

**ESTRUCTURA ECOLÓGICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO
«ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»**

**MAURICIO TABARES MOSQUERA
LUIS FELIPE GAITÁN IDÁRRAGA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI, VALLE DEL CAUCA, 2018**

**ESTRUCTURA ECOLÓGICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO
«ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»**

**MAURICIO TABARES MOSQUERA
LUIS FELIPE GAITÁN IDÁRRAGA**

Trabajo de grado para optar al título de Geógrafo

**Director, PhD. OSCAR BUITRAGO BERMÚDEZ
Profesor del Departamento de Geografía
Co-Director, MSc. EMMANUEL ZAPATA CALDAS
Estudiante de Doctorado en Ciencias Ambientales
Universidad del Valle**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE HUMANIDADES
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE GEOGRAFÍA
SANTIAGO DE CALI, VALLE DEL CAUCA, 2018**

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar al título de Geógrafo.

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, ----- 2018

DEDICATORIA

A nuestras familias, quienes nos han brindado su apoyo incondicional durante el recorrido de este trayecto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera afectuosa a Oscar Buitrago Bermúdez y a Emmanuel Zapata Caldas, directores de este trabajo de grado, quienes, con sus orientaciones precisas, excelencia académica, ética profesional, motivación y amistad, garantizaron la elaboración de este documento.

También, se agradece a los integrantes del grupo de investigación Territorios, dado que sus grandes aportes, profesionalismo y calor humano, contribuyeron incommensurablemente al desarrollo de esta investigación.

Por último, se agradece a todas(os) los docentes del Departamento de Geografía, quienes formaron en muchas dimensiones a quienes ahora son autores de este documento.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTOS	5
CONTENIDO	6
LISTA DE CUADROS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ANEXOS	10
GLOSARIO	11
 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	 12
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
1.2. OBJETIVOS	18
1.3. CONTEXTO DE «ESTRUCTURAS ECOLÓGICAS» EN COLOMBIA Y SU APLICABILIDAD EN ÁREAS METROPOLITANAS	18
 CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	 22
2.1. REFLEXIONES SOBRE LA IDEA DE LA RELACIÓN «SOCIEDAD Y NATURALEZA»: INTERPRETACIÓN SISTÉMICA Y ESTRUCTURALISTA DE LA REALIDAD	23
2.2. EL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE CALI: ENFOQUE Y COMPONENTES	25
2.2.1. La sustentabilidad: pilar fundamental del sistema socioecológico	29
2.2.2. Estructura ecológica metropolitana (EEM)	31
2.2.3. Estructura metropolitana construida (EMC)	32
2.2.4. Servicios ecosistémicos (SE)	36
2.3. URBANIZACIÓN CONTEMPORÁNEA: DESDE EL ORIGEN DE LAS CIUDADES AL HECHO METROPOLITANO DE SANTIAGO DE CALI	37
 CAPÍTULO 3. FASES METODOLÓGICAS PARA IDENTIFICAR LA EEM	 43
3.1. FASE 1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA AMBIENTAL METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI	60
3.1.1. Criterio urbano-funcional: identificación de la estructura metropolitana construida (EMC)	60
3.1.2. Criterio biofísico	61
3.1.3. Criterio altitudinal	61
3.2. FASE 2. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS DE LA TIERRA DEL ÁREA DE ESTUDIO	62
3.3. FASE 3. IDENTIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA ECOLÓGICA METROPOLITANA (EEM)	65
3.3.1. Tipología CICESv4.3 de SE	66
3.3.2. Adaptación de la Leyenda CORINE <i>Land Cover</i> de coberturas de la tierra	67
3.3.3. Valoración de SE por consulta a expertos	68
3.3.4. Criterios ecosistémicos para identificar la EEM	76
3.3.5. Operaciones entre criterios de SE y clasificación de los elementos de la EEM	79
3.4. FASE 4. CATEGORÍAS ACTUALES DE GESTIÓN AMBIENTAL QUE SE SUPERPONEN A LA PROPUESTA DE EEM	83

CAPÍTULO 4. SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»: LA EMC Y LA EEM	85
4.1. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»	86
4.2. ESTRUCTURA METROPOLITANA CONSTRUIDA DEL ÁREA DE ESTUDIO (EMC)	91
4.3. UNIDADES DE ANÁLISIS DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO: COBERTURAS DE LA TIERRA DEL ÁREA DE ESTUDIO	95
4.4. ESTRUCTURA ECOLÓGICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»	100
4.4.1. Datos del proceso de consulta.....	100
4.4.2. Matriz de oferta y demanda de SE.....	101
4.4.3. Aplicación de los criterios de identificación de la EEM.....	102
4.4.4. Elementos de la EEM	106
4.4.5. Análisis multivariado de la EEM.....	111
4.5. CATEGORÍAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE OPERAN EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SOBRE LA EEM.....	115
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN	127
CONCLUSIONES	130
BIBLIOGRAFÍA.....	132

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Áreas metropolitanas legamente constituidas en Colombia y su enfoque ambiental.	21
Cuadro 2. Escala Likert semi-cuantitativa de valoración de SE.....	71
Cuadro 3. Características de los formularios virtuales.	74
Cuadro 4. Criterios ecosistémicos para identificar la EEM.	77
Cuadro 5. Valores máximos y mínimos hipotéticos por criterio.	79
Cuadro 6. Normalización de datos hipotéticos por criterio.	79
Cuadro 7. Clases para identificar la EEM.....	81
Cuadro 8. Nomenclatura de las 28 coberturas de la tierra.	85
Cuadro 9. Nomenclatura de los 21 SE.	86
Cuadro 10. Cuencas hidrográficas comprendidas en el área de estudio.....	88
Cuadro 11. Descripción general de los municipios abarcados en el área de estudio. .	92
Cuadro 12. Altitud de los grandes equipamientos del área de estudio.	93
Cuadro 13. Altitud de las zonas industriales y comerciales del área de estudio.	93
Cuadro 14. Área de coberturas de la tierra clasificadas y pos-procesadas.	97
Cuadro 15. Cifras del proceso de consulta a expertos en SE.	100
Cuadro 16. Análisis de oferta y demanda de SE por coberturas.	102
Cuadro 17. Categorías de protección ambiental con jurisdicción en el área de estudio.	117
Cuadro 18. Inventario de coberturas de la tierra abarcadas en la jurisdicción de las categorías actuales de protección ambiental que se superponen al área de estudio.	119
Cuadro 19. Categorías nacionales y regionales que gestionan los elementos de la EEM.	125
Cuadro 20. Terminología de teledetección empleada en ese documento.	144
Cuadro 21. Características espectrales y espaciales de las imágenes RapidEye.	150
Cuadro 22. Matriz de correlación entre bandas para el mosaico RapidEye.	155
Cuadro 23. Cifras del proceso de segmentación.....	160
Cuadro 24. Ejemplo de matriz de confusión.....	167
Cuadro 25. Coberturas clasificadas de forma automática, manual y semiautomática	170
Cuadro 26. Matriz de confusión de la clasificación del mosaico.....	172

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura del Estado colombiano.....	14
Figura 2. Esquema teórico y conceptual desarrollado en la investigación.....	22
Figura 3. Sistema socioecológico del área de influencia metropolitana de Cali.....	27
Figura 4. La estructura metropolitana construida.	34
Figura 5. Crecimiento demográfico y urbano mundial.	39
Figura 6. Mapa de coronas de influencia metropolitana de Santiago de Cali.	42
Figura 7. Esquema metodológico general desarrollado en la investigación.	46
Figura 8. Fases del proceso de clasificación de coberturas de la tierra.	63
Figura 9. Fases del proceso de identificación de la EEM.	66
Figura 10. Esquema operativo de la consulta a expertos.....	68
Figura 11. Esquema operativo de valoración de SE	71
Figura 12. Secciones del formulario de consulta.....	75
Figura 13. Esquema del procesamiento de matrices para identificar la EEM.	80
Figura 14. Creación de un área de influencia.....	84
Figura 15. Mapa del área de estudio y la EMC.	87
Figura 16. Mapa de división política-administrativa, de cuencas hidrográficas y de altitud del área de estudio	90
Figura 17. Coberturas de la tierra del área de estudio.	96
Figura 18. Porcentaje de área ocupada y segmentos por unidad de cobertura de la tierra.	99
Figura 19. Espacialización de los criterios de identificación de EEM.....	104
Figura 20. Valores promedio de criterios de SE por unidad de cobertura de la tierra.....	105
Figura 21. Mapa de la EEM y descripción de sus elementos	108
Figura 22. Mapa final de las áreas que son EEM, podrían ser EMM y no son EMM .	109
Figura 23. Esquema radial de los SE que ofrece la EEM.....	110
Figura 24. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de multifuncionalidad.	111
Figura 25. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de capacidad.	112
Figura 26. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de singularidad.....	113
Figura 27. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio importancia relativa.....	113
Figura 28. Círculo de correlaciones y plano factorial de la intersección de los cuatro criterios.....	114
Figura 29. Porcentaje de cada cobertura de la tierra bajo la jurisdicción de las categorías de protección ambiental valoradas.	123
Figura 30. Categorías de protección ambiental con jurisdicción en el área de estudio y su relación con la EEM	126
Figura 31. Contextualización en campo de área de estudio.....	143
Figura 32. Objetos de la superficie terrestre y la resolución espacial de imágenes...	147
Figura 33. Fases del proceso de clasificación de coberturas de la tierra.	148
Figura 34. Cuadrantes <i>RapidEye</i> , fecha de adquisición y firmas espectrales	153
Figura 35. Resultados preliminares de la clasificación del mosaico.	156
Figura 36. Modelo de calibración de coberturas de la tierra.....	157
Figura 37. Ejemplo de segmentación en el área de estudio.....	159
Figura 38. Resultados del muestreo en uno de los cuadrantes de calibración.	162
Figura 39. Arquitectura de un árbol de decisión.	164
Figura 40. Esquema operativo de una iteración ejecutada por script.	169
Figura 41. Comparación de las opciones de la herramienta simplify.....	173
Figura 42. Ilustración de los errores de topología de superposición y vacíos.....	175

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Clasificación de coberturas de la tierra.....	142
Anexo B. Descripción de las coberturas de la tierra para el área de estudio.....	177
Anexo C. Descripción de los SE valorados en la consulta a expertos.....	187
Anexo D. Estructura del script de muestreo estratificado	194
Anexo E. Estructura del script de clasificación de coberturas	195
Anexo F. Matriz de oferta de SE y criterios para identificar la EEM	196
Anexo G. Matriz de demanda de SE.....	197
Anexo H. Matriz de capacidad de SE (oferta – demanda) [sin transformar]	198
Anexo I. Matriz de capacidad de SE (oferta – demanda) [normalizada]	199
Anexo J. Matriz de multifuncionalidad	200
Anexo K. Matriz de singularidad	201
Anexo L. Matriz de importancia relativa	202
Anexo M. Matriz de EEM	203
Anexo N. Código empleado para realizar el análisis multivariado	204

GLOSARIO

ACOPI: asociación colombiana de pequeñas y medianas empresas.
ASOCAÑA: asociación de cultivadores de caña de azúcar de colombia.
ASTER: *advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer*.
CAR: corporación autónoma regional.
CIAT: centro internacional de agricultura tropical.
CICES: *common international classification of ecosystem services*.
CORINE: *coordination of information on the environment*.
CRC: corporación autónoma regional del cauca.
CVC: corporación autónoma regional del valle del cauca.
DANE: departamento administrativo nacional de estadística.
DEM: *digital elevation model*.
ECD: *esri classifier definition*.
FAO: *food and agricultural organization*.
FARN: fundación ambiente y recursos naturales.
FENALCE: federación nacional de cultivadores de cereales y leguminosas.
GEOBIA: *geographical object based image analysis*.
IDEAM: instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.
IGAC: instituto geográfico agustín codazzi.
IPCC: *intergovernmental panel on climate change*.
MADS: ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.
MEA: *millennium ecosystem assessment*.
NASA: *national aeronautics and space administration*.
NDVI: *normalized difference vegetation index*.
ONU: organización de las naciones unidas.
PNGIBSE: política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos.
PNN: parque nacional natural.
SIAC: sistema de información ambiental de colombia.
SIG: sistema de información geográfico.
SIG-OT: sistema de información geográfico para el ordenamiento territorial.
SINA: sistema nacional ambiental.
SINAP: sistema nacional de áreas protegidas.
SVM: *support vector machine*.
TIFF: *tagged image file format*.
UMC: unidad mínima cartografiable.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el problema de investigación, las preguntas, los objetivos planteados y un contexto referencial general. En el problema de investigación se plantea que la metropolización es una expresión particular de la sociedad humana contemporánea y que este fenómeno urbano ha deteriorado gravemente los ecosistemas en el planeta Tierra. En segundo lugar, se muestran las preguntas de investigación y los objetivos que direccionaron este trabajo. Por último, se muestra un contexto referencial de las «estructuras ecológicas» en las áreas metropolitanas constituidas en Colombia para evidenciar que la configuración administrativa territorial del Estado colombiano acarrea una deuda importante: la gestión ambiental desde una perspectiva supramunicipal.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La biosfera del planeta Tierra es un sistema con características que posibilitan la existencia de todas las formas de vida, incluida la humana. Sin embargo, solo desde que se empezaron a observar importantes efectos de las actividades antrópicas sobre el medio, y los impactos de los procesos naturales sobre las sociedades —impulsados y asociados al cambio climático acelerado—, la sustentabilidad ambiental del planeta se convirtió en un tema de preocupación global.

Aproximadamente hacia 1950, las organizaciones internacionales establecieron distintos espacios consultivos para proponer, fomentar, recomendar y gestionar, políticas ambientales en búsqueda de la sustentabilidad global. Uno de ellos fue la Cumbre de la Tierra realizada en 1992, en Río de Janeiro, Brasil, en la cual se firmaron compromisos de la llamada «Agenda 21». Uno de los tópicos más desarrollados tuvo que ver con la legislación ambiental, en especial de los centros urbanos. Esto se debió al reconocimiento de la tendencia histórica progresiva de la urbanización de la vida humana.

El crecimiento demográfico constante y las políticas formuladas a partir de las ventajas competitivas, favorecieron la conglomeración poblacional en las urbes e intensificó un patrón de distribución ocupacional concentrado en el planeta. Estos fenómenos socioespaciales se han explicado a partir de cinco factores de «presión y atracción» de la población rural a las zonas urbanas¹: i) alta tasa de natalidad rural, ii) tecnología reduce la necesidad de trabajo agrícola, iii) cambios del consumo familiar, de alimentación a otras mercancías, iv) precios bajos e inestables de productos agrícolas y, v) economías de aglomeración en las ciudades y sus beneficios derivados. Pero, al mismo tiempo, existen factores de atracción social hacia la ciudad. Así, por ejemplo, la concentración de fuerza de trabajo, la especialización de mercados y de servicios en pequeñas áreas geográficas, exhiben la complejidad de la ciudad moderna y plantean una serie de valores urbanos de la vida social contemporánea.

¹ HAGGETT, Peter. Geografía: una síntesis moderna. 3 ed. Barcelona: Omega, 1994. 669 p.

Durante este proceso de urbanización global, las características del entorno natural —suelo, agua, vegetación, aire, y clima— fueron utilizadas como recursos para la construcción de un ambiente nuevo, un ambiente antrópico². Lo expuesto se vuelve aún más relevante al considerar que hoy en día, las ciudades constituyen las mayores concentraciones espaciales de actividades productivas. En ellas se perciben y se producen los cambios efectivos del sistema económico y social. Así que no es extraño identificar impactos de fenómenos contemporáneos como el de la globalización en las grandes urbes³.

Bajo estos argumentos, la metrópoli se identifica como una de las maneras en las cuales se expresa la urbanización contemporánea, siguiendo los dictámenes del mercado y potenciando la evolución de algunas ciudades a través de procesos de concentración-difusión⁴; de primacía urbana —a escala regional y nacional—; de concentración de funciones urbanas especializadas, equipamientos e infraestructuras. Se debe agregar que, la evolución e impacto de la metrópoli en un contexto de globalización, a escalas local y regional, depende de sus fuerzas económicas y la capacidad para movilizar flujos de bienes y servicios a escala global. Según lo exponen Martínez y Buitrago⁵, estos factores gestan una región de influencia urbana con afecciones complejas; contaminación, presión sobre recursos, trabajo precario, entre otras.

Colombia no es indiferente a esa preocupante realidad urbano-ambiental. Los fenómenos de metropolización —en ocasiones reconocidos legalmente, pero siempre materializados morfológica y funcionalmente en la superficie de la tierra—, han sido objeto de especial atención desde el ámbito de la planificación con el fin de estimular el aparato productivo, el intercambio económico, el acceso a servicios, entre otras prioridades, acarreando una deuda importante: la dimensión ambiental a escala metropolitana.

Precisamente, la estructura estatal colombiana es fragmentada y se compone de un conjunto de entidades territoriales entre las que sobresalen los departamentos, los distritos, los municipios, los resguardos indígenas y también, las áreas metropolitanas (cuadro rojo en la Figura 1). El departamento, es considerado el nivel intermedio en la organización territorial administrativa estatal colombiana. Su función central es servir de intermediario entre la escala nacional y municipal. El municipio, fue definido como la unidad administrativa más cercana al ciudadano, y se pueden clasificar según la cantidad de habitantes e ingresos que posean.

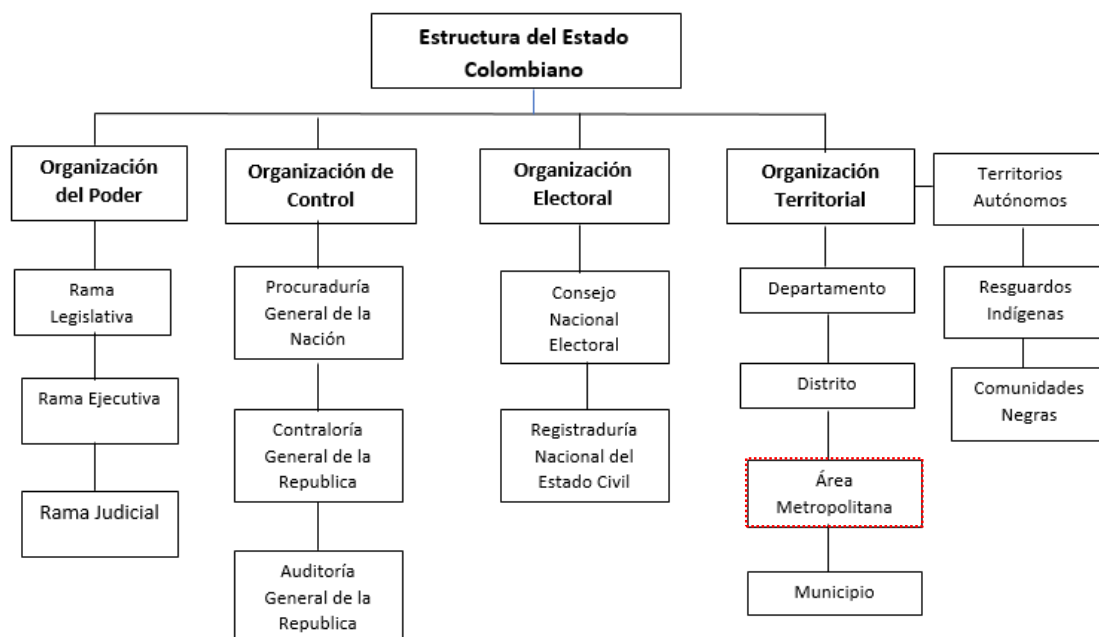
² WILHEIM, Jorge. Sao Paulo: los problemas de su metropolización y su gestión. *En*: Ambiente y Desarrollo. 1987. Vol. 3, No. 1 y 2; p. 47-60.

³ MARTÍNEZ, Pedro. La producción del espacio en la ciudad latinoamericana: el modelo del impacto del capitalismo global en la metropolización. *En*: Hallazgos. 2014. Vol. 12, No. 23; p. 211-229.

⁴ ABRAMO, Pedro. La ciudad com-fusa: mercado y producción de la estructura urbana en las grandes metrópolis latinoamericanas. *En*: EURE. 2012. Vol. 38, No. 114; p. 35-69.

⁵ MARTÍNEZ, Pedro y BUITRAGO, Oscar. Cali, una metrópoli regional en movimiento: la planeación municipal y los procesos de metropolización. Cali: Universidad del Valle, 2011. 131 p.

Figura 1. Estructura del Estado colombiano.



Fuente: COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. El estado y su organización. Bogotá: DNP, 2003.

Para el caso de las áreas metropolitanas en Colombia se han planteado formas de organización de este fenómeno, pero siempre considerando como unidad de integración al municipio. A partir de la Ley orgánica 128 de 1994 y la Ley 1625 de 2013 (Régimen para las Áreas Metropolitanas), se fortaleció jurídicamente la figura de Área Metropolitana en Colombia. A partir de la Ley 1625 de 2013, las Áreas Metropolitanas son⁶:

[...] entidades administrativas de derecho público, formadas por un conjunto de dos o más municipios integrados alrededor de un municipio núcleo, vinculados entre sí por dinámicas e interrelaciones territoriales, ambientales, económicas, sociales, demográficas, culturales y tecnológicas que, para la programación y coordinación de su desarrollo sustentable, desarrollo humano, ordenamiento territorial y racional prestación de servicios públicos requieren una administración coordinada.

Con las citadas normas, se faculta a los municipios, como entidad básica del Estado, de asociarse para buscar un desarrollo común y concertado. Por las dimensiones mencionadas, podría decirse que con la asociación se busca un desarrollo integral para la población. Sin embargo, en la realidad colombiana se ha fomentado la dimensión económica, consolidando morfológica y funcionalmente manchas urbanas interconectadas en la superficie.

⁶ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1625 de 2013. Bogotá: _____, 2013, p. 9.

Ante este panorama, la institucionalidad colombiana ha planteado distintas soluciones, pero no ha conseguido los cambios esperados. Por ejemplo, la citada Ley 1625 de 2013 ajustó la figura de AM en el país, pero también ordenó que cada hecho metropolitano identificado en la Ley promueva su planificación y gestión ambiental de forma integrada bajo una figura común de ordenamiento. Esta directriz de la Ley 1625 en Colombia ha sido poco aplicada. En este sentido, otras herramientas de gestión y planificación ambiental estarían en capacidad de subsanar esta deuda.

Por otro lado, el concepto de EE se propone como una forma apropiada para establecer aquellas áreas merecedoras de protección en los ámbitos de las áreas de influencia metropolitana. En esta investigación se considera importante articular los conceptos de «estructuras ecológicas» y áreas metropolitanas. En el caso colombiano el primero concepto ha sido también elaborado en política ambiental con el Decreto 3600 de 2007, el cual establece la necesidad de definir los determinantes de ordenamiento del suelo rural. Infortunadamente, las recomendaciones de Thomas van der Hammen⁷, autor seminal del concepto de estructura ecológica, por conveniencia o mala interpretación, no se ven reflejadas en el Decreto, el cual se centra en el aprovechamiento humano de los recursos naturales para el desarrollo socioeconómico.

En este contexto, a pesar de que desde 1969 se afirma que Santiago de Cali o Cali —como también se encontrará en el resto del documento— es una metrópoli⁸, no cuenta con un área metropolitana reconocida legalmente, pero en la realidad funciona como un sistema urbano con satélites complementarios, en donde ha primado la agroindustria, las actividades extensivas, y el intercambio de bienes y servicios, deteriorando gravemente los elementos ecológicos localizados en su área de influencia. Lo anterior tiene raíces en la falta de reconocimiento de los hechos ambientales como hechos supramunicipales, los cuales ocurren tanto dentro como fuera de los límites político-administrativos de los municipios.

Diferentes procesos, eventos y contextos históricos determinaron la consolidación metropolitana de Santiago de Cali. Esta Ciudad ingresó al siglo XX con una morfología de tipo nuclear, reproduciendo en su perímetro urbano un modelo agrícola tradicional basado en la hacienda colonial, pero, a partir de una serie de factores detonantes, Cali sobrellevó procesos sustanciales de transformación que la situaron como un polo de desarrollo regional y nacional. A grandes rasgos, estos factores fueron:

1. En 1910, Santiago de Cali se designó como «capital vallecaucana congregando una serie de funciones burocráticas»⁹. Este hecho, le

⁷ HAMMEN, Thomas van der. Plan ambiental de la cuenca alta del Río Bogotá. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 1998. 142 p.

⁸ MARTÍNEZ y BUITRAGO. Op. cit.

⁹ VÁSQUEZ, Edgar. Historia del desarrollo económico y urbano en Cali. Cali: Cámara de Comercio de Cali, 1990. p. 7.

permitió transformarse en un centro administrativo del sector público regional.

2. En 1954 se creó la CVC. Bajo una gran influencia del empresariado regional y la intención de estimular el desarrollo económico y social departamental, los proyectos iniciales de esta corporación abordaron: «i) el control de las aguas del río Cauca cuyos desbordamientos inutilizaban grandes extensiones de tierra para el aprovechamiento agrícola; ii) la generación de energía eléctrica de una manera adecuada al crecimiento industrial y económico de la región»¹⁰. El embalse «La Salvajina», localizado al norte del departamento del Cauca, es una obra clave de la CVC, la cual mitigó la situación de las inundaciones, favoreciendo, entre otras cosas, la expansión de un sector azucarero modernizante que requería energía y adecuación de tierras.
3. A partir de 1960, con el bloqueo a Cuba del mercado norteamericano, crecieron considerablemente la producción y exportación de azúcar, así como el área sembrada para la actividad cañera. Esto favoreció el establecimiento de una cadena productiva dentro de la región que, acompañada de otros factores, estimuló un acelerado proceso de urbanización, migración y crecimiento urbano. A inicios del siglo XX, Santiago de Cali contaba con menos de veinticinco mil habitantes. Durante las décadas de 1930 a 1960 la ciudad multiplicó catorce veces su población; tan solo en el período inter-censal de 1951-1964, su población creció en 353.747 personas. Pero, el hecho crucial reside en que el 71,5% de ese crecimiento correspondió a fenómenos migratorios¹¹. Dato exorbitante que situó a Santiago de Cali como la ciudad colombiana con la tasa más alta de migración durante esos años.
4. En 1961, la creación de las Empresas Municipales de Cali (EMCALI) fortaleció la oferta de servicios públicos y «definió el horizonte histórico de Santiago de Cali [y su influencia en la región] como ciudad moderna y líder para la segunda mitad del siglo XX»¹².
5. El proceso de modernización agrícola, urbanización y sistema vial e industrialización, caracterizado por una integración productiva y regional, aseguró una distribución espacial particular. «La vía férrea jugó un papel elemental en este proceso porque en los alrededores de las estaciones se crearon zonas industriales importantes en busca de acceso al transporte, a las bodegas y a las actividades de cargue y descargue»¹³.

¹⁰ Ibíd., p. 6.

¹¹ Ibíd., p. 21-22.

¹² CAMACHO, Miguel. La encrucijada de los servicios públicos en Cali (1961-2004). Cali: Secretaria de Cultura y Turismo del Valle del Cauca, 2007. p. 7.

¹³ VÁSQUEZ. Op. cit., p. 24.

Bajo este orden de ideas, esta investigación buscó responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles es la **estructura metropolitana construida** del sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali»?
2. ¿Cuáles es la **estructura ecológica** del sistema socioecológico en mención?
3. ¿Cuáles son los **servicios ecosistémicos** que provee la estructura ecológica del sistema socioecológico estudiado?
4. ¿Cómo operan espacialmente las **categorías de protección ambiental nacional y regional** frente a los elementos de la estructura ecológica del sistema socioecológico bajo estudio?

La aproximación a las respuestas de estas preguntas se hizo bajo el enfoque epistemológico crítico-estructuralista y la teoría de sistemas como hilo conductor. De esta manera, el área de influencia metropolitana de Cali se interpretó como un sistema socioecológico entendido como un conjunto compuesto por estructuras antrópicas y ecológicas, las cuales interactúan de forma recíproca y constante.

En el segundo capítulo de este documento se expone el marco teórico, cuyo eje principal es el concepto de sistema socioecológico, el cual se interpreta para el área de influencia metropolitana de Cali como el conjunto constituido por la «Estructura Ecológica Metropolitana» (ecológica) y la «Estructura Metropolitana Construida» (antrópica), componentes sistémicos que se articulan a partir de flujos y vínculos, lo cuales se denominarán «servicios ecosistémicos».

En el tercer capítulo del documento, se presenta la metodología de este trabajo, que consistió en aplicar técnicas mixtas de investigación científica para resolver el problema y alcanzar el objetivo propuesto. Posteriormente, el cuarto capítulo presenta tanto los resultados de la estructura ecológica del sistema socioecológico metropolitano, como el análisis de las categorías de gestión ambiental nacionales y regionales que la ordenarían. El quinto capítulo muestra los aportes sustanciales que hacen los resultados de esta investigación para la gestión ambiental de hechos supramunicipales como son las áreas merecedoras de protección ambiental bajo la figura de «Estructura Ecológica Metropolitana».

Por último, están las conclusiones y los anexos en los cuales se muestran los procesos metodológicos especializados y sus resultados. En los anexos se encontrarán las técnicas, herramientas y parámetros empleados para producir los insumos que sirvieron para alcanzar el objetivo principal del trabajo.

1.2. OBJETIVOS

El trabajo de grado tiene como propósito alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Proponer la estructura ecológica del sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali».

Objetivos específicos:

1. Establecer los límites del sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali».
2. Caracterizar los elementos que configuran el sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali».
3. Estimar la capacidad ecosistémica de los elementos que configuran el sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali».
4. Analizar espacialmente la operación de las categorías de protección ambiental nacional y regional frente a los elementos de la estructura ecológica del sistema socioecológico en mención.

1.3. CONTEXTO DE «ESTRUCTURAS ECOLÓGICAS» EN COLOMBIA Y SU APLICABILIDAD EN ÁREAS METROPOLITANAS

En el contexto del presente trabajo resulta indispensable realizar una revisión al estado del arte, en términos de su aplicación en Colombia, al concepto de «estructura ecológica». Un concepto que también debe ser entendido como «instrumento de gestión ambiental», dada su pertinencia en la identificación de elementos ecológicos que posibilitan la existencia de las diferentes formas vida en un lugar determinado. Este análisis permitirá contrastar la interpretación y aplicación del Decreto 3600 de 2007¹⁴, expedido por el Gobierno Nacional, frente a la interpretación y aplicación del concepto que propuso Thomas van der Hammen (1924 – 2010), quien definió el concepto de estructura ecológica por primera vez, así:

El conjunto de sistemas naturales y semi-naturales que tienen una localización, extensión, conexiones y estado de salud, tales que garantiza el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medida para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida¹⁵

¹⁴ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto número 3600 de 2007. Bogotá: _____, 2007. 13 p.

