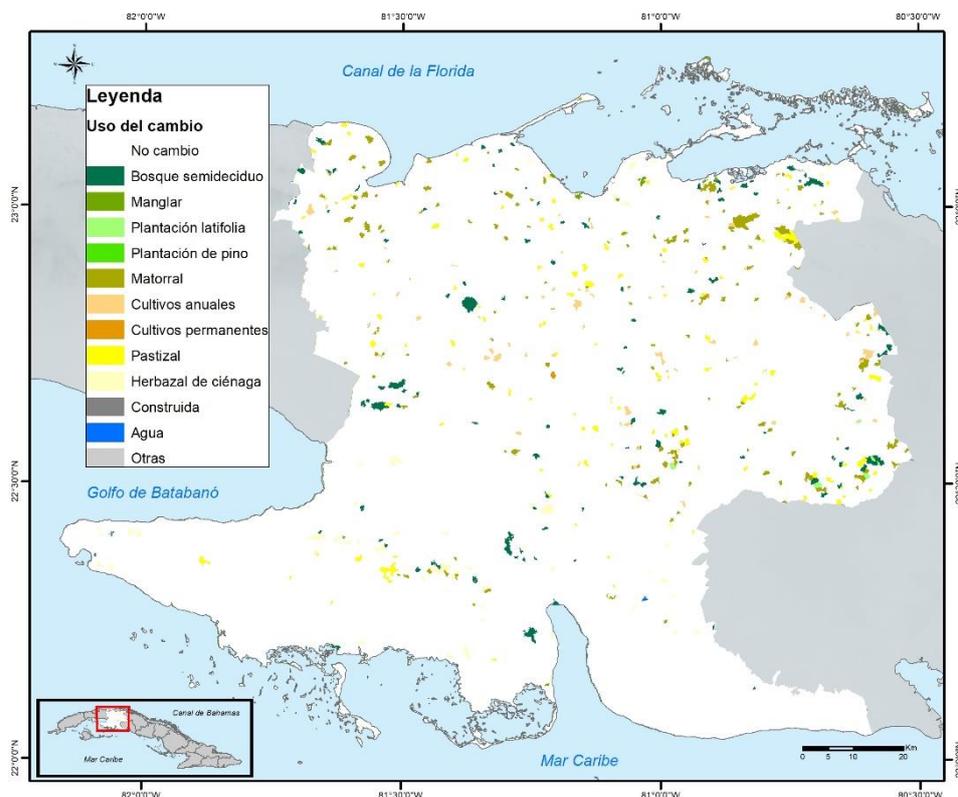


Ilustración 33. Áreas de cambio y no cambio, Matanzas, 2014-2019.
Fuente: Elaborado por el autor.

En cuanto al cambio, las pérdidas se mostraron en la mayoría de las categorías de uso de la tierra, pero hubo cuatro categorías que no contaron con pérdidas de tierras (cuerpos de agua, construida, otras y plantación latifolia). De las más importantes pérdidas que existieron en el territorio para este período se encuentra la categoría de bosque semideciduo. Por su parte las ganancias más importantes se concentraron en el matorral (Ilustración 34).

El cambio neto, mostró decrecimiento en la mitad de las categorías, pero solo el bosque semideciduo obtuvo más de mil hectáreas de pérdidas netas. Mientras que el cambio neto positivo obtuvo el más elevado territorio en los matorrales, con alrededor de 3 mil hectáreas. Obteniéndose que las políticas implementadas para la entrega de tierras en usufructo no están mostrando los resultados esperados, pues apenas crecen los cultivos anuales, pero las tierras en abandono, caracterizadas por el crecimiento de la maleza y el resurgimiento del bosque siguen creciendo en este período (Ilustración 35).

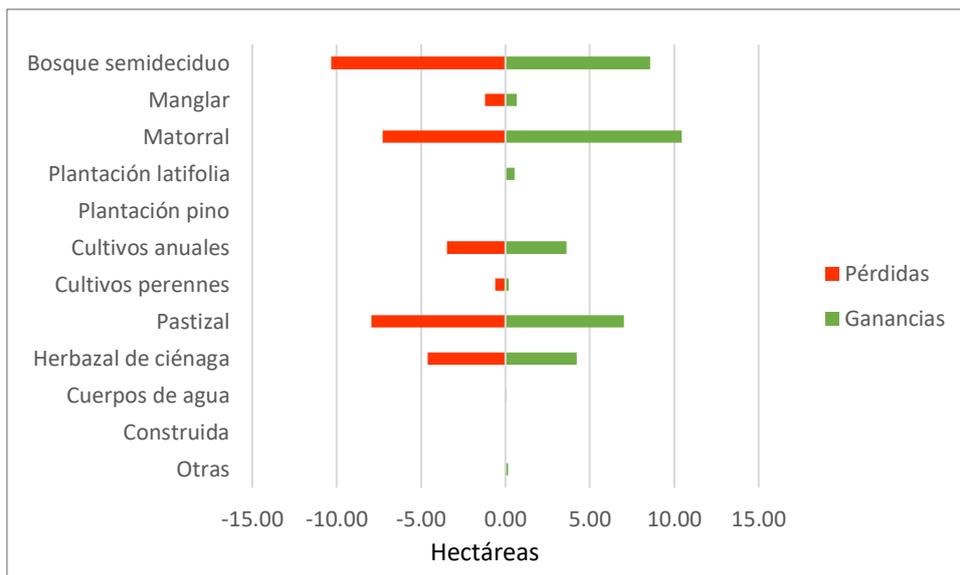


Ilustración 34. Cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2014-2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

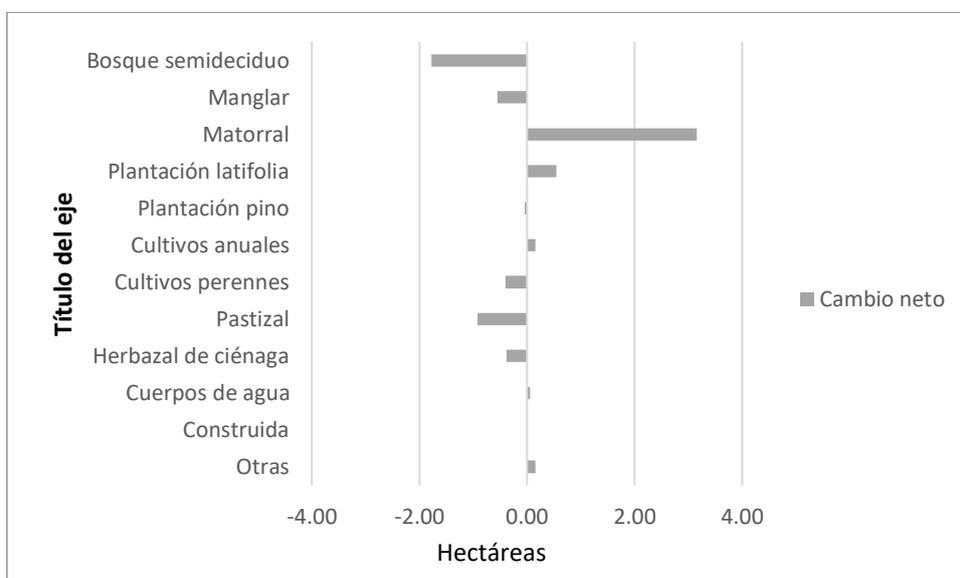


Ilustración 35. Cambio neto del uso de la tierra, Matanzas, 2014-2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.3 Intensidad del cambio de uso de la tierra

Se realiza una clasificación para interpretar la intensidad del cambio, clasificando todos los polígonos según las veces que cambia de uso. Para los polígonos que cambiaron solo entre 1 y ninguna vez, se les clasifica como de poco cambio (verde en la ilustración). Los que cambian entre 2 y 3 veces, se clasifican como medio (amarillo) y para los que cambian más de 3 veces se clasifica como elevados (rojo) (Ilustración 36).

Todo lo anterior visto, muestra como resultado un conglomerado de polígonos a los que se le debería dar un seguimiento estricto en cuanto a su cambio de uso, pues han sido muy cambiantes durante todo el período de estudio. Sobre todo, resaltan las áreas que se encuentran comprendidas en las ciénagas de Zapata y de Majaguillar, en el sur y norte del territorio de estudio.

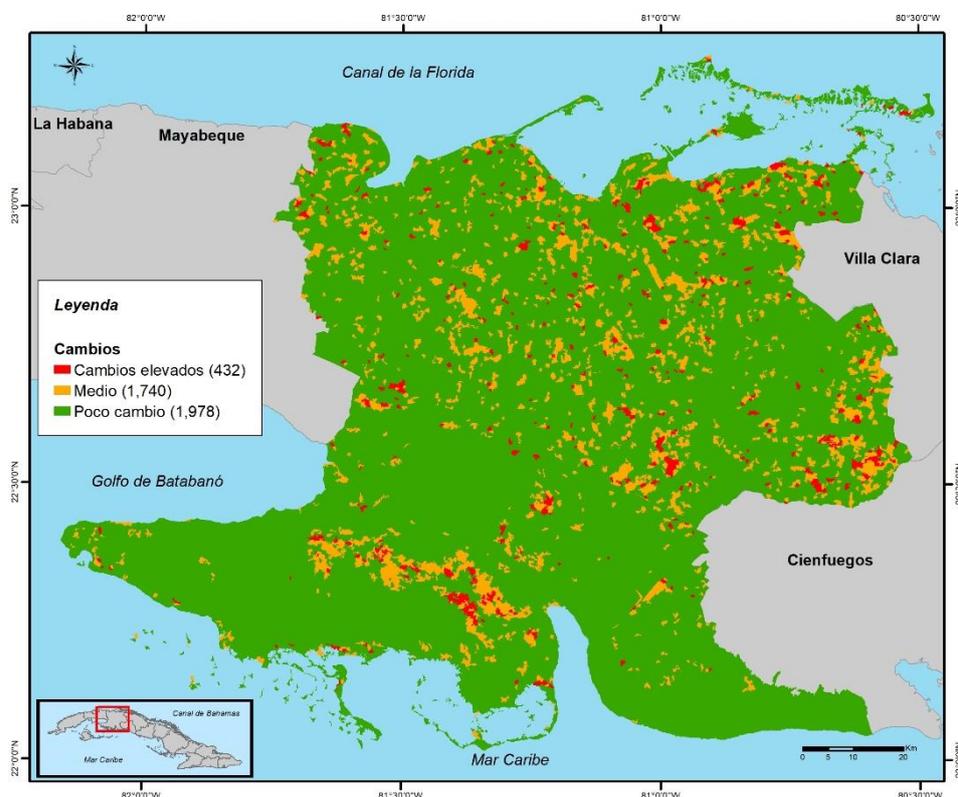


Ilustración 36. Áreas de cambio, Matanzas, 1989-2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

3.4 Validación del cambio de uso

La evaluación del cambio se realizó para el período 2014-2019, ya que fueron los años con los que se contó con mejores imágenes de alta resolución en el Google Earth, y trabajo de campo realizado en el año 2019. El total de áreas de muestreo ascendió a 1,326 y se distribuyeron como se observa en la siguiente tabla 18.

Tabla 18. Puntos de muestreo estratificados.

<i>Categorías de cambio⁸</i>	<i>Puntos fijos (30 o 25% del área si la clase es pequeña)</i>	<i>Puntos restantes (los puntos en proporción al área, después de considerar los puntos fijos)</i>	<i>TOTAL</i>
AA	30	97	127
AB	9	0	9
AE	11	0	11
AG	30	1	31
AH	1	0	1
BA	16	0	16
BB	30	87	117
BC	30	1	31
BE	30	2	32
BG	19	1	20
BI	4	0	4
CB	30	1	31
CC	30	148	178
CD	8	9	17
CE	8	0	8
CG	20	1	21
CI	2	0	2
CL	2	2	4
DC	17	0	17
DD	30	16	46
DF	2	0	2
DG	1	0	1
EA	13	0	13
EB	30	2	32
EC	5	0	5
ED	7	0	7
EE	30	57	87
EF	1	0	1
EG	26	1	27
FF	30	1	31
GA	29	1	30
GB	24	1	25
GC	8	3	11
GE	30	2	32
GG	30	70	100
GH	6	3	9
GI	4	0	4
HG	15	3	18
HH	30	10	40

⁸ Anexo 3.

<i>II</i>	30	1	31
<i>JG</i>	1	0	1
<i>JJ</i>	28	1	29
<i>KK</i>	30	4	34
<i>LL</i>	30	3	33
TOTAL	797	529	1326

Fuente: Elaborado por el autor a partir de Olofsson et al. (2014).

Con estos se obtiene la matriz de confusión bruta (Anexo 1). A partir de ella, se construye la matriz de confusión corregida por la proporción de las categorías en el mapa (Anexo 2), de la cual se obtienen los valores de confiabilidad y su respectivo intervalo de confianza (Tabla 19). Destaca la elevada fiabilidad global, 97%, y su intervalo de confianza de $\pm 0.8\%$.

Tabla 19. Coeficientes de índices de confiabilidad y su intervalo de confianza.

<i>Categorías de cambio⁹</i>	<i>Usuario</i>		<i>Productor</i>	
	Fiabilidad	Intervalo de confianza	Fiabilidad	Intervalo de confianza
<i>AA</i>	0.992	0.016	0.999	0.003
<i>AB</i>	0.889	0.210	0.889	0.000
<i>AE</i>	0.900	0.190	0.854	0.000
<i>AG</i>	0.935	0.088	0.554	0.003
<i>AH</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>BA</i>	0.882	0.156	0.937	0.000
<i>BB</i>	0.991	0.017	0.999	0.003
<i>BC</i>	0.968	0.063	0.572	0.003
<i>BE</i>	1.000	0.000	0.788	0.002
<i>BG</i>	1.000	0.000	0.908	0.000
<i>BI</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>CB</i>	0.882	0.111	0.554	0.003
<i>CC</i>	0.989	0.016	1.000	0.005
<i>CD</i>	0.800	0.179	0.727	0.000
<i>CE</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>CG</i>	1.000	0.000	0.388	0.003
<i>CI</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>CL</i>	0.800	0.358	1.000	0.000
<i>DC</i>	0.938	0.121	0.976	0.000
<i>DD</i>	1.000	0.000	0.999	0.000
<i>DF</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>DG</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>EA</i>	0.867	0.176	1.000	0.000

⁹ Anexo 3.

<i>EB</i>	0.968	0.063	0.736	0.003
<i>EC</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>ED</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>EE</i>	0.913	0.059	0.998	0.007
<i>EF</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>EG</i>	0.962	0.075	0.878	0.000
<i>FF</i>	0.939	0.083	0.664	0.001
<i>GA</i>	0.967	0.066	0.499	0.003
<i>GB</i>	0.840	0.147	0.851	0.000
<i>GC</i>	0.667	0.243	1.000	0.000
<i>GE</i>	0.889	0.105	0.554	0.004
<i>GG</i>	0.990	0.021	0.998	0.003
<i>GH</i>	0.800	0.253	0.820	0.000
<i>GI</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>HG</i>	0.789	0.187	0.929	0.000
<i>HH</i>	0.947	0.072	0.792	0.006
<i>II</i>	0.967	0.066	0.715	0.002
<i>JG</i>	1.000	0.000	1.000	0.000
<i>JJ</i>	1.000	0.000	0.945	0.000
<i>KK</i>	0.871	0.120	0.981	0.001
<i>LL</i>	1.000	0.000	0.998	0.000
<i>Fiabilidad global</i>			0.979	
<i>Intervalo de confianza</i>			0.008	

Fuente: Elaborado por el autor.

Uno de los objetivos de la matriz estimada por el método de Card (1982), es la obtención del área estimada ajustada con los puntos de muestreo y proporción de las categorías en el mapa. En la tabla 20, hace una comparación entre las áreas estimadas en el mapa y el área ajustada a partir del método de Card (1982). En la misma, se observa que en las áreas obtenidas a partir del mapa existen un grupo de categorías de cambio que están subestimadas, siendo las más representativas el herbazal de ciénaga-pastizal y pastizal-bosque. En el otro extremo, de sobreestimadas, aunque no existen muchas, ni tan elevados los índices, se pueden mencionar el caso de la categoría pastizal-herbazal de ciénaga y herbazal de ciénaga-construida.

Tabla 20. Comparación entre el área del mapa y le área estimada según método de Card (1982).

Categoría de cambio ¹⁰	Área de mapa (ha)	Área estimada (Método de Card, 1982) (ha)	Coefficiente de variación	% del área en el mapa	% del área estimada
AA	225055.9	223388.5	0.01	0.1909	0.1894
AB	518.5	518.1	0.00	0.0004	0.0004
AE	699.1	736.7	-0.05	0.0006	0.0006
AG	2233.7	3769.7	-0.69	0.0019	0.0032
AH	21.2	21.2	0.00	0.0000	0.0000
BA	974.0	917.0	0.06	0.0008	0.0008
BB	200898.0	199401.8	0.01	0.1704	0.1691
BC	2665.9	4513.5	-0.69	0.0023	0.0038
BE	5292.5	6718.3	-0.27	0.0045	0.0057
BG	1162.3	1280.5	-0.10	0.0010	0.0011
BI	245.5	245.5	0.00	0.0002	0.0002
CB	2461.4	3918.8	-0.59	0.0021	0.0033
CC	344191.5	340492.9	0.01	0.2919	0.2887
CD	240.8	265.0	-0.10	0.0002	0.0002
CE	480.4	480.4	0.00	0.0004	0.0004
CG	1266.0	3266.2	-1.58	0.0011	0.0028
CI	103.0	103.0	0.00	0.0001	0.0001
CL	60.7	48.5	0.20	0.0001	0.0000
DC	1057.6	1015.6	0.04	0.0009	0.0009
DD	35968.2	35992.3	0.00	0.0305	0.0305
DF	99.4	99.4	0.00	0.0001	0.0001
DG	47.7	47.7	0.00	0.0000	0.0000
EA	806.5	699.0	0.13	0.0007	0.0006
EB	4109.7	5402.8	-0.31	0.0035	0.0046
EC	258.8	258.8	0.00	0.0002	0.0002
ED	411.0	411.0	0.00	0.0003	0.0003
EE	131166.8	120051.9	0.08	0.1112	0.1018
EF	52.7	52.7	0.00	0.0000	0.0000
EG	1653.5	1811.0	-0.10	0.0014	0.0015
FF	2243.2	3171.5	-0.41	0.0019	0.0027
GA	1843.6	3568.3	-0.94	0.0016	0.0030
GB	1476.9	1457.8	0.01	0.0013	0.0012
GC	249.4	166.3	0.33	0.0002	0.0001
GE	3979.0	6388.4	-0.61	0.0034	0.0054
GG	161287.9	159911.0	0.01	0.1368	0.1356
GH	181.3	176.8	0.02	0.0002	0.0001
GI	200.4	200.4	0.00	0.0002	0.0002
HG	604.6	513.6	0.15	0.0005	0.0004

¹⁰ Leyenda de categorías de cambio en el Anexo 3.