¹⁵ HAMMEN. Op. cit., p. 128.

Como medida para articular el ordenamiento del suelo urbano con el rural y definir una estructura ecológica se creó el Decreto 3600 de 2007. En esta norma se entiende como estructura ecológica:

[...] El conjunto de elementos bióticos y abióticos que dan sustento a los procesos ecológicos esenciales del territorio, cuya finalidad principal es la preservación, conservación, restauración, uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables los cuales brindan la capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico de las poblaciones¹⁶

Para van der Hammen, el objetivo de establecer una «estructura ecológica» es garantizar la satisfacción de las necesidades básicas para la vida y la perpetuación de la misma, reconociendo al ser humano en un sentido amplio como parte de la vida. Por el contrario, en la propuesta de «estructura ecológica» del Decreto 3600, sobresale la visión de aprovechar toda la capacidad de soporte que brindan los recursos naturales para un desarrollo socioeconómico. En este sentido, prevalece el pensamiento voraz y destructivo por lograr una riqueza económica, incorporando la visión de elementos naturales como recursos dando paso a distintas formas de aprovechamiento.

A lo largo del desarrollo de esta investigación, se plantea que es necesario partir del respeto por las distintas formas de vida, para lograr redefinir y proponer, otra forma de interpretar una «estructura ecológica» diferente a la propuesta por el Decreto 3600.

Como parte de la revisión de aplicación del concepto de estructura ecológica en áreas metropolitanas (AM), es necesario precisar que, como punto de referencia, fueron tomadas las AM reconocidas oficialmente. Estas son: AM de Barranquilla, AM de Bucaramanga, AM de Cúcuta, AM del Valle de Aburrá, AM de Centro-occidente y AM del Valle del Cacique de Upar. En cada AM se consultó los planes integrados de desarrollo metropolitano, los planes de ordenamiento territorial del municipio núcleo, buscando una relación en los directrices ambientales de escala municipal con las directrices ambientales a escala metropolitana en materia de estructura ecológica.

En el Cuadro 1 se analizaron las seis AM, al comparar los instrumentos de gestión en la columna elementos de la «estructura ecológica» del municipio núcleo, con los elementos de la «estructura ecológica» a escala metropolitana. Como resultado, se evidencia la falta de integración multiescalar en términos espaciales, e inclusive, los elementos ecológicos no coinciden. En otras palabras, se propone desde lo municipal, una serie de elementos ecológicos que hacen parte de una «estructura ecológica» de la escala departamental o metropolitana. Además, no existen lineamientos claros desde lo nacional hasta lo municipal con una perspectiva sistémica que debe tener una gestión ambiental multiescalar.

¹⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Op. cit., p. 1.

Por otra parte, teniendo en cuenta las fechas de creación de las distintas áreas metropolitanas, se resalta que, en materia de gestión ambiental, solo se centran en temas como la gestión integrada de residuos sólidos, educación ambiental y calidad del agua, dejando a un lado los temas relacionados con la conservación restauración de elementos ecológicos vitales para proveer servicios ecosistémicos.

En definitiva, se aprecia la falta de lineamientos desde la escala metropolitana que promuevan la articulación entre los ecosistemas a distintas escalas incluyendo los ecosistemas urbanos, estos lineamientos deben propender por valorar los procesos ecológicos esenciales para la vida, en respuesta a ello, el presente trabajo buscar brindar aportes técnicos y analíticos para llenar el vacío normativo, específicamente en el área de influencia metropolitana de Cali, a pesar, que no cuenta con una figura supramunicipal establecida oficialmente, pero los hechos metropolitanos de carácter socioecológico hacen necesaria la identificación de una «estructura ecológica» que aporte a una gestión ambiental aplicada a nivel metropolitano.

Cuadro 1. Áreas metropolitanas legamente constituidas en Colombia y su enfoque ambiental.

Figura supramunicipal	Creación del área metropolitana	Estructura Ecológica del municipio núcleo	Elementos de la estructura ecológica del Municipio núcleo	Estructura Ecológica Metropolitana	Estructura Ecológica Departamental	Observaciones
Área metropolitana de Barranquilla	Ordenanza 28 de 1981	La estructura ecológica principal del Distrito de Barranquilla comprende los aspectos naturales de la estructura ambiental del territorio y de la ciudad en interacción dinámica con el sistema eco-espacial nacional y su funcionamiento; combinada con elementos articuladores del espacio público de origen artificial o construido, los conjuntos urbanos, históricos y culturales	1. El sistema de áreas de protección y reserva natural. 2. El conjunto de parques de la ciudad. 3. El conjunto de parques de la ciudad. 4. Los corredores ecológicos urbanos	En esta área metropolitana, en materia de gestión ambiental, no existe una figura de escala direccionada a establecer una estructura ecológica	El Plan de Ordenamiento Territorial Departamental se encuentra en ejecución, pero no se ha publicado la información de los diagnósticos ambientales	
Área metropolitana de Bucaramanga	Ordenanzas 20 de 1981 y 46 de 1984	En este municipio toma como definición la estructura ecológica propuesta en el decreto 3600 de 2007	El Plan de Ordenamiento Territorial no cuenta con una definición de estructura ecológica, argumentan que hubo ambigüedades entre los mapas de áreas de protección y zonas de protección, ya que hubo delimitaciones distintas entre los dos mapas	En esta área metropolitana, en materia de gestión ambiental, no existe una figura de gestión a esta escala direccionada a establecer una estructura ecológica	El Plan de Ordenamiento Territorial Departamental se encuentra en ejecución, pero no se ha publicado la información de los diagnósticos ambientales	
Área metropolitana de Cúcuta	Ordenanza 49 de 1990 y Decreto 0508 de 1991	En este municipio no se cuenta con un área legalmente constituida como estructura ecológica, pero se identifica figuras de protección y gestión	1. Áreas de importancia ecológica, ambiental y paisajística. 2. Áreas de infiltración para recarga de acuíferos. 3. Áreas de bosque protector. 4. Áreas para la protección de la fauna. 5. Áreas de amortiguación de áreas protegidas. 6. Áreas del sistema de parque municipal	En esta área metropolitana, en materia de gestión ambiental, no existe una figura de gestión a esta escala direccionada a establecer una estructura ecológica	En el Plan Estratégico Ambiental Regional Departamental, se evidencia como eje temático las áreas de ecosistemas estratégicos, biodiversidad y servicios ecosistémicos, utilizando las áreas ya establecidas con figuras de protección	En Cúcuta, municipio núcleo, no se establece una figura de gestión bajo el nombre de estructura ecológica, pero se identifican instrumentos mencionados en la columna de elementos de la estructura ecológica
Área metropolitana del Valle de Aburrá	Ordenanza 34 de 1981	Es un sistema interconectado de las áreas con alto valor ambiental que sustenta los procesos ecológicos esenciales del territorio y a la oferta de servicios ecosistémicos, que se integran estructural y funcionalmente con la estructura ecológica regional, con la finalidad de brindar capacidad de soporte para el desarrollo socioeconómico y cultural de la población	Áreas protegidas públicas: 1. Reserva Forestal Protectora Nare. 2. Distrito de Manejo Integrado Divisoria Valle Aburrá – Río Cauca. 3. Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador. 4. Área de Recreación Parque Ecológico Cerro Nutibara. 5. Área de Recreación Urbana Cerro La Asomadera. Áreas Protegidas Privadas: 6. Reserva Natural de la Sociedad Civil Montevivo	Esta área metropolitana toma el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las Áreas de Reserva Forestal, Áreas de Manejo Especial y de Importancia Ecosistémica. Pero no establece lineamientos de gestión a esta escala.	El Plan de Ordenamiento Territorial Departamental, señala distintos puntos de trabajo en materia ambiental, pero no establece áreas para identificar una estructura ecológica. Además, toma como base las áreas ya establecidas por otros instrumentos de gestión	El Plan de Ordenamiento Territorial Departamental se encuentra en desarrollo. Por lo tanto, no se encuentra información actualizada a la fecha
Área metropolitana de Centro-occidente	Ordenanzas 1 de 1981 y 14 de 1991	En este municipio, se establecen áreas para la protección del agua y la biodiversidad. No se presenta una definición de estructura ecológica	Toma todas las áreas establecidas en el Sistema Municipal de Áreas Protegidas, sin tener como fundamento una estructura ecológica. Sin embargo, en el 2014, se presentaron las siguientes áreas para realizar proyectos socioecológicos: zona universidad, comuna del café, zona del batallón y área de influencia, zona olímpica y zona belmonte	En el Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano, en materia ambiental hace referencia al manejo de residuos sólidos, abastecimiento y vertimiento de agua	Se revisó los distintos planes de orden departamental, pero no se establece una figura de gestión relacionada con estructura ecológica	El Plan de Ordenamiento Territorial Departamental se encuentra en desarrollo. Por lo tanto, no se encuentra información actualizada a la fecha
Área metropolitana del Valle del Cacique de Upar	Escritura pública 2709 del 17 de diciembre 2002	Valledupar, municipio núcleo, no cuenta con una página oficial que facilite la consulta de los documentos soportes en materia de gestión ambiental	Valledupar, municipio núcleo, no cuenta con una página oficial que facilite la consulta de los documentos soportes en materia de gestión ambiental	El Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano, se encuentra en desarrollo. Esta área de integración supramunicipal, no cuenta con una plataforma web oficial para consultar los documentos soportes en materia de gestión ambiental.	No cuenta con un Plan de Ordenamiento Departamental	

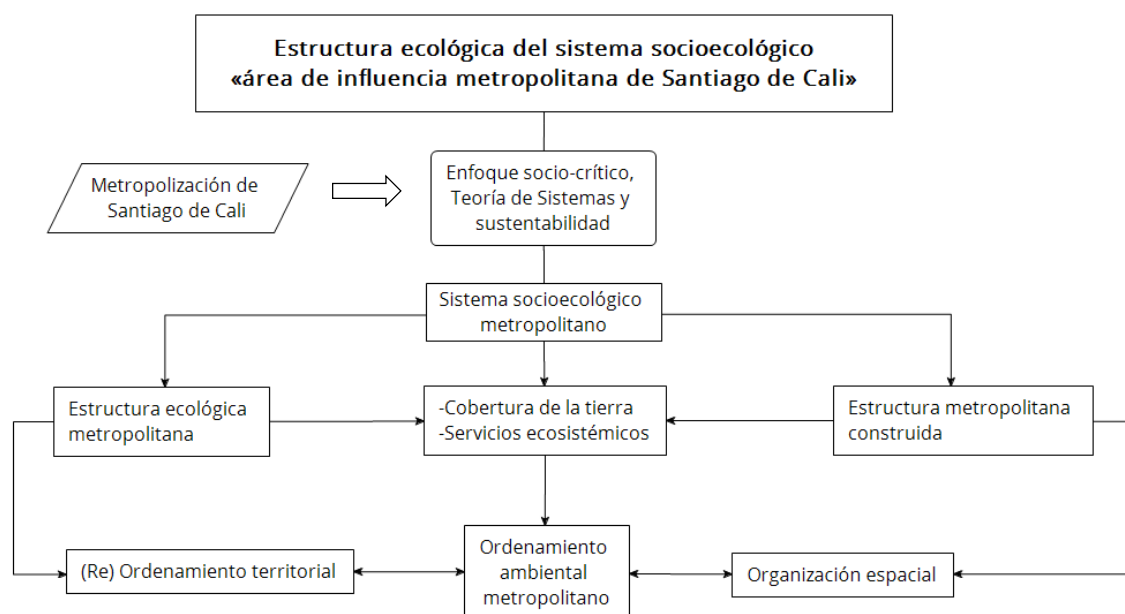
Fuente: BARRANQUILLA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2008. 75 p. & BUCARAMANGA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2013 - 2027. 170 p. & SAN JOSÉ DE CÚCUTA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2014. 185 p. & MEDELLÍN. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2014. 71 p. & PEREIRA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2000. 55 p. & BARRANQUILLA. JUNTA METROPOLITANA. Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano. _____. 2013. 280 p. & PEREIRA. JUNTA METROPOLITANA. Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano. _____. 2012. 170 p. & ANTIOQUIA. SECRETARIA DE PLANEACIÓN DEPARTAMENTAL. Plan de Ordenamiento Territorial Departamental. _____. 2013. 160 p.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo muestra los elementos teóricos y conceptuales para entender el problema de investigación. La explicación del diagrama de flujos presentado en la Figura 2 es la siguiente: el enfoque epistemológico socio-crítico es la base que permitió realizar reflexiones sobre la relación «sociedad y naturaleza» para interpretar la metropolización de Santiago de Cali como un sistema complejo, compuesto por las estructuras naturales y antrópicas que se articulan funcionalmente por los «servicios ecosistémicos». Desde este enfoque, el sistema socioecológico debe administrarse de forma armónica y sustentable para superar los límites artificiales creados para la administración del territorio nacional del estado moderno, lo que quiere decir, ordenar en términos ambientales el hecho metropolitano de Santiago de Cali.

Jürgen Habermas cuestionando los intereses cognoscitivos de la ciencia hegemónica, publicó el libro *Knowledge and Human Interests*. En esta publicación el autor relacionó, sistemáticamente, el interés técnico, práctico y emancipatorio del conocimiento con las ciencias empírico-analíticas, histórico-hermenéuticas y socio-críticas (tanto empíricas como interpretativas)¹⁷. Reconociendo la propuesta del sociólogo y filósofo alemán, esta investigación se adhiere al enfoque socio-crítico del conocimiento, tomando como herramienta e hilo conductor la Teoría General de Sistemas (TGS). La argumentación de este enfoque es el punto de partida de este documento.

Figura 2. Esquema teórico y conceptual desarrollado en la investigación.



Fuente: elaboración propia.

¹⁷ HABERMAS, Jürgen. *Knowledge and human interests*. 2 ed. Londres: Heinemann Educational Books, 1972. 392 p.

2.1. REFLEXIONES SOBRE LA IDEA DE LA RELACIÓN «SOCIEDAD Y NATURALEZA»: INTERPRETACIÓN SISTÉMICA Y ESTRUCTURALISTA DE LA REALIDAD

La relación entre sociedad y naturaleza tiene raíces profundas en el pensamiento geográfico, siendo tema de interés para los intelectuales más influyentes en la disciplina. Esta relación es una dicotomía que generó tensiones académicas que perduran en la actualidad. En gran parte del pensamiento geográfico, se reprodujo un divorcio clásico entre la sociedad y la naturaleza. Los enfoques deterministas, posibilistas, evolucionistas, reprodujeron una separación instrumental e incomprensible entre la sociedad y la naturaleza. Situación que favoreció la desnaturalización por la ocupación humana del planeta y produjo intensos cambios con efectos críticos para los ecosistemas.

No obstante, como respuesta en el transcurso del siglo XX, se desarrollaron cuerpos teóricos críticos que resaltaron la existencia de la vida, incluyendo la humana y sus particularidades, como una sola unidad integrada con todas las demás especies de la Tierra. La teoría de sistemas y el estructuralismo, son los cuerpos teóricos que permitieron plantear esta investigación desde una perspectiva socio-crítica en donde se difumina la idea de naturaleza fragmentada y separada de la sociedad.

Fue probablemente Aristóteles el primer filósofo que manifestó un pensamiento sistémico. A través de su visión holística del mundo, expresó que «el todo es más que la suma de las partes». No obstante, en su evolución, la ciencia occidental parece haber ignorado este planteamiento; el mecanicismo y el reduccionismo han sido las corrientes de pensamiento y acción dominantes, y han enfatizado en la dualidad de la naturaleza como el único medio efectivo para entenderla. Lo que no se ha tenido en cuenta es que, en esa dicotomía, la organización de los elementos y su expresión como conjunto ha sido deficiente. En 1920, analizando los organismos vivos y su ordenamiento, Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) declaró que «el estudio de elementos aislados no permite conocer la coordinación de las partes y procesos»¹⁸. Bajo estas ideas germinó lo que este autor llamaría en 1930 la TGS¹⁹.

La frase de Aristóteles conforma una definición básica y válida de la visión sistémica planteada por Bertalanffy, quien definió un sistema como «un complejo de elementos interrelacionados»²⁰. Los sistemas y los conceptos de la TGS fueron considerados por la geografía a partir de la década de 1960. En el núcleo central de este enfoque geográfico-sistémico yace la utilidad de «los sistemas como estructura analítica que permite combinar los fenómenos humanos y los ambientales»²¹. Esto quiere decir que un enfoque sistémico en geografía permite

¹⁸ BERTALANFFY, Ludwig. The history and status of General Systems Theory. *En*: The Academy of Management Journal. 1972. Vol. 15, No. 4; p. 410.

¹⁹ *Ibíd.*

²⁰ BERTALANFFY, Ludwig. An outline of General System Theory. *En*: The British Journal for the Philosophy of Science. 1950. Vol. 1, No. 2; p. 143.

²¹ UNWIN, Tim. El lugar de la geografía. 2 ed. Madrid: Cátedra, 1995. p. 180.

interpretar las conexiones entre los distintos elementos de la superficie terrestre, tanto los creados por el ser humano como los existentes en la naturaleza misma del planeta Tierra. Entre los desarrollos académicos de los sistemas en geografía, se destacan los aportes de Georges Bertrand y de la «Escuela de Chicago».

Inspirado en la geografía sistémica soviética, el geógrafo francés Georges Bertrand retomó y modificó el concepto «geosistema». El concepto de geosistema se instrumentalizó en la Unión Soviética. En la estación de Martkopi (Cáucaso) se midieron parámetros espaciales y temporales para reconocer la probabilidad de sucesos, flujos de energía, y el estado del geosistema²². Es un ejercicio poco reproducible debido al requerimiento de altos recursos financieros, tecnológicos y humanos, sin embargo, sirve como antecedente empírico para estudiar la expansión humana de la superficie terrestre vista como un todo, es decir, como un complejo de elementos interrelacionados.

En el transcurso del siglo XX, en la ciudad de Chicago germinó una línea de pensamiento novedosa y osada para la época: la ecología humana. Esta idea fue sustentada por la denominada «Escuela de Chicago» y alcanzó su clímax académico con las publicaciones de Robert Park (1864-1944), Lewis Mumford (1895-1990) y Harlan Barrows (1877-1960). Estos autores propusieron que las relaciones entre los seres humanos y la naturaleza eran recíprocas y semejantes a las de otras especies animales y vegetales²³. Así, por ejemplo, con este enfoque, las ciudades se planteaban como “sistemas complejos creados que están dentro, y a su vez forman, sistemas ambientales más complejos”²⁴.

El estructuralismo es un enfoque crítico que permite desarrollar fuertes señalamientos a la teoría fragmentaria del ser humano y su entorno. A partir de 1950, el estructuralismo emergió como corriente de pensamiento en Francia, pero no tuvo efecto significativo en la geografía anglo y latina americana hasta mediados de 1970 con las publicaciones de David Harvey (1935-), Milton Santos (1926-2001), José Coraggio (1938-), Manuel Castells (1942-) y Louis Althusser (1918-1990)²⁵.

Formalmente, el estructuralismo «intenta construir una ciencia de la existencia humana estableciendo métodos que permitan entender el orden de los componentes de la realidad»²⁶. Desde este enfoque, el mundo empírico está determinado por estructuras, asegurando que los eventos histórico-geográficos son producto de relaciones multicausales de forma directa e indirecta entre ellas. Con una perspectiva geográfico-estructuralista, la explicación de los fenómenos que se expresan en la superficie terrestre se consigue a través de la descripción

²² BERUCHASHVILI, Nicolás y BERTRAND, Georges. El geosistema o “sistema territorial natural”. En: BERTRAND, Claude y BERTRAND, Georges. Geografía del medio ambiente. Granada: Universidad de Granada, 2006. p. 97-108.

²³ HAGGETT. Op. cit.

²⁴ TONKISS, Fran. Cities by design: the social life of urban form. Cambridge: Polity Press, 2013. p. 116.

²⁵ PEET, Richard. Modern geographical thought. Oxford: Blackwell, 1998. 342 p. & UNWIN. Op. cit.

²⁶ PEET. Op. cit., p. 144.

de dichas estructuras, y así se pueden proponer estrategias para su transformación²⁷.

En términos teóricos y metodológicos, el estructuralismo permite descubrir la esencia, lógica y dinámica de los componentes de la realidad y las relaciones que los articulan en estructuras espaciales identificables. La forma estructuralista de aproximarse al conocimiento es a través de la dialéctica, lo que significa «pasar de los conceptos o pensamientos a sus opuestos y, a través de la reiteración de este método, alcanzar una unidad más elevada de análisis»²⁸. Partiendo del método dialéctico, es posible identificar elementos que, relacionados entre sí, articulan estructuras visibles y subyacentes, no para simplificar la realidad compleja, sino para transformarla, incorporando sus paradojas y contradicciones. Esta vinculación de los elementos y sus particularidades no es en abstracto, se desarrollan en un área, con efectos tangibles materiales, entradas y salidas, además de relaciones que permite identificar unidades mayores de análisis. Es decir, un sistema.

En conjunto, a partir de estas ideas, en esta investigación se entiende que la urbanización y la metropolización son procesos que no plantean una relación sociedad y naturaleza antagónica, sino que, por el contrario, son procesos por los que se articulan relaciones mucho más complejas y profundas. Por lo tanto, en los planos filosóficos y metodológicos, se interpreta la realidad del área de influencia metropolitana a partir de dos estructuras que son opuestas esencialmente, pero que se relacionan de forma recíproca para evolucionar de forma conjunta en un mismo sistema socioecológico.

2.2. EL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO DEL ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE CALI: ENFOQUE Y COMPONENTES

Si se observa de manera crítica la relación de la sociedad y la naturaleza, resulta evidente que los ecosistemas y las sociedades humanas están vinculadas de manera íntima e interdependiente²⁹. No importa desde qué ángulo se mire la relación, la interrelación siempre sale a la luz. Por este motivo, se plantean análisis sistémicos argumentando que el entorno y los seres humanos son interdependientes y se conectan de manera dinámica y compleja. Así las cosas, en esta sección se plantea el concepto de sistema socioecológico, las estructuras que lo conforman y conceptos que articulan su funcionamiento para el área de influencia metropolitana de Cali.

El estudio de los sistemas socioecológicos es un campo interdisciplinar que ha llamado la atención de la comunidad científica. Esto se debe a la promesa de que, incorporando nuevos cuerpos de conocimiento, se podrán resolver muchas

²⁷ UNWIN. Op. cit.

²⁸ *Ibíd.*, 230.

²⁹ REBORATTI, Carlos. Ambiente y sociedad: conceptos y relaciones. Buenos Aires: Ariel, 2000. 253 p. & SOJA, Edward. Postmetropolis: critical studies of cities and regions. Los Ángeles: Blackwell, 2000. 600 p. & HARPER, Charles. Environment and society: human perspectives on environmental issues. 3 ed. New Jersey: Pearson & Prentice Hall, 2004. 482 p.

de las problemáticas ambientales contemporáneas. La teoría de los sistemas socioecológicos cuenta con elementos clave para su interpretación y posible instrumentalización³⁰. El enfoque de los sistemas socioecológicos se benefició de los desarrollos conceptuales de la TGS durante el siglo XX, por lo que incorporó conceptos como la resiliencia, sustentabilidad y vulnerabilidad, entre otras³¹.

En la misma línea, Salas-Zapata, Ríos-Osorio, y Álvarez-Del Castillo³², refiriéndose a los efectos que tienen las acciones humanas y naturales sobre los sistemas socioecológicos, consideran que las interacciones entre los sistemas sociales y ecológicos se dan por doble vía. Por un lado, las intervenciones y actividades de carácter cultural, político, social y económico producen cambios y transformaciones en el ambiente (e.g. la minería, la pesca y las actividades agrícolas). Por otro lado, las dinámicas de los ecosistemas influyen la cultura, las relaciones de poder y las actividades económicas de los seres humanos (e.g. las inundaciones y los cambios climáticos). Mediante esta explicación, queda claro entonces que los sistemas socioecológicos son reconocidos como entes orgánicos cuyas partes tienen incidencia sobre las demás y sobre el todo.

Bajo este orden de ideas, con la idea de sistema socioecológico se responde críticamente a la idea de la relación sociedad naturaleza. Considerando lo expuesto por Cumming³³, los elementos clave de un sistema socioecológico son tres:

- **Complejidad**, porque refiere a un conjunto de elementos que interactúan constantemente en un entorno compartido.
- **Identidad**, dado que los componentes clave y las relaciones de un sistema se mantienen continuamente en el espacio y en el tiempo.
- **Cohesión**, teniendo en cuenta la existencia de fuerzas que mantienen unidos (centrípetas) o empujan (centrífugas) los elementos del sistema³⁴.

Así las cosas, plantear un sistema socioecológico que abarca tanto elementos naturales como artificiales y conserva la cohesión de sus elementos, implica entender que los atributos que dan identidad a cada uno, deben mantenerse, y que las dinámicas que se dan en ese espacio determinado están caracterizadas por la complejidad. En términos estructuralistas, el llamado no sería distinto a «fusionar» los conceptos de sociedad y naturaleza en uno, teniendo el debido cuidado de no perder las características esenciales de cada concepto. Esto es trascendental para la presente investigación, pues permite interpretar el área de

³⁰ CUMMING, Graeme. Conceptual Background on Social-Ecological Systems and Resilience. En: _____, Spatial resilience in social-ecological systems. Londres: Springer, 2011. p. 7-28.

³¹ Ibíd.

³² SALAS-ZAPATA, Walter; RÍOS-OSORIO, Leonardo y ÁLVAREZ-DEL CASTILLO, Javier. Marco conceptual para entender la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos. En: Ecología Austral [en línea]. 2012. Vol. 22, No. 1; p. 74-79.

³³ CUMMING. Op. cit.

³⁴ Las fuerzas centrífugas incluyen las interacciones tróficas, el capital social y el comercio. Las fuerzas centrípetas incluyen cosas como la destrucción del hábitat, la fragmentación y el conflicto.

estudio como un sistema socioecológico que supera la visión morfológico-funcional-urbana, e incluye, al tiempo, elementos ecológicos para así empezar a sentar las bases de un tipo de gestión ambiental holística de la superficie terrestre.

En términos instrumentales, en este ejercicio de investigación se propone un sistema socioecológico compuesto por la estructura ecológica metropolitana (EEM) y la estructura metropolitana construida (EMC), los cuales, a su vez, se relacionan a través de los servicios ecosistémicos (SE) (Figura 3). En este contexto, son los SE —entendidos como el aporte de los ecosistemas al bienestar de los seres humanos—, los más calificados para vincular los subsistemas ecológico y social, divididos históricamente en la ciencia tradicional³⁵.

En primer lugar, la biodiversidad y los procesos de los ecosistemas tienen un rol preponderante al interior de la EEM, pues es la biodiversidad —como característica central de los ecosistemas— un aspecto fundamental para los procesos ecosistémicos que soportan la generación de los SE³⁶. En un segundo momento, el beneficio (in)directo humano de la oferta potencial de SE está condicionado por los modelos de ordenamiento del territorio, entendiéndolos como la disposición de actividades y usos. Estas actividades y usos constituyen parte de la «vida funcional» de la EMC, la cual, al igual que la población, demandan SE para su funcionamiento y bienestar. La demanda representa la presión social dentro del sistema sobre las coberturas de la tierra observables en la superficie —elementos naturales que cumplen funciones y procesos ecológicos más tarde concebidos por los seres humanos como servicios, o también, elementos seminaturales que reflejan la inscripción de la cultura en la superficie terrestre—.

Figura 3. Sistema socioecológico del área de influencia metropolitana de Cali.



Adaptado de: BURKHARD, Benjamin, *et al.* Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. *En: Ecological Indicators* [en línea]. 2012. Vol. 21, p. 17-29.

³⁵ JACOBS, Sander, *et al.* «The Matrix Reloaded»: A review of expert knowledge use for mapping ecosystem services. *En: Ecological Modelling*. 2015. Vol. 295, p. 21-30.

³⁶ HAINES-YOUNG, Roy y POTSCHIN, Marion. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): consultation on Version 4. Nottingham: University of Nottingham, 2013. 34 p.

Un sistema socioecológico se compone de estructuras con patrones y elementos observables espacialmente. Este sistema tiene estructura porque está conformado de rasgos materiales: son naturales, hechos por el hombre o combinan la naturaleza y la actividad humana. Un prerequisite para conocer dicha estructura «es identificar los tipos de cobertura de la tierra»³⁷. Estas coberturas naturales y/o antrópicas identificables y observables son la unidad de análisis espacial del sistema socioecológico metropolitano.

Entonces, ¿qué se entiende por cobertura de la tierra? La definición de este término generó repetidas confusiones entre la comunidad académica. Desde hace más de cinco décadas, Terence Burley³⁸ identificó esta situación y sostuvo que el punto central de la confusión era el intercambio descuidado entre los términos cobertura y uso de la tierra. En ese contexto, este autor sugirió que la cobertura de la tierra es «el escenario en el que se lleva a cabo la acción, [es decir], la vegetación y construcciones artificiales que cubren la superficie terrestre»³⁹⁻⁴⁰. Esta definición sigue vigente pues, en términos formales, la cobertura de la tierra hace referencia a la cubierta física y biológica observable de la superficie de la Tierra⁴¹. Esta definición agrupa elementos naturales y artificiales de la superficie, situando a las coberturas de la tierra como unidad espacial de análisis del sistema socioecológico que aquí se defiende.

Las coberturas de la tierra representan la espacialidad física de las estructuras que componen el sistema socioecológico presentado en la Figura 3. La literatura ofrece dos aproximaciones al análisis sistémico de las coberturas de la tierra⁴²: i) como criptosistema, valorando las condiciones y flujos ecológicos, geomorfológicos o biogeoquímicos; y ii) como fenosistema, considerando las estructuras de la superficie con sus patrones y distribución física. En este ejercicio, utilizando los datos de la cobertura de la tierra únicamente es posible realizar un procedimiento fenotípico de valoración de los elementos del sistema. Con el análisis de las características externas de las coberturas «es posible inferir sus particularidades y dinámicas ambientales subyacentes»⁴³.

El papel de los datos de cobertura de la tierra en la evaluación fenotípica de la superficie es doble. Por una parte, los inventarios de coberturas de la tierra

³⁷ RODRÍGUEZ, Militza y ROSALES, Judith. Cobertura de la tierra, usos asociados y análisis de paisaje en el corredor ribereño bajo Orinoco. En: Copérnico. 2008. Vol. 5, No. 9; p. 19.

³⁸ BURLEY, Terence. Land use or land utilization?. En: The Professional Geographer. 1961. Vol. 13. No. 6; p. 18-20.

³⁹ *Ibíd.*, p. 19.

⁴⁰ El uso de la tierra no es objeto de análisis principal de esta investigación, pero, la confusión entre los términos cobertura y uso yace en una mala interpretación de su relación. El análisis de los diferentes tipos de cobertura de la tierra permite conocer los usos y actividades asociados. Por ejemplo, en la cobertura de bosque se pueden inferir los usos potenciales de agroforestería, cacería, recreación, etcétera.

⁴¹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Report on land use, land-use change and forestry. Oslo: GRID-Arendal, 2000. 375 p.

⁴² GULINCK, Hubert, *et al.* A framework for comparative landscape analysis and evaluation based on land cover data, with an application in the Madrid region (Spain). En: Landscape and Urban Planning. 2001. Vol. 55, No. 4; p. 257-270.

⁴³ *Ibíd.*, p. 258.

constituyen contextos de referencia diferenciables en sistemas específicos, por ejemplo, tomando en cuentas sus características, pueden ser naturales, artificiales o seminaturales. En segundo lugar, las coberturas de la tierra proporcionan información relativa a la configuración espacial de la superficie con el uso de métricas como la orientación, localización, distancia, porcentaje de ocupación, vecindad y asociación, etcétera.

2.2.1. La sustentabilidad: pilar fundamental del sistema socioecológico

Para que un sistema socioecológico funcione armónicamente se propone discutir la idea de **sustentabilidad**. En la Figura 3 (página 27) se plantea la idea sustentabilidad ambiental, resaltando el papel que tiene el ordenamiento territorial (OT) como la reproducción espacial de los deseos e intereses de diversos agentes sociales. Este concepto de sustentabilidad es clave, dado que puede abordarse desde diferentes puntos de vista. Desde la ecología, la sustentabilidad es «la capacidad de un sistema de mantener constante su estado en el tiempo»⁴⁴. Esta es una característica que se alcanza de manera espontánea en la naturaleza, pero es insuficiente al analizar un sistema socioecológico porque la intervención del ser humano crea situaciones artificiales. Según Nicolo Gligo⁴⁵, la sustentabilidad ambiental es la que conviene analizar porque aborda la dimensión económica y social, incluyendo las estrategias de ordenamiento, desarrollo y ocupación de la superficie terrestre. Finalmente, interpretar el sistema metropolitano como un todo interrelacionado requiere considerar un enfoque de sustentabilidad ambiental y no solo ecológica. Allí es donde entran y son claves los SE.

En marco de la sustentabilidad ambiental, los SE, como articuladores de la EMC y EEM se discuten a partir de los paradigmas ecologista⁴⁶ y economicista⁴⁷. Contrastar ambos paradigmas permite, por una parte, evitar completa atención en las funciones ecológicas de los ecosistemas que ocultan la influencia antrópica bajo un modelo de naturaleza prístina, y también, superar la valorización mercantil total de lo natural que prioriza SE aprovechables en el mercado limitando perspectivas alternativas a su apreciación. Este es un punto de vista compartido con Scholte, Teeffelen y Verburg⁴⁸.

⁴⁴ GLIGO, Nicolo. Entorno de la sustentabilidad ambiental del desarrollo agrícola latinoamericano: factores y políticas. En: GALLOPÍN, Gilberto. (comp.). El futuro ecológico de un continente: una visión prospectiva de la América Latina, Volumen II. México D.F.: Universidad de las Naciones Unidas, 2001. p. 306.

⁴⁵ *Ibíd.*

⁴⁶ GROOT, Rudolf de; WILSON, Matthew y BOUMANS, Roelof. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. En: Ecological Economics. 2002. Vol. 41, No. 3; p. 393-408. & HAINES-YOUNG y POTSCHIN, Op. cit.

⁴⁷ COSTANZA, Robert, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. En: Nature. 1997. Vol. 387, No. May; p. 253-260. & GÓMEZ-BAGGETHUN, Erik, *et al.* The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. En: Ecological Economics [en línea]. 2010. Vol. 69, No. 6; p. 1209-1218.

⁴⁸ SCHOLTE, Samantha; TEEFFELEN, Astrid van y VERBURG, Peter. Integrating socio-cultural perspectives into ecosystem service valuation: A review of concepts and methods. En: Ecological Economics [en línea]. 2015. Vol. 114, p. 67-78.

Efectivamente, se debe conocer la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, pero en el marco de un sistema socioecológico, resulta crucial entender su reacción frente a determinadas estrategias y usos antrópicos. De no manejarse un punto de vista sistémico, se corre el peligro de reproducir un velo ambientalista insuficiente para realizar un análisis a escala metropolitana, o también, sustituir inadecuadamente la vegetación natural y la fauna nativa por usos como actividades agroindustriales, forestales o pecuarias. Estos usos resultan homogéneos y más eficientes para la implementación de la economía de mercado, pero afectan gravemente la sustentabilidad del sistema metropolitano —e.g. con la disminución de SE, y la modificación de la estructura y la biodiversidad de los ecosistemas—. Posiblemente, la metrópoli ideal sea aquella que se integre profundamente hasta armonizar su presencia con el entorno llegando a estados mimetizados con tamaño, forma, usos, creaciones, relaciones que hagan que la ciudad sea un componente consciente de la naturaleza del planeta Tierra.

En línea con lo anterior, ¿qué se entiende por oferta y demanda de SE? Mientras la oferta de SE hace referencia a «la capacidad de un área particular de proveer un conjunto de bienes y servicios de los ecosistemas»⁴⁹, la demanda de SE es la «sumatoria de todos los bienes y servicios ecosistémicos requeridos por un área particular»⁵⁰. Debe destacarse que la oferta y demanda de SE están conectadas inseparablemente porque «el estado de un SE está influenciado no solo por su suministro, sino también por las necesidades humanas y el nivel deseado de aprovisionamiento de este servicio por la sociedad»⁵¹. Así, por ejemplo, fuera de los límites inmediatos de una ciudad, las demandas de su población urbana conducen a una serie de impactos que se expresan en la periferia⁵². La insaciable necesidad de una economía capitalista urbana de agua, alimentos, materiales de construcción y minerales conlleva una explotación de amplio alcance de los ecosistemas. Por este motivo, la demanda y la oferta de SE son una pieza clave al momento de proponer la EEM.

Bajo este contexto, el ordenamiento territorial (OT), como política pública y ejercicio concertado entre la comunidad, agentes sociales, la academia y los gremios económicos, está en capacidad de establecer lineamientos que propendan por la sustentabilidad ambiental. Definitivamente, el OT tiene un rol superlativo en este ejercicio puesto que con la ayuda de los mapas resultantes se puede identificar la distancia espacial entre las áreas productoras y las que se benefician de SE y, así, considerando la figura de EEM, valorar el beneficio que tiene la sociedad humana de los ecosistemas.

⁴⁹ BURKHARD, *et al.* Op. cit., p. 18.

⁵⁰ *Ibíd.*, p. 18.

⁵¹ *Ibíd.*, p. 18.

⁵² HAGGETT, Op. cit.

2.2.2. Estructura ecológica metropolitana (EEM)

Históricamente, la planificación ambiental es un intento de cierre de brechas entre la planificación de ciudades y la conservación de la naturaleza. Es una concepción similar al pensamiento geográfico de la escuela de Chicago en la cual se planteó una relación recíproca entre sociedad y naturaleza. En los períodos posindustriales de Londres y París (siglos XIX y XX), se desarrollaron corredores verdes con la finalidad de regular el crecimiento urbano —e.g. Campos Elíseos de París—⁵³. Sin embargo, no se usaba el término «estructura ecológica» (EE). Durante la época e incluso en la actualidad, se utilizaron concepto como *corredores verdes o redes ecológicas*. Esto quiere decir que la preocupación por ordenar el territorio valorando elementos ambientales existe desde hace más de un siglo, pero, se debe reconocer que la terminología, más no la finalidad, es la que evolucionó con el correr de los años.

A inicios del XXI, Thomas van der Hammen (1924-2010) influenció el desarrollo académico del concepto de EE en Colombia. Para este autor, la EE es:

[...] el conjunto de ecosistemas naturales y semi-naturales que tienen una localización, extensión, conexiones y estado de salud, tales que garantiza el mantenimiento de la integridad de la biodiversidad, la provisión de servicios ambientales (agua, suelos, recursos biológicos y clima), como medida para garantizar la satisfacción de las necesidades básicas de los habitantes y la perpetuación de la vida⁵⁴.

En este sentido, la EE es la propuesta de ordenamiento de la cobertura vegetal, del uso y manejo de la tierra y del agua, que garantiza la conservación (preservación y restauración) de la biodiversidad, los recursos biológicos y los SE. Además, presenta como resultado clave —entre otros mecanismos de gestión— la formulación de lineamientos para la gestión ambiental. Por otra parte, Márquez y Valenzuela⁵⁵ comentan el concepto de EE como un sistema de soporte de actividades humanas que oferta diversos servicios ambientales, compuesto por áreas que deben conservarse al ofertar servicios ecológicos, áreas con riesgo crítico para la vida, y áreas de uso humano directo.

A modo de síntesis, los conceptos expuestos sobre EEM reproducen una visión común antropocéntrica de la naturaleza; se protege, conserva y restaura, con la intención de hacer su uso sustentable y garantizar servicios ecológicos para la humanidad. Esa es una idea clave que permite relacionar el concepto de EEM con elementos y fenómenos antrópicos en el espacio —entendidos aquí como «estructura metropolitana construida»— en el marco de un sistema

⁵³ JONGMAN, Rob. Ecological networks and greenways in Europe: reasoning and concepts. *En*: Journal of Environmental Sciences. 2003. Vol. 15, No. 2; p. 173-181.

⁵⁴ HAMMEN, Thomas van der y ANDRADE, Germán. Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación. Bogotá: IDEAM, 2003. p. 5.

⁵⁵ MÁRQUEZ, Germán y VALENZUELA, Elizabeth. Estructura ecológica y ordenamiento territorial ambiental: aproximación conceptual y metodológica a partir del proceso de ordenación de cuencas. *En*: Gestión y Ambiente. 2008. Vol. 11, No. 2; p. 137-148.

socioecológico superior. Así las cosas, en esta investigación se concibe la EEM como **el conjunto de coberturas de la tierra naturales y seminaturales que a partir de sus SE tienen mayor potencialidad, singularidad, diversidad e importancia estratégica y, por lo tanto, son merecedoras de protección ambiental**. Instrumentalmente, a partir del análisis de un conjunto de características⁵⁶, se identificaron las coberturas que tienen mayor capacidad de ofrecer SE y se consideraron elementos de la EEM.

En esta investigación se plantea que los elementos de la EEM corresponden a las coberturas de la tierra identificables en la superficie del área terrestre. Estas coberturas son la expresión espacial de las dinámicas sociales y naturales del sistema socioecológico metropolitano de Santiago de Cali. Precisamente, las coberturas de la tierra vinculan la EEM con la EMC porque son elementos naturales que cumplen funciones y procesos ecológicos consumidos por los seres humanos como bienes o servicios. Esta proposición concuerda con la línea de pensamiento del geógrafo estructuralista Richard Peet. A pesar de ser una visión antropocentrista, para este autor, «las áreas naturales reflejan la base espacial fundamental de toda organización social [dado que] las comunidades obtienen de la naturaleza los elementos que satisfacen sus necesidades»⁵⁷. Bajo este argumento, en esta investigación se identificarán los elementos de la EEM que proveen SE, soportando física y funcionalmente la vida urbana del área de influencia metropolitana de Cali.

2.2.3. Estructura metropolitana construida (EMC)

Desde una perspectiva sistémica, en esta investigación se observa el área de influencia metropolitana de Cali como una estructura metropolitana (EMC). El punto clave para su planteamiento es que esta EMC existe física y funcionalmente, entre otras cosas, a partir de la EEM, pero al mismo tiempo, la primera transforma a la segunda al ejercer las presiones antrópicas en la naturaleza. Esta conceptualización sostiene la relación estrecha y recíproca entre la sociedad y su entorno defendida en secciones anteriores.

Básicamente, la EMC se concibe como el conjunto de elementos que favorecen la consolidación y funcionamiento de superficies urbanas a escala metropolitana⁵⁸. La existencia de la EMC con sus particularidades es una respuesta a «la necesidad básica de espacio y comunicación de las actividades sociales urbanas»⁵⁹. Estas actividades son de carácter dinámico puesto que responden a flujos y procesos históricos exclusivos.

⁵⁶ Son cuatro las características de las coberturas que son los elementos de la EEM: a) multifuncionalidad, o conteo de SE que presta una misma cobertura. b) singularidad, conteo de coberturas que ofrecen un mismo SE. c) capacidad, la relación entre las áreas productoras y consumidoras de SE. y d) importancia relativa, ranking de coberturas que ofrecen los SE más estratégicos para la vida en general.

⁵⁷ PEET. Op. cit., p. 127.

⁵⁸ YUJNOSKY, Oscar. La estructura interna de la ciudad: el caso latinoamericano. Buenos Aires: SIAP, 1971. 163 p. & GEORGE, Pierre. El medio ambiente. Barcelona: OIKUS-TAU, 1972. 128 p.

⁵⁹ YUJNOSKY. Op. cit., p. 18.

Para esta investigación, los elementos principales que conforman la EM, son:

- **Superficie natural:** las características de la superficie «condicionan la capacidad de la estructura física urbana y su expansión»⁶⁰. Es un elemento de mayor cuantía porque condiciona la localización geográfica, selección del emplazamiento y el orden espacial de la EMC. De este elemento depende la reducción de amenazas y riesgos, y también, la elección de un *hinterland* agropecuario que garantice el abastecimiento de insumos para las actividades urbanas.
- **Equipamientos:** corresponde a la infraestructura física instalada en la «superficie natural». Es el sistema construido que estimula la funcionalidad de la EMC⁶¹. Ejemplificando, las zonas urbanas, áreas industriales y comerciales, además de grandes equipamientos colectivos —aeropuertos, puertos, rellenos sanitarios, hidroeléctricas, etcétera— hacen parte de este elemento.
- **Redes de comunicación y transporte:** al igual que el «sistema físico», este elemento tiene gran impacto en la funcionalidad de la EM. Las redes de comunicación y transporte «están íntimamente relacionadas a la dimensión socioeconómica, particularmente en el acceso al mercado, insumos productivos, y los procesos de intercambio y distribución de la riqueza»⁶². Hacen parte de este elemento los corredores metropolitanos, malla de doble calzada y carreteras, al igual que la red de ferrocarril.

La Figura 4 sintetiza lo expuesto sobre la EMC. A la luz de la caracterización de sus elementos, se puede concluir que la EMC es una totalidad compuesta de partes interrelacionadas. Es un sistema espacial de carácter abierto, multidimensional y dinámico, sobre el que el tiempo es un factor relevante dado que favorece la variabilidad propia de la EMC. Además, a partir de la interacción con los tres componentes de la EMC (superficie natural, sistema físico y redes), «la población satisface sus necesidades cotidianas y urbanas de residencia, alimentación y actividad»⁶³. De otra parte, en el esquema de la EMC se destaca cómo la superficie es el soporte de la funcionalidad y cómo el tiempo articula procesos históricos multidimensionales. Entre el conjunto de dimensiones, se destaca la cultural porque la tecnología determina la eficiencia y el costo de la transformación de la naturaleza.

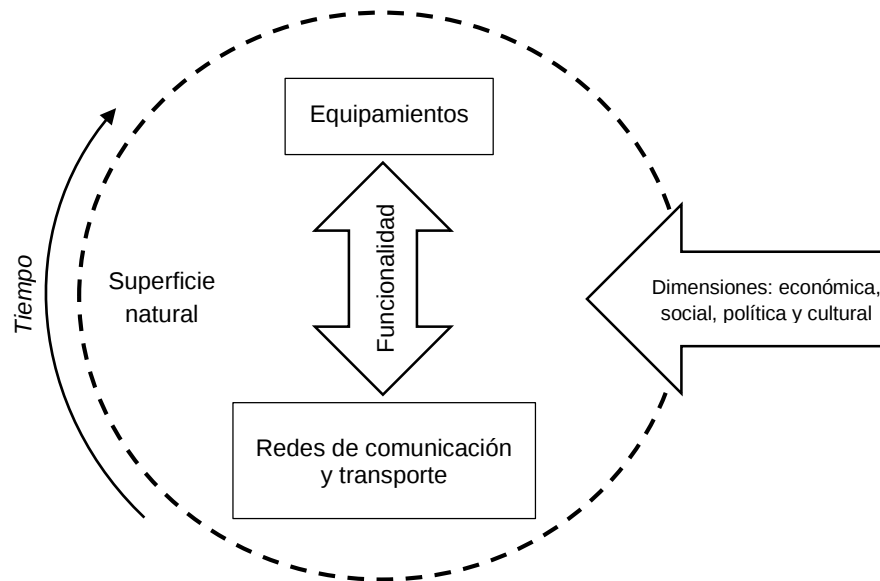
⁶⁰ *Ibíd.*, p. 26.

⁶¹ BONILLA, Ramiro. Magister en Planificación Urbana. Comunicación personal, 11 de febrero de 2015.

⁶² RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude y SLACK, Brian. *The geography of transport systems*. 3 ed. New York: Routledge, 2013. p. 226.

⁶³ GEORGE. *Op. cit.*, p. 74.

Figura 4. La estructura metropolitana construida.



Fuente: elaboración propia.

Hablar de estructuras construidas implica orden espacial, área, elementos y una distribución particular. La organización del entorno de un individuo y de una sociedad existe objetivamente desde los albores de la humanidad. Esta realidad, que parecía inconsciente a través de la historia, se volvió objeto de investigación para la academia, y especialmente para la geografía, en los siglos recientes. A partir de este interés se desarrollaron grandes aportes científicos que describían modelos explicativos de la realidad, por ejemplo; «[el modelo] de producción agrícola (Thunen, 1826), localización industrial y distribución de recursos (Weber, 1909) o de comercio y servicios (Reily, 1931; Christaller, 1933)”⁶⁴.

Conceptualmente, la organización espacial evoca un pensamiento sistémico porque defiende la existencia de una estructura espacial compuesta por elementos diversos que se relacionan en función a la distancia⁶⁵. Además de la morfología y las métricas de la superficie, el ordenamiento espacial involucra las relaciones de poder y de clase social que aseguran una estructura espacial funcional a gran escala, como las áreas metropolitanas⁶⁶. Con estas explicaciones, se da paso al contexto de los intereses de múltiples agentes sociales, estrategias consensadas y objetivos comunes planteados socialmente como factor fundamental para la organización espacial de una sociedad. De lo que se está hablando es de un OT como la búsqueda social de un orden espacial común y articulado.

⁶⁴ KLAPKA, Pavel, *et al.* Spatial organisation: development, structure and aproximation of geographical systems. *En*: Moravian Geographical Reports. 2010. Vol. 18, No. 3; p. 53.

⁶⁵ *Ibíd.*

⁶⁶ JOHNSTON, Ron. Quantitative methods. *En*: GREGORY, Derek; JOHNSTON, Ron; PRATT, Geraldine, WATTS, Michael; WHATMORE, Sarah (eds.). The dictionary of human geography. 5 ed. Oxford: Blackwell, 2009. p. 123-125.

Como política pública en Colombia, el OT armoniza las visiones y modelos espaciales de diversos agentes sociales. Es un ejercicio político-técnico orientado, dirigido, y planificado, para racionalizar y funcionalizar la ocupación del territorio⁶⁷. Para Ángel Massiris el OT es:

Un proceso y un instrumento de planificación, de carácter técnico-político-administrativo, con el que se pretende configurar, en el largo plazo, una organización del uso y ocupación del territorio, acorde con las potencialidades y limitaciones del mismo, las expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos de desarrollo⁶⁸.

Massiris está defendiendo que una posición multidimensional e integral del OT es necesaria para garantizar un modelo territorial sustentable en el tiempo. En este orden de ideas, es posible afirmar que, a partir de su integralidad, prospectiva, unanimidad, conciliación, y enfoque espacial, el OT está en capacidad de solventar problemáticas territoriales. Eso resulta factible porque el OT «no ordena áreas, sino las actividades que se realizan en el territorio en cuanto a su localización y distribución regional»⁶⁹. Esto quiere decir que el OT aspira controlar el crecimiento espontáneo de las actividades humanas para evitar los problemas y desequilibrios, guiándose por un principio fundamental: «toda actuación debería situarse allí donde se maximice la capacidad o aptitud del territorio para acogerla y, a la vez, se minimice el impacto negativo o efecto adverso de la intervención sobre la naturaleza»⁷⁰.

El OT reproduce un enfoque de sustentabilidad porque concilia entre las potencialidades y limitantes naturales con la disposición de actividades antrópicas en el territorio. Para Nicolo Gligo, «la sustentabilidad ambiental de los procesos de desarrollo de una sociedad es una condición en la que (...) se logra la coexistencia armónica del hombre con su ambiente equilibrando los sistemas transformados y creados evitando sus deterioros»⁷¹. Esta idea de sustentabilidad ambiental para el OT demanda la valoración de las características naturales para seleccionar el modelo de ocupación, la tecnología de acceso, y la producción de materiales y energía. Por estos motivos, la sustentabilidad ambiental es la directriz que permea el objetivo del OT, y se articula perfectamente con la propuesta de un sistema socioecológico metropolitano vinculando de manera estrecha las demandas sociales con las características naturales de las EMC y EEM.

⁶⁷ RODRÍGUEZ, José. Geografía y planificación territorial. En: Entorno Geográfico [en línea]. 2014. No. 10; p. 8-31. & THOMAS, Javier. Doctor en Geografía, comunicación personal, 01 de septiembre de 2015.

⁶⁸ MASSIRIS, Ángel. Ordenación del territorio en América Latina. En: Scripta Nova. 2002. Vol. 6, No. 125; p. 750.

⁶⁹ MASSIRIS, Ángel. Determinantes de los planes de ordenamiento territorial. En: Perspectiva Geográfica. 1998. Vol. 1, No. 2; p. 8.

⁷⁰ FUNDACIÓN AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Sustentabilidad de la cadena productiva de la soja argentina y la región. Buenos Aires: Departamento de Desarrollo Sostenible, 2007. p. 277.

⁷¹ GLIGO. Op. cit., p. 308.

2.2.4. Servicios ecosistémicos (SE)

Los servicios ecosistémicos (SE) es el concepto que sirve para interpretar las relaciones entre la EEM y EMC (Figura 3, página 26). En diferentes etapas históricas, la naturaleza y la sociedad se han interrelacionado a través de lo que hoy día se conoce como los SE. Estos SE son evidentes en el proceso de desarrollo social de la especie humana, pero no fueron considerados explícitamente hasta la segunda mitad del siglo XX⁷². En la década de 1980, el término «servicios ecosistémicos» fue introducido por Ehrlich y Ehrlich y, tras importantes contribuciones de Daily y Costanza en 1990, para el año 2000, las Naciones Unidas dio relevancia académica y social a los SE a nivel mundial⁷³. Gómez-Baggethun, *et al.*⁷⁴, establecieron cuatro etapas distintivas de la historia moderna del concepto de SE, así:

- a) A partir de 1970 y de los albores de 1980, las publicaciones resaltaron el beneficio social de las funciones de los ecosistemas como servicios destacando la dependencia humana de la naturaleza.
- b) A finales de 1980, se empleó el concepto de SE para sustentar la expansión del mercado ambientalista y el ciclo de privatización del desarrollo.
- c) En 1990 emerge la corriente principal de los SE en la literatura de las ciencias ambientales.
- d) A inicios del año 2000, los SE son situados en la agenda política de las instituciones internacionales estimulando la producción académica de la temática en el mundo.

Las etapas descritas por estos autores contemplan: el origen y gestación del concepto moderno de SE (a y b); el posicionamiento de los SE en la agenda científica (c); y la presencia de los SE en la toma de decisiones (d). Cada uno de estos factores tuvo un papel trascendental para la propuesta, evolución e interés mundial por los SE. En la actualidad, el concepto de los SE es cada vez más importantes para una serie de disciplinas que abarcan tanto las ciencias naturales como las sociales.

Conceptualmente, los SE describen potencialmente la relación antropocéntrica de dependencia entre las sociedades humanas y la naturaleza. La definición más breve de SE fue propuesta por la *millennium ecosystem assessment* (MEA) asegurando que los SE representan «el beneficio que obtiene la humanidad de los ecosistemas»⁷⁵. Otra idea popular sobre SE plantea un enfoque híbrido económico-ecológico que «vincula directamente los procesos y funciones de los

⁷² ENGLUND, Oskar; BERNDES, Göran y CEDERBERG, Christel. How to analyse ecosystem services in landscapes—A systematic review. *En: Ecological Indicators* [en línea]. 2017. Vol. 73, p. 492-504.

⁷³ *Ibíd.*

⁷⁴ GÓMEZ-BAGGETHUN, *et al.* Op. cit.

⁷⁵ MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC: Island Press, 2005. 155 p.

ecosistemas con los beneficios finales que obtiene la sociedad»⁷⁶. Esto quiere decir que los SE y el beneficio humano se plantean en forma de cadena con una dinámica de «producción y consumo». En respuesta a ello y desde un punto de vista ecológico, Groot, Wilson y Boumans⁷⁷, plantearon que los SE son la demanda materializada de las funciones ecosistémicas. Estos autores hacen énfasis en las funciones y procesos ecológicos porque describen la dinámica interna de los ecosistemas y potencian la oferta de SE para la humanidad.

Las definiciones de SE expuestas reproducen un enfoque antropocéntrico, exaltando la dependencia que tiene la humanidad de los ecosistemas. No obstante, los SE pueden leerse de otra manera: que el ser humano es natural, es decir que sus relaciones con esos otros elementos llamados «naturaleza» indican no dependencia sino esencia. Por lo mismo, no deberían llamarse SE, sino evidencias de la naturalidad humana.

El enfoque de los SE permeó en los últimos años en Colombia. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) legisló la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE)⁷⁸. Esta política nacional reconoce que las interacciones ecológicas entre organismos producen SE, los cuales constituyen beneficios directos e indirectos para los seres humanos en todas sus dimensiones (política, social, económica, tecnológica, simbólica, mítica y religiosa)⁷⁹. Adicionalmente, la PNGIBSE plantea el desarrollo de todas las actividades humanas de producción, extracción, asentamiento, consumo y el bienestar general de la sociedad, dependen directa e indirectamente de los SE⁸⁰. Esto quiere decir que el Estado colombiano acepta el enfoque de los SE y los postula como un elemento articulador y enriquecedor del territorio. Los contextos urbanos hacen parte de los grandes benefactores de los SE. En ese sentido, se realiza una mención espacial de ese modo de ocupación y su expresión metropolitana en el área de estudio.

2.3. URBANIZACIÓN CONTEMPORÁNEA: DESDE EL ORIGEN DE LAS CIUDADES AL HECHO METROPOLITANO DE SANTIAGO DE CALI

A partir los cambios socio-espaciales, las asociaciones territoriales, y el auge de tecnologías en comunicación y transporte, entró en consideración el término de «área metropolitana» como superación de la idea de única ciudad. Conceptualmente, un área metropolitana se concibe como un «área geográfica continúa en la que se organiza una gran aglomeración humana que (...) constituye un mercado de trabajo diversificado; expresa fuertes relaciones de interdependencia entre los núcleos que la integran; ejerce una posición de

⁷⁶ DANLEY, Brian y WIDMARK, Camilla. Evaluating conceptual definitions of ecosystem services and their implications. *En: Ecological Economics* [en línea]. 2016. Vol. 126, p. 136.

⁷⁷ GROOT, WILSON Y BOUMANS. Op. cit.

⁷⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Política Nacional de Gestión Integral de Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos, PNGIBSE. Bogotá: _____, 2012. 134 p.

⁷⁹ *Ibíd.*

⁸⁰ *Ibíd.*

dominio al sistema de ciudades»⁸¹. Un área metropolitana también puede verse como «una entidad funcional de gran escala, conteniendo, quizás, múltiples áreas urbanizadas y construidas de forma discontinua, pero que, sin embargo, funcionan como un todo económico integrado»⁸². En definitiva, un área metropolitana supera la idea de ciudad y representa un modo de organización socio-espacial diferente para la humanidad.

La metropolización global también se puede entender desde una perspectiva distinta a la espacial y urbana: la dimensión social. La metropolización es un fenómeno de magnitud crítica al considerar el crecimiento inusitado de la población y su migración a contextos urbanos a partir de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Así, por ejemplo, durante el siglo XX la cantidad total de habitantes del planeta se cuadruplicó, pasando de 1,6 a más de 6 billones de habitantes y, a inicios del siglo XXI, «el promedio de crecimiento demográfico anual ascendió a 74 millones, o más de 200 mil personas por día»⁸³. En este contexto, las ciudades absorbieron dos tercios del crecimiento poblacional total; para 1900 había 13 ciudades con una población de más de un millón de habitantes; en 1950 fueron 86; en el año 2000 eran 400; y para el 2015 fueron más de 550⁸⁴ (Figura 5).

En ese sentido, el crecimiento demográfico constante y las políticas formuladas a partir de las ventajas competitivas, favorecieron la conglomeración poblacional en las urbes e intensificó un patrón de distribución ocupacional concentrado en el Planeta. A saber:

Más del 90% de los habitantes residen al norte del paralelo del Ecuador; más de la mitad (4 billones) viven en puntos tan concentrados que ocupan solo el 5% de la superficie emergida; se estima que casi el 80% de las personas se congrega bajo los 500 metros sobre el nivel del mar⁸⁵.

⁸¹ VINUESA, Julio. Sobre el concepto de área metropolitana, citado por MARTÍNEZ, Pedro. La planificación y la gestión interesalar municipal y metropolitana: casos áreas metropolitanas de Valle de Aburrá (AMVA) y centro occidente (AMCO). Cali: Universidad del Valle, 2014. p. 22.