HH	22881.9	27380.5	-0.20	0.0194	0.0232
II	3127.8	4227.8	-0.35	0.0027	0.0036
JG	42.0	42.0	0.00	0.0000	0.0000
JJ	1784.3	1888.5	-0.06	0.0015	0.0016
KK	8248.4	7320.0	0.11	0.0070	0.0062
LL	6871.7	6883.8	0.00	0.0058	0.0058
TOTAL	1179224.6	1179224.6			

Fuente: Elaborado por el autor.

En la siguiente tabla 21, se muestran las áreas estimadas y su intervalo de confianza en hectáreas. Resaltan categorías de cambio que poseen un intervalo de confianza muy elevado con respecto a su área, como es el caso de pastizal-herbazal de ciénaga y herbazal de ciénaga-cultivos anuales, superando el intervalo de confianza el área estimada por estas categorías. Pero, la suma del área de todas las categorías de cambio que poseen elevado intervalo de confianza en ha, no sobrepasa el 4% del área total del área de estudio.

Tabla 21. Intervalos de confianza para el área estimada (ha).

Categorías de cambio ¹¹	Área estimada (ha)	Intervalo de confianza (ha)	Límite inferior (ha)	Límite superior (ha)
AA	223388.5	3733.6	219654.8	227122.1
AB	518.1	225.2	292.9	743.4
AE	736.7	280.6	456.1	1017.4
AG	3769.7	3489.3	280.3	7259.0
AH	21.2	0.0	21.2	21.2
BA	917.0	266.7	650.3	1183.7
BB	199401.8	3844.1	195557.6	203245.9
BC	4513.5	3958.5	555.0	8472.1
BE	6718.3	2794.4	3923.9	9512.7
BG	1280.5	160.3	1120.1	1440.8
BI	245.5	0.0	245.5	245.5
CB	3918.8	3694.6	224.2	7613.4
CC	340492.9	5675.4	334817.6	346168.3
CD	265.0	185.2	79.8	450.3
CE	480.4	0.0	480.4	480.4
CG	3266.2	3847.7	0.0	7113.9
CI	103.0	0.0	103.0	103.0
CL	48.5	0.0	48.5	48.5
DC	1015.6	162.0	853.5	1177.6
DD	35992.3	32.5	35959.8	36024.8
DF	99.4	0.0	99.4	99.4

¹¹ Leyenda de categorías de cambio en el Anexo 3.

DG	47.7	0.0	47.7	47.7
EA	699.0	143.6	555.4	842.6
EB	5402.8	3054.3	2348.6	8457.1
EC	258.8	0.0	258.8	258.8
ED	411.0	0.0	411.0	411.0
EE	120051.9	8032.7	112019.2	128084.7
EF	52.7	0.0	52.7	52.7
EG	1811.0	426.6	1384.4	2237.6
FF	3171.5	1174.9	1996.6	4346.5
GA	3568.3	3621.3	0.0	7189.6
GB	1457.8	454.8	1003.0	1912.6
GC	166.3	61.6	104.7	227.8
GE	6388.4	4344.4	2044.0	10732.8
GG	159911.0	3715.8	156195.1	163626.8
GH	176.8	109.7	67.1	286.6
GI	200.4	0.0	200.4	200.4
HG	513.6	161.2	352.3	674.8
HH	27380.5	7142.3	20238.1	34522.8
II	4227.8	1850.7	2377.1	6078.5
JG	42.0	0.0	42.0	42.0
JJ	1888.5	204.3	1684.2	2092.9
KK	7320.0	1174.9	6145.1	8495.0
LL	6883.8	0.0	6883.8	6883.8

Fuente: Elaborado por el autor.

Este análisis lleva a la conclusión de que el mapa de cambio de uso de la tierra para el período 2014-2019 posee errores en la estimación de sus áreas, sobre todo en las más pequeñas. Pero, basado en la concepción de que los mapas son un modelo de representación de la realidad, y como modelo no es posible representarse perfectamente; apoyado, en que el método de clasificación se basa en clasificaciones interdependientes, similar al método de clasificación interdependiente propuesto por la FAO (1996), lo cual evita la creación de cambios erróneos por clasificaciones independientes y permite elaborar mapas de distintas fechas que son congruentes en el tiempo (Mas et al., 2003); y siendo la fiabilidad global del mapa de cambio de uso de la tierra de 97%, se determina hacer uso del mapa para proseguir la estimación del carbono por el cambio de uso de la tierra. No obstante, sería ideal profundizar en este tema para futuros trabajos, ya que ello podría dar falsos resultados a la hora de proponer áreas de intervención para proyectos basados en el cambio de uso de la tierra.

4. ESTIMACIÓN DE CARBONO POR EL CAMBIO DE USO DE LA TIERRA

Cuando se habla de estimación de carbono en este capítulo, se refiere al carbono total, que es el resultado de la suma entre el carbono de la biomasa y del suelo. La estimación de carbono se realizó para ambos almacenes de carbono en cada año de estudio, comparándola con el año antecesor.

Indistintamente se escribirá como emisiones refiriéndose tanto a emisiones o remociones, la única diferencia será el signo al escribir. Cuando se hable de emisiones negativas, se entenderá como remociones de la atmósfera, mientras que las emisiones positivas, entonces serán emisiones a la atmósfera.

4.1. Variación del carbono en biomasa

El carbono en biomasa, tal y como se explicó en la sección anterior es el carbono que se acumula en la parte viva del árbol, y está compuesto por la biomasa aérea y subterránea.

Para la confección de los mapas de carbono en biomasa, se dividieron en cinco categorías las emisiones, quedando de la siguiente manera:

- i. Remociones altas o emisiones negativas altas, menos que -10 y hasta -24 toneladas de carbono por hectárea
- ii. Remociones bajas o emisiones negativas bajas, menos que 0 hasta -10 toneladas de carbono por hectárea
- iii. Nulo, 0 toneladas de carbono por hectárea
- iv. Emisiones bajas o emisiones positivas bajas, mayor que 0 y hasta 10 toneladas de carbono por hectárea
- v. Emisiones altas o emisiones positivas altas, mayor que 10 y hasta 26.00 toneladas de carbono por hectárea

4.1.1 Emisiones de carbono en biomasa, 1989

Para este año en específico, el que inicia la serie del estudio, no se estiman las emisiones por el cambio, sino que solo se contabiliza el incremento anual de existencia de carbono en biomasa, para las tierras que siguen en el mismo uso. Dado que según IPCC (2006a), se asume que para el primer año de estudio, se considera que las tierras no han tenido cambios anteriores.

La distribución espacial de las emisiones se presenta como grandes parches con remociones bajas, coincidiendo con las áreas de las categorías de bosque semidecídulo, manglar, matorral, plantación latifolia y pino, así como los cultivos perennes (Ilustración 37).

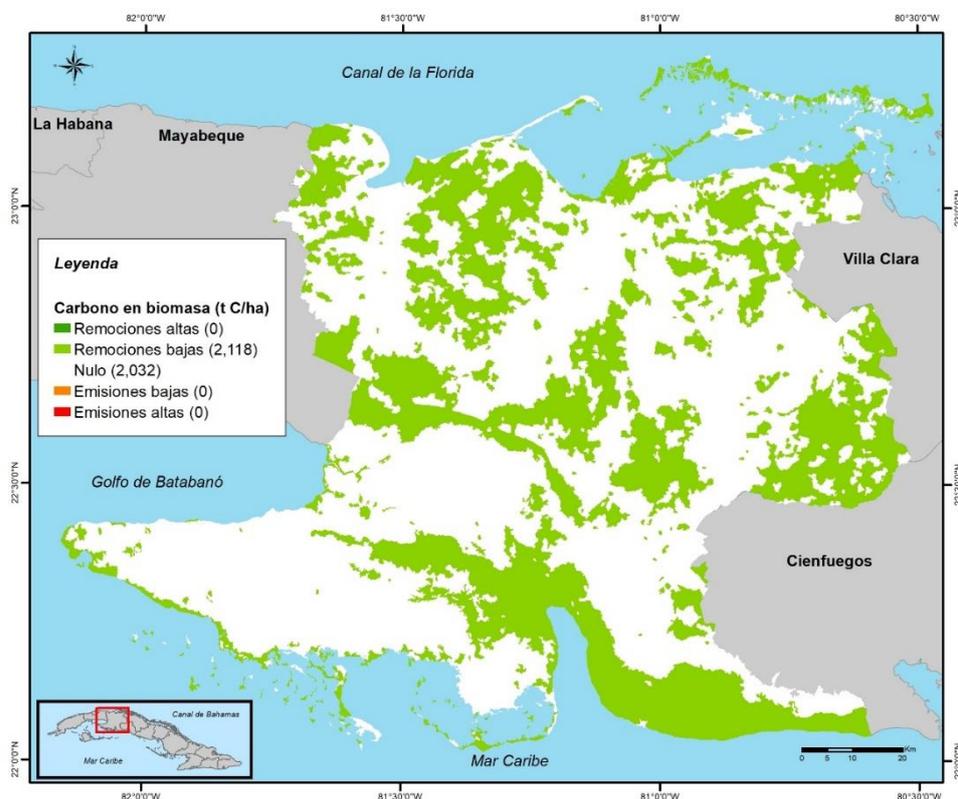


Ilustración 37. Carbono en biomasa debido cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1989.

Fuente: Elaborado por el autor.

En la siguiente ilustración se observa como la mayor parte de las emisiones, remociones para este caso en específico, pertenecen al matorral, seguidas del bosque semidecídulo, y sumando en total una emisión, para el año 1989, de - 924.69 mil toneladas de carbono para el año (Ilustración 38).

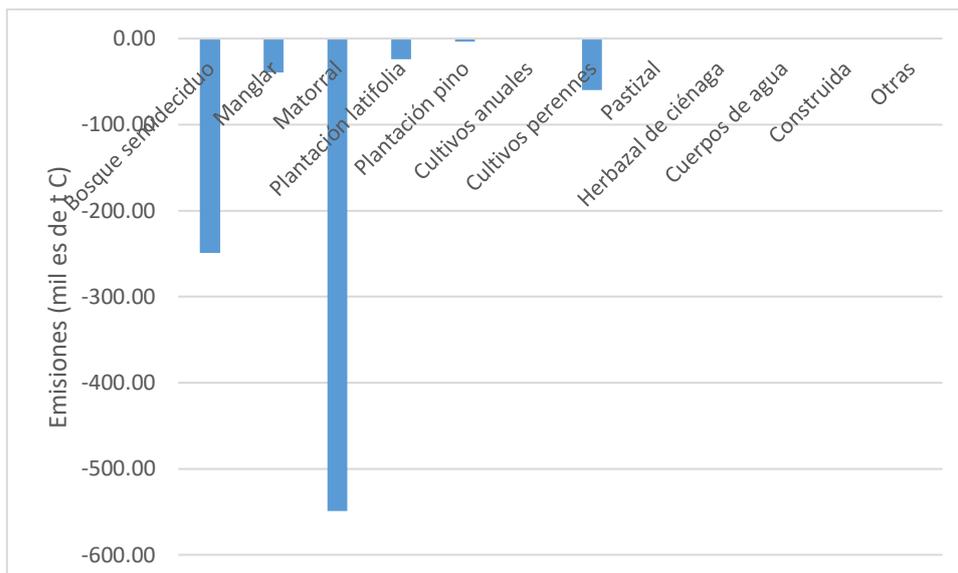


Ilustración 38. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1989.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.2 Emisiones de carbono en biomasa, 1994

Las emisiones nulas constituyen la mayor parte del territorio, debido en su generalidad al no cambio de uso en esos lugares, pero también inciden los cambios que no tienen repercusión en las emisiones. También sobresalen las remociones bajas en gran parte del territorio. Las áreas con emisiones altas destacan en la zona central de la Ciénaga de Zapata, y algunos sectores dispersos en todo el territorio, mientras que las zonas de remoción alta, aparecen muy dispersas (Ilustración 39).

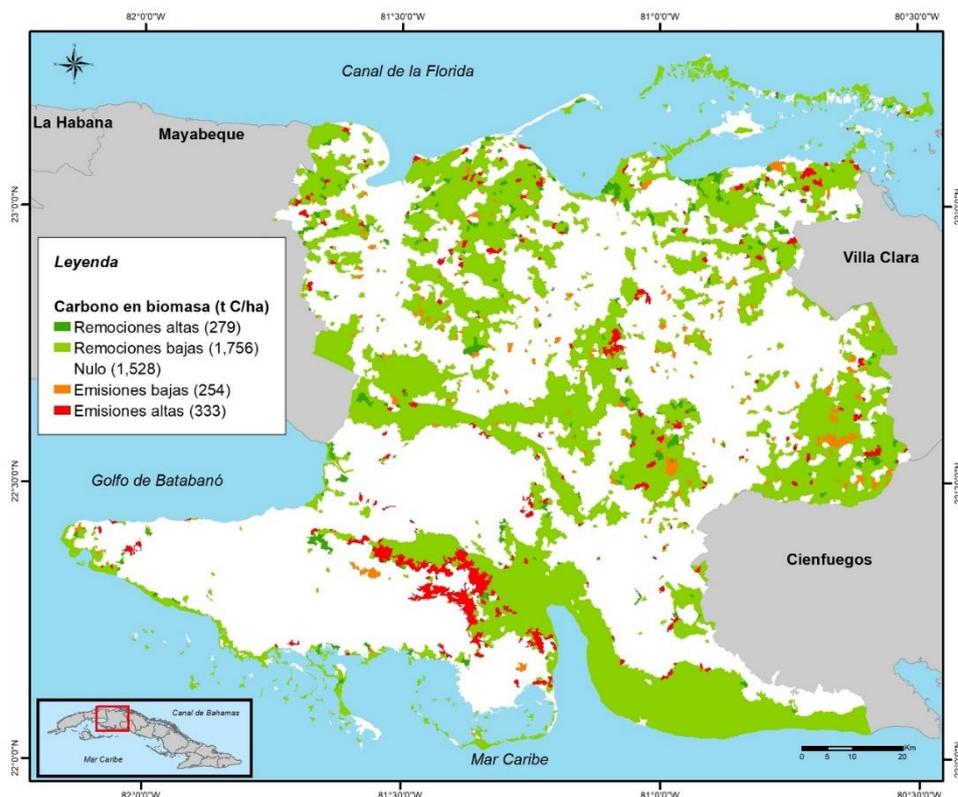


Ilustración 39. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

Parecido al año anterior, las mayores remociones se concentran en las categorías de matorral y bosque semidecuido, pero también aparecen emisiones bastante elevadas en las categorías de herbazal de ciénaga y pastizal. Esto último, sobre todo, debido a la pérdida de bosque semidecuido en la zona centro de la Ciénaga de Zapata, y convertida a herbazal de ciénaga. En total, las emisiones netas fueron de -628.72 mil toneladas de carbono (Ilustración 40).

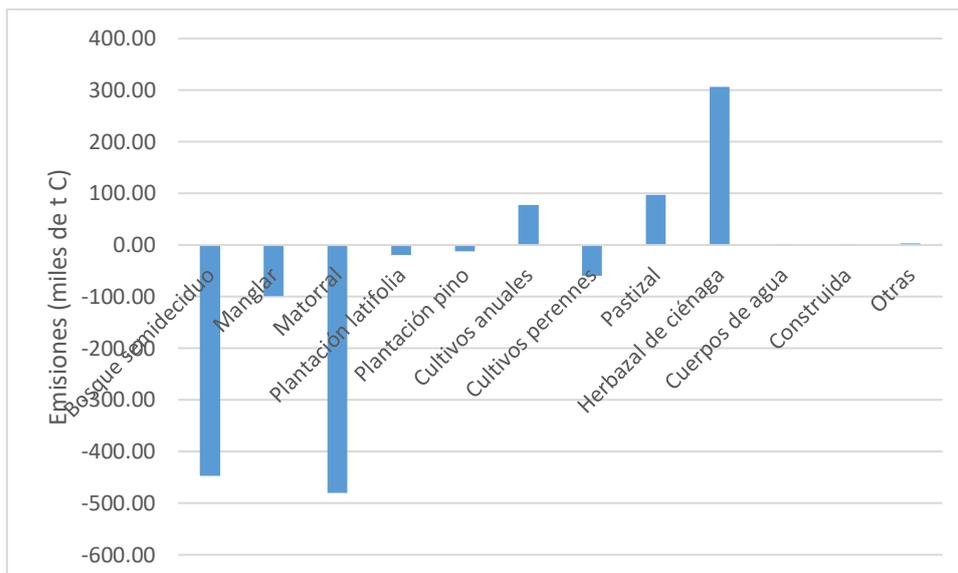


Ilustración 40. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.3 Emisiones de carbono en biomasa, 1999

Siguen siendo mayoría las áreas con emisiones nulas y remociones bajas, en comparación con las demás categorías, pero sobresale la disminución de las áreas de emisiones altas, sobre todo en la porción sur del territorio., aunque se observa un leve aumento de las mismas en la Ciénaga de Majaguillar. En la Ciénaga de Zapata, aparecen zonas de remociones altas, dado la recuperación de las áreas (Ilustración 41).