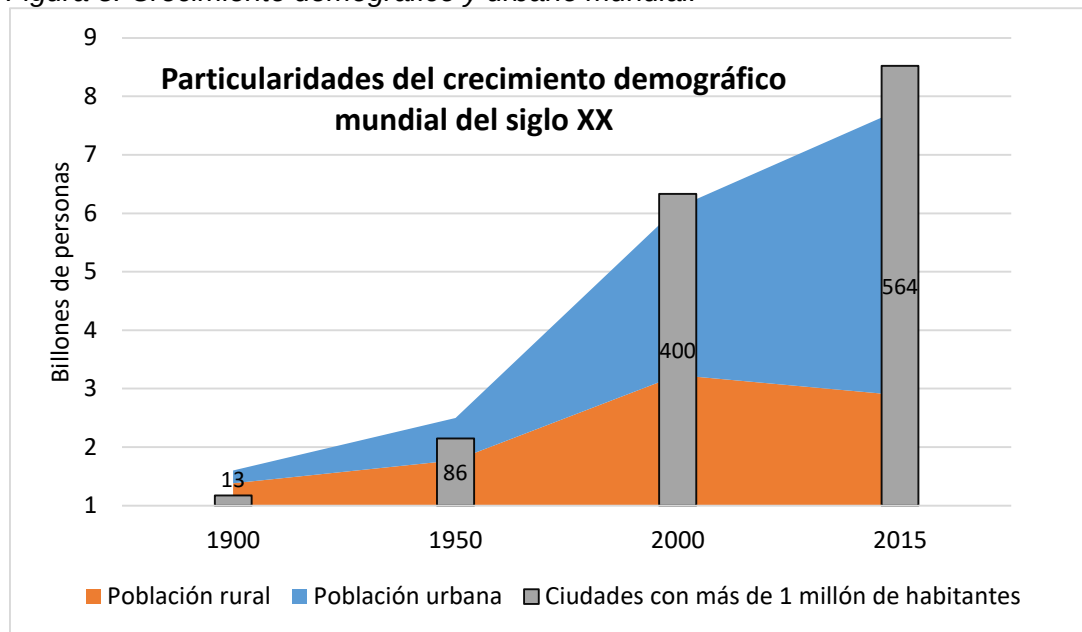
⁸² GETIS, *et al.* Introduction to Geography. New York: McGraw-Hill, 2011. p. 362.

⁸³ *Ibíd.*, p. 161.

⁸⁴ DAVIS, Mike. Planet of slums. New York: Verso, 2006. 120 p.

⁸⁵ GETIS, *et al.* Op. cit., p. 182.

Figura 5. Crecimiento demográfico y urbano mundial.



Fuente: elaborado a partir de DAVIS. Op cit. & GETIS, *et al.*, Op cit.

Pero esta dimensión demográfica es solo un componente de la aparición y evolución de las ciudades en la superficie terrestre. Adicionalmente, para Edward Soja⁸⁶, el origen de las ciudades y su evolución en el Planeta se asocia con cinco factores generales diferentes:

- El origen de las ciudades estuvo en función de la **convivencia humana en densidades altas**.
- Las primeras ciudades dependieron de la existencia de un **excedente agrícola**.
- Las élites gobernantes y castas sacerdotales que establecieron una **estructura de poder** que organizó la vida de los demás residentes.
- Las ciudades crecieron en **puntos estratégicos** para su defensa.
- La aparición de zonas urbanas se debe a un quinto factor: **una economía más compleja**.

A grandes rasgos, estos factores sintetizan el origen y evolución de las ciudades en el mundo. Sin embargo, las ciudades de América Latina se desarrollaron a partir de procesos socioculturales históricos particulares, como la conquista y la colonización europea. Falla, *et al.*⁸⁷, sintetizan la influencia de los procesos de conquista y colonización en el modelo territorial actual en países latinoamericanos como México, Brasil, Argentina, Chile y Colombia. Estos autores discriminaron en cinco períodos diferenciables el proceso de la colonización y su influencia en la estructuración de las ciudades latinoamericanas, especialmente para las ciudades colombianas, así:

⁸⁶ SOJA. Op. cit., p. 61.

⁸⁷ FALLA, Marcela, *et al.* Un modelo físico de ordenamiento territorial para el Valle del Cauca a partir de su sistema de ciudades. Cali: Universidad de San Buenaventura, 2009. 302 p.

- **Precolombino:** caracterizado por los asentamientos indígenas, transformación minúscula y concentrada de las características ambientales.
- **Conquista y parte de la colonia:** primera fase de ocupación española, bases militares de penetración, control territorial, centros mineros, caminos de bestias, comunicación fluvial, búsqueda permanente de salida al mar, estructura urbana exclusiva de carácter militar.
- **Colonia:** segunda fase de ocupación española, instalación de centros urbanos importantes, dominación demográfica y derrumbe de población nativa, centros de control económico e ideológico, centros de manejo de la mano de obra indígena y esclava, ampliación de la frontera agrícola, explotación de la minería del oro y flujo de oro americano a España, fundación de pueblos en torno a una capilla doctrinera y las haciendas españolas.
- **Supremacía de sociedades agrarias:** declaración de independencia y libertad de países latinoamericanos, declive del imperio español, capitalismo internacional dominado por Inglaterra, diversificación de la producción agraria de hacendados, colonización antioqueña en Colombia y expansión de la frontera agrícola
- **Fundaciones del siglo XX y XXI:** consolidación de los sistemas de transporte fluvial y ferrocarril, muelle de Buenaventura, procesos intensos de división político-administrativa, procesos de industrialización.

La huella histórica del proceso de conquista y colonización europea en América Latina es compleja y profunda. A partir del siglo XV, este proceso acarrió la reestructuración sociocultural de las comunidades del continente. Esta transformación y dominación tuvo como eje un control territorial agresivo, indiferente, violento, que rompió las cosmovisiones propias de las sociedades latinoamericanas.

En términos geográficos, la conquista y la colonización influenciaron la configuración del modelo territorial polarizado y actual de Colombia, donde su población creció a partir de la influencia regional, económica y social del «triángulo del oro». Este triángulo se compone por las ciudades de Bogotá, Medellín y Cali, por la forma geométrica que se genera a partir de su localización estratégica y su interconexión vial nacional⁸⁸. Con la consolidación del Estado colombiano moderno, la forma de conexión, articulación, proyección de las ciudades se proyectaron desde distintas entidades territoriales.

El fenómeno metropolitano que se quiere estudiar bajo principios sistémicos y con miras a proporcionar elementos para su manejo, se ha investigado desde la perspectiva morfológico-funcional. La conclusión principal de este tipo de análisis es que la urbanización es un proceso espacial tan complejo que debe comprenderse caso por caso⁸⁹. En esta sección se destacan algunas

⁸⁸ *Ibíd.*, p. 35.

⁸⁹ HAGGETT. Op. cit.

características del proceso de consolidación metropolitana de Santiago de Cali en el área de estudio de esta investigación.

La incidencia de Santiago de Cali en el contexto regional está inmersa en un proceso histórico, con tinte económico, funcional y social. Espacialmente, «las actividades económicas de la región —producción de café y azúcar, así como la industria agrícola— se localizaron a lo largo del valle del río Cauca, consolidando un sistema de centros urbanos en el cual Santiago de Cali juega un papel decisivo»⁹⁰. Los centros urbanos que conforman dicho sistema establecieron vínculos sociales, funcionales y económicos fuertes⁹¹. Sirven de ejemplo las áreas urbanas de Jamundí, Palmira y Yumbo, considerados como ciudades dormitorio, área agroindustrial y área industrial, respectivamente, en la región de influencia metropolitana inmediata de Santiago de Cali.

En el tema del estudio del proceso de metropolización de Santiago de Cali, el profesor Pedro Martínez, de la Universidad del Valle, ha hecho grandes contribuciones. Una de ellas es la definición de coronas metropolitanas que definen los vínculos entre los municipios del sur del Valle del Cauca y norte del Cauca con la capital vallecaucana. La investigación realizada por Martínez y Patiño⁹², toma en cuenta los subsistemas político-administrativo, socioeconómico y funcional para identificar las **coronas metropolitanas**, articulando de esta manera los diferentes subsistemas mencionados (Figura 6).

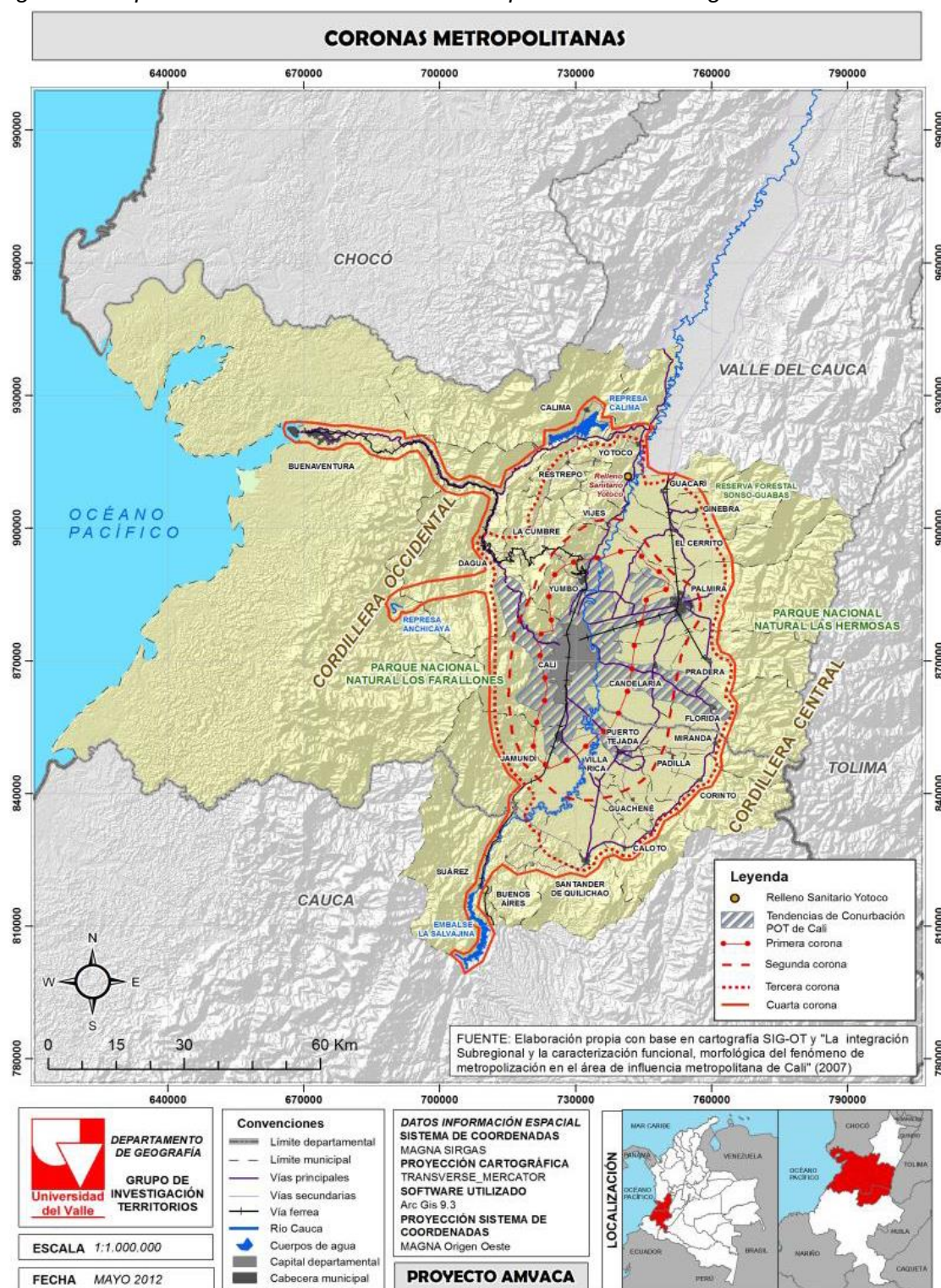
- La **primera corona** la fue denominada espacio de conurbación. Es el área donde se expande la ciudad de Santiago de Cali —desde el núcleo principal hasta los ejes intermunicipales que conectan con las cabeceras urbanas más cercanas. Se ha constatado que el crecimiento morfológico del suelo rural en los municipios vecinos ejerce una presión por nuevo suelo para urbanización.
- La **segunda corona** metropolitana se denomina «relaciones urbano-rurales». Esta área se caracteriza por relaciones de tipo migratorias residencia-trabajo, con una oferta en el espacio rural de productos agrícolas de uso cotidiano, y una importante oferta de espacios naturales utilizados para la recreación, por ejemplo, el río Pance.
- La **tercera corona** se denomina metrópoli-cabeceras municipales. Esta corona tiene como característica principal la identificación de vivienda de segunda residencia o vivienda de fin de semana, cabe destacar que su límite llega hasta el piedemonte de la Cordillera Central y en la Cordillera Occidental, hasta la cabecera municipal de la Cumbre.
- Por último, en la **cuarta corona** metropolitana abarca los equipamientos de carácter regional metropolitano. En esta categoría se encuentran los embalses de La Salvajina y Calima Darién, así como cabeceras municipales asociadas a enclaves regionales como Buenaventura.

⁹⁰ VÁSQUEZ. Op. cit., p. 2.

⁹¹ MARTÍNEZ y BUITRAGO. Op. cit.

⁹² MARTÍNEZ, Pedro y PATIÑO, Zaida. Área metropolitana del sur del Valle y norte del Cauca, AMVACA: definición, caracterización y propuesta de conformación. Cali: Universidad del Valle, 2015. 266 p.

Figura 6. Mapa de coronas de influencia metropolitana de Santiago de Cali.



Fuente: MARTÍNEZ y PATIÑO. Op. cit., p. 164.

CAPÍTULO 3. FASES METODOLÓGICAS PARA IDENTIFICAR LA EEM

En este capítulo se presenta la metodología desarrollada en esta investigación. De manera general, esta metodología se fundamenta en la aplicación de métodos de investigación mixtos, proponiendo la generación de información geográfica a partir de imágenes satelitales y la identificación de la EEM del área de estudio con el conocimiento de expertos. Resultaría equivocado sostener la dicotomía entre lo cualitativo y lo cuantitativo dado que el vínculo entre estos enfoques enriquece el desarrollo de una investigación al mejorar su precisión y profundidad⁹³. Por tal motivo, en este trabajo se apeló a las estrategias de investigación mixtas puesto que fueron las más pertinentes para responder las preguntas de investigación y los objetivos planteados.

En cada una de las etapas metodológicas descritas se desarrollaron múltiples actividades. Mientras los métodos empleados para proponer la EEM se muestran como el elemento central de esta sección metodológica, las fases operativas y los procesamiento que aportaron los insumos necesarios para alcanzar el objetivo se enseñan en la sección de anexos. Con esta estrategia, el hilo conductor teórico e instrumental del ejercicio mantiene como núcleo la EEM, sin olvidarse los procesos periféricos que permitieron tener éxito en la investigación.

Así las cosas, la Figura 7 muestra la temporalidad procedimental en sentido de las manecillas del reloj de los procesos que se precisarán en este capítulo. Fueron cuatro las fases metodológicas empleadas para alcanzar cada uno de los objetivos planteados. Estas son: I) delimitación del área de influencia ambiental metropolitana de Santiago de Cali, II) clasificación de coberturas de la tierra del área de estudio, III) identificación de la estructura ecológica metropolitana (EEM), y IV) análisis de la gestión de las categorías normativas respecto a los elementos de la EEM. En primera instancia, se presenta una descripción general considerando fases, seguido se exponen algunos aspectos con los cuales se busca el mayor entendimiento por parte del lector de los procesos realizados.

En la **fase I**, fue necesario identificar una serie de criterios urbano-funcionales y biofísicos que permitieran definir el área del sistema socioecológico, reflejando así la estructura y relaciones de los diferentes subsistemas antrópicos y naturales allí abarcados. Con el primero criterio, urbano-funcional, se identificó la localización de los elementos morfológico-funcionales urbanos que estimulan el proceso de metropolización de Santiago de Cali. Estos elementos integraron el subsistema antrópico denominado EMC. Siguiendo criterios biofísicos y altitudinales, se definió el perímetro del sistema socioecológico. Esta definición fue lo menos arbitraria posible dado que se emplearon los límites de los subsistemas biofísicos en donde toda la vida está relacionada al agua, como las cuencas hidrográficas, y también, se incorporaron las áreas que proveían

⁹³ PÁRAMO, Pablo. La falsa dicotomía entre investigación cualitativa y cuantitativa. En: _____ (ed.). La investigación en ciencias sociales: estrategias de investigación. 2 ed. Bogotá: Universidad Distrital de Colombia. 2013. p. 23-32.

distintos SE. Por último, el criterio altitudinal permitió ajustar el perímetro del sistema socioecológico acotando el área de las cuencas que no tenían un vínculo directo con los elementos de la EMC.

Con el área del sistema socioecológico identificada, incluyendo la localización de los elementos metropolitanos de la EMC, se procedió a definir las unidades ecológicas básicas de análisis en la **fase II**. Las coberturas se establecieron como la unidad porque representan fielmente las características reales de los elementos de la superficie, permitiendo analizar su distribución espacial, extensión y relaciones al interior del sistema. Las coberturas se priorizaron sobre otras unidades como los ecosistemas o los instrumentos de gestión. Mientras, los ecosistemas están propuestos desde un enfoque ecológico y expresan las relaciones entre plantas, suelo, aire, radiación solar, etcétera, los instrumentos de gestión, son creaciones humanas con la que se destina un uso y un límite particular a un área. Por ejemplo, mientras la cobertura de la tierra predominante en la localización de Santiago de Cali es el «tejido urbano continuo», esta área se clasifica como un «ecosistema de bosque seco», o también, asumir que el PNN Farallones de Cali es un elemento natural cuando en realidad es un límite artificial que abarca diversas coberturas y ecosistemas donde ocurren procesos y funciones naturales. Con el objetivo de plantear una EEM concreta, identificable y operativa, las coberturas fueron la unidad más adecuada.

El proceso de clasificación de coberturas de la tierra es un proceso extenso y complejo que incluyó una serie de actividades conectadas en cascada. Con este procedimiento, se produjeron las unidades básicas del sistema socioecológico y, a partir de ellas, se identificaron los elementos que componen la EEM. Es decir que, la clasificación de coberturas aportó el insumo fundamental para la EEM, más no es el objetivo principal de la investigación. En este sentido, los procedimientos realizados, configuración, herramientas, y resultados de la clasificación de coberturas se adjuntan en formato digital a este documento en el Anexo A.

A partir de las coberturas, en la **fase III** se identificó la EEM a partir de una consulta a expertos en SE. Los participantes fueron académicos y funcionarios públicos y privados con vasta experiencia institucional, conocedores a fondo del fenómeno metropolitano de Cali y de la temática de los SE. A los expertos se les consultó sobre el potencial hipotético de oferta y demanda de las coberturas de la tierra clasificadas. Para lograrlo se elaboró un formulario virtual que incluyó soportes en términos conceptuales, instrumentales y cartográficos. Luego de obtener todas las valoraciones de SE, se aplicaron cuatro criterios de SE — multifuncionalidad, singularidad, capacidad e importancia— que orientaron la identificación de los elementos de la EEM de forma integral, incluyente y precisa. Esta fase metodológica es el eje central de la investigación y se presenta en este documento con sus detalles, estrategias y resultados.

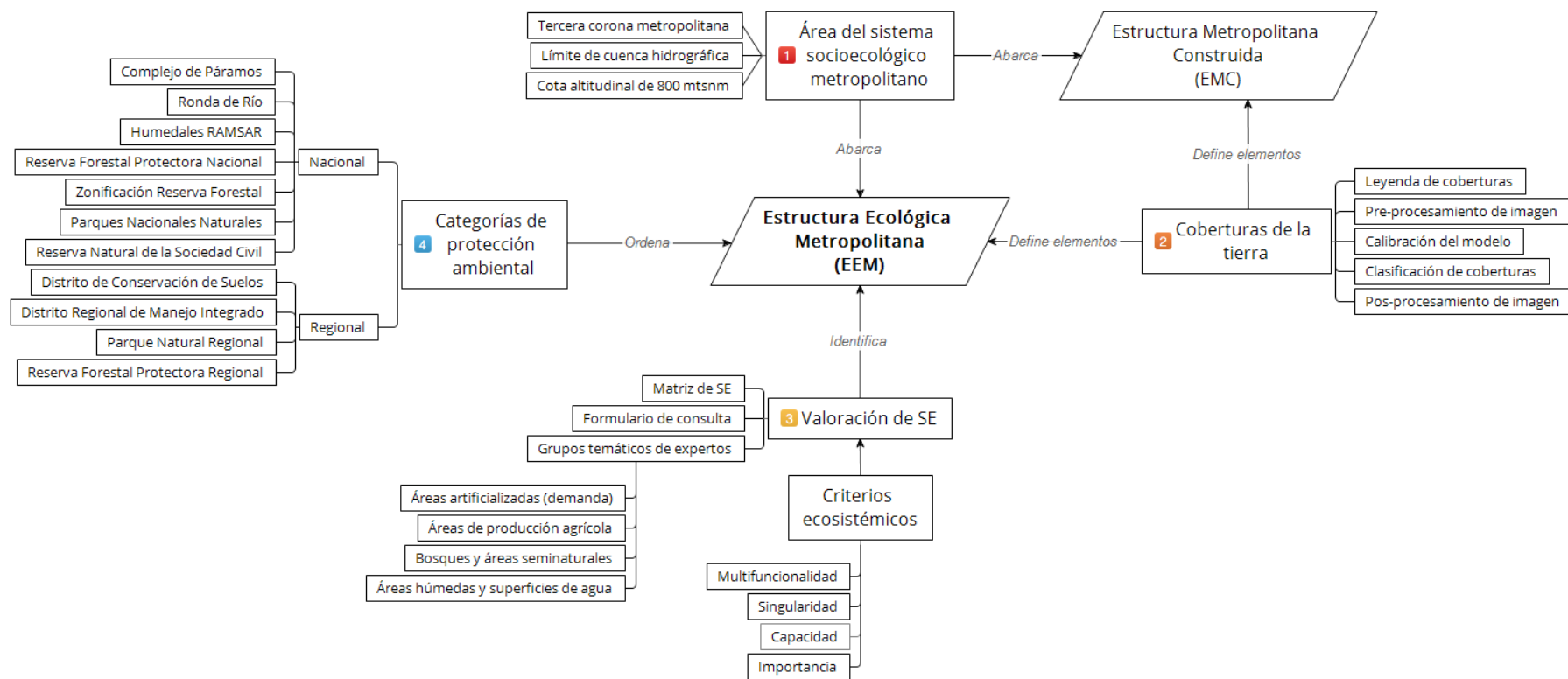
En último lugar, se identificaron las categorías de protección ambiental de escala nacional y regional actuales que gestionan la EEM propuesta en este trabajo. En ese sentido, en la **fase IV** se analizó la aplicación de estas categorías en el área

del sistema socioecológico. El procedimiento constó de cruzar espacialmente la información de coberturas de la tierra con el área de jurisdicción de cada una de las categorías. De esta forma, se pudo identificar si el inventario de coberturas de la tierra abarcadas en la jurisdicción de la categoría de protección fue coherente con su objetivo.

Por otra parte, se realizaron dos salidas de campo para reforzar el conocimiento previo del área estudiada. Estas salidas tuvieron como destino: 1) el sur del área visitando el embalse La Salvajina y el contexto ambiental de la vía regional Cali – Popayán, y 2) recorrido en lancha del río Cauca por los municipios de Jamundí, Candelaria, Palmira y Cali. Esta experiencia permitió aplicar unas bases interpretativas sólidas y actualizadas de la geografía del área de estudio a la investigación.

Finalmente, toda la información espacial producida en esta investigación se almacenó y proceso en una *Geodatabase* para garantizar su gestión eficiente, estructurada, que conservó la integridad de todos los datos. Igualmente, cada uno de estos productos contó con el sistema de coordenadas planas «WGS84 Zona 18N» para evitar cualquier irregularidad que pudiese producirse al combinar sistemas de coordenadas diferentes.

Figura 7. Esquema metodológico general desarrollado en la investigación.



Fuente: elaboración propia.

3.1. FASE 1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA AMBIENTAL METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI

Para efectos de esta fase metodológica, fue necesario identificar una serie de criterios urbano-funcionales y biofísicos que permitieran definir un área de estudio que reflejara la estructura y relaciones de los diferentes subsistemas antrópicos y naturales allí abarcados. En otras palabras, unos criterios que permitieran delimitar un área de estudio lo menos arbitrariamente posible y, con eso, conservar las relaciones sistémicas que tienen las comunidades con los ecosistemas.

3.1.1. Criterio urbano-funcional: identificación de la estructura metropolitana construida (EMC)

La EMC es un hecho espacial dependiente de contextos y trasfondos culturales específicos. Su consolidación responde a unos intereses particulares. Por ese motivo, se revisó literatura especializada para listar una serie de factores detonantes que estimularon el proceso de metropolización de Santiago de Cali. Esta revisión aseguró una contextualización integrada en términos geográficos e históricos del problema de investigación. Este fue el primer punto de la identificación de la EMC.

Posteriormente, se tomó como primer criterio de delimitación la tercera corona metropolitana definida por Martínez y Patiño⁹⁴ (Figura 6, página 41). Para estos autores, las coronas metropolitanas expresan el grado de integración funcional a escala regional⁹⁵. La tercera corona abarca tanto los municipios del área de influencia metropolitana inmediata de Santiago de Cali como los equipamientos colectivos que proveen de diferentes tipos de servicios (comercio, salud, educación, etcétera) a ese conjunto de municipios. Actividades como las residenciales, comerciales, (agro) industriales, institucionales, se desarrollan dentro de la tercera corona⁹⁶.

La información espacial requerida para aplicar este criterio fue solicitada a los autores Martínez y Patiño⁹⁷ quienes amablemente compartieron su base de datos geográfica. Esta base de datos contenía, en formato vector y de tipo polígono, los límites de las coronas metropolitanas, áreas urbanas, equipamientos colectivos, división político-administrativa. La base de datos también contaba con la localización de los principales equipamientos de comercio en formato de punto, al igual que las conexiones de vías principales y red férrea, en formato de línea.

⁹⁴ MARTÍNEZ y PATIÑO. Op. cit.

⁹⁵ Ibíd.

⁹⁶ El puerto de Buenaventura hace parte de la cuarta corona, pero no se incorporó al área de influencia metropolitana de Cali porque, más que estar vinculado a Cali, es un equipamiento de peso nacional e internacional.

⁹⁷ Ibíd.

A partir de la información secundaria obtenida fue posible identificar todos los elementos morfológico-funcionales que bajo nuestra interpretación conforman una EMC. Es decir que, con la localización de las áreas urbanas, los equipamientos regionales y las conexiones viales y ferroviarias, se espacializa el hecho metropolitano del área de estudio.

3.1.2. Criterio biofísico

El segundo criterio corresponde al límite de cuencas hidrográficas. Tal como lo indican Nedkov, Boyanova y Burkhard, las cuencas hidrográficas «proporcionan la escala espacial apropiada para las evaluaciones de servicios [ecológicos] debido a que varias funciones de los ecosistemas relacionados con el ciclo del agua se llevan a cabo dentro de sus límites»⁹⁸. En este sentido, los SE relacionados con el agua —suministro de agua dulce, purificación del agua, control de inundaciones, etcétera— se basan en las funciones de los ecosistemas y los procesos desarrollados a escala de cuenca hidrográfica.

Este criterio se aplicó a partir de la información espacial suministrada por la CVC y la CRC. A través de una solicitud formal, se contó con la delimitación oficial de las cuencas hidrográficas del área de estudio. Sin embargo, se descubrió que los límites establecidos por las CAR no coincidían y, en algunos casos, presentaban solapamiento o vacíos entre ellas. Por tal motivo y con la intención de presentar una capa oficial de cuencas geométricamente correcta, se resolvieron todas estas situaciones con la herramienta **Topology > Align Edge** de ArcGIS 10. Esta herramienta permite alinear rápidamente los límites de polígonos, en este caso cuencas hidrográficas, que no se alinean adecuadamente, por solapamientos o vacíos, con las otras entidades.

3.1.3. Criterio altitudinal

El último criterio de delimitación del área de influencia ambiental comprende la localización espacial de los elementos de la EMC en la tercera corona. Para la aplicación de este criterio se tuvieron en cuenta la tercera corona metropolitana y la altura en metros sobre el nivel del mar (msnm) de los elementos de la EMC —centros urbanos (30 municipios), embalse La Salvajina, aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, etcétera— ubicados por encima de 800 msnm. Bajo esta situación se estableció un límite en aquellas cuencas con grandes áreas por debajo de ese límite altitudinal (e.g. cuenca hidrográfica del río Dagua) y sin una conexión directa con la tercera corona del área de influencia metropolitana de Santiago de Cali. También, se realizó un corte en la cuenca del río Cauca justo en el punto donde termina el embalse La Salvajina (en sentido norte-sur) dado que se esta se extendía hasta el nacimiento del río al interior del Dpto. del Cauca.

⁹⁸ NEDKOV, Stoyan; BOYANOVA, Kremena y BURKHARD, Benjamin. Quantifying, modelling and mapping ecosystem services in watersheds. En: CHICHARO, Luis; MÜLLER, Felix y FOHRER, Nicola (eds.). Ecosystem services and river basin ecohydrology. Dordrecht: Springer, 2015. p. 136.

La localización espacial de los elementos urbanos referenciados fue la guía para establecer este criterio. La información altitudinal se extrajo del *digital elevation model* (DEM)⁹⁹ producido por la NASA empleando el sensor ASTER¹⁰⁰. A menudo, se orientan en una cuadrícula regular —DEM ASTER: 30x30 mt— para que puedan ser fácilmente manipulados en el procesamiento de imágenes. El corte del área de estudio se elaboró empleando la **Raster Calculator** de ArcGIS 10 para seleccionar aquellos píxeles con altitud mayor o igual a 800 msnm.

3.2. FASE 2. CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS DE LA TIERRA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La teledetección permite recolectar datos de forma rápida, eficiente y precisa, sin alterar el fenómeno que se desea estudiar. Este es un método de recolección de datos que responde a todos estos requerimientos, permitiendo conocer los ambientes, físicos, químicos, biológicos y culturales, de la superficie terrestre¹⁰¹. La teledetección se vincula a esta investigación dado que es la técnica que permitió producir las coberturas de la tierra que fueron la unidad básica del sistema socioecológico, las mismas que son vistas como los elementos de la EEM y la EMC.

La principal justificación para proponer y realizar esta clasificación de coberturas es que la información temática oficial no era la más adecuada para esta investigación. Los datos de coberturas existentes o estaban a una escala espacial muy baja —1:100.000 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales¹⁰² (IDEAM)— o la brecha temporal era tan amplia que las coberturas difícilmente representaban con exactitud la superficie terrestre del área de estudio para un año —la capa de coberturas de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca¹⁰³ (CVC) tiene insumos desde 1996 a 2010— o la información temática de coberturas presentaba todo tipo de incongruencias entre las fuentes —el área de estudio abarca la jurisdicción de la CVC y la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC)—. Así las cosas, la solución más apta fue producir las coberturas de la tierra para el área de estudio.

A grandes rasgos, el proceso de clasificación de coberturas de la tierra ejecutado en este trabajo fue semiautomático, o lo que quiere decir, el usuario encontró la información de las clases de cobertura deseadas mediante un muestreo, y el *software* clasificó las porciones restantes de la imagen. Sin embargo, fue necesario ejecutar procesos auxiliares en fases específicas para que la

⁹⁹ El DEM es un archivo digital que almacena las coordenadas tridimensionales de una matriz de puntos que corresponden a una superficie real.

¹⁰⁰ NASA JPL. ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. Sioux Falls: _____, 2009.

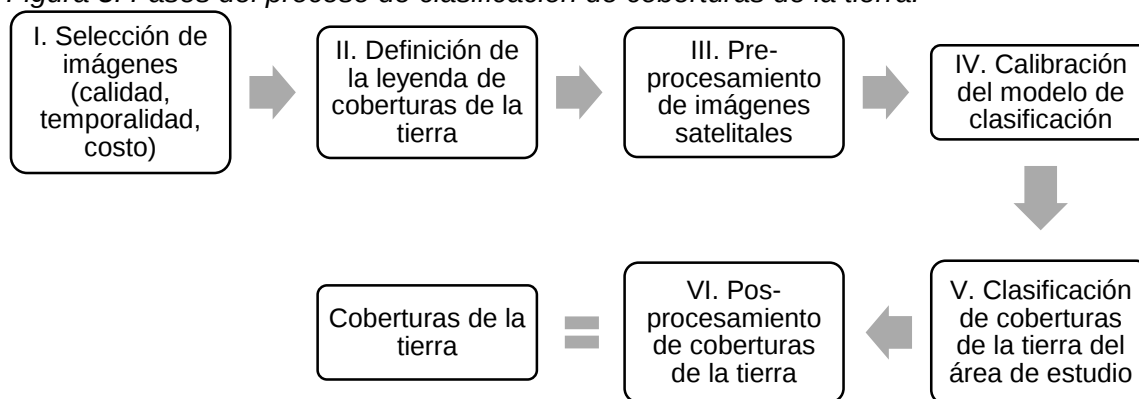
¹⁰¹ CHUVIECO, Emilio. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Madrid: Ariel, 2010. 608 p.

¹⁰² INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE *Land Cover* adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá: _____, 2010. 72 p.

¹⁰³ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Protocolo de información de la capa temática de cobertura y uso del suelo. Santiago de Cali: _____, 2011. 27 p.

clasificación de coberturas fuera exitosa. La Figura 8 muestra sintéticamente las fases de clasificación y la conexión de sus productos para alcanzar el objetivo deseado. El proceso de generación de esta información fue complejo, aquí se esbozará una descripción general del proceso, pero se recomienda la lectura del Anexo A para conocer a profundidad su ejecución.

Figura 8. Fases del proceso de clasificación de coberturas de la tierra.



Fuente: elaboración propia.

El primer paso para clasificar coberturas de la tierra es definir, en función al objetivo de investigación propuesto, una **leyenda** que incluya los tipos de coberturas deseados y los niveles de especificidad requeridos. En esta fase se adaptó la leyenda *coordination of information on the environment* (CORINE) *Land Cover* con base en las particularidades del área de estudio y con el objetivo de identificar los elementos de la EEM y EMC. La leyenda de coberturas se discriminó en cuatro niveles de profundidad, donde el nivel uno (1) es el más general y el cuatro (4) el más específico. El nivel tres (3) de la leyenda fue seleccionado como el más adecuado porque se ajustó al objetivo de producir coberturas relacionadas a fenómenos metropolitanos a escala 1:25.000. De acuerdo con Salitchev¹⁰⁴, la unidad mínima cartografiable (UMC), o la superficie menor que puede ser representada sobre un mapa, para esta escala es de 10.000 mt² (una (1) hectárea). Bajo este orden de ideas, se identificaron en la leyenda 28 coberturas de la tierra para el área de estudio.

La clasificación de coberturas tuvo como insumo principal 32 imágenes del satélite *RapidEye*, capturados en los años: 2013 (5 cuadrantes); 2014 (4 cuadrantes); 2015 (21 cuadrantes); y 2016 (2 cuadrantes). Como la captura de una imagen satelital está condicionada por factores como la hora, la altitud, la nubosidad, la composición atmosférica y, debido a que la investigación contó con fuentes de información de cuatro años diferentes, las imágenes *RapidEye* se procesaron después de su recepción para subsanar irregularidades en los valores de radiancia y reflectancia.¹⁰⁵ Por ese motivo, en la Fase II se realizó una **corrección radiométrica y atmosférica** a cada una de las imágenes. Con

¹⁰⁴ SALITCHEV, Konstantin. Cartografía. La Habana: Pueblo y Educación, 2009. 182 p.

¹⁰⁵ ŞATIR, Onur y BERBEROĞLU, Süha. Land use/cover classification techniques using optical remotely sensed data in landscape planning. En: OZYAVUZ, Murat (ed.). Landscape Planning. Rijeka: InTech, 2012. p. 21-54.

los 32 cuadrantes corregidos se realizó una unión de imágenes satelitales o **mosaico** del área estudiada¹⁰⁶. La presencia de nubes en el mosaico afecta la discriminación de coberturas de la tierra y, por tal motivo, se **extrajo la superficie de nubes** de la imagen. Otro de los problemas involucrado en la clasificación de coberturas es la alta correlación estadística entre bandas espectrales¹⁰⁷. En este caso, fue necesario **eliminar los componentes** que contribuyeran con un escaso porcentaje de la varianza original para quedarse con los que absorban mayor variabilidad

En la Fase III se calibró el modelo de clasificación de coberturas. El proceso de clasificación de una imagen es complejo e involucra diferentes fases articuladas en secuencia. El modelo de clasificación de esta investigación incluyó: **i) segmentación, ii) muestreo, iii) entrenamiento, iv) clasificación y v) evaluación de precisión**. La configuración y los productos de cada fase alteran el resultado final de clasificación de coberturas. Frente a este panorama, la solución fue calibrar el modelo de clasificación completo en un área menor, ajustando de forma iterativa la configuración hasta alcanzar un resultado óptimo, cuyos parámetros puedan ejecutarse para todo el mosaico¹⁰⁸. Esta estrategia de procesamiento iterada produjo resultados excelentes de clasificación. Por lo tanto, la calibración del modelo es el componente más profundo y técnico de esta clasificación de coberturas de la tierra del área de estudio.

Mientras en la fase de calibración se procesó una porción de área, en la Fase IV se clasificó el área de estudio completa. Esto quiere decir que se ejecutaron todas las fases de calibración con los *scripts* sobre el mosaico de imágenes *RapidEye*. Mientras en la fase de calibración el modelo se iteró 20 veces, en esta etapa de clasificación se ejecutaron **50 iteraciones** utilizando diferentes conjuntos de datos para el entrenamiento y la validación.

La última fase de esta metodología de clasificación involucró el pos-procesamiento de las coberturas. En pocas palabras, esta fase es el control de calidad del producto de coberturas de la tierra¹⁰⁹. Esto implica la intervención directa del usuario para ajustar el producto clasificado en tres fases diferentes: i) digitalización, ii) etiquetado, y iii) corrección de topología. La **digitalización** de coberturas se realizó para ingresar de forma manual aquellas que no se clasificaban correctamente de forma automática. El **etiquetado** consistió en editar manualmente los errores identificables contrastando la capa clasificada con la imagen *RapidEye* del mosaico. La última actividad de esta fase incluyó una **corrección topológica** con la que se generó un producto de coberturas de la tierra correcto en términos geométricos y espaciales.

¹⁰⁶ DUARTE, Efraín, *et al.* Mapa de cobertura forestal y uso de la tierra año 2015: metodología y resultados preliminares. San Salvador: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2015. 28 p.

¹⁰⁷ CHUVIECO. Op. cit.

¹⁰⁸ SOUSA, Celio de, *et al.* Analysis of Rapideye's Red edge band for image segmentation and classification. *En: Proceedings of the 4th GEOBIA [en línea]. 2012. Vol. 79, p. 518-523. & MAKINDE, Esther, et al. Object Based and Pixel Based Classification Using Rapideye Satellite Imager of ETI-OSA, Lagos, Nigeria. En: Geoinformatics FCE CTU. 2016. Vol. 15, No. 2; p. 59-70.*

¹⁰⁹ DUARTE, *et al.*, Op. cit.

Finalmente, con estas correcciones se tuvo una capa de coberturas de la tierra geométricamente correcta y geográficamente contextualizada a la realidad del área de estudio. Con este insumo tan valioso se procedió a identificar la EEM del sistema socioecológico de Santiago de Cali. Ese es el componente abarcado en la siguiente sección de la metodología.

3.3. FASE 3. IDENTIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA ECOLÓGICA METROPOLITANA (EEM)

En esta investigación se interpreta el área de influencia metropolitana de Cali como un sistema socioecológico compuesto por un par de estructuras identificables: la EEM y la EMC. Como se presentó en el marco teórico, la dinámica de este sistema socioecológico se deduce a partir de los tres tipos de SE (aprovisionamiento, regulación y culturales)¹¹⁰ que la sociedad recibe de forma (in)directa de los procesos naturales abarcados en distintas coberturas de la tierra.

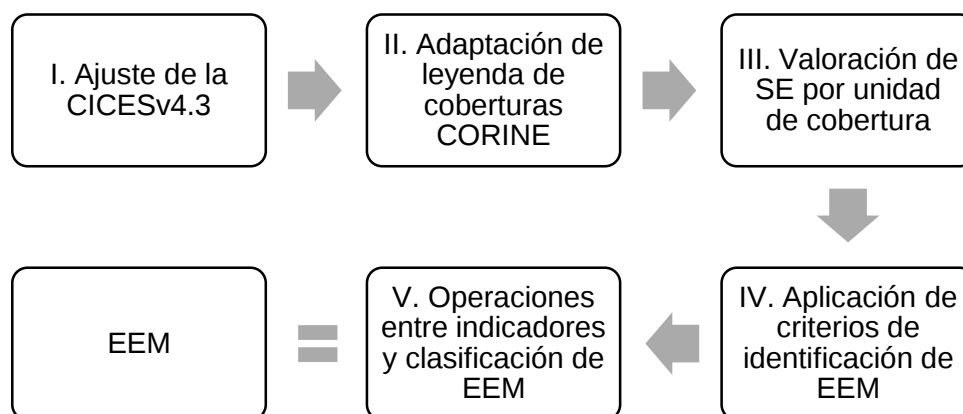
En este ejercicio, la EEM es **el conjunto de coberturas de la tierra naturales y seminaturales que más ofrecen SE**. Esta «interpretación» de la naturaleza como fuente de SE por parte de los seres humanos se sustenta en una idea clave: la valoración de SE es el primer paso para reconocer y comprender ampliamente el beneficio general que tiene la humanidad de los demás componentes de la naturaleza¹¹¹. Por lo tanto, la identificación de esta EEM se realizó con base en 29 respuestas de expertos regionales en SE y temas afines. Con estos resultados se creó una matriz cruzada de oferta y demanda SE por unidad de cobertura y se estableció una serie de criterios para seleccionar los elementos de la EEM.

Esta fase metodológica incluyó cinco actividades interconectadas: i) ajuste de la tipología *Common International Classification of Ecosystem Services* (CICES), ii) adaptación de leyenda de coberturas de la tierra, iii) valoración de SE por cobertura mediante una matriz cruzada, iv) aplicación de criterios para identificar los elementos de la EEM y v) operación entre criterios y clasificación de EEM. El esquema operativo de esta fase metodológica se presenta en la Figura 9.

¹¹⁰ HAINES-YOUNG y POTSCHIN, Op. cit.

¹¹¹ FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION. Servicios ecosistémicos y biodiversidad: evaluación y valoración [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de junio de 2017]. En: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/valuation/es/>

Figura 9. Fases del proceso de identificación de la EEM.



Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describe cada una de estas fases.

3.3.1. Tipología CICESv4.3 de SE

Los SE han sido clasificados en tipologías múltiples, controversiales y hasta antagónicas. Bajo esta investigación, se propuso una clasificación internacional común que tuviera en cuenta las tipologías desarrolladas estandarizando la forma en que se describen y valoran los SE. Es así que en este ejercicio se empleó la CICES en su versión 4.3¹¹². CICES se sustenta en un modelo de cascada que, con el concepto de los SE finales, enfatiza sobre qué tan cercana y recíproca es la relación entre lo humano y lo natural.

Esta particularidad de CICES elimina el error de otras clasificaciones de valorar funciones y procesos propios de los ecosistemas como servicios o, en otras palabras, confundir los «medios con los fines». A saber, el ciclo de los nutrientes y la polinización, son considerados como servicios en la clasificación de SE propuesta por la MEA¹¹³, pero en CICES, son procesos y funciones naturales que favorecen la producción de servicios finales para la humanidad; la formación y composición de suelo, y el desarrollo de cultivos agrícolas y la floricultura, respectivamente. En este sentido, para Haines-Young y Potschin¹¹⁴, la principal ganancia de CICES es considerar el concepto de los SE finales porque garantiza retener la conexión con las funciones ecosistémicas, los procesos y estructuras naturales que contribuyen al bienestar humano. Esta es la instrumentalización deseada de los conceptos utilizados en esta investigación.

Estructuralmente, CICES tiene cinco niveles: 1-secciones, 2-divisiones, 3-grupos, 4-clases, 5-tipos de clase. Las categorías de estos niveles no se superponen ni redundan y sus niveles inferiores heredan las propiedades de los niveles superiores¹¹⁵. La estructura jerárquica también está diseñada para

¹¹² HAINES-YOUNG y POTSCHIN, Op. cit.

¹¹³ MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESTMENT. Op. cit.

¹¹⁴ HAINES-YOUNG y POTSCHIN, Op. cit.

¹¹⁵ Ibíd.

abordar problemas de escala y reconocer qué salida del ecosistema es un servicio final. En la CICES existen tres grandes secciones de SE: 1) aprovisionamiento, 2) regulación y mantenimiento, y 3) culturales¹¹⁶. Esta investigación llega hasta la jerarquía de grupos en la CICES porque es la que mejor se ajusta a la escala espacial del fenómeno metropolitano de Santiago de Cali, y permite desarrollar la fase de valoración de SE sobre elementos de relevancia geográfica para el problema a resolver. En el Anexo C se presenta la estructura de la CICES adaptada para esta investigación, con las descripciones completas y las ilustraciones de los 21 grupos diferentes de SE.

3.3.2. Adaptación de la Leyenda CORINE *Land Cover* de coberturas de la tierra

Con el objetivo de proponer la EEM del sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali», se modificó levemente la leyenda de coberturas de la tierra producida en la fase metodológica anterior. En la leyenda original, son cinco los grupos de coberturas de la tierra clasificados en el nivel 1: i) áreas artificializadas; ii) áreas agrícolas; iii) bosques y áreas seminaturales; iv) áreas húmedas; y v) superficies de agua. Los grupos iv) áreas húmedas y v) superficies de agua se unieron en un solo grupo porque fueron muy pocas las coberturas de estos dos grupos identificadas en el área de estudio. Por lo tanto, se tuvieron en cuenta cuatro grupos para el análisis propuesto en esta investigación.

Estos cuatro grupos de coberturas de la tierra fueron seleccionados por su grado de contribución al bienestar humano y su presencia localizada en el área de estudio. Las áreas artificializadas, que incluyen áreas urbanas, comerciales, instalaciones recreativas y zonas verdes urbanas, constituyen un sistema de interpretación y aplicación de conocimiento científico¹¹⁷, al tiempo que afectan directamente las condiciones ambientales de las especies en general. Las áreas agrícolas, que abarcan cultivos transitorios, permanentes, y su mezcla con elementos naturales, aportan significativamente al aprovisionamiento de materiales y alimentos a la sociedad. Por su parte, los bosques y áreas seminaturales mantienen las condiciones de vida para gran parte de las especies que ocupan del área de estudio. Además, estimulan el entorno físico y mental de los seres humanos mediante símbolos y sistemas de conocimiento. Finalmente, las áreas húmedas y superficies de agua aprovisionan a los seres humanos del líquido vital y regulan las condiciones de vida de muchas especies vinculadas a los ecosistemas acuáticos.

Estos cuatro grupos componen la leyenda de coberturas de la tierra empleada en esta fase metodológica. Esta leyenda junto a la CICES 4.3, fueron los insumos necesarios para crear una matriz cruzada de valoración de SE. La matriz se creó con la colaboración de expertos regionales y, tras una serie de tratamientos,

¹¹⁶ Ibíd.

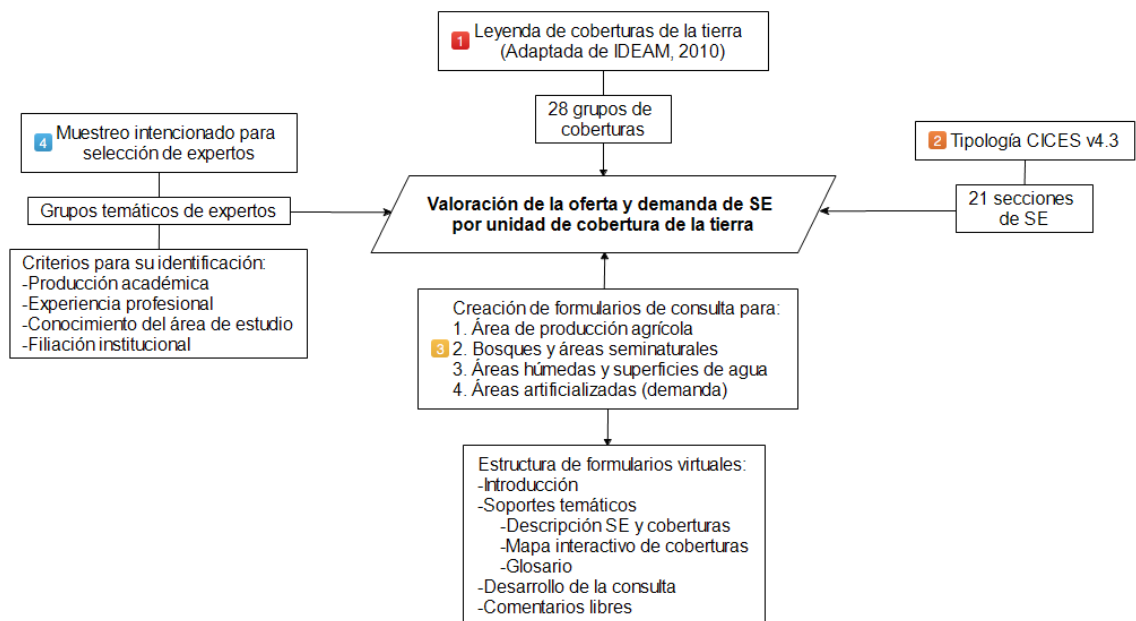
¹¹⁷ Ibíd.

permitió la identificación de la EEM. Todos estos temas se exponen en la siguiente fase metodológica: la valoración de SE.

3.3.3. Valoración de SE por consulta a expertos

Es posible entender a los SE como el beneficio que tienen los seres humanos de los ecosistemas¹¹⁸. Este concepto relaciona indivisiblemente y profundamente lo antrópico y lo natural, ajustándose plenamente al análisis de los sistemas socioecológicos¹¹⁹. En esta sección se presenta la instrumentalización de este concepto mediante el método de la matriz, involucrando la creación de formularios en línea con los que expertos regionales valoraron la oferta y demanda de SE. La articulación procedimental de estas etapas metodológicas se presenta en la Figura 10 en el sentido de las manecillas del reloj.

Figura 10. Esquema operativo de la consulta a expertos.



Fuente: elaboración propia.

Implícitamente, al considerar que los seres humanos se benefician de los ecosistemas, se está aceptando una dinámica funcional y compleja de producción y consumo. Entender esta dinámica es clave para ordenar de forma sustentable los recursos de un área y, para poder hacerlo, es necesario tener en cuenta dónde y cómo se proveen y demandan distintos SE¹²⁰. En este contexto, los mapas son una herramienta científica de gran utilidad y apoyan esta tarea porque permiten representar un fenómeno complejo de forma sencilla e intuitiva.

La literatura especializada expresa que la **oferta de SE** es «la capacidad de un área particular de proveer un conjunto de bienes y servicios de los ecosistemas

¹¹⁸ MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESTMENT. Op. cit.

¹¹⁹ JACOBS, et al. Op. cit.

¹²⁰ BURKHARD, Benjamin, et al. Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification. *En: Landscape Online*. 2014. Vol. 34, No. 1; p. 1-32.

[y la **demanda de SE** es] la sumatoria de todos los bienes y servicios de los ecosistemas actualmente consumidos o requeridos por un área particular»¹²¹. En el marco de un sistema socioecológico, la oferta y la demanda de SE están conectadas de forma inseparable porque las necesidades humanas establecen un nivel de consumo, hecho que repercute en la cantidad y condiciones del suministro del servicio¹²². Por ejemplo, para el caso de una ciudad de Cali, las necesidades de la población urbana intensifican las presiones ambientales sobre la periferia, que es en donde se localizan las áreas que proveen el agua, alimentos, materiales, minerales, etcétera. Por lo tanto, el enfoque de los SE y sus análisis se nutren sustancialmente de la espacialidad dado que la oferta y la demanda de SE pueden interpretarse como elementos espacialmente explícitos.

Así las cosas, existen unidades espaciales de oferta y demanda de SE. Mientras las primeras son la fuente de un SE, incluyendo el conjunto de organismos y sus características requeridas para entregarlo, las segundas corresponden a la localización espacial o sitio donde los beneficiarios consumen los SE¹²³. En este ejercicio, las unidades de oferta y demanda de SE corresponden a las coberturas naturales y artificiales del área de estudio. Con estas unidades se procedió a crear una **matriz de valoración** de SE.

Propuesto en el año 2009 por Burkhard, *et al.*¹²⁴, el método de la matriz de SE sobresale por su eficiencia, accesibilidad, y adaptabilidad¹²⁵. Estructuralmente, la matriz se compone de las coberturas de la tierra en las filas y los distintos SE en las columnas. No obstante, realizando un ejercicio crítico sobre la aplicación de la matriz en diferentes contextos, Jacobs, *et al.*, identificaron los requerimientos técnicos y temáticos de este método, así: (1) selección de área de estudio o caso, (2) selección adecuada de coberturas de la tierra, (3) elección apropiada de SE, (4) recopilación o adquisición de datos eficiente y confiable, (5) cuantificación precisa y consistente, (6) escala Likert 0-5 de valoración normalizada, (7) mapeo de la oferta y demanda en SIG y (8) interpretación y contextualización de los resultados¹²⁶. Todos estos elementos se tuvieron en cuenta para aplicar el método de la matriz en esta investigación y se desarrollan en este documento.

La técnica de la matriz permite valorar los SE a partir de distintas fuentes de información como las estadísticas, datos biofísicos, monitoreo socioeconómico o consultas a expertos¹²⁷. De entrada, las primeras tres fuentes de información parecerían las más adecuadas, pero en la realidad son las más difíciles de conseguir porque en muchas ocasiones no existen o están desactualizadas, y

¹²¹ BURKHARD, *et al*, Mapping ecosystem service supply, demand and budgets, Op. cit. p. 18.

¹²² BURKHARD, *et al*, Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification, Op. cit.

¹²³ *Ibíd.*

¹²⁴ BURKHARD, Benjamin, *et al.* Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. *En*: Landscape Online. 2009. Vol. 15, No. 1; p. 1-22.

¹²⁵ JACOBS, *et al.* Op. cit.

¹²⁶ *Ibíd.*

¹²⁷ *Ibíd.*

los esfuerzos humanos y financieros requeridos para crear la información no siempre se justifican. Así las cosas, las estimaciones de expertos han sido las más aplicadas con el método de la matriz por su grado de integración multidisciplinar, en donde cooperan las ciencias sociales y naturales, al igual que a los ciudadanos y a los encargados de tomar decisiones políticas. Por estos motivos, la valoración por expertos fue seleccionada en este trabajo.

Con el método de la matriz, la oferta y la demanda de SE son valoradas empleando las estimaciones de expertos por unidad de cobertura de la tierra. El sustento científico de este ejercicio es que «las estimaciones de los expertos son el resultado de un dominio científico, empírico e intuitivo del complejo sistema socioecológico se está modelando»¹²⁸. Es así que un experto puede valorar cuál es la oferta/demanda hipotética de SE por unidad de cobertura de la tierra.

Con la impronta de identificar la técnica más adecuada para recopilar información sobre SE a partir del conocimiento de expertos, Koschke, *et al.*¹²⁹, examinaron dos opciones: el *Analytic Hierarchy Process* (AHP) y la **escala Likert**. La conclusión principal de los autores es que la escala Likert es la más recomendada teniendo en cuenta que generó estimaciones validas, fue más fácil de aplicar y consumió menos tiempo, lo que motivó la aceptación del método y la participación masiva de su panel de expertos¹³⁰. A partir de esta guía y de los aportes de Jacobs, *et al.*¹³¹, en esta investigación se empleó una escala Likert semi-cuantitativa de seis categorías de valoración de SE (Cuadro 2).

La normalización de esta escala relativa de seis niveles tiene como objetivo hacer que los diferentes SE, medidos y evaluados por los expertos, sean comparables entre sí. Los datos se clasificaron en seis categorías semi-cuantitativas para agrupar la información en las clases de cero (0) a cinco (5). La técnica de **intervalos iguales** se empleó porque otros métodos, como puntos de quiebre natural o cuantiles, crean las clases con base en el comportamiento de los datos, lo que no permitiría comparar las clases creadas entre sí y con otros ejercicios de valoración de SE¹³². En el Cuadro 2, la clase 0 (no relevante) indica que no existe una oferta o demanda de SE «notable» y dependiendo del tipo de SE y la cobertura, eso puede significar que el SE no se provee o que requiere una cantidad exigua. Naturalmente, existe una gran dependencia de la experiencia, el conocimiento y la objetividad del experto para valorar que la oferta y la demanda de SE es relevante o no.

¹²⁸ *Ibíd.*, p. 24.

¹²⁹ KOSCHKE, Lars, *et al.* A multi-criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning. *En: Ecological Indicators*. 2012. Vol. 21, p. 54-66.

¹³⁰ *Ibíd.*

¹³¹ JACOBS, *et al.* Op. cit.

¹³² BURKHARD, *et al.*, Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification, Op. cit.

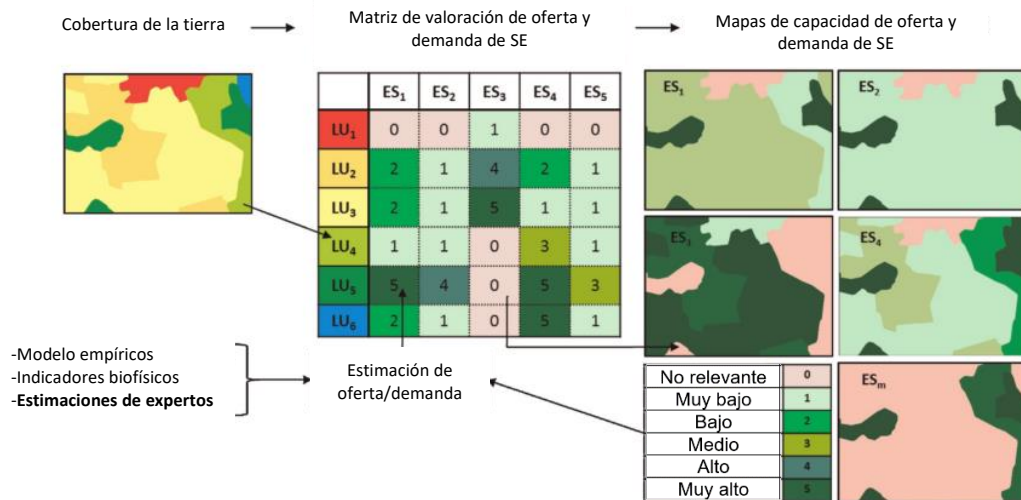
Cuadro 2. Escala Likert semi-cuantitativa de valoración de SE.

Valor cuantitativo	Valor cuantitativo
No relevante	0
Muy bajo	1
Bajo	2
Medio	3
Alto	4
Muy alto	5

Fuente: JACOBS, et al. Op. cit.

La valoración de SE realizada por los expertos se puede vincular a un programa que permita representar datos espaciales (e.g. ArcGIS o QGIS) y así mapear la oferta y la demanda de SE para el área de interés¹³³. En este caso, la puntuación se asoció a los tipos de coberturas de la tierra clasificadas en formato polígono para el área de influencia metropolitana de Cali. La valoración de SE ejecutada por cada experto fue compleja, articulando su conocimiento al formulario de consulta, la escala Likert, la matriz, las unidades de coberturas y la información espacial (Figura 11).

Figura 11. Esquema operativo de valoración de SE



Fuente: JACOBS, et al. Op. cit.

Una característica de un experto es que fuese especialista en por lo menos una de las áreas de SE. Además, fue muy importante que el experto conociera el contexto del área de estudio. Los expertos identificados estuvieron afiliados a instituciones públicas administrativas (alcaldías y gobernaciones), universidades y centros privados de investigación. El perfil incluyó profesionales de ciencias aplicadas, humanidades, ingeniería y socioeconomía. Los expertos fueron capaces de hacer juicios sustentados científicamente relacionando su experiencia profesional con los soportes técnicos de la investigación. Para identificarlos se aplicaron las siguientes estrategias.

¹³³ JACOBS, et al. Op. cit.