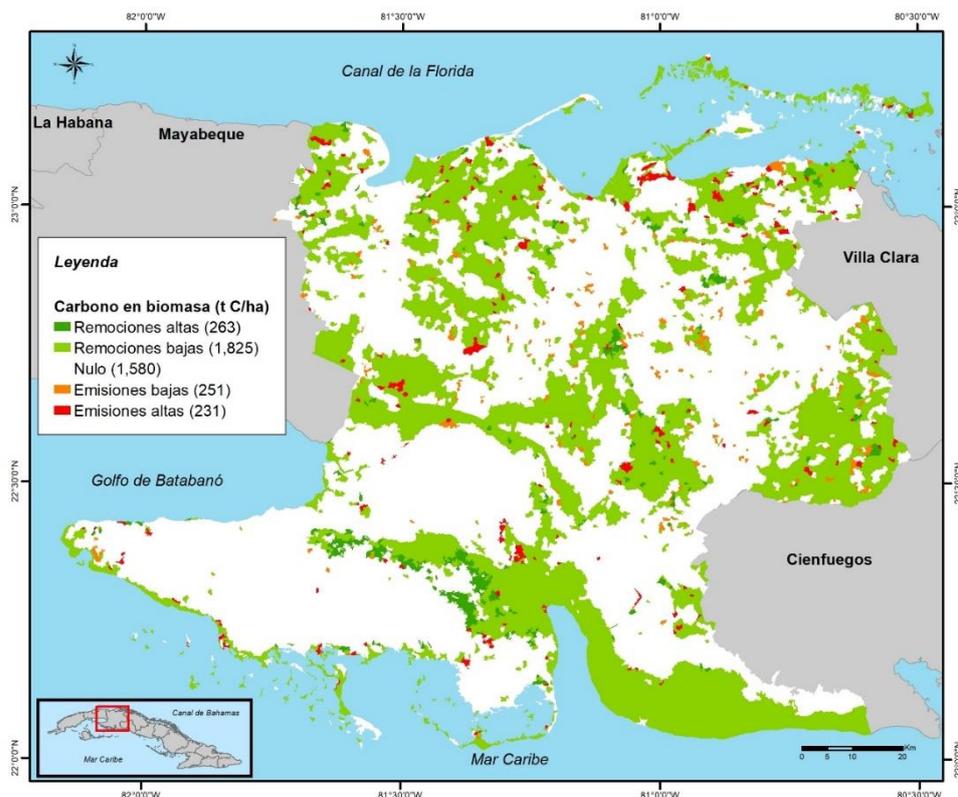


Ilustración 41. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

En total las emisiones para este año contabilizaron -9746.58 mil toneladas de carbono, siendo el año con mayor emisión neta de todo el período de estudio. Esto apoyado por las elevadas remociones de las categorías de bosque semideciduo y matorral, acompañado de las bajas emisiones de las demás categorías (Ilustración 42).

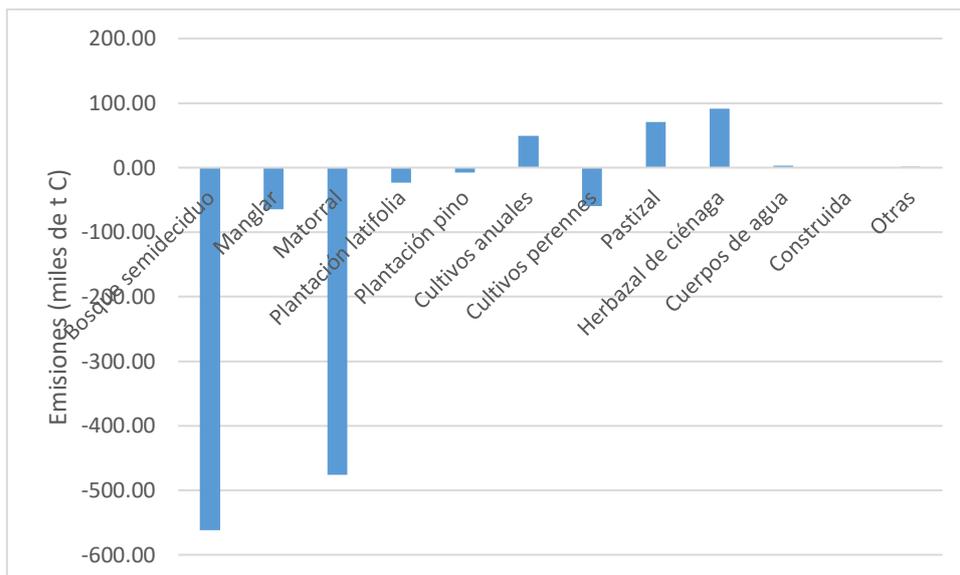


Ilustración 42. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.4 Emisiones de carbono en biomasa, 2004

Las áreas de emisiones altas se elevan, existiendo nuevamente grandes zonas en la Ciénaga de Zapata, pero apareciendo grandes porciones de territorio con emisiones altas en la zona centro norte. Y también existen varas áreas con emisiones bajas concentrándose en la zona centro, centro norte y este del territorio yumurino, disminuyendo las áreas con remociones altas con respecto a los años anteriores (Ilustración 43).

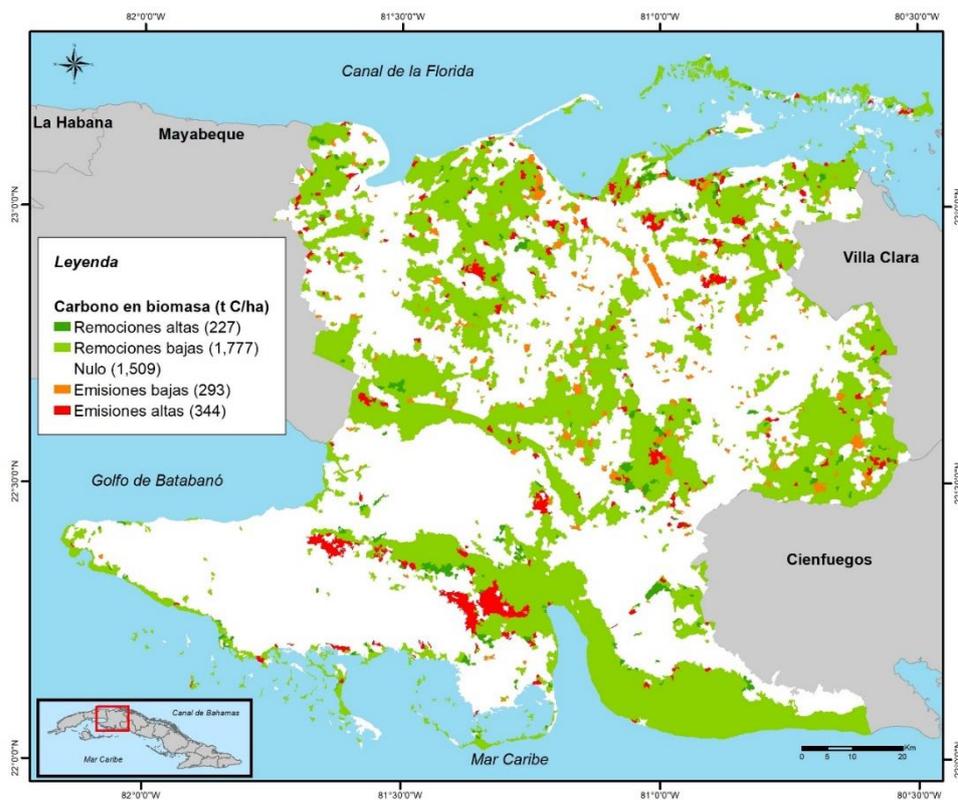


Ilustración 43. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2004.

Fuente: Elaborado por el autor.

Este año aparece con las estadísticas más elevadas de emisiones netas del período de estudio con un total de -593.13 miles de toneladas de carbono. El matorral, fue la categoría más importante de captura de carbono, seguida por el bosque semideciduo y el manglar. Las emisiones más relevantes se dieron en las categorías de herbazal de ciénaga, pastizal y cultivos perennes, sobre pasando en todas las 100 mil toneladas de carbono cada una (Ilustración 44).

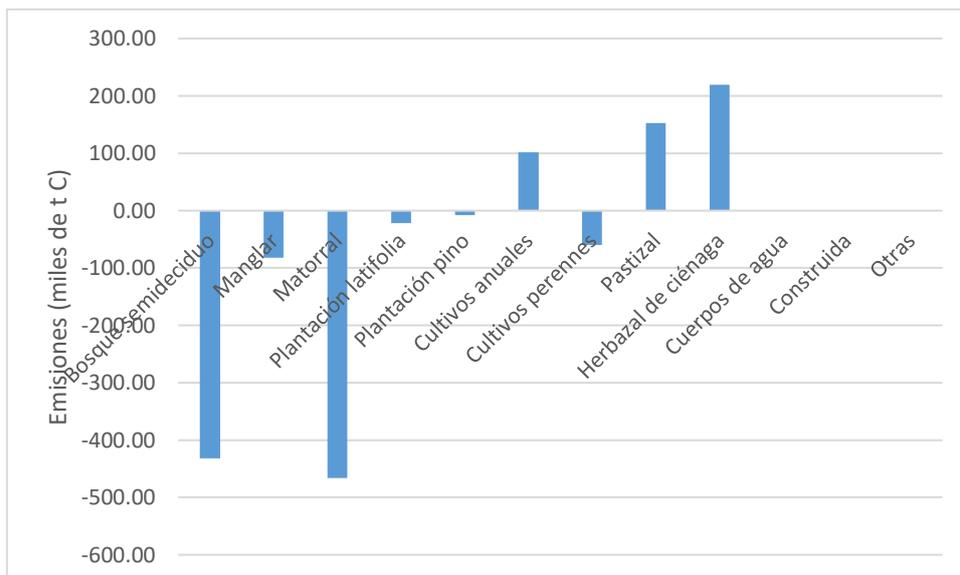


Ilustración 44. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2004.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.5 Emisiones de carbono en biomasa, 2009

Para el año 2009 siguen dominando las áreas con nula emisión y con remociones bajas. Pero, se observan varios polígonos con remociones altas concentradas sobre todo en el noreste del territorio. Hacia la región central, se observan varios polígonos con emisiones bajas, y hacia el este se concentran más las áreas con altas emisiones (Ilustración 45).

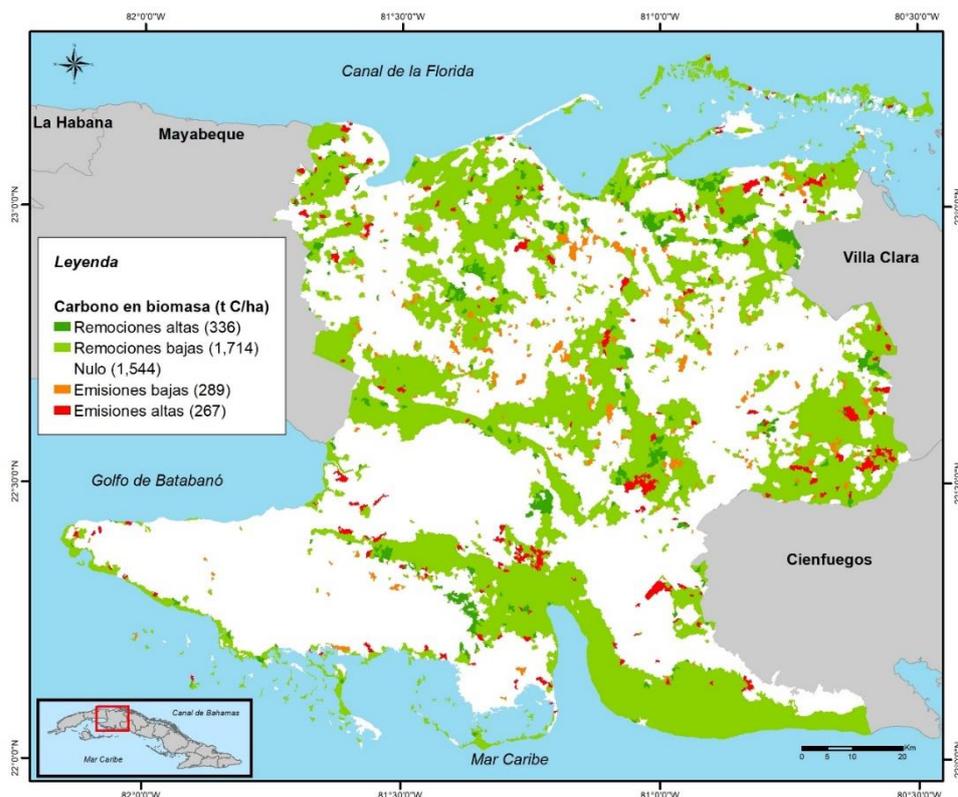


Ilustración 45. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

El año 2009, fue el año con que mayores remociones contó la categoría de bosque semideciduo llegando a sobrepasar las emisiones netas de esta categoría las 600 mil toneladas de carbono, mientras que el matorral solo llegó a ser aproximadamente de 450 mil toneladas. Las emisiones positivas, disminuyeron en su totalidad, haciendo que las emisiones netas llegaran a ser de -948.70 toneladas de carbono, siendo el segundo año en importancia para este estudio (Ilustración 46).

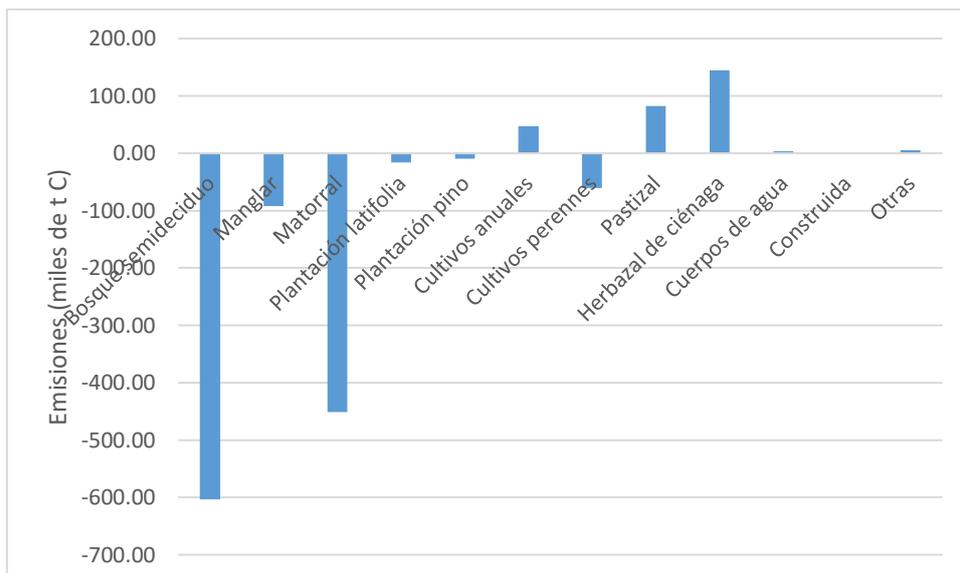


Ilustración 46. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.6 Emisiones de carbono en biomasa, 2014

Para este año, vuelven a aparecer zonas de emisión alta en la Ciénega de Zapata, combinadas con áreas de emisión baja. En la porción este del territorio existen varias manchas con emisión baja, al igual que en el centro norte (Ilustración 47).

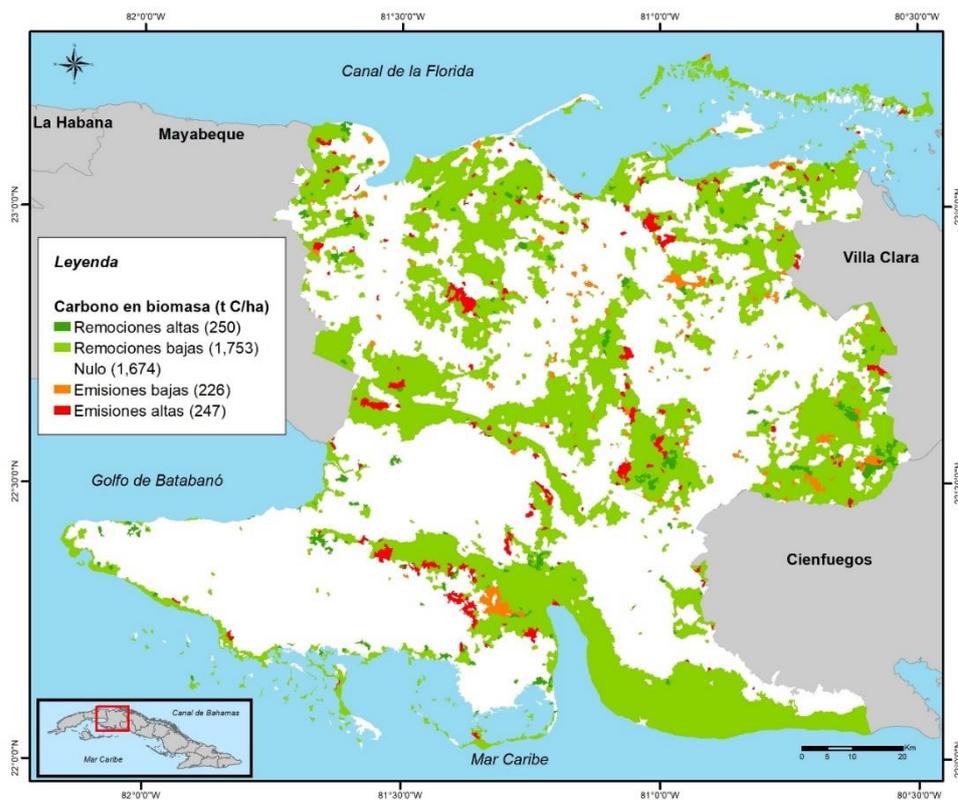


Ilustración 47. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

Las emisiones del matorral y bosque semideciduo son muy similares para el 2014, siendo de -443 y -436 miles de toneladas de carbono, respectivamente, mientras que las más elevadas emisiones pertenecen al herbazal de ciénaga y pastizal, con más de 100 mil toneladas de carbono ambas. Como emisiones netas contabiliza este año un total de -754.30 miles de toneladas de carbono (Ilustración 48).

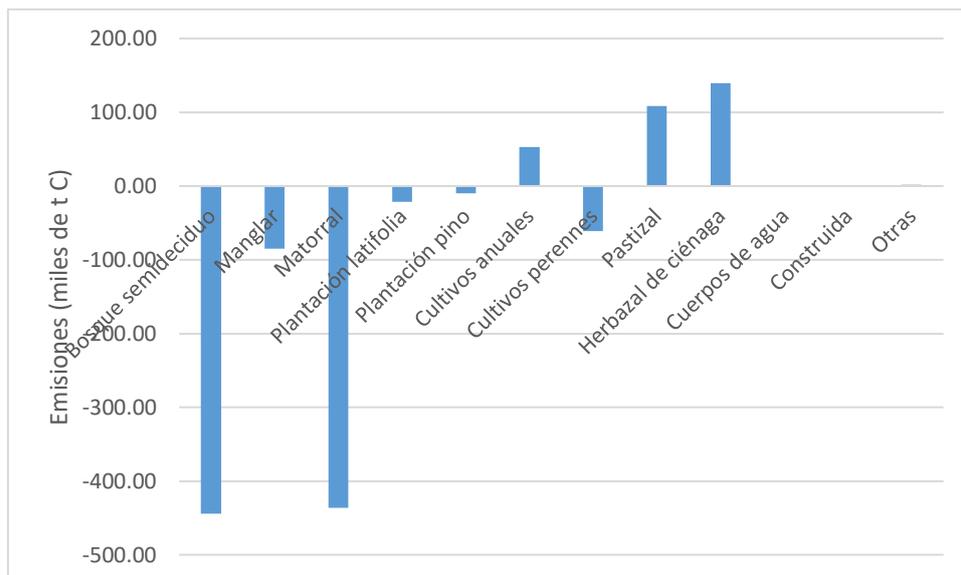


Ilustración 48. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.7 Emisiones de carbono en biomasa, 2019

Para este año, es donde menores áreas de emisión de carbono se presentan, siendo las más importantes al noreste del territorio yumurino, pero a su vez, también se presentan las menos áreas de remociones altas (Ilustración 49).

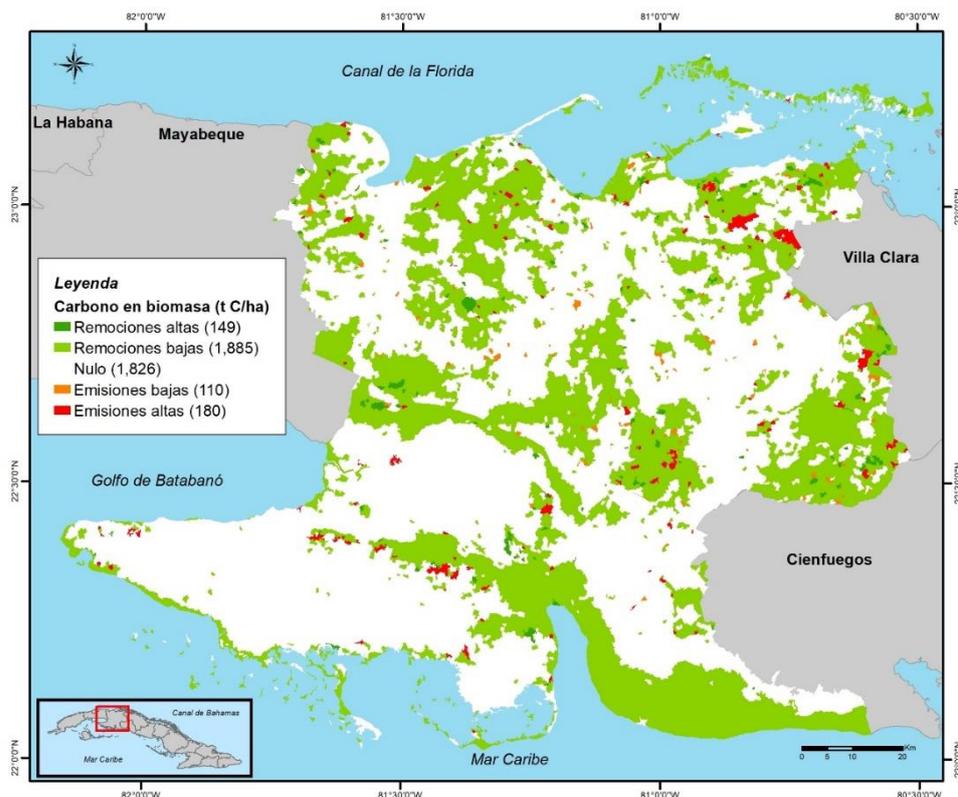


Ilustración 49. Carbono en biomasa debido al cambio de uso de la tierra, Matanzas, 2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

Las emisiones netas para el 2019 fue de -840.20 miles de toneladas de carbono, y fue el valor intermedio de toda la serie estudiada. Estas emisiones fueron el resultado de las elevadas remociones del matorral y el bosque semidecíduo en su mayoría, pues las emisiones para este año, tal y como se observó espacialmente, estuvieron muy poco reflejadas en el territorio yumurino (Ilustración 50).

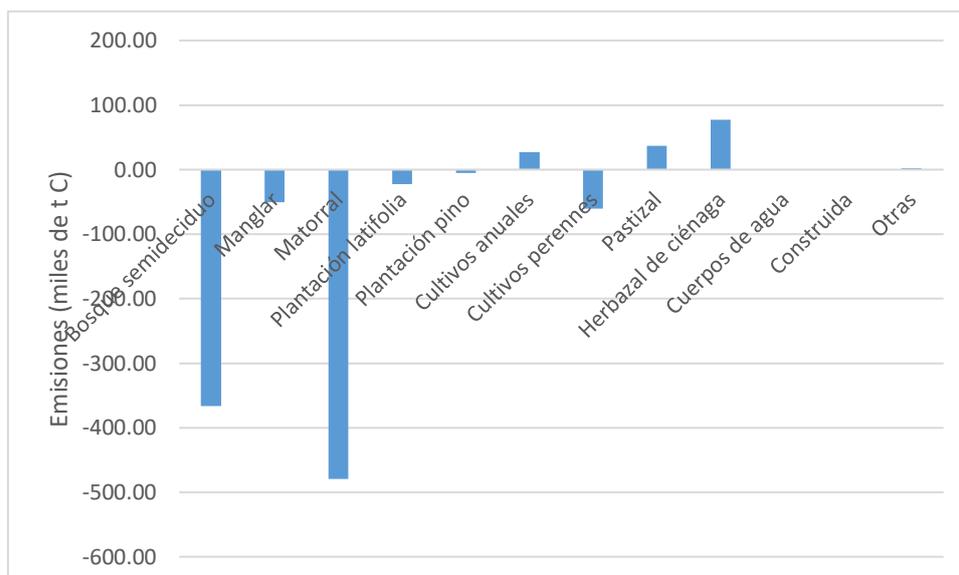


Ilustración 50. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.1.8. Validación del carbono por concepto de área estimada

El error en las áreas del mapa de cambio se trasladará a la estimación de carbono, por lo que se decidió determinar cuánto afectaría el cambio de áreas en el carbono emitido.

Se realizó la estimación del carbono en biomasa para las áreas de cambio estimadas según el método de Card (1982), obteniéndose en total una diferencia con el carbono obtenido a partir de las áreas del mapa, más de 22 mil toneladas de carbono. Esta diferencia, muestra como el error del mapa sobrestima el carbono para el cambio de uso de la tierra 2014-2019, pero, el mismo solo representa el 3% del carbono total (Tabla 22).

Tabla 22. Diferencias en el carbono obtenido con el área del mapa y el área estimada. Período 2014-2019.

Carbono con área mapa	Carbono con área estimada	Diferencia	Coficiente de variación
-840.20	-817.56	-22.64	0.03

Fuente: Elaborado por el autor.

Pero, aunque se obtiene la diferencia, se determinaron también los rangos de incertidumbre para el carbono en biomasa a partir del área estimada. Esto se llevó a cabo a partir de una función de distribución acumulada inversa construida con las áreas estimadas y su error estándar, cuya función se repitió mil veces. A

los resultados de las mil corridas por cada una de las categorías de cambio se le estimó el carbono, y a partir de ello, se le calculó el percentil 0.05 y 0.95. Esto mostró como resultado que el 90% de las muestras se encuentran entre -12.2% y +12.9%. Es decir, el error que le introduce el área estimada a la estimación del carbono es de entre -12.2% y +12.9%.

4.1.9. Resumen de emisiones de carbono por biomasa.

Los totales de emisiones de carbono en biomasa por cada categoría de uso de la tierra y en cada año evaluado se encuentran en la siguiente tabla, evidenciándose la importancia que poseen el bosque semidecuido y el matorral en las emisiones netas de la provincia. Y aunque las remociones por concepto del bosque semidecuido son importantes, queda evidenciado que no son el total de las emisiones del territorio, pues ni tan siquiera suman el 50% del total (Tabla 23).

Tabla 23. Emisiones de carbono en biomasa, Matanzas, 1989-2019 (miles de t de C).

Categorías de uso	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019	Tasa de cambio 94-19
<i>Bosque semidecuido</i>	-249.06	-447.40	-561.54	-431.89	-603.04	-443.89	-366.42	81.90
<i>Manglar</i>	-39.49	-99.07	-64.27	-81.65	-92.16	-85.09	-50.60	51.07
<i>Matorral</i>	-549.06	-479.98	-476.15	-465.74	-451.53	-436.63	-479.58	99.92
<i>Plantación latifolia</i>	-23.66	-19.45	-23.31	-21.36	-15.53	-21.06	-22.56	115.95
<i>Plantación pino</i>	-3.81	-12.02	-7.48	-7.91	-9.14	-10.07	-5.03	41.87
<i>Cultivos anuales</i>	0.00	77.82	49.25	101.38	47.35	53.31	27.22	34.98
<i>Cultivos perennes</i>	-59.62	-59.49	-59.70	-59.61	-60.72	-61.05	-60.03	100.91
<i>Pastizal</i>	0.00	97.49	70.64	152.67	82.20	108.42	36.51	37.45
<i>Herbazal de ciénaga</i>	0.00	306.46	90.95	219.51	144.95	139.76	77.58	25.31
<i>Cuerpos de agua</i>	0.00	1.32	3.27	0.81	3.16	0.17	0.10	7.37
<i>Construida</i>	0.00	1.75	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Otras</i>	0.00	3.83	1.75	0.63	5.74	1.83	2.61	68.08
Emisiones netas	-924.69	-628.72	-976.58	-593.13	-948.70	-754.30	-840.20	133.64

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el año 2019, las emisiones tuvieron un crecimiento de 133% con respecto a 1994¹². De las categorías las más relevantes son la plantación latifolia, cultivos perennes y matorral, los cuales presentaron crecimiento de 116, 101 y 100%, respectivamente. Las demás categorías tuvieron un decrecimiento en cuanto a sus emisiones y remociones (Ilustración 51).

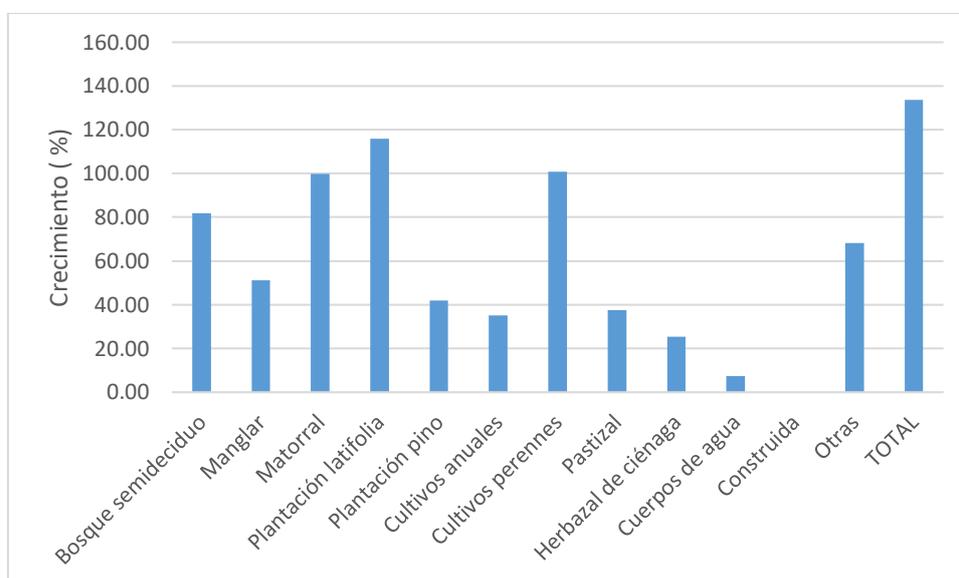


Ilustración 51. Crecimiento porcentual de las emisiones de carbono por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994-2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2. Variación del carbono en suelo

En este acápite se estima el carbono en el suelo debido al cambio de uso de la tierra. En el suelo se encuentra el carbono tanto de manera orgánica como inorgánica, pero lo habitual es que la gestión de la tierra tenga un mayor impacto sobre los depósitos de carbono inorgánico (IPCC, 2006a).

4.1.1 Emisiones de carbono en suelo, 1989

Como para el año 1989 no se estima el cambio de uso de la tierra, entonces no se obtienen las emisiones o remociones de carbono. Debido a en concepto del suelo, solo se obtienen el cambio anual de existencias de carbono.

¹² Se compara con 1994 es el primer año donde se considera el cambio de uso de la tierra, pues las emisiones en 1989 están realizadas a partir de que se consideró que antes de 1989, las tierras permanecían sin cambio.

4.1.2 Emisiones de carbono en suelo, 1994

La distribución de las emisiones de carbono provenientes del cambio de gestión del suelo, es muy variable en todo el territorio de estudio. las áreas con variaciones de carbono se ubican en su mayoría en la porción centro y norte del territorio, debido a que en ella se ubican las grandes áreas cubiertas por cultivos. Mientras que, en el sur, se encuentra la Ciénaga de Zapata, en la cual no se realizan grandes cambios drásticos de la gestión del suelo. La dispersión es elevada, aunque aparecen polígonos de gran tamaño, en la región este (Ilustración 52).

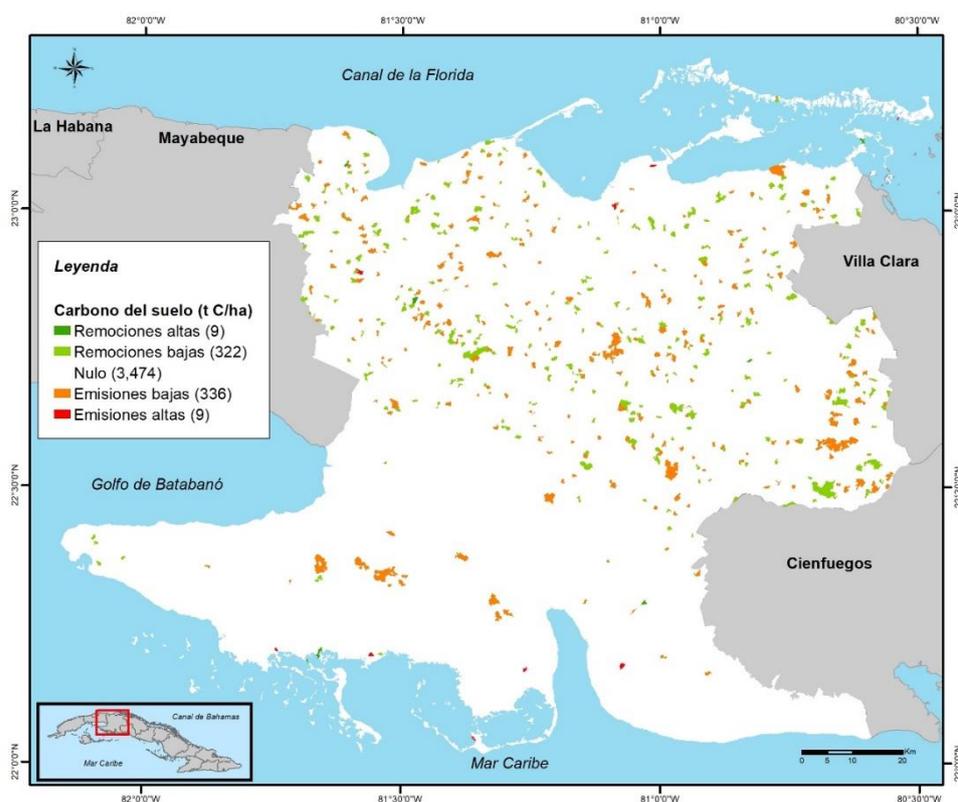


Ilustración 52. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

En cuanto a las emisiones por categorías de uso de la tierra, se muestra como la categoría de cultivos anuales son las de mayor cuantía, llegando a ser de 45 mil toneladas de emisión de carbono. De las remociones, resaltan las categorías de bosque semideciduo, matorral y pastizal, superando las tres, las -100 mil toneladas de carbono. Debido al comportamiento por categorías, las emisiones netas suman 2.7 mil toneladas de carbono (Ilustración 53).