Se crearon cuatro grupos temáticos de expertos en esta consulta, así: expertos en a) áreas agrícolas, b) bosques y áreas seminaturales, c) áreas húmedas y superficies de agua y d) áreas artificializadas. Este proceso de creación se vio precedido de un **muestreo intencional**, cuyo sustento es el conocimiento previo y global del problema a tratar para así generar conocimiento nuevo con base en ese mismo saber¹³⁴. Entre todos los tipos de muestreo intencional, el que orientó la creación de grupos temáticos fue un **muestreo por expertos**. La intención fundamental de este tipo de muestreo es identificar aquellos expertos conocedores del tema y que están en capacidad de suministrar información precisa y relevante sobre el asunto de estudio¹³⁵. Esta técnica de muestreo orientó la creación de los grupos temáticos y favoreció la aplicación de criterios de selección de expertos por cada tema.

Se establecieron **criterios** de selección para identificar los expertos que participaron en la consulta virtual. Estos fueron:

1. **Nivel de conocimiento:** para contribuir con la calidad de los resultados generados a partir de la consulta, es necesario que el experto consultado tuviera los niveles de conocimientos adecuados. El perfil deseado incluyó: i) investigadores o académicos involucrados en temas relacionados con gestión de ciudades, urbanismo, ecología urbana, planificación urbana, ii) investigadores o académicos que trabajen estructura ecológica, servicios ecosistémicos, ecosistemas, biodiversidad y iii) funcionarios públicos involucrados a la gestión ambiental del Departamento del Valle del Cauca y Cauca, especialmente a profesionales que de forma directa o indirecta tienen como función velar por la conservación de los ecosistemas.
2. **Afinidad institucional:** con este criterio se vincularon a los profesionales o investigadores que trabajan o trabajaron en el área de estudio representando a diversas instituciones públicas o privadas. Con este criterio se recopilaban las estimaciones de los expertos conocedores del tema sin sesgos políticos o ideológicos.
3. **Interés por participar en la consulta:** una vez el nivel de conocimiento fue comprobado, se realizó un primer contacto telefónico o por correo electrónico para evidenciar el interés de cada experto para participar de la actividad. En esta comunicación se compartió el objetivo, los alcances y el acuerdo ético del anonimato para cada uno de los participantes. Este principio generó un compromiso entre el investigador y el experto a consultar.

Una dificultad de todas las valoraciones de SE es la identificación de técnicas de recolección de datos apropiadas para cuantificar estos servicios a cabalidad. Lo que se pretendió fue cuantificar las hipótesis de los expertos con referencia a la producción o consumo de SE por unidad de cobertura de la tierra. Teniendo en

¹³⁴ RINCÓN, Juan y BARRETO, Idaly. Técnicas de muestreo para investigadores sociales. En: PÁRAMO, Pablo (ed.). La investigación en ciencias sociales: estrategias de investigación. 2 ed. Bogotá: Universidad Distrital de Colombia. 2013. p. 33-44.

¹³⁵ *Ibíd.*

cuenta estas cuestiones, se desarrolló un **formulario de consulta virtual** en la plataforma de Google.

La plataforma de Google permite la creación de formularios atractivos con los que se puede recopilar y ordenar todo tipo de información. Entre las principales características de esta plataforma se destacan: la recepción inmediata de respuestas, personalización de formularios, opciones diversas de preguntas, la recopilación automática y ordenada de la información en hojas de cálculo, todo esto en marco de una plataforma gratis¹³⁶. Se crearon cuatro formularios de consulta relacionados directamente a cada grupo de coberturas —áreas agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua, y áreas artificializadas (demanda)—, esto favoreció el ajuste, envío y procesamiento de los formularios y las respuestas.

Cada uno de estos formularios se elaboró a partir de una estructura básica, así: a) introducción de la actividad con alcances y objetivos, b) fundamentos teóricos y prácticos de la consulta, c) soportes cartográficos, conceptuales y de terminología empleada, d) preguntas desarrolladas por secciones de SE, y e) apartado de comentarios libres para retroalimentar el ejercicio. La mayoría de componentes de los formularios son auto-explicativos, pero es necesario profundizar en el numeral de preguntas.

Todos los formularios contaron con 21 preguntas correspondientes al total de 21 SE de la tipología CICES. La consulta se desarrolló de forma estructurada, reproduciendo la configuración jerárquica de CICES. Es decir, las preguntas fueron dirigidas para la sección de SE aprovisionamiento, luego para los SE de regulación y mantenimiento y, por último, para los SE culturales. Con la estructura de consulta descrita, el tipo de pregunta de los formularios es otro asunto clave a considerar.

En total, Google ofrece nueve (9) opciones de preguntas para sus formularios, pero la que resultó ser más adecuada fue **Multiple choice grid** porque asocia directamente dos elementos en marco de una misma pregunta. En este caso, la cobertura de la tierra, en las filas, con la escala Likert de valoración de SE desde cero (0 – Sin relevancia) a cinco (5 – Muy alta relevancia), en las columnas. Por último, con el objetivo de valorar la oferta y la demanda de SE para cada cobertura de SE, se crearon dos tipos de formularios para valorar la oferta de SE y otro para apreciar la demanda de SE. Las diferencias entre estos dos formularios se presentan en el Cuadro 3. Adicionalmente, la estructura, secciones y opciones de preguntas de los formularios se ilustran en la Figura 12.

¹³⁶ GOOGLE. Formularios [en línea]. _____. [Consultado el 8 de agosto de 2017]. En: <https://www.google.com/forms/about/>

Cuadro 3. Características de los formularios virtuales.

Formulario	Pregunta clave	Intención de la pregunta	Coberturas valoradas por formulario
Oferta de SE	¿Qué capacidad tienen estas coberturas para proveer “SE”?	Valorar la capacidad de cada cobertura de la tierra para ofertar un SE particular	7 coberturas —áreas de producción agrícola—
			10 coberturas —(8) bosques y áreas seminaturales, (1) instalaciones recreativas* y (1) zonas verdes urbanas*—
			4 coberturas —áreas húmedas y superficies de agua—
Demanda de SE	¿Cuál es el nivel de demanda de “SE” de estas coberturas de la tierra?	Puntuar el nivel de demanda de todos los bienes y SE requeridos por cada cobertura de la tierra	18 coberturas — (9) áreas artificializadas, (7) áreas de producción agrícolas, (1) plantación forestal y (1) cuerpos de agua artificiales**—

* Coberturas seminaturales adicionadas que ofertan SE y contribuyen al bienestar humano

** Se consultaron todas las coberturas de la leyenda que demandan SE

Fuente: elaboración propia.

Los soportes incluyeron cartografía temática con la que se ofreció una contextualización completa a todos los participantes de la consulta. En ese sentido, se creó un **mapa interactivo** de coberturas de la tierra en la plataforma *ArcGIS Online*. Este sitio ofrece la creación y visualización en la web de mapas interactivos con una cuenta gratuita, asegurando que el mapa publicado estará visible en la web indefinidamente. La plataforma también ofrece servicios especiales a través de una cuenta de pago, pero considerando el objetivo de este ejercicio, la cuenta gratuita permitió publicar el mapa de coberturas sin inconvenientes.

ArcGIS Online es una plataforma de diseño sencillo y optimizado para realizar las tareas de manera eficiente. Dando clic en el botón “+” de la interfaz se cargaron las capas procesadas de coberturas de la tierra. El único cambio realizado tuvo que ver con la elección del mapa base que es una imagen de fondo que acompaña a las capas cargadas en la visualización. En la opción **Base Map** se seleccionó **OpenStreetMaps** porque adicionó información contextual al mapa del área de estudio como la división político administrativa y la jurisdicción de categorías de gestión ambiental como los PNN. A cada cobertura se le adicionó una descripción breve y una imagen que se desplegaría al momento que los expertos dieran clic al mapa. Esto se realizó desde el menú **Properties** de cada cobertura. Luego de guardar el mapa, el enlace web al mapa se produce automáticamente y se puede compartir por cualquier medio electrónico. Un pantallazo del mapa virtual se puede visualizar en la Figura 12, centro.

Con todos los formularios ajustados a los objetivos de la consulta y una descripción meticulosa de la metodología de consulta, el paso siguiente fue enviar cada uno de los formularios a los expertos identificados y así recibir sus respuestas. Con el procesamiento de esta información, se establecieron criterios ecosistémicos que ayudaron a identificar los elementos de la EEM.

Figura 12. Secciones del formulario de consulta. De izquierda a derecha: introducción, interpretación conceptual y preguntas de consulta.

Consulta a expertos sobre servicios ecosistémicos en el área de influencia metropolitana de Santiago de Cali

Debido a la concentración de actividades económicas, sociales y políticas, Santiago de Cali determina aspectos morfológico-funcionales de los municipios vecinos, consolidando lo que distingue como un área de influencia metropolitana, la cual no ha sido establecida jurídicamente dificultando a su vez el reconocimiento del tema ambiental como hecho supramunicipal. Este panorama evidencia la poca atención que se le ha prestado a la relación de dependencia que la sociedad humana de los ecosistemas que sostienen la vida. De ahí, que exista un vacío en términos de instrumentos de planificación, ordenamiento y gestión a escala supramunicipal p área de influencia metropolitana.

Para afrontar dicha problemática, esta investigación desarrolla una metodología mixta que se ejecuta en fases múltiples. En este momento nos encontramos en la etapa del establecimiento la estructura ecológica metropolitana (EEM), en la cual, a partir de identificación de cobertura la tierra, consultaremos a personas expertas sobre la capacidad de las coberturas para proveer servicios ecosistémicos. Para efectos de la consulta, se seleccionaron expertos —consideran conocimiento del tema y del área, su filiación institucional, y su experiencia en planificación y gestión pública, entre otros criterios— para hacer parte de cuatro grupos temáticos según el conjunto de coberturas identificadas. Estos cuatro grupos son: i) áreas de producción agrícola, bosques y áreas seminaturales; iii) áreas húmedas y superficies de agua; y por último, iv) área artificializadas. Mediante esta consulta, los expertos nos ayudarán a identificar la EEM a escala 1:25.000.

En su condición de experto(a), lo(a) invitamos a participar de este ejercicio diligenciando el presente formulario. Respetuosamente, le recordamos que la recepción de sus respuestas tiene como plazo máximo el día miércoles, 20 de septiembre de 2017, a las 23:59 horas. Muchas gracias.

NEXT Page 1

Never submit passwords through Google Forms.

Figura 1. Sistema socioecológico del área de influencia metropolitana de Cali

Figura 2. Coberturas de la tierra del área de influencia ambiental metropolitana de Santiago de Cali

Servicios ecosistémicos: aprovisionamiento

Los SE de aprovisionamiento son todas las salidas nutricionales, materiales y energéticas de los sistemas vivos. Esta sección de SE de aprovisionamiento se compone de tres divisiones: a) nutrición, b) material y c) energía.

SE de aprovisionamiento: nutrición

Esta división abarca todas las salidas de los sistemas vivos que son el aprovisionamiento nutricional y alimenticio de la sociedad.

1. ¿Qué capacidad tienen estas coberturas para proveer "biomasa para alimentación (1.1.1)"? *

	0 - Nula	1 - Muy baja	2 - Baja	3 - Media	4 - Alta	5 - Muy alta
Bosque denso	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bosque fragmentado	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Bosque ripario	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Plantación forestal	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Herbazal (páramos)	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vegetación secundaria o en transición	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Afloramientos rocosos	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Tierras desnudas y degradadas	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Fuente: elaboración propia en Formularios de Google.

3.3.4. Criterios ecosistémicos para identificar la EEM

Con el ánimo de tener definidas claramente las coberturas que constituirán la EEM y después de haber realizado la valoración por parte de los expertos, se procedió a establecer una serie de criterios para identificar la EEM. Precisamente, la matriz cruzada de valoración de SE fue la base potencial para considerar unos criterios de identificación de aquellas coberturas de la tierra estratégicas, únicas, valiosas y polifacéticas del área. Pero este potencial se encontraba oculto en la estimación de todos los expertos y, para descubrirlo, debían responderse las siguientes inquietudes: ¿las coberturas ofrecen un SE en la misma proporción?, ¿las coberturas proveen el mismo conjunto de SE?, ¿serán estos SE ofertados los más significativos para el bienestar humano y la escala de investigación?

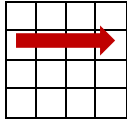
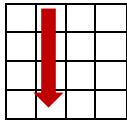
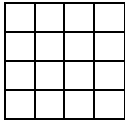
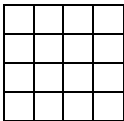
La literatura del método de la matriz de valoración de SE comparte que para aprovechar el potencial de este método deben considerarse una serie de indicaciones o retos. Primero, debe mejorarse la comparación cruzada entre los valores estimados, «verticalmente, dentro de las categorías de [SE] y en diferentes unidades espaciales [y] horizontalmente, dentro de unidades espaciales [coberturas] individuales en diferentes [SE]»¹³⁷. En segundo lugar, las comparaciones entre valoraciones de oferta, demanda, y otros datos o indicadores de la matriz, deben normalizarse en las mismas unidades y escalas para que los valores sean más comparables¹³⁸. Estas dos estrategias, la comparación bidireccional y la normalización de unidades, complementan los análisis de suma y totales realizados comúnmente por la comunidad científica y enriquecen el método de la matriz.

Así las cosas, en el Cuadro 4 se presentan los **criterios** ecosistémicos que ayudaron a identificar la EEM del área de estudio. En conjunto, estos criterios permitieron establecer en definitiva qué coberturas harían parte de la EEM, abarcando: 1) la multifuncionalidad de coberturas para descubrir aquellas que proveen un gran número de SE, 2) la singularidad entre coberturas y oferta SE para identificar relaciones especiales y únicas, 3) la capacidad ecosistémica de las coberturas para apreciar el balance entre la oferta y la demanda de SE, y 4) la importancia relativa de las coberturas que proveen los SE más significativos para la población del área de estudio. Los criterios de multifuncionalidad, capacidad e importancia relativa operan de forma semejante: a mayor número, mejor valoración para cada criterio. Al contrario, el criterio de singularidad es inverso: a menor número, mayor valoración porque la idea es resaltar los vínculos especiales de producción entre las coberturas y los SE.

¹³⁷ BURKHARD, *et al*, Ecosystem service potentials, flows and demands-concepts for spatial localisation, indication and quantification, Op. cit., p. 20.

¹³⁸ *Ibíd.*

Cuadro 4. Criterios ecosistémicos para identificar la EEM.

Criterio	Descripción	Hipótesis	Fórmula	Mayor y menor	Ilustración operativa	Soporte
Multifuncionalidad de cobertura	Conteo de SE que presta una misma cobertura	A mayor número de SE prestados por una cobertura, mejor aptitud para ser EEM	$\bar{x} (\Sigma SE / (21*5) \& \text{Cuenta } SE > 1 / 21)$	Máx:21 Mín: 0		POTSCHIN, Marion y HAINES-YOUNG, Roy. Ecosystem services: exploring a geographical perspective. En: Progress in Physical Geography. 2011. Vol. 35, No. 5; p. 575-594.
Singularidad de cobertura	Conteo de coberturas que ofrecen un mismo SE	A menor número de coberturas que prestan un SE, más estratégica su inclusión como elemento de la EEM. E.g. páramos o bosques y oferta de agua	$1 - (\bar{x} (\Sigma SE / (19*5) \& \text{Cuenta } SE > 1 / 19))$	Máx:19 Mín: 0		
Capacidad ecosistémica de cobertura	Expresa la relación entre las áreas productoras y consumidoras de SE	Coberturas con balance positivo son idóneas para ser EEM	Oferta SE - Demanda SE	Máx:+5 Mín:-5	Oferta  Demanda 	BURKHARD, <i>et al.</i> , 2012 & BURKHARD, <i>et al.</i> , 2014
Importancia relativa de cobertura	Valorar jerárquicamente los SE para calificar la importancia de cada cobertura que lo produce según el contexto y objetivo de investigación	Las coberturas que ofrecen los SE mejor puntuados en importancia deberían ser EEM	$\bar{x}$ valoración grupal	Máx: 5 Mín: 0	1. _____ 2. _____ 3. _____ 4. _____ 5. _____ 21. _____	KOSCHKE, <i>et al.</i> , Op. cit.

Fuente: elaboración propia.

El insumo base para crear los criterios de multifuncionalidad y singularidad fue la matriz de oferta de SE valorada por los expertos. Indistintamente que una cobertura ofrezca y/o demande SE en menor o mayor medida, no determina que tan multifuncional o singular es, pues el número de SE que provee será el mismo. Es decir que para estos criterios lo que más importa es «cuántos» SE están involucrados, sin menospreciar «cuánto» ofrece la cobertura por SE. Por tal motivo, la fórmula de estos criterios abarca un promedio entre la sumatoria de la oferta de SE y el conteo de SE ofertados por unidad de cobertura de la tierra.

Por otra parte, el criterio de capacidad ecosistémica se elaboró a partir de la resta entre la oferta y la demanda. Este resultado permitió conocer si el balance de SE por unidad de cobertura fue positivo (oferta > demanda), neutral (oferta = demanda) o negativo (oferta < demanda)¹³⁹. Operativamente, es el criterio de instrumentalización más sencillo porque tanto la oferta como la demanda, se valoraron con la escala Likert de seis niveles semicuantitativos.

El cuarto criterio de identificación recibió un tratamiento especial. En teoría, todas las coberturas ofrecen algún SE, pero eso no quiere decir que todos ellos sean igual de importantes para los seres humanos. En ese sentido, el grupo de investigación Territorios¹⁴⁰ tomó el rol de experto para estimar la importancia relativa de las coberturas que ofertan los SE. Así las cosas, el grupo respondió un formulario corto en la plataforma de Google en el que se consultó sobre la importancia relativa de los SE para el área de estudio, claro está, a partir de la misma escala Likert de valoración.

Llegados a este punto, con el planteamiento y sustento de los cuatro criterios de identificación de EEM, aún quedaba un reto por solventar: hacer comparables todos estos criterios entre sí. Lo que se elaboró fue una estrategia para **normalizar** los valores máximos y mínimos de los cuatro indicadores en la misma escala Likert de cero (0) a cinco (5) referenciada. Operativamente, dicha normalización se realizó en cuatro pasos:

1. Identificar el **recorrido** o rango para cada criterio restando su valor máximo y mínimo (Cuadro 5).
2. Determinar el **factor** de conversión dividiendo la unidad entre el número de clases deseado (seis en este caso - 1/6).
3. Crear los **rangos** con valores hipotéticos multiplicando los seis factores por el valor del recorrido para cada criterio (multiplicar punto 1 y 2).
4. Asignar una **clase** de cero (0) a cinco (5) para cada rango creado.

Los valores hipotéticos fueron priorizados sobre los valores ajustados a los datos para evitar sobre/sub estimaciones entre los criterios, además de volver el método más genérico, replicable y comparable con otros ejercicios. En el Cuadro 6 se presentan los pasos de normalización 2, 3 y 4.

¹³⁹ Ibid.

¹⁴⁰ Grupo clase A de COLCIENCIAS, coordinado por Oscar Buitrago, PhD. En Geografía. Es un equipo multidisciplinar que por su conocimiento profundo sobre la temática de los SE, las coberturas, el problema de investigación y el área de estudio, participó como experto de la consulta.

Cuadro 5. Valores máximos y mínimos hipotéticos por criterio.

Criterio	Máx	Mín
Multifuncionalidad	21	0
Singularidad	19	0
Capacidad	5	-5
Importancia	5	0

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 6. Normalización de datos hipotéticos por criterio.

Clase	Factor	Multi.	Imp.	Cap.		Clase inv.	Sing.	Factor inv.
0	0,2	3,5	0,8	-3,3		5	3,2	1,0
1	0,3	7,0	1,7	-1,7		4	6,3	0,8
2	0,5	10,5	2,5	0,0		3	9,5	0,7
3	0,7	14,0	3,3	1,7		2	12,7	0,5
4	0,8	17,5	4,2	3,3		1	15,8	0,3
5	1,0	21,0	5,0	5,0		0	19,0	0,2

Fuente: elaboración propia.

Por último, estos criterios tienen su fundamento en la estadística bayesiana en vista de que tienen como base la percepción de expertos, y vinculan parámetros de estadística clásica durante el procesamiento de los datos. Con estos criterios se crearon matrices de multifuncionalidad, singularidad, capacidad e importancia de SE. El proceso de aplicar estos criterios en la identificación de la EEM es el último paso de esta sección.

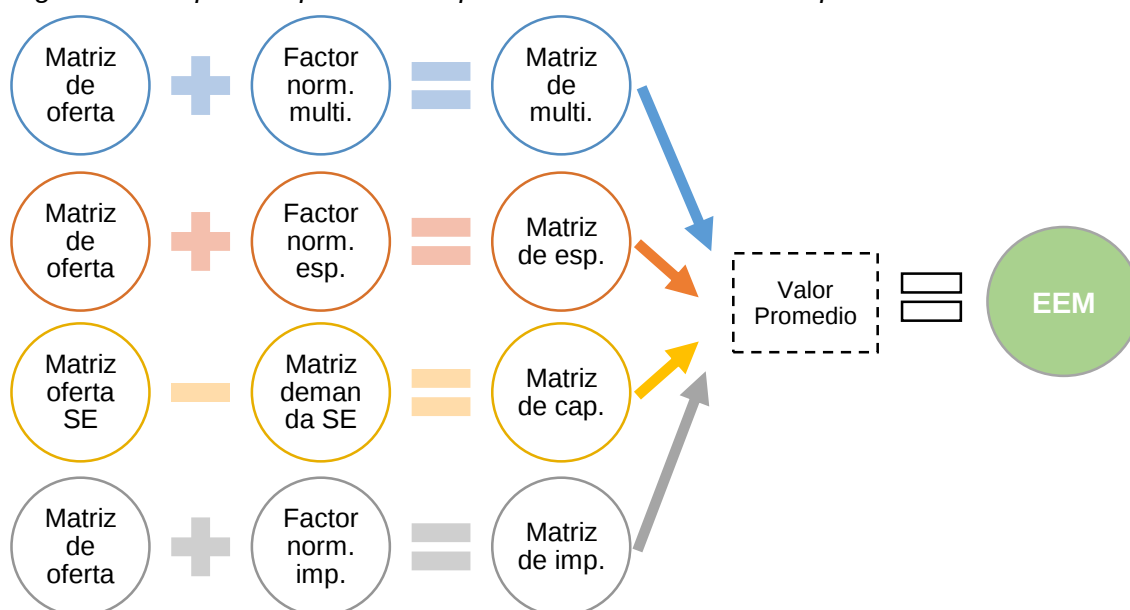
3.3.5. Operaciones entre criterios de SE y clasificación de los elementos de la EEM

La aplicación de los criterios ecosistémicos permitió identificar la EEM del área de estudio. Se creó una matriz para cada criterio a partir de los valores promedio de las calificaciones dadas por cada experto a cada cobertura según el conjunto de SE. Cruzando la información entre las cuatro matrices, se identificaron los elementos de la EEM. Expuesto de esta forma, es fácil proyectar las dos etapas y las operaciones involucradas para identificar la EEM: i) creación de las matrices por cada criterio y ii) procesamiento de los datos por unidad de cobertura de la tierra. Estas etapas y sus vínculos se representan en la Figura 13.

En primera instancia, la **creación de una matriz por cada criterio** se realizó mediante una operación matemática muy usada. La operación se conoce como una transformación escalar de una matriz, y consiste en multiplicar cada entrada de la matriz por un factor¹⁴¹ (en este caso, el valor del Cuadro 6). Como se especifica en la Figura 13, la matriz de oferta se multiplicó por el factor de normalización de cada criterio y el resultado fue una matriz diferente para cada uno de ellos. Luego, se integraron las cuatro matrices con un promedio.

¹⁴¹ STANFORD UNIVERSITY. Matrix Operations [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 13 de septiembre de 2017]. En: <http://ee263.stanford.edu/notes/matrix-primer-lect2.pdf>

Figura 13. Esquema operativo del procesamiento de matrices para identificar la EEM.



Fuente: elaboración propia.

Como la valoración de SE fue realizada por grupos temáticos, hubo unos campos de la matriz de oferta que no tuvieron valor. Específicamente, durante el proceso de consulta no se preguntó por la oferta de SE del conjunto de coberturas de la tierra artificializadas porque los antecedentes mostraron que este tipo de coberturas no provee SE de forma significativa. El inconveniente principal es que estos campos vacíos se convertían en «falsos ceros» (0), pues es la manera como las hojas de cálculo electrónicas asumen celdas sin valor. Para solventar esta situación, se creó en las matrices un procedimiento que multiplicara exclusivamente los campos con valores y asignara correctamente los ceros (0) donde deberían estar.

Con las matrices por criterio creadas, se procesó toda esta información para cada cobertura de la tierra. Este procesamiento incluyó una etapa de integración de criterios y otra de clasificación de resultados. En primer lugar, con la fase de **integración de criterios** se procesó cada cruce de las cuatro matrices con un promedio sin incluir campos vacíos. Si cada matriz tiene 28 filas de coberturas y 21 columnas de SE, son 588 celdas por matriz, y multiplicado por cuatro se tiene que fueron 2.352 intersecciones procesadas. Es un número amplio de datos, pero se procesó exitosamente con la programación correcta de las hojas de cálculo.

Para evitar la influencia de los campos vacíos sobre el resultado y con la intención de tener los datos normalizados, la fórmula empleada para integrar la información de los criterios fue la siguiente:

$$EEM = \frac{\sum(\text{multifuncionalidad; singularidad; capacidad; importancia})}{\text{Conteo (mmultifuncionalidad; singularidad; capacidad; importancia)} \times 5}$$

La fórmula realizó una sumatoria de todas las cuatro matrices y dividió ese resultado por el conteo de celdas que tuvieron valor numérico, para finalmente multiplicarse por la nota máxima, cinco (5). Es decir que, con esta fórmula se dividieron los datos numéricos de manera correcta, sin ponderación, para no castigar excesivamente a las coberturas que no fueron consultadas en la valoración de la oferta o la demanda de SE.

El último paso para identificar los elementos de la EEM tiene que ver con la **clasificación de resultados**. Cada celda de esta matriz final tuvo como puntaje máximo un valor de uno (1), lo que quiere decir que el máximo puntaje que tendrá cada cobertura de SE será 21, precisamente el número de SE valorados. El Cuadro 7 presenta las tres clases orientativas para seleccionar la EEM. Se crearon tres clases porque representan la diversidad característica de las coberturas de la tierra, y era muy arbitrario usar clasificaciones binarias cuando se tienen elementos artificiales, seminaturales y naturales, cada uno de ellos con diferentes grados de intervención. Estas tres clases fueron:

- **Elementos de la EEM:** las coberturas de la tierra clasificadas en la clase 3 (medio), 4 (alto) o 5 (muy alto), que cumplieron con más del 50% de todos los cuatro criterios establecidos.
- **No son elementos de la EEM:** las coberturas de la tierra que cumplieron solamente con el 17% de los cuatro criterios formulados, clasificadas en la clase 0 (sin relevancia).
- **Podrían ser elementos de la EEM:** coberturas de la tierra clasificadas en las clases 1 (muy bajo) y 2 (bajo), que cumplieron con el 17% hasta el 50% de los criterios propuestos.

Cuadro 7. Clases para identificar la EEM.

%	Valor	Clase		Resultado
17	3,5	0	Sin relevancia	No es EEM
33	7,0	1	Muy bajo	Podría ser EEM
50	10,5	2	Bajo	
67	14,0	3	Medio	Es EEM
83	17,5	4	Alto	
100	21,0	5	Muy alto	

Fuente: elaboración propia.

El proceso de identificación de la EEM es extenso y complejo, partiendo desde la consulta a expertos, el procesamiento de toda la información recopilada y la aplicación de criterios de identificación para definir los elementos de la EEM. Con la intención de analizar los resultados y validar el procesamiento de los datos, se realizó un **análisis estadístico multivariado**.

El análisis estadístico multivariado permite la exploración de relaciones entre muchos tipos diferentes de atributos¹⁴². Es una de las técnicas estadísticas más empleadas en muchas áreas del conocimiento porque siempre es significativo estudiar las posibles relaciones que existan en un conjunto de datos. Comúnmente, se aplica este análisis para reducir el conjunto de datos conservando los más significativos, pero también se puede emplear para estudiar o discutir qué tan relevante es el aporte de una variable sobre el total.

En este contexto, aplicando el análisis multivariado a esta investigación, se descubrió cuáles son las coberturas que más aportan por cada criterio lo que permitió identificar una estructura subyacente a partir de sus relaciones. Dicho en otras palabras, sobresalieron las coberturas con mayor significancia para todos los criterios. Por este motivo, los resultados del análisis multivariado se consideraron como un estudio o validación para el proceso de identificación de los elementos de la EEM.

El análisis multivariado se aplicó a las matrices de cada criterio empleando el software estadístico RStudio 2.43. RStudio es un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, que abarca, principalmente, el análisis estadístico¹⁴³. La librería importada para realizar el análisis fue **ADE4**, ejecutando las funciones: **acp-dudi**, para ejecutar un análisis de componentes principales de las variables, **inertia-dudi** que produce la varianza del análisis listando las contribuciones totales y relativas de cada variable, y por último, la función **s.cocircle** para crear un gráfico circular de correlaciones entre variables y **s.label** para elaborar un plano factorial donde se agrupan las variables según su nivel de significancia. Estos procesos se ordenaron en cascada en un código en lenguaje de programación R. La fortaleza de los métodos descriptivos multivariados son las gráficas y las salidas numéricas son el insumo para su creación¹⁴⁴. La interpretación de estos resultados se hace efectiva analizando y observando el agrupamiento y la posición de cada variable en los distintos gráficos.

Llegados a este punto, fue posible identificar los elementos de la EEM a partir de criterios ecosistémicos. Sin embargo, la metodología de esta investigación tiene un componente final: analizar la gestión de las categorías normativas ambientales sobre la EEM. Ese será el tema abordado a continuación.

¹⁴² ESRI. Multivariate Tools [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de noviembre de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-multivariate-tools.htm>

¹⁴³ RSTUDIO. About RStudio [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 10 de noviembre de 2017]. En: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/>

¹⁴⁴ *Ibíd.*

3.4. FASE 4. CATEGORÍAS ACTUALES DE GESTIÓN AMBIENTAL QUE SE SUPERPONEN A LA PROPUESTA DE EEM

Con esta fase metodológica, se pretende identificar las categorías de planificación ambiental aplicables a la EEM. Con una estructura descentralizada, el Estado realiza la gestión y planificación ambiental del territorio a través de legislaciones con diversos objetivos y escalas de aplicación. Dicha tarea se desarrolla de forma jerárquica entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR) y las Corporaciones de Desarrollo Sostenible, Departamentos y Distritos o Municipios.