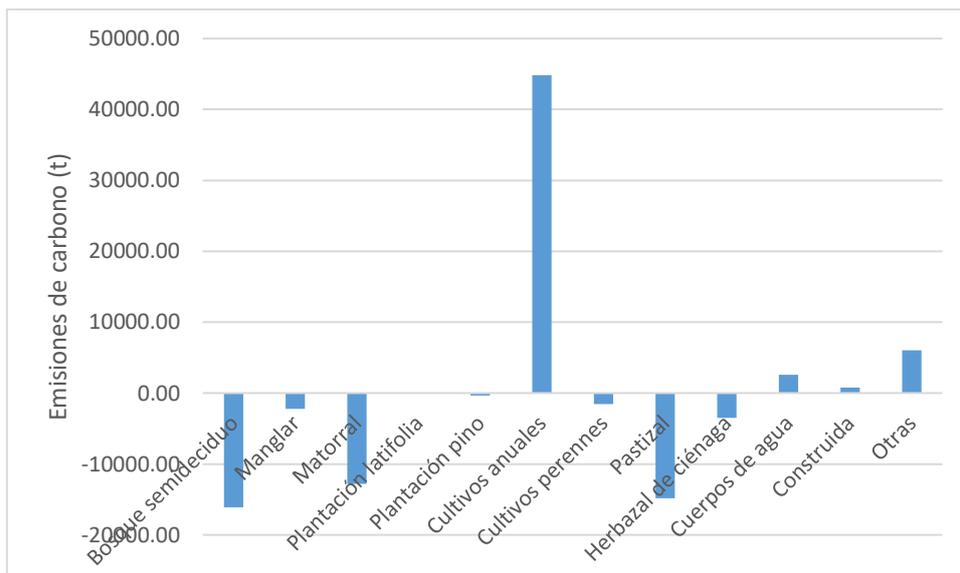


Ilustración 53. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.3 Emisiones de carbono en suelo, 1999

Las áreas de emisión de carbono disminuyeron con respecto al año anterior, y se puede observar que existe una mayoría de áreas con remociones bajas. Aunque también sobre sale la mancha de emisiones altas que se presenta al noreste del territorio (Ilustración 54).

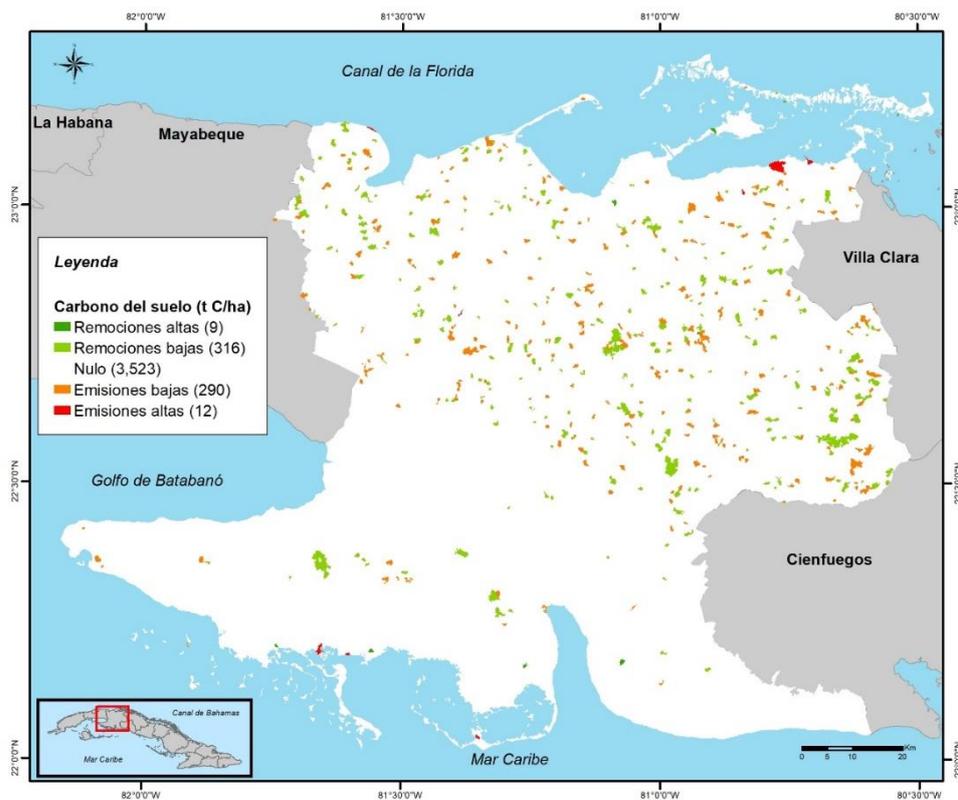


Ilustración 54. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

Del total de emisiones para este año, 3563 toneladas de carbono, corresponden un poco más de 40 mil a los cultivos anuales, mientras que en remociones resalta el matorral, con aproximadamente -20 mil toneladas de carbono (Ilustración 55).

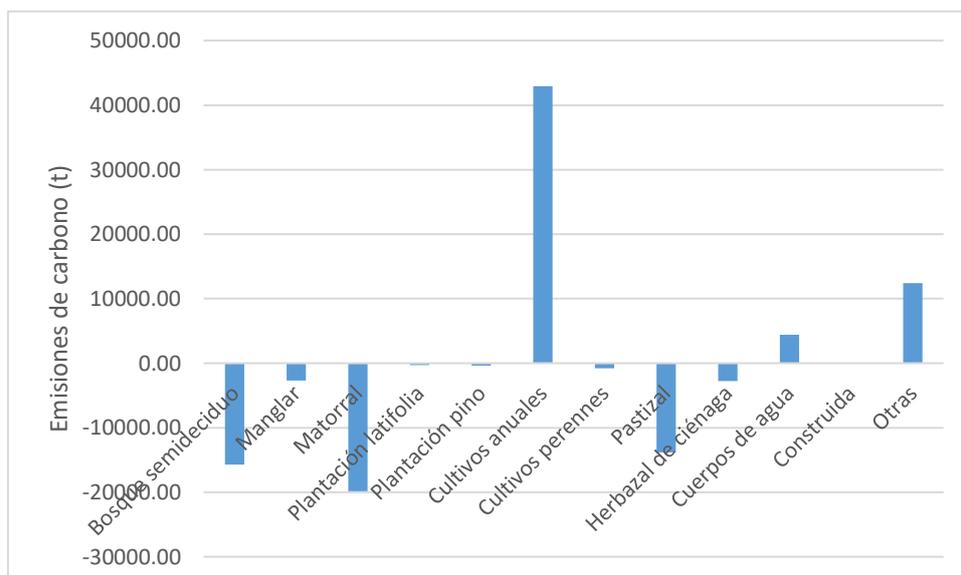


Ilustración 55. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1999.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.4 Emisiones de carbono en suelo, 2004

Para el año 2004 existe una variación en la densidad de áreas con cambio de carbono con respecto al año anterior, y para este sobresalen las áreas con emisiones bajas, las cuales se localizan con mayor concentración en el centro-norte de la provincia. En el centro del territorio se destacan las áreas con remociones bajas (Ilustración 56).

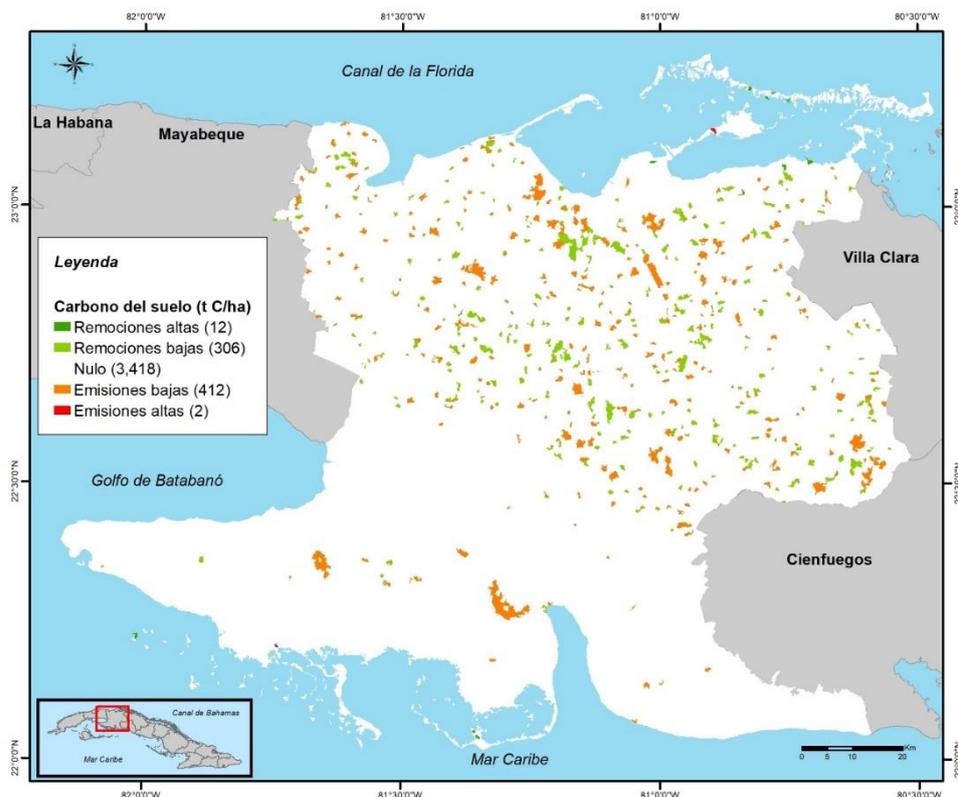


Ilustración 56. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2004.

Fuente: Elaborado por el autor.

Las emisiones por concepto del cambio de gestión en el uso de la tierra, por primera vez en el período de estudio poseen emisiones negativas (remociones), llegando a ser de -2205 toneladas de carbono. Aunque las emisiones provenientes de los cultivos anuales sobrepasaron las 60 mil toneladas, la sumatoria de las demás categorías que portaron a la remoción fue mucho mayor aún, destacando las 32 mil toneladas de carbono removidas por el pastizal, así como casi las 20 mil captadas por el matorral (Ilustración 57).

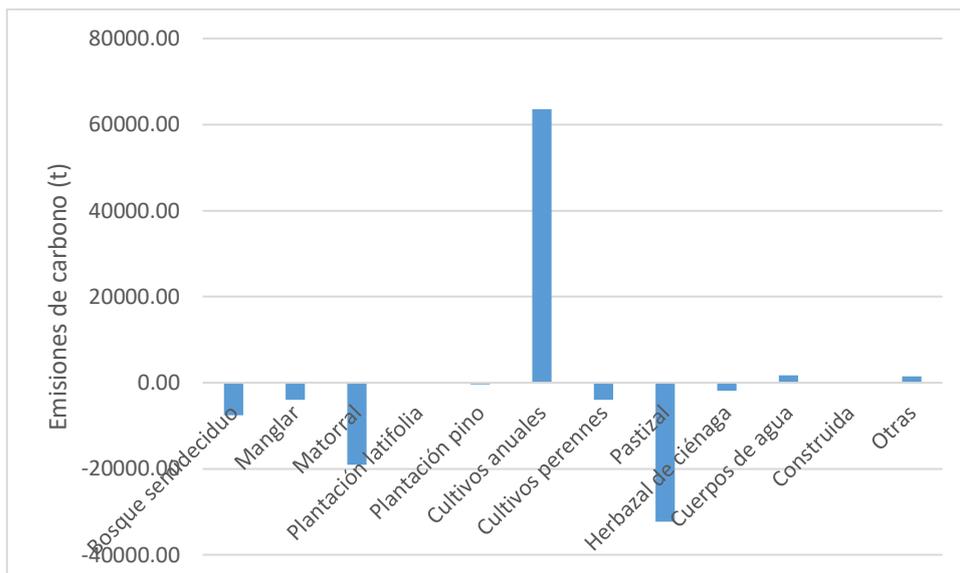


Ilustración 57. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2004.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.5 Emisiones de carbono en suelo, 2009

En cuanto a la distribución espacial de las áreas de emisión, se observa una gran densidad en la zona centro del territorio de estudio. Las áreas con remociones bajas tienen una alta representatividad, sobre todo en la zona centro-norte de la provincia, mientras que el resto de las áreas de emisión son de emisión baja (Ilustración 58).

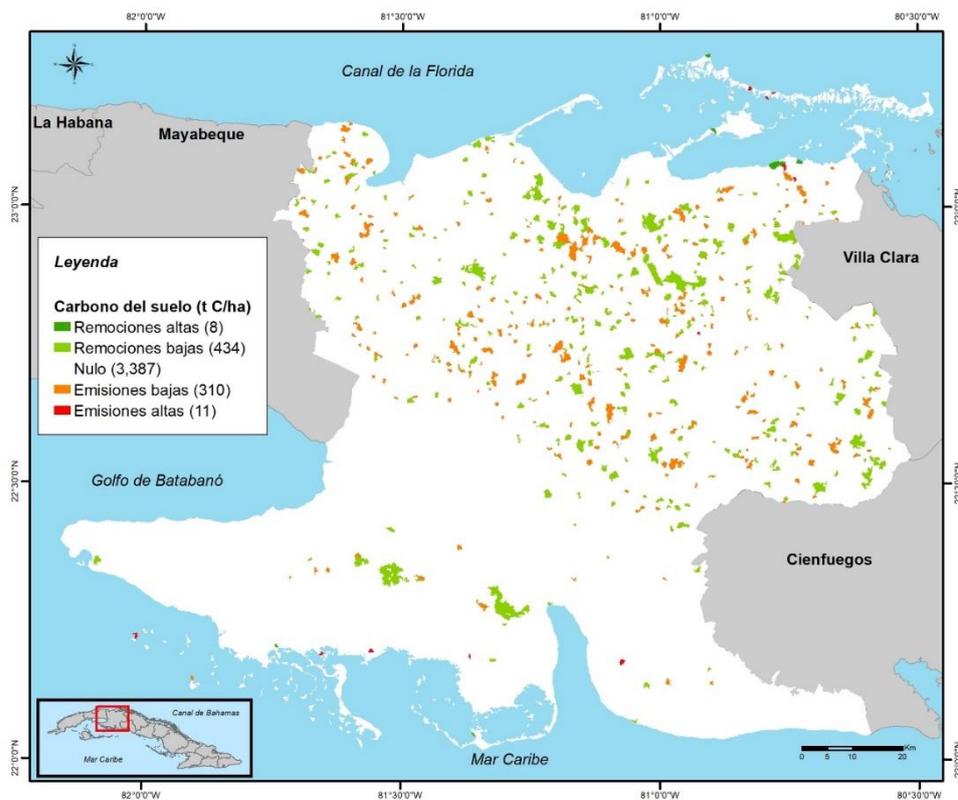


Ilustración 58. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

La emisión proveniente de la gestión del suelo en cultivos anuales fue de más de 50 mil toneladas, pero al igual que el año anterior evaluado, las emisiones netas sumaron un poco más de -21 mil toneladas de carbono. Este resultado proviene de las altas remociones provenientes de la gestión en los suelos de las categorías de bosque semidecídulo, pastizal y matorral entre las tres sumaron un total de -78 mil toneladas de carbono (Ilustración 59).

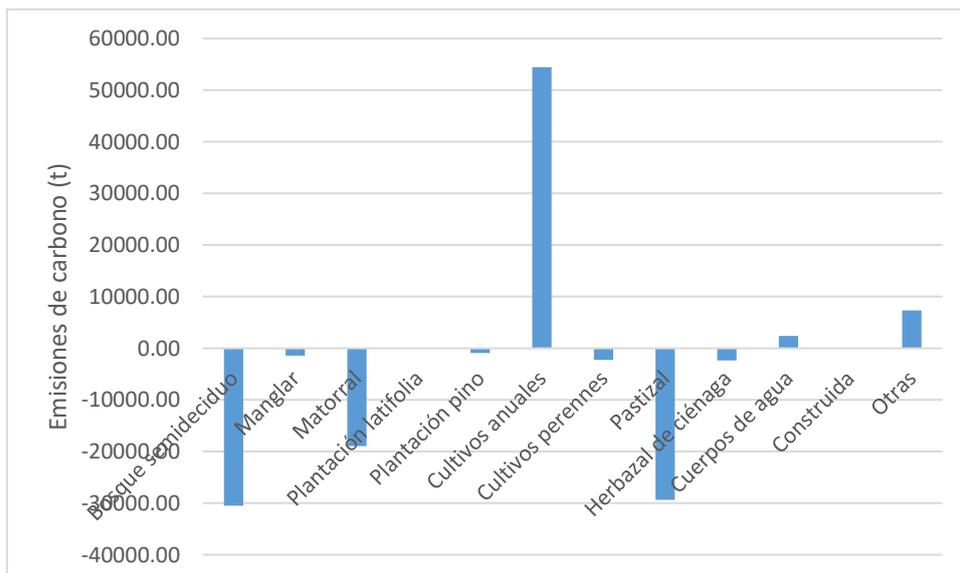


Ilustración 59. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2009.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.6 Emisiones de carbono en suelo, 2014

Para este año de estudio, las áreas de emisión están más dispersas que en años anteriores, aunque existe una concentración de las áreas de emisión baja en el noreste del territorio. Además, sobresale el área de emisión alta que existe en la zona de la Ciénaga de Majaguillar (Ilustración 60).

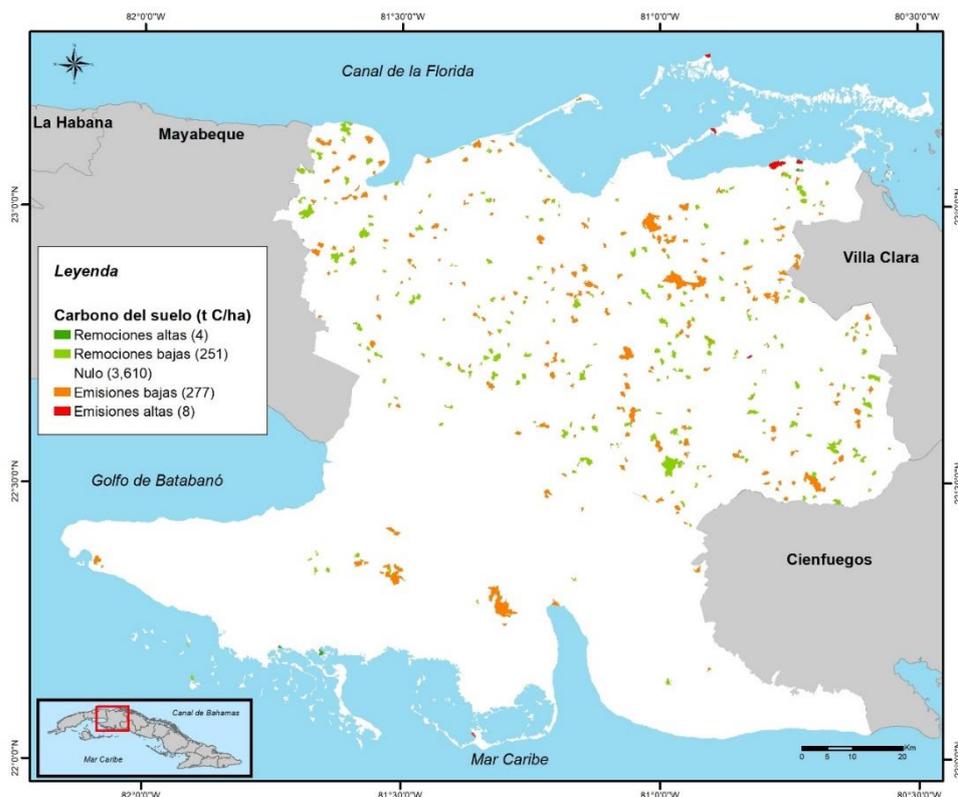


Ilustración 60. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

Ya para este año disminuyeron las emisiones de carbono por la gestión de los suelos en los cultivos anuales, aunque la categoría otras, tuvo un aumento sustancial con respecto a años anteriores. Las remociones estuvieron aportadas por el matorral, pastizal y el bosque semideciduo, con un poco más de 10 mil de toneladas de carbono las dos primeras, y de casi 8 mil la última. No obstante, a la disminución de las emisiones por parte de los cultivos, este año culminó con una emisión neta positiva de 10 mil toneladas de carbono (Ilustración 61).

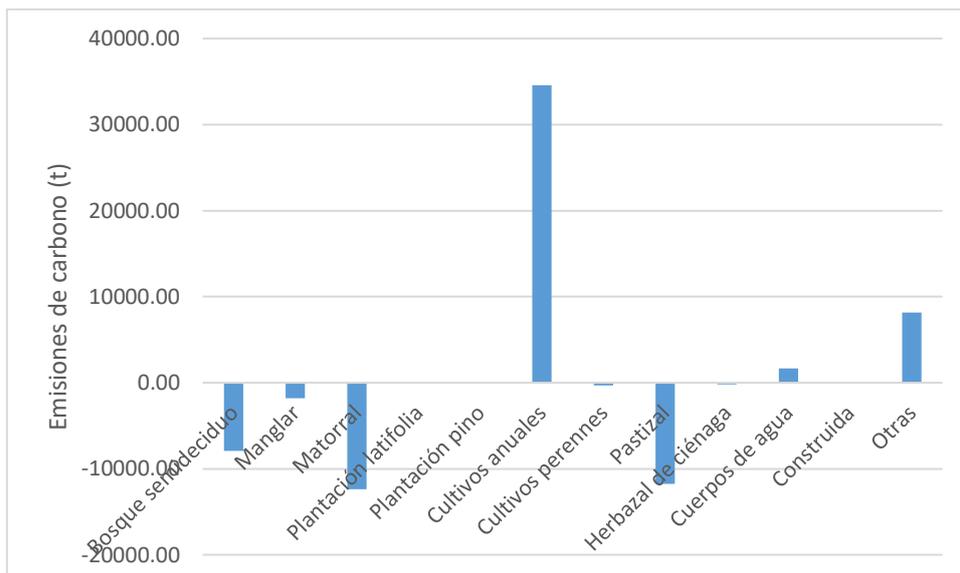


Ilustración 61. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2014.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.7 Emisiones de carbono en suelo, 2019

La distribución espacial de las emisiones fue muy dispersa, y de pequeños polígonos, no destacando ningún área en específico (Ilustración 62).

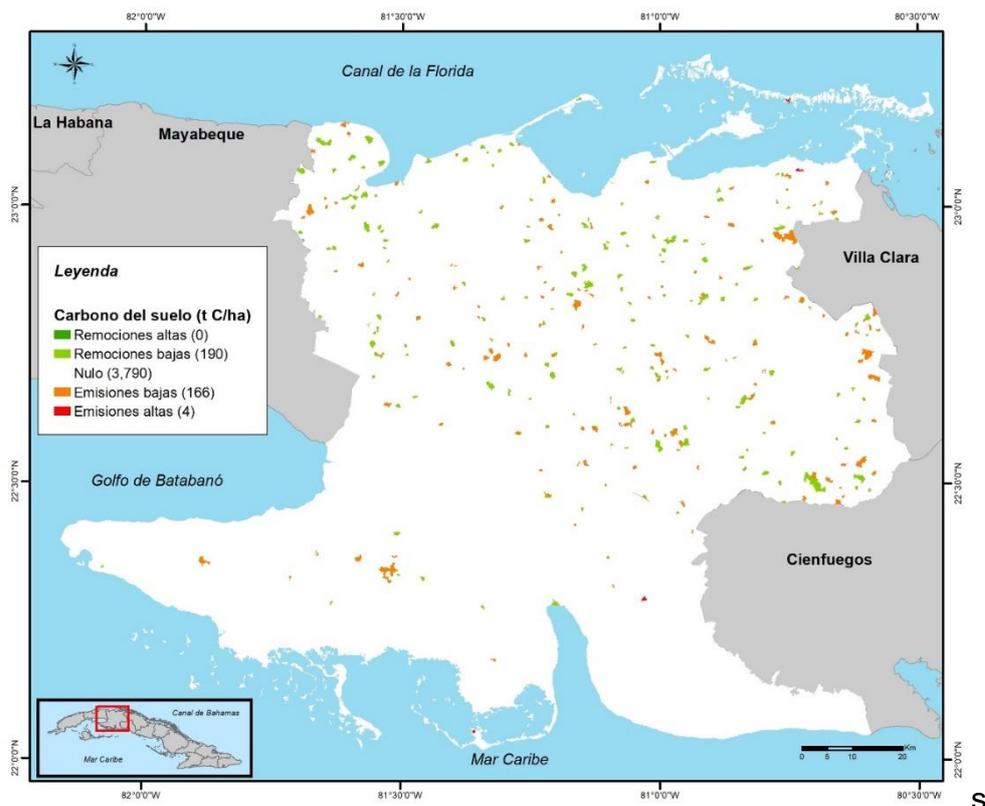


Ilustración 62. Carbono en el suelo debido al cambio de gestión en el uso de la tierra, Matanzas, 2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

El año 2019, fue el que menos cambios ocurridos mostró, lo cual también se manifestó en las emisiones provenientes de la gestión de la tierra, terminando en 2019 con una emisión neta de casi 5 mil toneladas de carbono. Y aunque este año, mostró menos cambio, si obtuvo mayores emisiones que los años 1994 y 1999 (Ilustración 63).

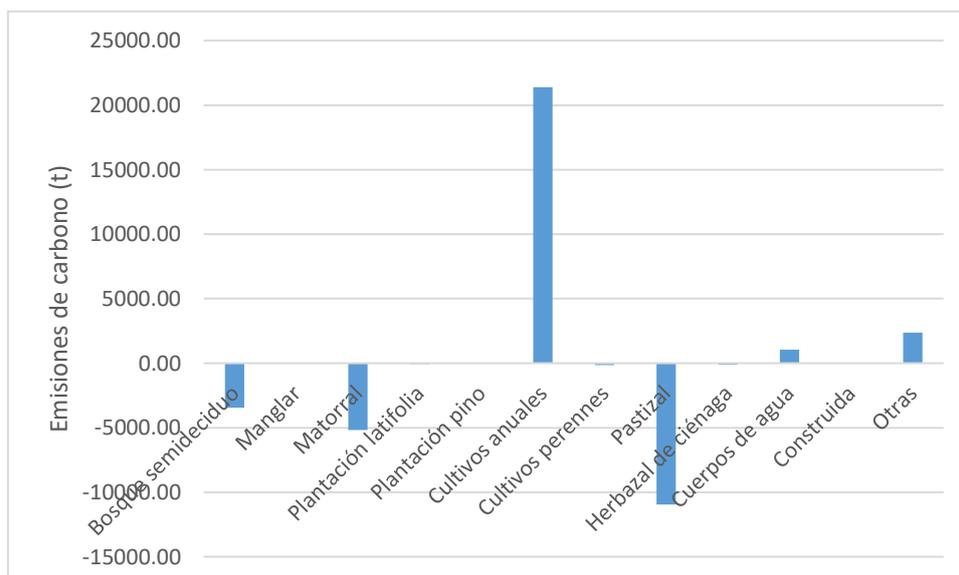


Ilustración 63. Emisiones de carbono en el suelo debido al cambio de gestión por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.2.8 Resumen de las emisiones de carbono del suelo

Los totales de emisiones de carbono en el suelo por el cambio de gestión del uso de la tierra, se presentan en la siguiente tabla. En esta, y por lo que se observó en el acápite anterior, las áreas de cultivos anuales, son las de mayor responsabilidad en cuanto a las emisiones de carbono debido al cambio de gestión en su uso (Tabla 24).

Tabla 24. Emisiones de carbono totales por cambio de gestión del suelo.

Categorías	1994	1999	2004	2009	2014	2019
Bosque semidecídúo	-16138.25	-15729.46	-7511.56	-30473.81	-7946.26	-3460.04
Manglar	-2197.14	-2645.32	-3933.33	-1393.30	-1810.00	0.00
Matorral	-12794.03	-19847.14	-19053.00	-18962.12	-12357.03	-5154.68
Plantación latifolia	0.00	-301.18	-22.20	-102.91	0.00	-62.14
Plantación pino	-379.57	-370.83	-395.93	-936.15	0.00	0.00
Cultivos anuales	44812.27	42952.63	63617.24	54424.27	34549.70	21365.27
Cultivos perennes	-1552.86	-780.73	-3950.06	-2252.60	-300.99	-154.50
Pastizal	-14862.75	-13802.43	-32246.84	-29350.56	-11743.59	-10929.57
Herbazal de ciénaga	-3530.46	-2768.55	-1894.76	-2313.08	-197.69	-122.52
Cuerpos de agua	2579.66	4426.86	1781.55	2370.50	1685.94	1043.35
Construida	771.85	0.00	-9.14	0.00	0.00	0.00
Otras	6061.45	12429.73	1412.82	7335.16	8149.98	2388.02
TOTAL	2770.16	3563.60	-2205.20	-21654.60	10030.04	4913.19

Fuente: Elaborado por el autor.

En el último año de estudio, las emisiones de carbono por concepto de gestión del uso de la tierra, crecieron un total de 177%. Aunque a resaltar que ninguna de las categorías de uso de la tierra de manera individual, tuvieron un crecimiento en cuanto a las emisiones y remociones de carbono del suelo, sino todo lo contrario, todas decrecieron con respecto al año 1994 (Ilustración 64).

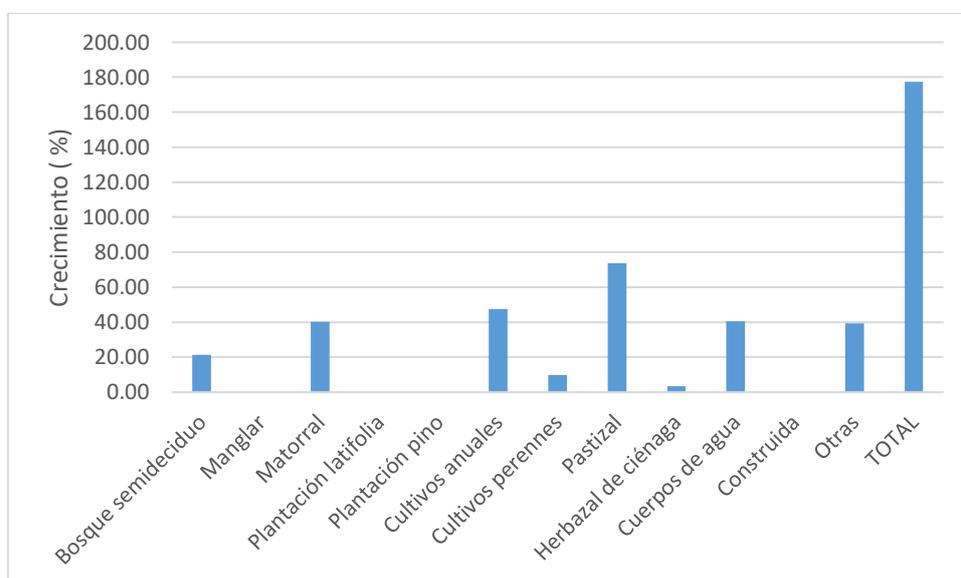


Ilustración 64. Crecimiento porcentual de las emisiones de carbono en el suelo por categorías de uso de la tierra, Matanzas, 1994-2019.

Fuente: Elaborado por el autor.

4.3. Estimación de la variación total de carbono por el cambio de uso de la tierra

Las emisiones de carbono por concepto de cambio de uso de la tierra, deben verse como un todo, por lo que al final, debemos sumar las emisiones por cada uno de los almacenes de carbono y mostrar las emisiones totales.

Para ello se suman los dos almacenes de carbono estudiados en nuestro estudio, y mostrando las emisiones totales en la siguiente tabla 25.

Tabla 25. Emisiones totales de carbono, Matanzas, 1989-2019 (miles de t de C).

Categorías	1989	1994	1999	2004	2009	2014	2019
Bosque semideciduo	-249.06	-463.54	-577.27	-439.40	-633.51	-451.84	-369.88
Manglar	-39.49	-101.26	-66.92	-85.59	-93.55	-86.90	-50.60
Matorral	-549.06	-492.77	-495.99	-484.80	-470.49	-448.99	-484.74
Plantación latifolia	-23.66	-19.45	-23.61	-21.38	-15.63	-21.06	-22.62
Plantación pino	-3.81	-12.40	-7.85	-8.30	-10.07	-10.07	-5.03

<i>Cultivos anuales</i>	0.00	122.63	92.21	165.00	101.78	87.86	48.59
<i>Cultivos perennes</i>	-59.62	-61.04	-60.48	-63.56	-62.98	-61.36	-60.18
<i>Pastizal</i>	0.00	82.63	56.84	120.42	52.85	96.68	25.58
<i>Herbazal de ciénaga</i>	0.00	302.93	88.18	217.61	142.64	139.56	77.45
<i>Cuerpos de agua</i>	0.00	3.90	7.70	2.59	5.54	1.86	1.14
<i>Construida</i>	0.00	2.53	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
<i>Otras</i>	0.00	9.89	14.18	2.04	13.08	9.98	5.00
TOTAL	-924.69	-625.95	-973.02	-595.34	-970.35	-744.27	-835.28

Fuente: Elaborado por el autor.

En realidad, no se diferencia mucho a las emisiones provenientes de la biomasa, debido a que las emisiones en el suelo por el cambio en su gestión no son de grandes cuantías. A destacar en este acápite, que el carbono que se estima por el cambio de uso de la tierra, son las pérdidas o ganancias de carbono, y no el carbono contenido ni en el suelo ni en la biomasa.

Las emisiones de carbono del suelo, representan entre el 0.36 y el 2.28%, del total de carbono emitido o removido de la atmósfera por el cambio y uso de la tierra en la provincia de Matanzas para todo el período.

4.3.1 Estimación de dióxido de carbono por cambio de uso de la tierra. Base de datos extendida.

Para poder completar una base de datos que abarque anualmente las emisiones de carbono, se realiza la interpolación entre los años evaluados en este estudio, asumiendo que existe una tendencia fija de crecimiento entre los años evaluados, por lo que se utiliza la interpolación y extrapolación lineal. Para ello, se hace uso de las ecuaciones de interpolación y extrapolación ofrecidas por el IPCC (2006a). Esta suposición solo se realiza a las emisiones totales del sector FOLU.

Es necesario completar la serie temporal de estas emisiones, pues para la contabilidad del inventario es necesario contar con todos los años de estudio, y no solo quinquenalmente. Por ejemplo, en el caso del Inventario de Gases de Efecto Invernadero a nivel nacional se contabilizan las emisiones cada dos años, a partir del año 1990.

Hasta este punto del estudio, se han tratado las emisiones como carbono, pero para la contabilidad final, se necesita calcular ello a CO₂. Para esto se hace uso de peso molecular, el cual se multiplica por las emisiones de carbono. Como resultado las emisiones de dióxido de carbono a nivel provincial debido al cambio y uso de la tierra, son aproximadamente 3.66 veces mayores a las emisiones de carbono (Ilustración 65).

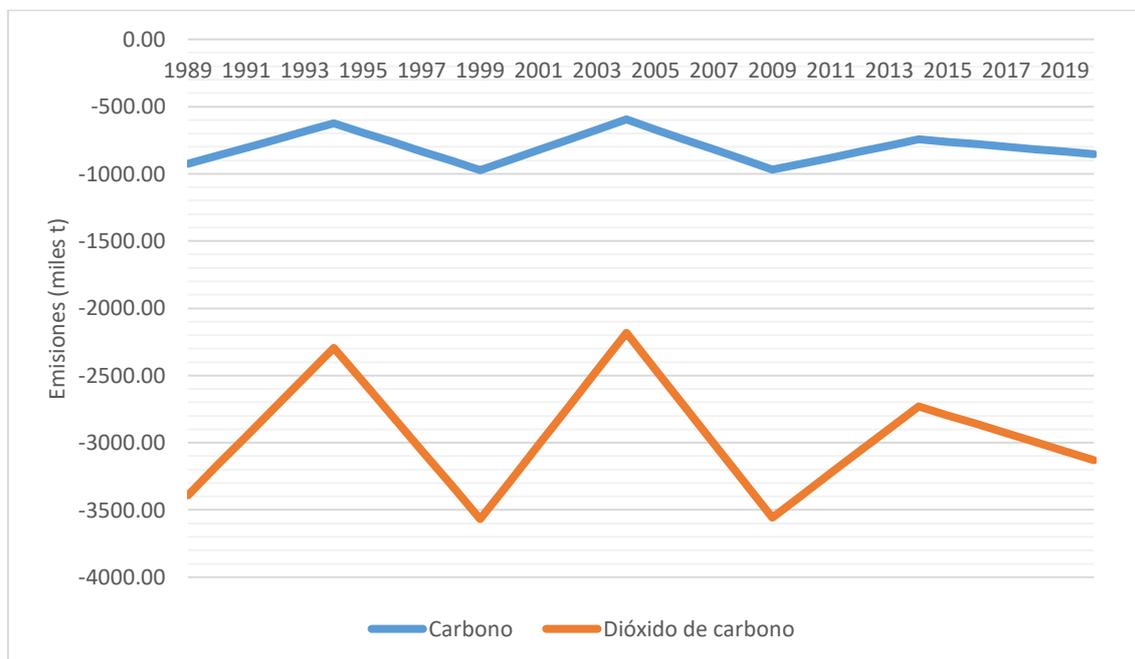


Ilustración 65. Emisiones de carbono y dióxido de carbono totales por cambio y uso de la tierra, Matanzas, 1989-2020.