Esta actividad se realizó en dos fases. La primera constó de la revisión bibliográfica de los instrumentos normativos de escala nacional —algunos incluidos en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP)— y otros de carácter regional para identificar el objetivo de la norma. En segundo lugar, se emplearon datos espaciales oficiales de los instrumentos normativos para valorar geográficamente su aplicación. Esta información se obtuvo de los portales web del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y el Sistema de Información Geográfico para el Ordenamiento Territorial (SIG-OT).

Técnicamente, los datos se procesaron comparando las áreas gestionadas por las categorías de protección propuestas por el SINAP con los elementos de la EEM a partir de la capa de coberturas de la tierra que se produjo en esta investigación. Esto se realizó con el uso en cascada de las herramientas **Clip**, **Intersect**, y **Add Geometry Attributes** de ArcGIS 10. **Clip** permitió cortar la jurisdicción de los instrumentos con base al área de estudio, con **Intersect** se identificaron las coberturas abarcadas en dicha jurisdicción, y la herramienta **Add Geometry Attributes** posibilitó calcular las áreas de cada uno de estos productos.

Al no contar con información espacial oficial sobre la delimitación de la franja protectora de río y cuerpos de agua, se procedió a simular la aplicación de esta norma. El proceso consistió en crear un área de influencia de 30 metros de extensión en ambas riberas de los ríos y cuerpos de agua digitalizados para el área de estudio. CORINE *Land Cover* para Colombia¹⁴⁵ establece que los ríos identificables a una escala 1:100.000 tienen un ancho de 50 metros, pero como esta capa de coberturas se produjo en esta investigación a escala 1:25.000, se tiene un ancho de ríos hipotético de 12,5 metros para el cauce principal de cada una de las cuencas hidrográficas abarcadas.

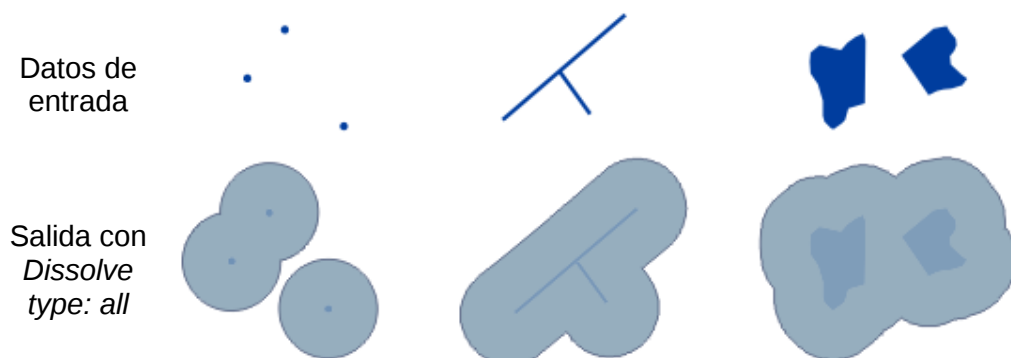
La herramienta **Analysis > Proximity > Buffer** de ArcGIS permitió crear con facilidad el área de influencia con la extensión deseada sin inconveniente (Figura 14). Las opciones configuradas fueron **Buffer Distance** para que el área de influencia tenga la extensión necesaria y **Dissolve Type: All** que posibilitó la combinación de todas las áreas de influencia en una sola eliminando cualquier superposición¹⁴⁶. El procedimiento tuvo dos etapas: i) se ingresó un valor de 12,5

¹⁴⁵ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. cit.

¹⁴⁶ ESRI. Buffer [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de noviembre de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/buffer.htm>

metros en *Buffer Distance* para simular el ancho del río a partir de la línea de cauce digitalizada, y ii) con el ancho hipotético del río, se estableció otra área de influencia de 30 metros para crear su franja protectora.

Figura 14. Creación de un área de influencia.



Fuente: ESRI. Buffer. Op. cit.

CAPÍTULO 4. SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»: LA EMC Y LA EEM

Los resultados de esta investigación se presentan en este capítulo. Los productos están vinculados con la metodología y serán expuestos en el mismo orden de sus fases operativas. Esta sección comprende: área de estudio; EMC; coberturas de la tierra del área de estudio; EEM; y las categorías de protección ambiental que instrumentos de gestión ambiental que operan sobre la EEM. Para favorecer la interpretación de esta sección de resultados, en los Cuadros 8 y 9, se presenta una nomenclatura con los nombres de los SE y las coberturas de la tierra involucrados en las fases metodológicas.

Cuadro 8. Nomenclatura de las 28 coberturas de la tierra.

#	Sigla	Nombre cobertura	#	Sigla	Nombre cobertura
1	TUC	Tejido urbano continuo	15	MCPN	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
2	TUD	Tejido urbano discontinuo	16	MPN	Mosaico de pastos con espacios naturales
3	ZIC	Zonas industriales o comerciales	17	BDE	Bosque denso
4	RVF	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	18	BFR	Bosque fragmentado
5	AER	Aeropuertos	19	BRI	Bosque ripario (ribereño)
6	ZEM	Zonas de extracción minera	20	PFO	Plantación forestal
7	ZDR	Zonas de disposición de residuos	21	HER	Herbazal (páramos)
8	ZVU	Zonas verdes urbanas	22	VST	Vegetación secundaria o en transición
9	IRE	Instalaciones recreativas	23	AFR	Afloramientos rocosos
10	CTR	Cultivos transitorios	24	TDD	Tierras desnudas y degradadas
11	CAZ	Caña de azúcar	25	AHC	Áreas húmedas continentales (humedales)
12	OCP	Otros cultivos permanentes	26	RIO	Ríos
13	PLI	Pastos limpios	27	LLC	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
14	PAR	Pastos arbolados	28	CAA	Cuerpos de agua artificiales

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 9. Nomenclatura de los 21 SE.

#	Sigla	Nombre SE	División SE
1	BI-N	Biomasa	Nutrición
2	AG-N	Agua	
3	BI-M	Biomasa	Materiales
4	AG-M	Agua	
5	MAB	Materiales abióticos metálicos y no metálicos	Energía
6	BI-E	Biomasa	
7	FAR	Fuente abiótica renovable	
8	FANR	Fuente abiótica no renovable	
9	MSV	Mediación por sistemas vivos	Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras molestias
10	FMA	Flujos de masa	Regulación de flujos
11	FLI	Flujos de líquido	
12	FGA	Flujos de gases / aire	
13	MHRG	Mantenimiento del ciclo de vida, hábitat y protección de reserva genética	Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas
14	CPE	Control de plagas y enfermedades	
15	FCS	Formación y composición del suelo	
16	CQA	Mantenimiento de la composición química del agua	
17	CAC	Composición atmosférica y regulación del clima	
18	EXF	Experiencia física	Interacción física e intelectual
19	EIR	Intelectual y representativa	
20	EEE	Espiritual y/o emblemática	Interacción simbólica y espiritual
21	EVN	Existencia y valor intrínseco natural	

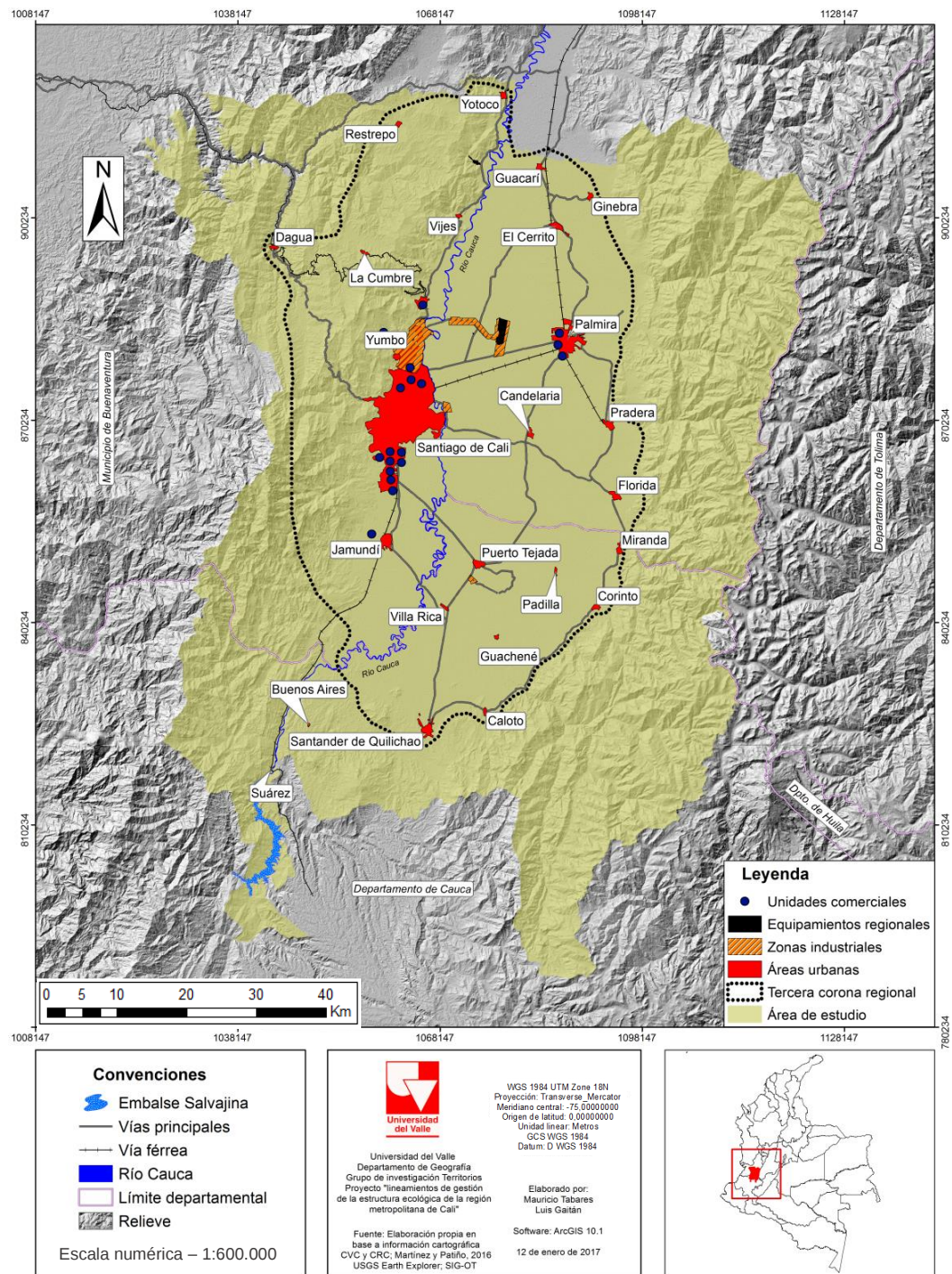
Fuente: elaboración propia.

4.1. DELIMITACIÓN DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»

Con la aplicación de los criterios enunciados en el capítulo de metodología, numeral 3.1, página 60, se obtuvo una delimitación del sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali». Este sistema cuenta con un área de 8.549 km² y se presenta en la Figura 15. En ese mismo mapa se encuentran superpuestos los elementos de la EMC. El perímetro del área involucra el 16,6% del área de jurisdicción de los departamentos del Valle del Cauca y Cauca, abarcando 15 municipios del Valle del Cauca y 14 del Cauca localizados a partir de la cota altitudinal de los 800 msnm. El área incorpora 30 cuencas hidrográficas —29 vierten al río Cauca y una al océano Pacífico—. De sur a norte, el valle del río Cauca presenta un cambio geomorfológico abrupto; pasa de múltiples cadenas montañosas a una planicie aluvial extensa.

El Cuadro 10 presenta las cuencas hidrográficas, su vertiente, el área y la CAR que las ordena. Mientras son 13 las cuencas en la jurisdicción de la CRC, son 15 las cuencas que están ordenadas por la CVC, con un caso especial de dos (2) cuencas en el límite de la jurisdicción de ambas corporaciones. Las cuencas hidrográficas de mayor extensión en el área son Palo de 1.509 km², Guachal con 1.163 km² y Dagua con 1.104 km² (recortada con la cota mínima de 800 msnm).

Figura 15. Mapa del área de estudio (polígono amarillo) y la EMC.



Fuente: elaboración propia en ArcGIS 10.

Cuadro 10. Cuencas hidrográficas comprendidas en el área de estudio.

Cuenca hidrográfica comprendidas en el área de estudio.				
#	Cuenca hidrográfica	Vertiente	CAR	Área (km ²)
1	Asnazú	Cauca	CRC	34
2	Cañaveralejo			15
3	Cauca (Embalse Salvajina)			238
4	Directos			78
5	La Quebrada			161
6	Palo			1.509
7	Qda. La Tabla			41
8	Qda. Sabaleta			6
9	Qda. Saperá			16
10	Quinamayó			290
11	Santo Domingo			10
12	Teta			179
13	Zanjón Oscuro			95
14	Desbaratado		CRC-CVC	165
15	Timba			419
16	Amaime		CVC	1.043
17	Arroyohondo			65
18	Cali			215
19	Claro			324
20	Dagua (800 msnm)	Pacífico		1.104
21	El Cerrito	Cauca		126
22	Guabas			238
23	Guachal (Bolo-Fraile)			1.163
24	Jamundí			345
25	Lilí-Meléndez-Cañaveralejo			191
26	Mulaló			48
27	Sabaletas		173	
28	Vijes		87	
29	Yotoco		106	
30	Yumbo		67	
Total				8.549

Fuente: elaboración propia.

La Figura 16 comprende la superposición de la división político administrativa de los municipios abarcados en el área con las cuencas hidrográficas (numeral a) y la altitud del área de estudio (numeral b). En primera instancia, los datos de altitud del área revelan que la cota más baja es de 702 msnm localizada al nor-oeste del área en Dagua, y la cota máxima es 4.271 msnm al sur-occidente sobre diferentes puntos de la cordillera central. El mapa b de la Figura 16 evidencia una situación muy particular: la jurisdicción de las unidades de cuencas por la jurisdicción administrativa de municipios. Así pues, se tiene que la cuenca de mayor área (río Palo) está bajo la autoridad de nueve (9) municipios, lo mismo ocurre con la cuenca Guachal dividida por cuatro (4) municipios y la cuenca de Dagua bajo la jurisdicción de cinco (5) municipios. Esta desarticulación entre los límites biofísicos y los administrativos es muy poco coherente, más aún, considerando la autonomía de cada municipio para gestionar su territorio.

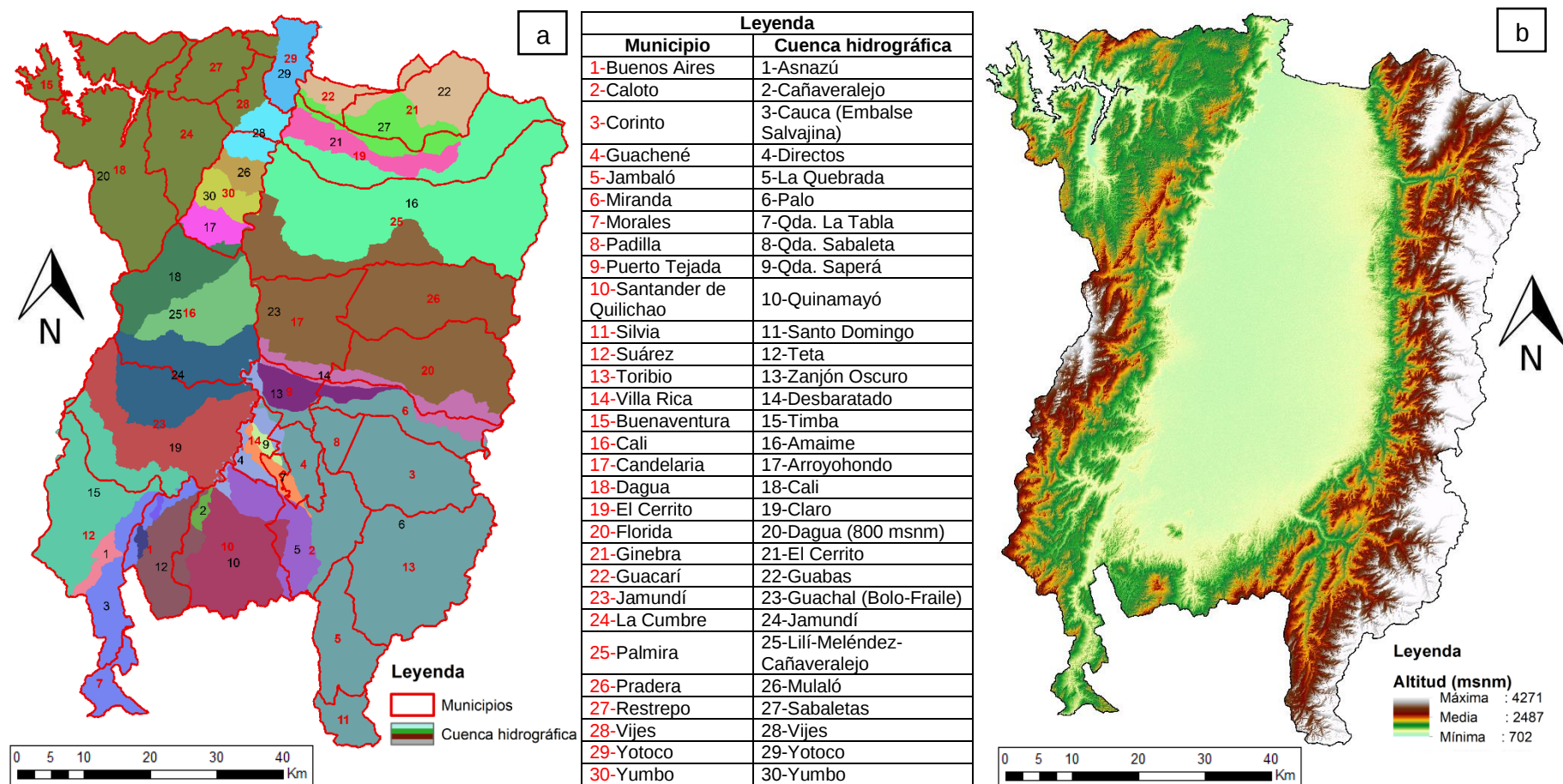
Diferentes procesos históricos como la migración poblacional, instalación de equipamientos regionales, destinación de uso de suelo en actividades agrícolas extensivas, etcétera, influyeron en la consolidación y distribución espacial del

sistema de ciudades actual sobre la planicie aluvial del río Cauca. Durante esta etapa, las manchas urbanas se fueron distribuyendo en ambas márgenes del río Cauca. De ellas, la de mayor extensión corresponde a Santiago de Cali. En esta área existen corredores metropolitanos de transporte y comunicación que consolidan una red doble calzadas, vías principales y red de ferrocarril.

Esta área también congrega zonas industriales y grandes superficies comerciales, así como una serie de equipamientos regionales: aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón, relleno sanitario Colomba-Guabal, estación de transferencia de residuos Palmaseca, el embalse Salvajina, entre otros. En conjunto, los elementos citados estimulan la consolidación y funcionamiento de un sistema urbano mesoescalar localizado al suroccidente del país, que tiene como núcleo la ciudad de Cali con satélites complementarias¹⁴⁷. La espacialización de este sistema se conoce aquí como la EMC.

¹⁴⁷ BAYONA, José. Misión para el fortalecimiento del sistema de ciudades. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2014. 115 p.

Figura 16. Mapa de división política-administrativa y de cuencas hidrográficas (a). Mapa de altitud del área de estudio (b).



Escala numérica 1: 600.000. Fuente: elaboración propia.

4.2. ESTRUCTURA METROPOLITANA CONSTRUIDA DEL ÁREA DE ESTUDIO (EMC)

Con una visión sistémica, se identificó la existencia de una estructura urbana artificial que funciona en el área de estudio. La EMC del área de influencia metropolitana de Cali se presentará a partir de sus componentes: superficie natural, sistema físico y redes de transporte. Finalizando, se identificará una serie de factores detonantes que estimularon la consolidación de esta EMC que funciona actualmente. Los componentes de la EMC fueron identificados a partir de información secundaria, así:

- La superficie natural se identificó a partir de la división de cuencas hidrográficas y el DEM ASTER¹⁴⁸. Con esta información se describieron las generalidades de la superficie terrestre y se discutió la localización geográfica de la EMC.
- A partir de la base de datos geográfica compartida por Martínez y Patiño¹⁴⁹, se reconoció el sistema físico de la EMC. Este incluyó equipamientos colectivos, áreas urbanas, áreas industriales y comerciales.
- Las redes de comunicación y transporte de la EMC se capturaron manualmente para toda el área de estudio. Esto se debe a la ausencia de datos que representaran fielmente la realidad de la superficie y de las carreteras principales al igual que la red ferroviaria.

Para comprender la **superficie natural** de la EMC es necesario considerar su situación geográfica¹⁵⁰ particular. En primera instancia, la EMC se emplaza en el valle tectónico del río Cauca, entre las cordilleras Occidental y Central de Colombia. Con una mirada del espacio abstracta, la presencia del Valle del río Cauca implica un cambio geomorfológico abrupto; de múltiples cadenas montañosas, la superficie se transforma en una planicie de más de 60 kilómetros en su punto más ancho de oriente a occidente¹⁵¹. Este hecho estimuló los usos particularmente extensivos del suelo en el Valle del Cauca, favoreciendo la distribución espacial de distintas zonas urbanas y su conexión a través de redes de transporte ferroviarias y de doble calzadas.

En segundo lugar, la red hídrica está estructurada por el drenaje del valle tectónico, esto es por el río Cauca. Este río tuvo gran influencia en la proyección de un sistema urbano de ciudad principal y puntos complementarios en la zona de estudio. En gran medida, la configuración y funcionalidad actual de la EMC están relacionadas al proceso artificial de regulación del caudal del río Cauca con la construcción del embalse La Salvajina al norte del Cauca.

¹⁴⁸ NASA JPL. Op. cit.

¹⁴⁹ MARTÍNEZ y PATIÑO. Op. cit.

¹⁵⁰ Mientras el término «sitio» sugiere la localización absoluta —e.g. coordenadas geográficas norte y oeste—, la «situación» indica la localización relativa de un asentamiento con las características físicas y culturales de los alrededores.

¹⁵¹ Medición propia del DEM ASTER en ArcGIS 10.

Esta superficie natural soporta la existencia y expansión del **sistema físico** de la EMC. Este comprende los equipamientos colectivos y la infraestructura física instalada en el área de estudio. Como se presenta en el Cuadro 11, el sistema físico comprende 27 áreas urbanas, entre todas ellas, la de mayor extensión corresponde a Santiago de Cali. Al interior de esta área se congregan más de cuatro millones de habitantes, habitando en Cali más de la mitad de esas personas. Mientras el Cuadro 12 enseña los cuatro grandes equipamientos regionales que contiene la EMC, el Cuadro 13 muestra las características de las cinco zonas industriales y las 18 grandes superficies comerciales abarcados en el área. En la Figura 15 (página 87), se observa que la superficie física de la EMC se instaló en el centro del área, ocupando la planicie aluvial del río Cauca, principalmente la margen occidental del río. Los equipamientos colectivos y las áreas urbanas están dispuestas en un sentido sur-norte a medida que la geomorfología del área lo permitió.

Cuadro 11. Descripción general de los municipios abarcados en el área de estudio.

#	Municipio	Dpto.	Población total (2016)	Área (km ²)	Porcentaje en AE (%)	Altitud casco urbano (msnm)
1	Buenos Aires	Cauca	32.834	225	87	1.220
2	Caloto		17.680	269	100	1.102
3	Corinto		32.296	325	93	1.066
4	Guachené		19.859	100	100	995
5	Jambaló		17.939	234	83	2.290
6	Miranda		40.455	189	99	1.180
7	Morales		26.167	513	14	1.677*
8	Padilla		7.837	70	100	1.001
9	Puerto Tejada		45.840	108	100	967
10	Santander de Quilichao		95.041	514	79	1.055
11	Silvia		32.315	626	13	2.508*
12	Suárez		18.610	594	76	1.075
13	Toribio		29.496	493	100	1.709
14	Villa Rica		16.397	80	100	971
15	Buenaventura	Valle del Cauca	407.675	6.254	1	11*
16	Cali		2.394.925	570	100	960
17	Candelaria		82.908	292	100	976
18	Dagua		36.524	916	64	874
19	El Cerrito		57.747	440	100	992
20	Florida		58.343	404	100	1.045
21	Ginebra		21.239	267	100	1.035
22	Guacarí		34.799	162	51	971
23	Jamundí		122.071	618	100	971
24	La Cumbre		11.564	255	100	1.575
25	Palmira		306.706	1.003	100	1.009
26	Pradera		55.842	356	100	1.063
27	Restrepo		16.276	135	98	1.407
28	Vijes		11.142	112	100	970

29	Yotoco		16.338	316	40	958
30	Yumbo		119.932	233	100	967
Total			4.186.797	16.675		

*Cascos urbanos no comprendidos en el perímetro del área de estudio.

Fuente: DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005 – 2020. Bogotá: _____, 2010. 300 p. & NASA JPL. Op. cit.

Cuadro 12. Altitud de los grandes equipamientos del área de estudio.

Elemento		Relaciones en contexto	Altitud (en msnm)
Grandes equipamientos	Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	Conecta la región con el País y el mundo	964
	Estación de transferencia de Palmaseca	Recibe residuos de Cali, Calima, Florida, Candelaria, Yumbo, Restrepo, Jamundí, Corinto y Villa Rica – Cali, Popayán y Miranda	954
	Relleno sanitario Colomba – Guabal		976
	Embalse e hidroeléctrica La Salvajina	El embalse La Salvajina regula el caudal del río Cauca y produce energía eléctrica	1136

Fuente: MARTÍNEZ y PATIÑO. Op. cit. & NASA JPL. Op. cit.

Cuadro 13. Altitud de las zonas industriales y comerciales del área de estudio.

Elemento	Contexto del área de estudio	Altitud (en msnm)
Corredores metropolitanos	Red de carreteras (1038 km) y ferrocarril (149 km)	De 800 a 2000 (aproximados)
Zonas industriales y francas en Cali. Yumbo, Palmira y Caloto	Zona industrial de ACOPI	956
	Zona franca del Pacífico	951
	Zona franca Palmaseca	960
	Zona industrial La Nubia	952
	Parque Industrial del Cauca	969

Fuente: MARTÍNEZ y PATIÑO. Op. cit. & NASA JPL. Op. cit.

El componente de la EMC restante son las **redes de comunicación y transporte**. En el área de estudio existe una red de corredores metropolitanos consolidada en carreteras de más de 1.038 km de longitud, al igual que más de 149 km de red ferroviaria. En el Cuadro 13 se muestra que los corredores metropolitanos existen desde una altitud de los 800 msnm a más de los 2.000 msnm. Analizando su distribución espacial, se observa que estos corredores están distribuidos en todas las direcciones del área persiguiendo la ruta más directa y de menor costo para conectar todas las áreas urbanas y los equipamientos de la EMC. Esto se debe a que las redes de transporte y comunicación tiene un rol clave para esta estructura: estimulan el funcionamiento de sus componentes perpetuando la existencia y la posible expansión del sistema. Estos componentes de la EMC, su disposición y aparición en el área persiguieron unas iniciativas particulares, situación que involucra la revisión de algunos factores históricos.

La expresión urbana de la EMC se consolidó en distintos momentos, por distintas razones, y a partir de distintos trasfondos culturales. Existen unos **procesos**, eventos y contextos históricos que determinaron la consolidación metropolitana de Santiago de Cali. Cali ingresó al siglo XX como una ciudad de tipo nuclear,

reproduciendo en su perímetro urbano un modelo agrícola tradicional basado en la hacienda colonial. Pero, a partir de una serie de factores detonantes, la Ciudad sobrellevó procesos sustanciales de transformación que la situaron como un polo de desarrollo regional y nacional. A partir de Edgar Vásquez¹⁵², se identificaron los siguientes cinco factores:

- En 1910, Santiago de Cali se designó como capital vallecaucana.
- En 1954 se creó la CVC.
- A partir de 1960, con el bloqueo a Cuba del mercado norteamericano, crecieron considerablemente la producción y exportación de azúcar, así como el área sembrada para la actividad cañera.
- En 1961, se crearon las Empresas Municipales de Cali (EMCALI).
- Durante el siglo XX se desarrolló un proceso de modernización agrícola, urbanización y sistema vial e industrialización.

Grosso modo, a partir de esta serie de elementos, Santiago de Cali se consolidó como eje central de un área de influencia metropolitana. De esta forma, se estimuló una configuración de ocupación mesoescalar de la superficie. Analizando desde un sentido crítico y asociando los cinco factores referenciados, se evidenció que las dimensiones políticas, culturales y sociales, combinadas con la economía, articularon el patrón espacial general de ocupación del área de estudio. En gran medida, las personas no son las responsables de este hecho, son las élites sociales que han estimulado estos factores detonantes, los han sustentado, y desean seguirlos perpetuando porque se usufructúan de este modo de ocupación.

Una lectura espacial, económica e histórica de la Figura 15 (página 87) evidencia la compleja articulación que tiene la EMC: cuenta con la expresión espacial de la producción (zonas industriales, zonas francas y equipamientos), la localización del consumo y la mano de obra en masa (áreas urbanas) los elementos que garantizan el intercambio (corredores metropolitanos donde circulan bienes, personas y mercancías). Por lo tanto, la configuración de la EMC es la «expresión espacial del modelo capitalista dominante (...) que posiciona la dimensión económica como la base de la organización del espacio»¹⁵³. La distribución de la EMC expresa una organización estrictamente funcional, en donde los elementos requeridos para satisfacer las necesidades de la sociedad se toman de la naturaleza. Las consecuencias de este modo de ocupación no serán tratadas en este documento, pero contextualizan plenamente el análisis del sistema socioecológico del área de estudio. Con la intención de instrumentalizar una relación más recíproca y sostenible entre las estructuras naturales y artificiales, fue necesario identificar sus componentes, lo que quiere decir, clasificar el inventario de coberturas de la tierra de la superficie.

¹⁵² VÁSQUEZ. Op. cit.

¹⁵³ PEET. Op. cit., p. 125.

4.3. UNIDADES DE ANÁLISIS DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO: COBERTURAS DE LA TIERRA DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para efectos de determinar la EEM, como ya se mencionó en el capítulo de metodología, fue necesario realizar un proceso de selección de coberturas, el cual fue realizado a partir de la consulta a expertos y el posterior manejo de los datos expresados por ellos. A continuación, se presentan los principales resultados de los procesos realizados para llegar a la EEM. Uno de esos productos son las coberturas de la tierra.