Fuente: Elaborado por el autor.

Para el país solo se cuenta con las remociones de CO₂ en biomasa aérea por bosque que sigue siendo bosque, a nivel nacional en la serie del Inventario Nacional de GEI de Cuba. Por lo que se escogen los años para los cuales se tiene información y se comparan con las emisiones obtenidas en este estudio en la misma categoría, es decir, bosque que sigue siendo bosque.

Como se muestra en la ilustración siguiente, las remociones del inventario nacional sobrepasan con creces a las obtenidas en este estudio, pero recordar que este estudio solo abarca el territorio de la provincia de Matanzas, de los 16 territorios administrativos¹³ con que cuenta el país. En el período, las emisiones

¹³ Se hace alusión a la Isla de la Juventud como un territorio administrativo, pues funciona como tal, aunque se reconozca que es un municipio.

obtenidas en este estudio representan entre 9.57 y 17.24% con respecto a las nacionales, y como promedio general para todo el período se comportan sobre el 13%. Por lo que si se compara con la representatividad de Matanzas en el contexto nacional en cuanto área respecta (10.8%), son emisiones ligeramente elevadas con respecto al nivel nacional (Ilustración 66). Si se toman solo los años donde coinciden las estimaciones reales evaluadas tanto para el INERGEI de Cuba y el de Matanzas (1994, 2004 y 2014), se obtiene que las emisiones de CO₂ en Matanzas oscilan como promedio en 12% con respecto al nivel nacional (Tabla 26).

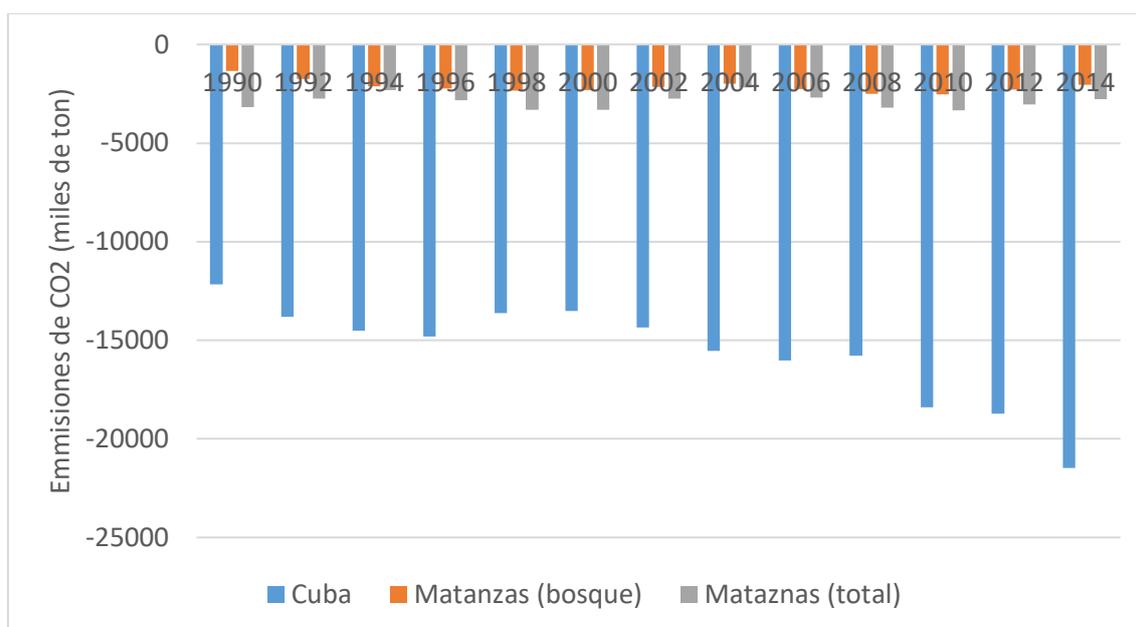


Ilustración 66. Comparación de emisiones de CO₂ entre Cuba y la provincia de Matanzas en la categoría de bosque.

Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos de Carrillo et al. (2017).

Pero, al comparar las emisiones totales obtenidas para el presente estudio, se obtiene que el promedio en porcentaje de emisiones aumenta hasta 19%, oscilando entre 12.89 y 26.07% (Ilustración 66). Mientras que, en los años 1994, 2004 y 2014 el promedio es de 14% (Tabla 26).

Tabla 26. Comparación de emisiones entre Cuba y Matanzas para los años donde coincidían estimaciones reales.

	1994		2004		2014	
	miles t CO ₂	%	miles t CO ₂	%	miles t CO ₂	%
<i>Cuba</i>	-14,503.10	100	-15,538.60	100	-21,464.10	100
<i>Matanzas (bosque)</i>	-1,734.94	11.96	-1,990.28	12.81	-2,053.75	9.57
<i>Matanzas (Total)</i>	-2,739.38	18.89	-2,174.82	14.00	-2,765.78	12.89

Fuente: Elaborado por el autor a partir de datos de Carrillo et al. (2017)

A partir de los datos totales de remociones en Matanzas y haciendo una rápida aritmética, sabiendo que el territorio de estudio ocupa alrededor del 10.8% del territorio nacional, se puede suponer que Cuba debía haber removido de la atmósfera en el año 1994, un total de 25,364.63 miles de toneladas de dióxido de carbono, este año, presenta una diferencia de 10,861.53 miles de toneladas de CO₂. Mientras que para el año 2004, el resultado fue de 20,137.22 miles de toneladas de CO₂, y en el año 2014, donde los resultados se ajustan un poco más que los años anteriores, se debía de haber reportado 25,609.07 miles de toneladas de CO₂ removidas.

Estos resultados demuestran que las emisiones de CO₂ en el territorio nacional están subestimadas. Esto pudiera ser porque se no representan el universo de las emisiones dentro de FOLU, incumpliendo uno de los preceptos del IPCC (2006b) a la hora de la realización de un inventario nacional de GEI, el cual debe ser exhaustivo, o lo que es lo mismo, se deben declarar las estimaciones para todas las categorías de fuentes y sumideros.

4.4. Categorías principales

Un análisis muy significativo para el inventario nacional de GEI, es el de categorías principales, el cual nos muestra de una forma resumida y rápida las categorías a tener en cuenta para una posible acción de mitigación, o incluso para perfeccionar los factores de emisión pertinentes.

El análisis llevado a cabo muestra como resultado que las subcategorías más importantes de FOLU en la provincia de Matanzas están representadas en la siguiente tabla 27.

Tabla 27. Categorías principales por el cambio de uso de la tierra en Matanzas, 2019.

Subcategorías	2019 (ton CO₂)	Valor absoluto. Año 2019 (ton CO₂)	Evaluación de nivel (%)
<i>Matorral que sigue siendo matorral</i>	-1898770.06	1898770.06	0.41
<i>Bosque semideciduo que sigue siendo bosque semideciduo</i>	-830914.08	830914.08	0.18
<i>Bosque semideciduo que se convirtió en matorral</i>	255383.13	255383.13	0.05
<i>Cultivos perennes que siguen siendo cultivos perennes</i>	-218140.49	218140.49	0.05
<i>Bosque semideciduo que se convirtió en herbazal de ciénaga</i>	199309.90	199309.90	0.04
<i>Matorral que se convirtió en bosque semideciduo</i>	-198305.74	198305.74	0.04
<i>Herbazal de ciénaga que se convirtió en bosque semideciduo</i>	-172983.73	172983.73	0.04
<i>Manglar que sigue siendo manglar</i>	-148764.45	148764.45	0.03
<i>Pastizal que se convirtió en bosque semideciduo</i>	-103794.82	103794.82	0.02
<i>Pastizal que se convirtió en matorral</i>	-87635.39	87635.39	0.02
<i>Bosque semideciduo que se convirtió en pastizal</i>	86897.24	86897.24	0.02
<i>Plantación latifolia que sigue siendo plantación latifolia</i>	-84086.97	84086.97	0.02
<i>Manglar que se convirtió en herbazal de ciénaga</i>	79067.94	79067.94	0.02
<i>Bosque semideciduo que se convirtió en cultivos anuales</i>	74996.46	74996.46	0.02

Fuente: Elaborado por el autor.

Como se puede observar, del total de subcategorías de cambio para el año 2019 en Matanzas (44), tan solo 14 son representativas en la evaluación de nivel, representando entre ellas el 95% de las emisiones de dióxido de carbono. De ellas, solo 4 emiten a la atmósfera, pues las demás remueven el carbono de la atmósfera.

Este ejercicio, vuelve a demostrar que la subcategoría de mayor importancia en el FOLU de Matanzas, no es el bosque semideciduo, sino el matorral, el cual es excluido de las estimaciones de carbono en el INERGEI de Cuba. Para Matanzas, esta subcategoría de matorral que sigue siendo matorral, representa 2/5 partes de las emisiones totales, duplicando a las emisiones del bosque semideciduo que sigue siendo bosque semideciduo.

CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación se observó que las emisiones netas de carbono en la provincia de Matanzas para el período 1989-2019, producto del cambio de uso de la tierra, oscilan entre un mínimo de 595 toneladas y un máximo de 924 toneladas removidas de la atmósfera, estas cifras curiosamente se dan en el año intermedio e inicial, respectivamente, de la serie de estudio. Mientras que para el año 2019, las emisiones totales son de 835 toneladas de carbono.

Para el área de estudio se logran determinar 12 categorías de uso, y se clasifican de acuerdo a lo recomendado por el IPCC, partiendo de cinco categorías principales (bosque, cultivos, pastos, agua y construida). De las 12 categorías, 5 pertenecen a bosques, 2 a pastos y cultivos, y una a cada una de los 3 restantes, quedando una categoría para los usos que no son representables en las anteriores. La serie quinquenal de cambio de uso de la tierra nos permitió aseverar que el uso de la tierra para el período posee pocos cambios, nunca sobrepasando el 7% del total de área de la provincia. Y de las tasas de cambio presentadas por las categorías, las más representativas son la perteneciente a plantación latifolia y la plantación de pino.

La fiabilidad global del mapa de cambio de uso de la tierra en el período 2014-2019 es de 97%, con un intervalo de confianza de $\pm 0.8\%$. Pero, hacia el interior de las categorías, existen algunas con baja fiabilidad tanto del usuario como del productor sobre todo en las categorías de menor área. Esta variabilidad en las fiabilidades trae aparejado diferencias entre el área del mapa y el área estimada, no sobrepasando el 4% del área total del territorio de estudio.

A partir de la confiabilidad de las áreas estimadas se determinó el aporte estas en la incertidumbre del carbono, oscilando entre -12.2% y +12.9% para el 90% de probabilidad.

Las emisiones de carbono en biomasa por el cambio de uso de la tierra, representaron en la mayoría de los años un poco más del 99% del total de carbono estimado. Siendo los años 2004 y 2009, donde las emisiones del suelo

sobrepaso el 1 y 2 % del total de emisiones, respectivamente. En cuanto a la distribución espacial de las emisiones de carbono, hay que prestar interés a las áreas fronterizas del bosque semidecidual, sobre todo en las ciénagas que conforman parte del territorio de estudio. También a las áreas del centro de la provincia, las cuales poseen cambios repetitivos durante todo el período de estudio.

Las emisiones de CO₂ estimadas en este estudio demuestran la subestimación en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en Cuba, por no contar con todas las subcategorías de emisión que se tiene en cuenta para este estudio. Las emisiones obtenidas para Matanzas, representan casi la quinta parte de las emisiones del INERGEI para el año 1994. Mientras que para los años 2004 y 2014, son de 14 % y 13 %, respectivamente.

La subcategoría que más influye sobre el balance de dióxido de carbono total de Matanzas es el matorral que sigue siendo matorral con 2/5 partes de las emisiones de la provincia.

RECOMENDACIONES

Luego de la realización de esta investigación se concluye recomendar la extensión de dicho estudio al resto del país, y de esta manera obtener las emisiones por concepto del cambio de uso de la tierra, lo cual contribuirá al perfeccionamiento continuo del INERGEI en Cuba.

Para la mejora de estos estudios, se exhorta a la confección de una leyenda homogénea y única, que sea capaz de afrontar los estudios futuros. A partir de esta leyenda, profundizar los esfuerzos en la obtención de factores de emisión de producción nacional por categorías de uso de la tierra, tanto de biomasa como de carbono en el suelo; y junto a ellos, obtener su respectivo error y de esta manera, contabilizar también la certidumbre de las emisiones obtenidas.

Basado en los resultados obtenidos en la fiabilidad de las categorías, se recomienda profundizar en el estudio de la incertidumbre del cambio de uso de la tierra dado la inexistencia de bases de sitios de referencia, para poder determinar, y disminuir el error de la clasificación de cambio de uso, y con ello su repercusión en las emisiones de carbono determinadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, A., & Mercadet, A. (2012). *El sector forestal cubano y el cambio climático*. Instituto de Investigaciones Agro-Forestales. La Habana, Cuba.
- Álvarez, A., Ponce, D., & Mercadet, A. (2004). El cambio climático y el sector forestal cubano: Segunda aproximación. *Revista Forestal Baracoa, Número Esp*, 43–49.
- Ardila, J. P., Espejo, O. J., & Herrera, J. L. (2005). Validación de una Metodología de Clasificación de Imágenes Satelitales en un entorno Orientado a Objetos. *Ingeniería*, 10(1), 61–69. <https://doi.org/10.14483/23448393.1877>
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., Hackler, J., Beck, P. S. A., Dubayah, R., Friedl, M. A., Samanta, S., & Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3), 182–185. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>
- Benavides, H. O., & León, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. In *Ideam* (pp. 1–102). <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Benz, U. C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., & Heynen, M. (2004). Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58(3–4), 239–258. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2003.10.002>
- Blaschke, T., Burnett, C., & Pekkarinen, A. (2004). *Image Segmentation Methods for Object-based Analysis and Classification* (pp. 211–236). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2560-0_12
- Card, D. H. (1982). Using Known Map Category Marginal Frequencies To Improve Estimates of Thematic Map Accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(3), 431–439.
- Carrillo, E., Manso, R., Sosa, C., González, Y., Bolufé, J., Boudet, D., León, A., Guevara, V., González, C., López, I., Pérez, D., Ricardo, H., Pire, S.,

- Mercadet, A., Álvarez, A., Y, R., Amaral, M., & Biart, R. (2017). Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de Gases de Efecto Invernadero en Cuba. *V Congreso de Cambio Climático. XI Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo.*
- Carrillo, E., Manso, R., Sosa, C., González, Y., León, A., Guevara, V., González, C., Boudet, D., Amarales, M., Biart, R., López, I., Pérez, D., Ricardo, H., Mercader, A., Álvarez, A., & Rodríguez, Y. (2015). Panorama de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero en Cuba para el período 1990-2010. *XV Encuentro de Geografos de América Latina.*
- Castelltort, A. L. (2012). Self management or managerial autonomy. SESPAS report, 2012. *Gaceta Sanitaria*, 26(SUPPL.1), 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2011.11.004>
- Centella, A., Llanes, J., & Paz, L. (2001). *República de Cuba. Primera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.*
- Chavez, P. S. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459–479. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)
- Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections - Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing. In *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1201/b18954>
- Chuvieco Salinero, E. (1996). *Fudamentos de Teledetección espacial* (Tercera Ed). Ediciones RIALP. S.A.
- Clewley, D., Bunting, P., Shepherd, J., Gillingham, S., Flood, N., Dymond, J., Lucas, R., Armston, J., & Moghaddam, M. (2014). A python-based open source system for Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA)

- utilizing raster attribute tables. *Remote Sensing*, 6(7), 6111–6135.
<https://doi.org/10.3390/rs6076111>
- Colectivo de autores. (1989). *Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. Principles and Practices* (Third Edit). Taylor&Francis.
- Cronemberger, F. M. (2014). *Análise geoecológica da dinâmica da paisagem no estado do Rio de Janeiro*. Universidade Federal Fluminense.
- Dixon, R. K., Brown, S., Houghton, R. A., Solomon, A. M., Trexler, M. C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263(5144), 185–190.
<https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Fernández Pérez, D. (2007). *Análisis de los cambios de uso de la tierra en las cuencas hidrográficas Itabo y Guanabo durante el período 1985 – 2005 a partir del procesamiento de imágenes de satélite* [Universidad de La Habana]. <http://dspace.geotech.cu/jspui/handle/123456789/161>
- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., Brovkin, V., Cadule, P., Doney, S., Eby, M., Fung, I., Bala, G., John, J., Jones, C., Joos, F., Kato, T., Kawamiya, M., Knorr, W., Lindsay, K., Matthews, H. D., ... Zeng, N. (2006). Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, 19(14), 3337–3353.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3800.1>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D. C. E., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., ... Zaehle, S. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838.
<https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Gallardo Lancho, J. F., & Merino, A. (2007). El ciclo del carbono y la dinámica de

los sistemas forestales. In *El papel de los bosques españoles en la mitigación del cambio climático* (Vol. 1, pp. 43–64). <http://dialnet.unirioja.es/servlet/extart?codigo=2959105>

Galli, A., & Savina, E. (2001). Hyperspectral Data Classification By Object-Oriented Approach for the Management of. *Image (Rochester, N.Y.), Definiens*.

GCE. (n.d.). Manual sobre los inventarios nacionales de GEI. In *CMNUCC*.

Geoffrey J. Hay y Danielle J. Marceau. (2004). *Multiscale Object-Specific Analysis (MOSA): An integrative approach for multiscale landscape analysis*. 1–33.

GFOI. (2013). *Integración de las observaciones por teledetección y terrestres para estimar las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero en los bosques. Métodos y orientación de la Iniciativa Mundial de Observación de los Bosques*.

Hao, H. mei, & Ren, Z. yuan. (2009). Land Use/Land Cover Change (LUCC) and Eco-Environment Response to LUCC in Farming-Pastoral Zone, China. *Agricultural Sciences in China*, 8(1), 91–97. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60013-4](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60013-4)

Hay, G., & Castilla, G. (2006). Object-Based Image Analysis: Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT). In *Earth Sciences* (Vol. 454, Issue May 2006). http://en.wikipedia.org/wiki/SWOT_Analysis

Hewson, J., Steininger, M., & Pesmajoglou, S. (2014). Manual de medición, reporte y verificación (MRV) de REDD+ versión 2.0. *Usaid, Fcmc*.

Houghton, R. A., & Hackler, J. L. (1999). Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology*, 5(4), 481–492. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00244.x>

Houghton, R. A., Hackler, J. L., & Lawrence, K. T. (1999). The U.S. carbon budget: Contributions from land-use change. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.285.5427.574>

- INECC. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 en México. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*, 845.
- INSMET. (2015). *República de Cuba. Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático*. <https://doi.org/363.738.747>
- INSMET. (2017). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Período 1990-2014* (p. 58).
- Instituto de Ecología y Sistemática. (2007). *Bosques de Cuba. Parte I y II*. 16.
- IPCC-OECD-IEA. (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- IPCC. (2006a). Agriculture, Forestry and Other Land Use. In Kiyoto Eggleston, Simon; Buendia, Leandro; Miwa, Kyoko; Ngara Todd; Tanabe (Ed.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Japan.
- IPCC. (2006b). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (K Eggleston, Simon; Buendia, Leandro; Miwa, Kyoko; Ngara Todd; Tanabe (ed.)). Japan.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- Lai, L., Huang, X., Yang, H., Chuai, X., Zhang, M., Zhong, T., Chen, Z., Chen, Y., Wang, X., & Thompson, J. R. (2016). Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2(11), 1–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601063>
- Lambin, E. F., Geist, H. J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205–241. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459>

- Lambin, E. F., Geist, H., & Rindfuss, R. R. (2002). Chapter 1 Introduction : Local Processes with Global Impacts. *Change, Turner*, 1–8.
- Lecha, L., Paz, L., & Braulio, L. (1994). *El clima de Cuba*. Editorial Academia.
- Lewis, S. L., Lopez-Gonzalez, G., Sonké, B., Affum-Baffoe, K., Baker, T. R., Ojo, L. O., Phillips, O. L., Reitsma, J. M., White, L., Comiskey, J. A., Djuikou K, M. N., Ewango, C. E. N., Feldpausch, T. R., Hamilton, A. C., Gloor, M., Hart, T., Hladik, A., Lloyd, J., Lovett, J. C., ... Wöll, H. (2009). Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 457(7232), 1003–1006. <https://doi.org/10.1038/nature07771>
- Lizarazo, I., & Elsner, P. (2008). *From pixels to grixels: a unified functional model for geographic object-based image analysis*. 40.
- López, C. (2009). Sistema para la preparación y actualización del Inventario Nacional de Emisiones y Remociones de Gases de Efecto Invernadero en Cuba: Experiencias, Resultados y Perspectivas. *I Congreso de Cambio Climático. VII Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo*.
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 455(7210), 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>
- Mármol, E. (2015). *Transformación de la estructura agraria en el período 1995-2013 en el municipio Los Palacios , provincia de Pinar del Río* . Universidad de La Habana.
- Martín-chivelet, J. (2010). Carbon Cycle and Climate : the geological perspective Fundamentos ConCeptuales y didáCtiCos. *Enseñanza de Las Ciencias*, 2010, 33–46.
- Martínez, J., & Fernández, A. (2004). *Cambio climático: una visión desde México*.

Instituto Nacional de Ecología.

- Mas, J.-F., González, R., Lemoine, R., López, J., Piña, A., & Herrera, E. (2015). Actualizaciones sucesivas de mapas de cubierta del suelo combinando segmentación de imagen e interpretación visual. *Memorias SELPER XXI*, 1–7.
- Mas, J.-F., Pérez-Vega, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. O., & Vega, E. (2014). A Suite of Tools for Assessing Thematic Map Accuracy. *Geography Journal*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/372349>
- Mas, J. (2017). Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio. In *Análisis y modelación de patrones y procesos de cambio*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786070296871e.2017>
- Mas, J. F., Díaz-Gallegos, J. R., & Vega, A. P. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: Una revisión. *Investigaciones Geográficas*, 51, 53–72.
- Mas, J. F., Lemoine-Rodríguez, R., González-López, R., López-Sánchez, J., Piña-Garduño, A., & Herrera-Flores, E. (2017). Land use/land cover change detection combining automatic processing and visual interpretation. *European Journal of Remote Sensing*, 50(1), 626–635. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1387505>
- Mas, J. F., Lemoine-Rodríguez, R., González, R., López-Sánchez, J., Piña-Garduño, A., & Herrera-Flores, E. (2017). Evaluación de las tasas de deforestación en Michoacán a escala detallada mediante un método híbrido de clasificación de imágenes SPOT. *Madera Bosques*, 23(2), 119–131. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321472>
- Matteucci, S. D., Silva, M. E., & Rodriguez, A. F. (2016). Clasificaciones de la tierra: provincias fitogeográficas, ecorregiones o paisajes. *Fronteras*, 14(January), 1–16.
- Meyfroidt, P., Rudel, T. K., & Lambin, E. F. (2010). Forest transitions, trade, and

- the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(49), 20917–20922. <https://doi.org/10.1073/pnas.1014773107>
- Mora, T. J. G., & Mas, J. F. (2008). Comparación de metodologías para el mapeo de la cobertura y uso del suelo en el sureste de México. *Investigaciones Geográficas*, 67(8701), 7–9. <https://doi.org/10.14350/rig.17987>
- Morales, G. M. (2019). Análisis histórico de los impactos potenciales del cambio climático antropogénico en dos áreas agrícolas de México y Cuba. Y diseño de una propuesta de estrategias alternativas de adaptación. In *Programa de becas de la S.R.R. para extranjeros* (p. 100). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mosquera, I. G. (2012). *Análisis de las transformaciones territoriales en el espacio de la provincia de Matanzas en el período comprendido entre los años 1985-2010*. Universidad de La Habana.
- Naciones Unidas. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. 62301.
- Oglesby, R., & Grünwaldt, A. (2010). *La ciencia del cambio climático. Manual práctico para Versión original en inglés La ciencia del cambio climático Manual práctico para.* 37. https://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/idb26_spn_0.pdf
- Ojeda Martínez, D. (2014). *Método Para La Evaluación De Los Cambios Espaciotemporales En La Agricultura Mediante La Geomática* [Instituto Técnico Militar Jose Martí Orden Antonio Maceo Orden Carlos J. Finlay]. <https://doi.org/10.1037/cou0000103>.
- Ojeda Martínez, D., & Martín Morales, G. (2016). Método Para La Evaluación De Los Cambios Espaciotemporales En La Agricultura Mediante La Geomática. *XV Encuentro de Geógrafos de América Latina*, 3(1 April), 477–484. <https://doi.org/10.1037/cou0000103>.
- Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., &

- Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>
- ONEI. (2019a). *Anuario Estadístico de Cuba 2018*. Oficina Nacional de Estadísticas e Información. <https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004>
- ONEI. (2019b). *Anuario Estadístico de Matanzas*. Oficina Provincial de Estadísticas e Información.
- Pacala, S. W., Hurtt, G. C., Baker, D., & Peylin, P. (2001). *Consistent Land- and Atmosphere-Based U. S. Carbon*. 292(June), 2316–2321.
- Pan, Y, Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Pan, Yude, Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- Partido Comunista de Cuba. (2011). *Lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución* (p. 41). Comité Central del Partido Comunista de Cuba.
- Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W. F., Núñez, P. V., Vásquez, R. M., Laurance, S. G., Ferreira, L. V., Stern, M., Brown, S., & Grace, J. (1998). Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science*, 282(5388), 439–442. <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.439>
- Pineda, O. (2011). *Análisis de cambio de uso de suelo mediante percepción*

remota en el municipio de Valle de Santiago.

Planos, E., Gutiérrez, T., Capote, R., Barranco, G., Salabrarría, D., & Vales, M. (2018). *Programa Nacional de Ciencia. Cambio Climático en Cuba. Aportes 2013-2018.*

Rafael C. Gonzalez, R. E. W. (1996). *Tratamiento Digital de Imagenes.*

Ramiro, L. (2014). *Evaluación de métodos de clasificación basados en píxeles y en objetos para la obtención de mapas de uso de cobertura del suelo a partir de imágenes satelitales Rapideye* [Universidad del Azuay]. <https://doi.org/10.4324/9781315853178>

Recio Recio, J. A. (2009). Técnicas de extracción de características y clasificación de imágenes orientada a objetos aplicadas a la actualización de bases de datos de ocupación del suelo. In *Tesis de doctorado*. Universidad Politecnica de Valencia.

San Marful Orbis, E. (2008). Azúcar, población y poblamiento en Matanzas (Siglos XV-XXI). *Revista Novedades de Población*, 4(8), 51–207.

Shepherd, J., Bunting, P., & Dymond, J. (2019). Operational Large-Scale Segmentation of Imagery Based on Iterative Elimination. *Remote Sensing*, 11(6), 658. <https://doi.org/10.3390/rs11060658>

Shevliakova, E., Pacala, S. W., Malyshev, S., Hurtt, G. C., Milly, P. C. D., Caspersen, J. P., Sentman, L. T., Fisk, J. P., Wirth, C., & Crevoisier, C. (2009). Carbon cycling under 300 years of land use change: importance of the secondary vegetation sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2007GB003176>

Smith, B., Knorr, W., Widlowski, J. L., Pinty, B., & Gobron, N. (2008). Combining remote sensing data with process modelling to monitor boreal conifer forest carbon balances. *Forest Ecology and Management*, 255(12), 3985–3994. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.03.056>

Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data. *Remote*

Sensing of Environment, 75(2), 230–244. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(00\)00169-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(00)00169-3)

Stehman, S. V., & Czaplewski, R. L. (1998). Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment - an application of satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 64(January), 331–344. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00010-8)

Stuiver, M., & Quay, P. D. (1981). Atmospheric ^{14}C changes resulting from fossil fuel CO_2 release and cosmic ray flux variability. *Earth and Planetary Science Letters*, 53(3), 349–362. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90040-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90040-6)

Toirac Arguelle, W., Bravo Iglesias, J., Barrero Medel, H., Vidal Corona, A., Ajete Hernández, A., & Castillo Edua, B. (2015). Estimación del carbono retenido en el fuste de las plantaciones de *Pinus maestrensis* Bisse en la provincia Granma, Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 3(1), 9.

Tubiello, F. ., Salvatore, M., Condor Golec, R. D., Ferrara, A., Rossi, S., Biancalani, R., Federeci, S., Jacobs, H., & Flammini, A. (2014). *Agricultura , Silvicultura y otros Usos de la Tierra Emisiones por fuentes y absorciones por sumideros*. 78.

Valdés, A., Manrique, R., Carrillo, E., Sosa, C., López, C., González, C., Guevara, V., León, A., Boudet, D., Amarales, M., Biart, R., López, I., Pérez, D., Pire, S., Cuesta, L., Mercadet, A., & Álvarez, A. (2013). Emisiones y Remociones de Gases de Efecto Invernadero en Cuba. Reporte Actualizado para el Período 1990-2006. *III Congreso de Cambio Climático. IX Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo*, 1.

Vicens, R. S., Rodriguez, J. M., & Cronemberger, F. M. (2020). a Paisagem Físico-Geográfica: Representação Cartográfica. *Revista Brasileira de Geografia*, 64(2).

Vilamajó, D., Ricardo, N., Capote, R., González, A., & Cabrera, L. (2010). La Vegetación de la Provincia Matanzas, Cuba. *Acta Botánica Cubana*, 209, 33–50.

WMO. (2019). World Meteorological Organisation Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No. 15. *Wmo*, 8.

Anexo 1

Parte 2. Continuación...

Categorías de cambio	EB	EC	ED	EE	EF	EG	FF	GA	GB	GC	GE	GG	GH	GI	HG	HH	II	JG	JJ	KK	LL	Total general	
AA								1															126
AB																							9
AE			1																				10
AG											2												31
AH																							1
BA																							17
BB																							115
BC																							31
BE																							32
BG																							18
BI																							4
CB								3															34
CC																							178
CD																							20
CE																							8
CG																							17
CI																							2
CL																					1		5
DC																							16
DD																							44
DF																							2

Anexo 2

Parte 1

	AA	AB	AE	AG	AH	BA	BB	BC	BE	BG	BI	CB	CC	CD	CE	CG	CI	CL	DC	DD	DF	DG
AA	0.189																					
AB		0.000				0.000																
AE			0.001																			
AG				0.002																		
AH					0.000																	
BA	0.000	0.000				0.001																
BB							0.169					0.001										
BC								0.002					0.000									
BE									0.004													
BG										0.001												
BI											0.000											
CB												0.002		0.000								
CC								0.002					0.289			0.002						
CD														0.000					0.000	0.000		
CE															0.000							
CG																0.001						
CI																	0.000					
CL																		0.000				
DC													0.000						0.001			
DD																				0.031		
DF																					0.000	
DG																						0.000
EA			0.000																			

Anexo 2

Parte 2. Continuación...

	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG	FF	GA	GB	GC	GE	GG	GH	GI	HG	HH	II	JG	JJ	KK	LL	Total	
AA									0.002														0.191	
AB																								0.000
AE					0.000																			0.001
AG													0.000											0.002
AH																								0.000
BA																								0.001
BB																								0.170
BC																								0.002
BE																								0.004
BG																								0.001
BI																								0.000
CB										0.000														0.002
CC																								0.292
CD																								0.000
CE																								0.000
CG																								0.001
CI																								0.000
CL																						0.000	0.000	0.000
DC																								0.001
DD																								0.031
DF																								0.000
DG																								0.000
EA	0.001																							0.001

<i>EB</i>	0.003																						0.003
<i>EC</i>		0.000																					0.000
<i>ED</i>			0.000																				0.000
<i>EE</i>	0.001			0.102							0.002					0.005							0.111
<i>EF</i>				0.000																			0.000
<i>EG</i>					0.001						0.000												0.001
<i>FF</i>						0.002														0.000			0.002
<i>GA</i>							0.002																0.002
<i>GB</i>								0.001															0.001
<i>GC</i>									0.000														0.000
<i>GE</i>			0.000		0.000					0.003													0.003
<i>GG</i>											0.135												0.137
<i>GH</i>												0.000		0.000									0.000
<i>GI</i>														0.000									0.000
<i>HG</i>												0.000	0.000		0.000								0.001
<i>HH</i>																0.018	0.001						0.019
<i>II</i>																	0.003		0.000				0.003
<i>JG</i>																		0.000					0.000
<i>JJ</i>																				0.002			0.002
<i>KK</i>							0.001														0.006		0.007
<i>LL</i>																						0.006	0.006
Total general	0.001	0.005	0.000	0.000	0.102	0.000	0.002	0.003	0.003	0.001	0.000	0.005	0.136	0.000	0.000	0.000	0.023	0.004	0.000	0.002	0.006	0.006	1.000

Anexo 3

Categorías de cambio

<i>AA</i>	Cultivos anuales que continúa siendo cultivos anuales
<i>AB</i>	Cultivos anuales que se convirtió en bosque semideciduo
<i>AE</i>	Cultivos anuales que se convirtió en matorral
<i>AG</i>	Cultivos anuales que se convirtió en pastizal
<i>AH</i>	Cultivos anuales que se convirtió en cultivos perennes
<i>BA</i>	Bosque semideciduo que se convirtió en cultivos anuales
<i>BB</i>	Bosque semideciduo que continúa siendo bosque semideciduo
<i>BC</i>	Bosque semideciduo que se convirtió en herbazal de ciénaga
<i>BE</i>	Bosque semideciduo que se convirtió en matorral
<i>BG</i>	Bosque semideciduo que se convirtió en pastizal
<i>BI</i>	Bosque semideciduo que se convirtió en plantación latifolia
<i>CB</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en bosque semideciduo
<i>CC</i>	Herbazal de ciénaga que continúa siendo herbazal de ciénaga
<i>CD</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en manglar
<i>CE</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en matorral
<i>CG</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en pastizal
<i>CI</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en plantación latifolia
<i>CL</i>	Herbazal de ciénaga que se convirtió en cuerpos de agua
<i>DC</i>	Manglar que se convirtió en herbazal de ciénaga
<i>DD</i>	Manglar que continúa siendo manglar
<i>DF</i>	Manglar que se convirtió en otras
<i>DG</i>	Manglar que se convirtió en pastizal
<i>EA</i>	Matorral que se convirtió en cultivos anuales

<i>EB</i>	Matorral que se convirtió en bosque semideciduo
<i>EC</i>	Matorral que se convirtió en herbazal de ciénaga
<i>ED</i>	Matorral que se convirtió en manglar
<i>EE</i>	Matorral que continúa siendo matorral
<i>EF</i>	Matorral que se convirtió en otras
<i>EG</i>	Matorral que se convirtió en pastizal
<i>FF</i>	Otras que continúa siendo otras
<i>GA</i>	Pastizal que se convirtió en cultivos anuales
<i>GB</i>	Pastizal que se convirtió en bosque semideciduo
<i>GC</i>	Pastizal que se convirtió en herbazal de ciénaga
<i>GE</i>	Pastizal que se convirtió en matorral
<i>GG</i>	Pastizal que continúa siendo pastizal
<i>GH</i>	Pastizal que se convirtió en cultivos perennes
<i>GI</i>	Pastizal que se convirtió en plantación latifolia
<i>HG</i>	Cultivos perennes que se convirtió en pastizal
<i>HH</i>	Cultivos perennes que continúa siendo cultivos perennes
<i>II</i>	Plantación latifolia que continúa siendo plantación latifolia
<i>JG</i>	Plantación de pino que se convirtió en pastizal
<i>JJ</i>	Plantación pino que continúa siendo plantación pino
<i>KK</i>	Construida que continúa siendo construida
<i>LL</i>	Cuerpos de agua que continúa siendo cuerpos de agua