Se clasificaron 28 coberturas de la tierra del área de estudio a escala 1:25.000. La UMC o la superficie menor que pudo ser representada es de 10.000 mt², cifra equivalente a una (1) hectárea¹⁵⁴. Como se enseña en el Anexo A, la clasificación de coberturas tuvo una precisión de 84% según el coeficiente de *kappa* en la iteración 16 de 50. Este es un porcentaje de precisión muy alto considerando el número de coberturas clasificado. También, se recomienda la revisión del Anexo B que contiene las características completas de las coberturas clasificadas.

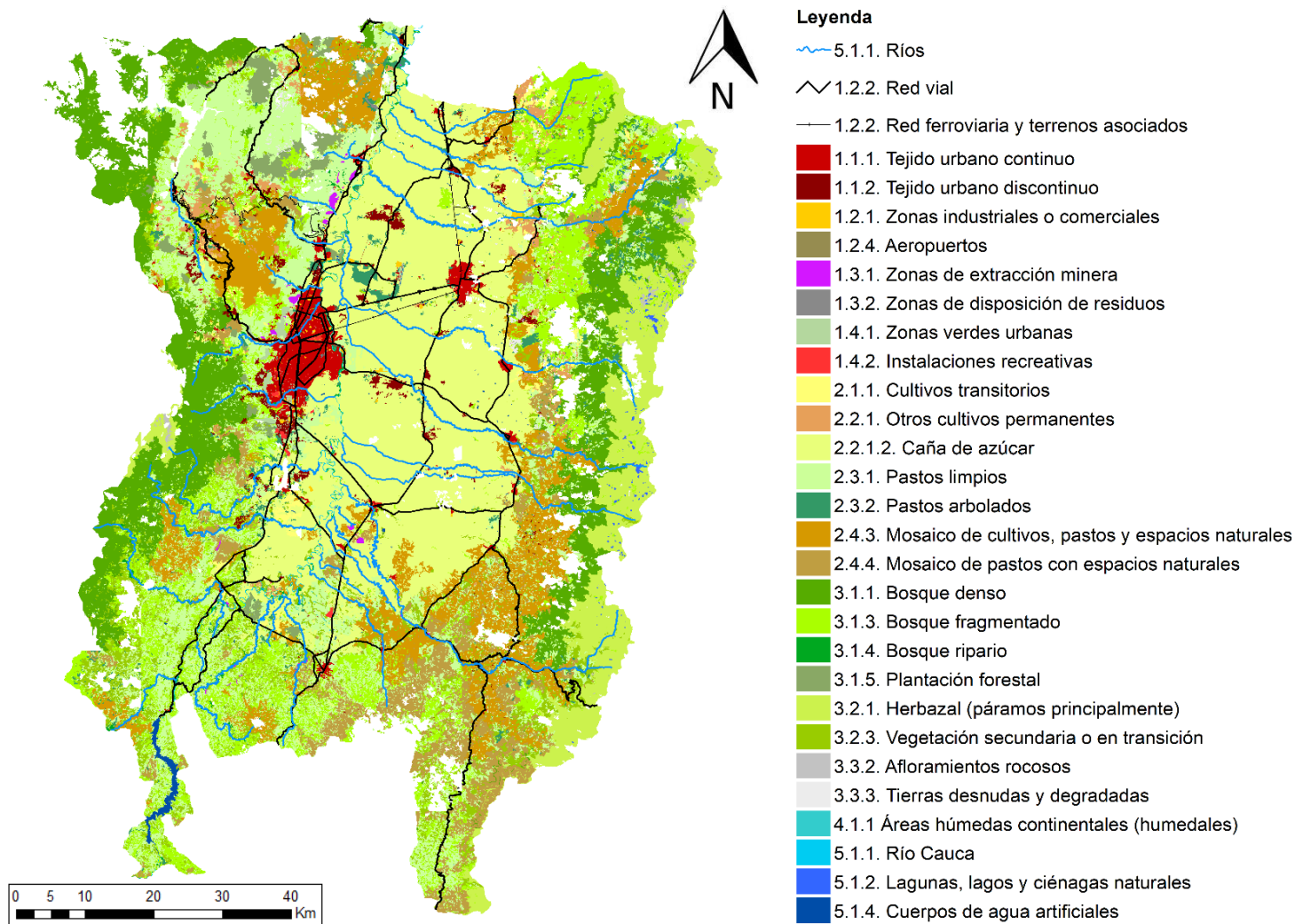
La distribución espacial de las coberturas se muestra en la Figura 17 y su área ocupada se presenta en el Cuadro 14. A raíz de estos dos productos, se tiene que los grupos de coberturas más predominantes en extensión en el área de estudio son las «áreas de producción agrícola» y los «bosques y áreas seminaturales». Las «áreas artificializadas» y las «áreas húmedas y superficies de agua» abarcan una extensión mucho menor con relación a las demás.

Las áreas de producción agrícola se localizan mayormente en la planicie aluvial del río Cauca por la presencia del monocultivo extensivo de la caña de azúcar (24%). Sin embargo, es sobresaliente identificar que los pastos limpios (17%) y los mosaicos de cultivos y bosques, que ocupan 14% del área, estén localizadas en los piedemontes de las cordilleras central y occidental. Se observa un patrón espacial de distribución de la agricultura y pastos en la periferia y un bloque extenso de cultivo agroindustrial en el centro. Por su parte, los bosques y áreas seminaturales presentan un patrón de distribución marginal, es decir, están localizadas significativamente en el perímetro del área de estudio. Los bosques densos (12%), fragmentados (10%) y los herbazales (7%), coberturas más extensas de este grupo, responden exactamente a este patrón de distribución.

El tejido urbano continuo (2%), incluido en el grupo de áreas artificiales, es la cobertura que dictamina la distribución de este conjunto. Si bien esta categoría de coberturas incluye redes de comunicación metropolitana (férreas y viales), los elementos de mayor extensión se distribuyen en la planicie aluvial del río Cauca, y la mancha urbana continua más extensa (Cali, Yumbo, y Jamundí) se localiza en la margen occidental del río. Por último, el conjunto de coberturas áreas húmedas y superficies de agua se distribuye en dos bloques identificables. Mientras los lagos y lagunas se localizan en la alta montaña, los humedales se extienden en sentido norte-sur en las márgenes del río Cauca.

¹⁵⁴ SALITCHEV. Op. cit.

Figura 17. Coberturas de la tierra del área de estudio.



Fuente: elaboración propia a partir de las imágenes de satélite *RapidEye*. Escala numérica 1:600.000.

Cuadro 14. Área de coberturas de la tierra clasificadas y pos-procesadas (etiquetadas).

#	Cobertura de la tierra		Nomenclatura	Clasificado			Etiquetado				
				Área (km²)	% áreasclas.	%áreaclas. - %áreaapos.	Número de segmentos	Área (km²)	% áreaapos.	% seg.	Atomización
1	Áreas artificializadas	Tejido urbano continuo	TUC	317,3	3,6	-1,6	1.479	166,6	2,0	2,1	-0,1
2		Tejido urbano discontinuo	TUD	-	-	-	1.642	80,1	1,0	2,4	-1,4
3		Zonas industriales o comerciales	ZIC	-	-	-	143	12,6	0,2	0,2	-0,1
4		Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	RVF	-	-	-	-	1.187*	-	-	-
5		Aeropuertos	AER	-	-	-	1	0,2	0,0	0,0	0,0
6		Zonas de extracción minera	ZEM	-	-	-	93	13,1	0,2	0,1	0,0
7		Zonas de disposición de residuos	ZDR	-	-	-	1	1,0	0,0	0,0	0,0
8		Zonas verdes urbanas	ZVU	-	-	-	325	23,7	0,3	0,5	-0,2
9		Instalaciones recreativas	IRE	-	-	-	87	8,8	0,1	0,1	0,0
10	Áreas de producción agrícola	Cultivos transitorios	CTR	511,8	5,8	-4,8	1.378	85,9	1,1	2,0	-0,9
11		Otros cultivos permanentes	OCP	282,7	3,2	-2,0	1.709	100,2	1,2	2,5	-1,3
12		Caña de azúcar	CAZ	1.137,2	13,0	+10,8	17.955	1.939,2	23,8	26,1	-2,3
13		Pastos limpios	PLI	1.572,2	18,0	-1,3	16.749	1.355,8	16,7	24,3	-7,7
14		Pastos arbolados	PAR	492,8	5,6	-4,1	2.128	122,3	1,5	3,1	-1,6
15		Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	MCPN	-	-	-	725	764,8	9,4	1,1	+8,3
16		Mosaico de pastos con espacios naturales	MPN	-	-	-	1.105	400,6	4,9	1,6	+3,3
17	Bosques y áreas seminaturales	Bosque denso	BDE	1.087,3	12,4	-0,8	1.013	947,3	11,6	1,5	+10,2
18		Bosque fragmentado	BFR	1.398,9	16,0	-5,9	7.628	822,8	10,1	11,1	-1,0
19		Bosque ripario (ribereño)	BRI	-	-	-	1.518	63,4	0,8	2,2	-1,4
20		Plantación forestal	PFO	197,6	2,3	-0,8	1.062	121,9	1,5	1,5	0,0
21		Herbazal (páramos)	HER	588,3	6,7	-0,1	1.281	534,7	6,6	1,9	+4,7
22		Vegetación secundaria o en transición	VST	774,1	8,8	-3,0	8.911	472,7	5,8	13,0	-7,1
23		Afloramientos rocosos	AFR	108,4	1,2	-1,1	140	13,6	0,2	0,2	0,0
24		Tierras desnudas y degradadas	TDD	196,1	2,2	-1,8	925	36,7	0,5	1,3	-0,9
25	Áreas húmedas y superficies de agua	Áreas húmedas continentales (humedales)	AHC	-	-	-	47	1,5	0,0	0,1	-0,1
26		Ríos	RIO	-	-	-	-	1.077*	-	-	-
27		Lagunas, lagos y ciénagas naturales	LLC	19,6	0,2	-0,1	185	9,7	0,1	0,3	-0,2
28		Cuerpos de agua artificiales	CAA	73,0	0,8	-0,6	259	22,4	0,3	0,4	-0,1
Total				8.138,6	100	-	68.793	8.138,6	100	100	-

*Calculado en km de longitud

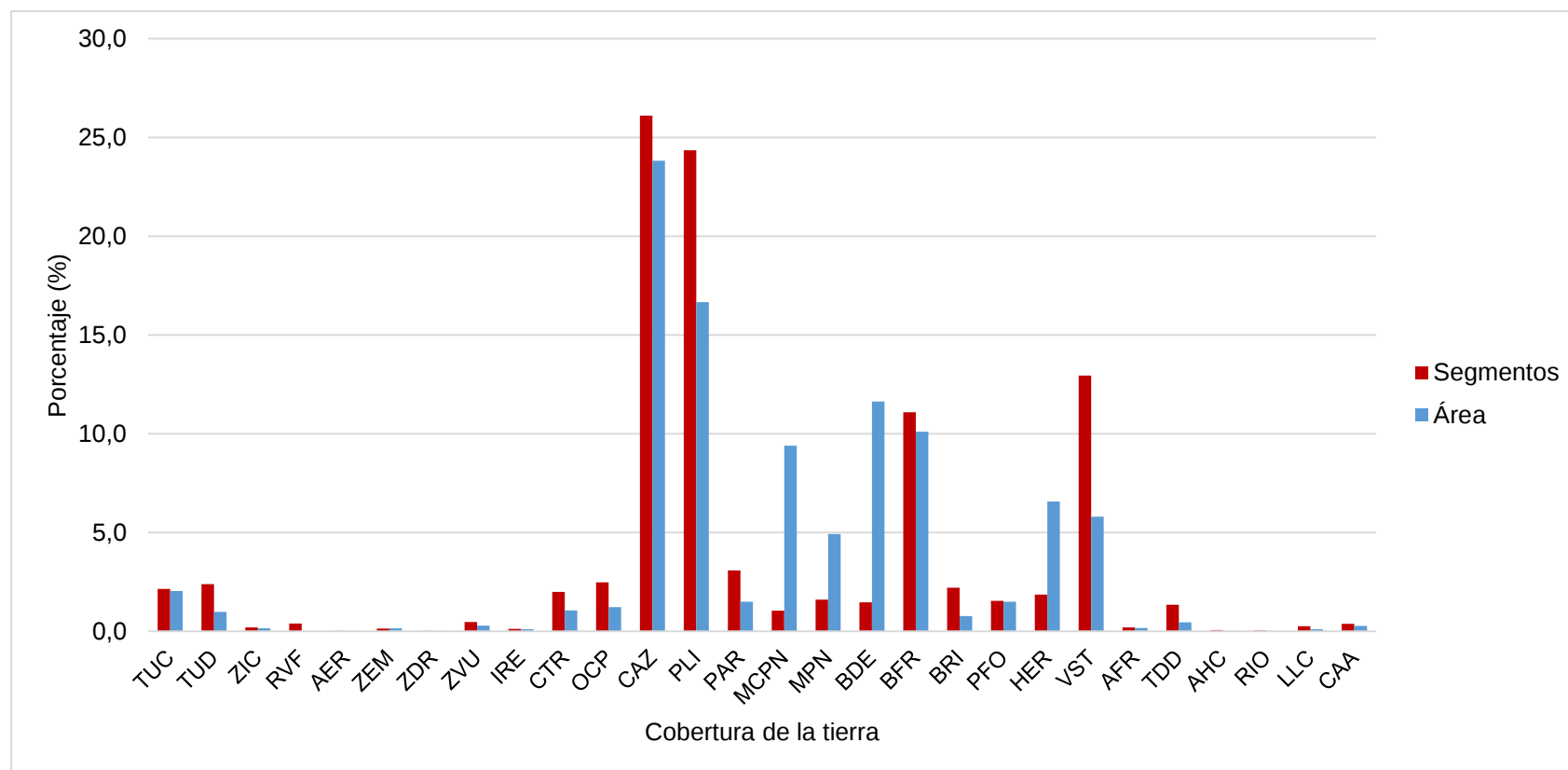
Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, el Cuadro 14 permite identificar las diferencias entre la clasificación automática de coberturas y el pos-procesamiento. Comparando las áreas de cobertura para el producto clasificado y el pos-procesado (Cuadro 14, columna «%áreaclas. - %áreaapos.»), se tiene una estimación de cuáles ganaron y perdieron área, o lo que quiere decir, qué coberturas sobre/sub estimó el modelo automático de clasificación. Las coberturas de BFR, CTR y PAR, fueron las que más redujeron su área tras el pos-procesamiento, es decir que fueron las más sobre-estimadas por el modelo automático. De otra parte, las coberturas de HER, LLC, CAA, BDE Y PFO sostuvieron su área o la redujeron sutilmente entre la clasificación y el pos-procesado. Finalmente, la cobertura que ganó área de manera significativa con el pos-procesado, es decir la más sub-estimada de forma automática, fue la CAZ. En gran medida, esto se explica dado que esta cobertura presentó el mayor efecto de «sal y pimienta», y al ajustar ese detalle, el usuario asignó correctamente más área a CAZ.

Otro elemento a distinguir es la relación entre número de segmentos por cobertura y su extensión de área (Figura 18). Este análisis permite identificar el nivel de atomización de la superficie del área de estudio. El escenario ideal es que las coberturas se encuentren muy poco atomizadas y así reducir los efectos nocivos sobre los elementos naturales del área de estudio. Para ello se creó la columna «atomización» con la resta entre la columna «% área» y «% seg.» del Cuadro 14. Analizando esta situación se identificaron tres tendencias principales: a) equilibrada (valor cercano a cero (0)) con muchos/pocos segmentos en mucha/poca área, e.g. cultivos transitorios, bosque fragmentado y tejido urbano; b) positiva (valores positivos máximos) con pocos segmentos y mucha área, e.g. bosque denso, mosaicos y páramos; y c) negativa (valores negativos extremos) con más segmentos que área, e.g. pastos limpios, vegetación secundaria y caña de azúcar. Estas tendencias pueden interpretarse como un indicador del estado de discontinuidad espacial cada cobertura clasificada.

Tomando en cuenta la extensión, la localización y el nivel de atomización, se identificó que la distribución espacial de las coberturas de la tierra reproduce un gradiente de naturalidad que aumenta progresivamente a medida que se aleja del centro del área de estudio. Es decir, mientras las más atomizadas y antrópicas se encuentran en el centro, las más compactas y naturales están en el perímetro del área. Esta situación responde al grado de intervención directa, los factores detonantes y el modelo de ocupación territorial de la EMC. Este hecho es muy significativo porque determina la posibilidad de identificar una EEM en el área de estudio. Ese es el tema presentado a continuación.

Figura 18. Porcentaje de área ocupada y segmentos por unidad de cobertura de la tierra.



Fuente: elaboración propia.

4.4. ESTRUCTURA ECOLÓGICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO «ÁREA DE INFLUENCIA METROPOLITANA DE SANTIAGO DE CALI»

Con esta metodología se identificó una serie de elementos naturales y seminaturales —con características de multifuncionalidad, singularidad, capacidad ecosistémica e importancia relativa—, que son objeto de diferentes procesos biogeoquímicos concebidos por la humanidad como SE, pero que contribuyen al bienestar de todas las formas de la vida, no solo la humana. Esta estructura contó con diez (10) elementos diferentes que aportan sustancialmente SE a la población. Para comprender esa meta o destino, se presentan los resultados que orientaron paso por paso el trayecto.

4.4.1. Datos del proceso de consulta

Las cifras generales del proceso de consulta se observan en el Cuadro 15. En total, se procesaron 5.229 datos de 29 respuestas de expertos, que contaron con los niveles académicos de profesional, maestría y doctorado, en los campos de la ingeniería agrícola, forestal, sanitaria y ambiental; en las ciencias exactas como la biología, ecología; y las humanidades como la geografía, filosofía, economía. Todos estos expertos participan activamente en instituciones públicas y privadas como la Universidad del Valle, Alcaldía de Cali, DAGMA, CVC, CRC, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), PNN, entre otras.

Mientras el grupo temático del agua fue el de mayor participación con nueve (9) integrantes, el de áreas artificializadas tuvo seis (6) colaboradores. En gran medida, esto se debe a que el formulario sobre agua fue el más corto, contabilizando 756 respuestas que representaron el 14% del total. Al contrario, el formulario de áreas artificiales fue el más extenso sumando 2.268 respuestas que proporcionalmente son el 43% del total. Esto quiere decir que mientras los integrantes del grupo de agua respondieron 96 preguntas menos del promedio general, los expertos del formulario áreas artificiales respondieron 198 preguntas más. Afortunadamente, los expertos que participaron en los formularios más extensos tuvieron una excelente disposición para colaborar lo que garantizó contar con un número significativo de datos para procesar.

Cuadro 15. Cifras del proceso de consulta a expertos en SE.

Grupo temático	# Exp.	Total R.	%	R.prom. c/u	Diferencia
Áreas de producción agrícola	7	1.029	20	147	-33
Bosques y áreas seminaturales	7	1.176	22	168	-12
Áreas húmedas y superficies de agua	9	756	14	84	-96
Áreas artificializadas (demanda)	6	2.268	43	378	198
Totales	29	5.229	100	180	0

Fuente: elaboración propia.

Los cuatro formularios de consulta creados son públicos, y se pueden revisar siguiendo estos hipervínculos a la web: 1) [áreas de producción agrícola](#), 2) [bosques y áreas seminaturales](#), 3) [áreas húmedas y superficies de agua](#), 4)

[áreas artificializadas \(demanda\)](#). Al interior de los formularios se encuentran todos los soportes que emplearon los expertos para participar de la consulta. Con este análisis general de las valoraciones de expertos, se deben revisar los resultados de las matrices de oferta y demanda de SE.

4.4.2. Matriz de oferta y demanda de SE

Con las respuestas de expertos, se crearon matrices de oferta y demanda de SE. Estas matrices están conformadas por 28 filas (coberturas de la tierra) y 21 columnas (SE). La matriz de oferta se muestra en el Anexo F. A partir de la valoración de expertos y con un máximo hipotético de cinco (5), se tiene en el Cuadro 16 que las cinco coberturas con mayor oferta de SE son bosque denso (BDE), bosque ribereño (BRI), herbazales (HER), ríos (RIO) y mosaicos de pastos con espacios naturales (MCPN). Es un excelente puntaje considerando que los BDE y HER son las coberturas naturales de mayor extensión en el área de estudio. También es satisfactorio que las coberturas de RIO y BRI, distribuidas en todos los puntos cardinales del área, sobresalgan como uno de los mayores contribuyentes al bienestar humano. Los MCPN merecen una mención especial por ser la cobertura seminatural que más aporta SE, situación que evidencia la riqueza biofísica y social de los MCPN.

No obstante, las TDD, AFR, PLI, CAZ e IRE son las coberturas de la tierra que menos proveen SE. El panorama es grave considerando que las coberturas de CAZ y PLI son las de mayor extensión en el área de estudio y, paradójicamente, son algunas de las que menos aportan SE. Es decir que se tiene mucho de algo que aporta realmente poco al bienestar humano considerando el aprovisionamiento de alimentos y materiales, regulación de las condiciones ambientales, y a la interpretación cultural de la naturaleza.

En lo referente a la demanda, su matriz completa se muestra en el Anexo G. El Cuadro 16 muestra que las coberturas de la tierra que más demandan SE para los expertos fueron TIC, TID, ZIC, AER e IRE. Esto concuerda con la localización en donde son requeridos y consumidos los SE, lo cual resalta la dependencia que tienen los asentamientos urbanos, de mayor o menor escala, sobre los elementos naturales. De este conjunto de coberturas, Cali y sus vecinos más próximos conforman la mancha urbana más extensa, la que congrega la mayor cantidad de población en el área y, por consiguiente, la que genera mayor afectación sobre el ambiente.

De otra parte, recordando que la consulta sobre la demanda de SE incluyó las coberturas seminaturales y artificiales del área, se tiene que, de este conjunto de elementos, los PAR, PLI, MPN, MCPN, PFO, son las que menos demandan SE. Este resultado es muy coherente porque los pastos son coberturas extensivas que solamente requieren tierra, lluvia y animales para existir. Las MCPN y PFO, son coberturas seminaturales que demandan mayor intervención y consumen una cantidad mayor de SE para su funcionamiento.

Cuadro 16. Análisis de oferta y demanda de SE por coberturas.

Oferta				Demanda			
Mayor	Valor	Menor	Valor	Mayor	Valor	Menor	Valor
BDE	4,3	TDD	0,4	TIC	4,1	PAR	1,7
HER	3,6	AFR	1,4	TID	4,0	PLI	1,8
BRI	3,4	PLI	1,4	ZIC	3,7	MPN	1,8
RIO	3,4	CAZ	1,6	AER	2,9	MCPN	1,9
MCPN	3,3	IRE	2,0	IRE	2,8	PFO	1,9

Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Aplicación de los criterios de identificación de la EEM

Las matrices de oferta y demanda de SE fueron la base para calcular y aplicar los criterios que permitieron identificar los elementos de la EEM. Así las cosas, mientras, la Figura 19 enseña la distribución espacial de cada criterio en el área de estudio, la Figura 20 muestra los valores promedio por unidad de cobertura de la tierra para los cuatro criterios. La Figura 19 presenta la distribución espacial de los cuatro criterios en el área de estudio. Mientras la periferia es la que más puntaje tiene en todos los criterios, el centro comprende los valores más bajos. Esto se explica teniendo en cuenta que las coberturas menos antropizadas están localizadas en el perímetro y las seminaturales y artificiales se ubican en el núcleo. Las coberturas más naturales —BDE, HER, RIO, MCPN— se localizan en los piedemontes y partes altas de las cordilleras central y occidental. También, las áreas más artificiales contemplan los valores más bajos de la leyenda y quedan representados como vacíos blancos o de verde muy claro en el centro. Lo más paradójico es que el centro concentra actividades productivas, poder económico, servicios, pero, a partir del análisis de estos criterios, la periferia soporta la existencia de la vida de todas las especies que habitan esta área.

La aplicación de los criterios de identificación presentó dos tendencias particulares: 1) valores bajos al inicio del gráfico (Figura 20) donde están las coberturas artificiales y seminaturales, y 2) valores altos en la parte media y final, donde están abarcadas las coberturas naturales. El criterio de capacidad fue el más significativo, abarcando casi en su totalidad las clases de 0 (sin relevancia) a 5 (muy alto). La multifuncionalidad de cobertura fue el segundo criterio más puntuado, con valores desde cero 0 (sin relevancia) a poco más de 4 (alto). Le sigue el criterio de importancia con un rango de datos entre las clases 0 (sin relevancia) a poco más de 3 (medio). Por último, el criterio menos representativo fue la singularidad, con un recorrido entre las clases 0 (sin relevancia) y 2 (bajo).

Lo que permite inferir esta distribución diferenciada del puntaje de los criterios, es que existen coberturas con muy alta capacidad para proveer SE, con alta multifuncionalidad, de importancia relativa alta o media, pero con un grado singularidad en la oferta de SE bajo o muy bajo. Esto último quiere decir que son pocos los casos en los que un SE está ligado a una cobertura en particular, situación que permite enfocarse en aquellos elementos realmente estratégicos por su valor polifacético y no enfrascarse en las especificidades o vínculos unívocos entre cobertura y SE. Producto de la aplicación de los diferentes

criterios, este es un resultado muy importante dado que permite interpretar de forma amplia e integra el beneficio que recibe el ser humano de la naturaleza.

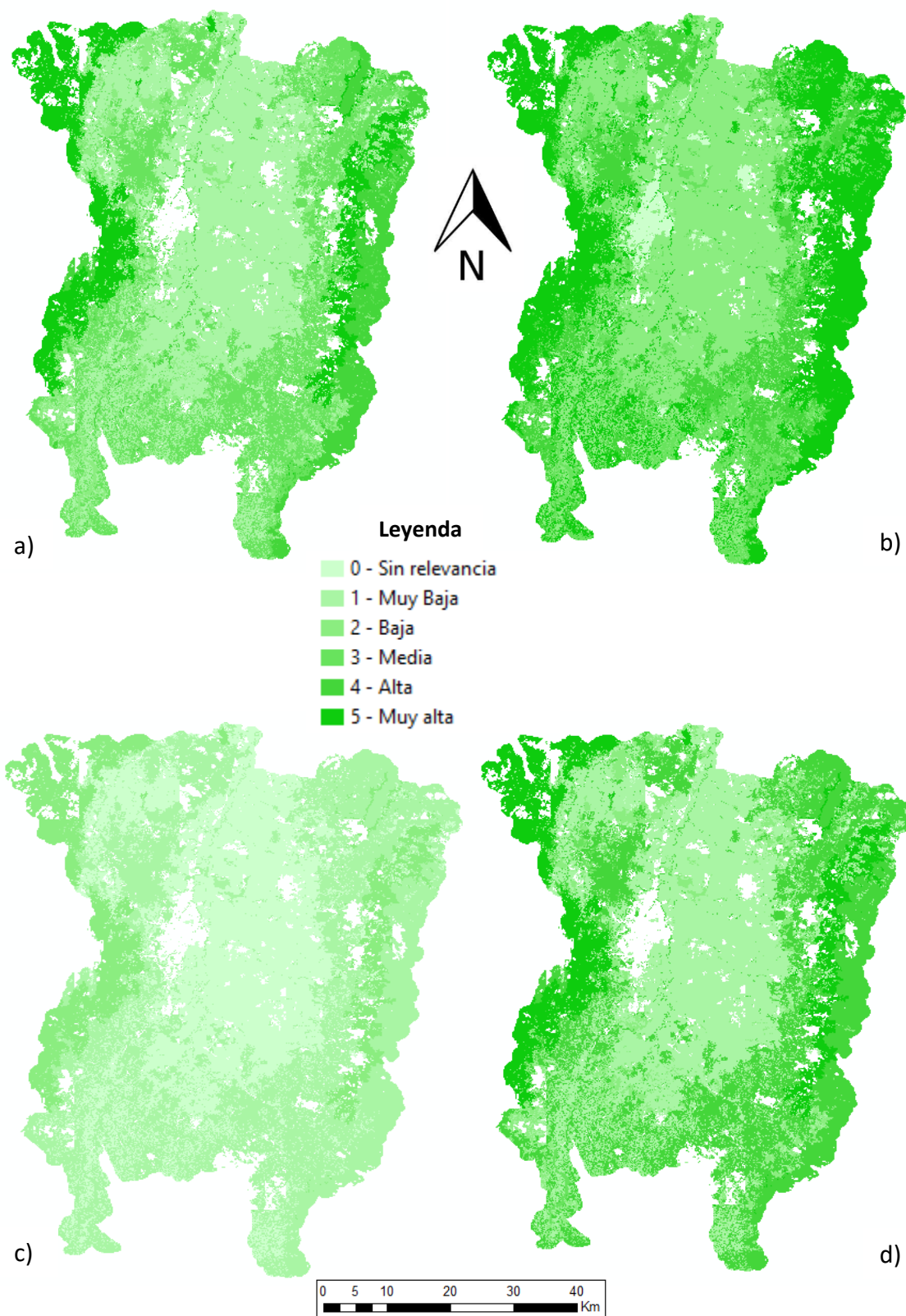
La Figura 20 enseña que las coberturas más **multifuncionales** fueron BDE (4,3), HER (3,6), BRI (3,4), RIO (3,4) y MCPN (2,8). Los bosques densos se destacan por su gran contribución total y en diversidad de SE, así lo reconocieron los expertos. Llamó la atención que los MCPN tengan un puntaje alto de multifuncionalidad y es la única cobertura seminatural que se clasificó así. Al contrario, las coberturas menos multifuncionales fueron TDD (0,1), AFR (0,5), PLI (1,0), CAZ (1,1) e IRE (1,4). Estas coberturas no ofrecen diversos SE. Por ejemplo, con el procesamiento de caña se produce azúcar para nutrición y biomasa para producir energía y, por su parte, los sitios de recreación aportan SE culturales estimulando la salud mental y física de los seres humanos. Se recomienda revisar el Anexo J y observar todos los resultados de este criterio.

El criterio de **capacidad** tuvo valores máximos y mínimos extremos. Las coberturas con mayor capacidad fueron BDE (4,9), BRI (4,6), RIO (4,6) BFR y HER (ambos 4,5). El criterio de capacidad ecosistémica confirma que las coberturas naturales son las que están en mejores condiciones para proveer SE y, afortunadamente, los BDE, BFR, y HER, hacen parte del grupo de coberturas de mayor extensión en el área. Sin embargo, las cinco coberturas que tuvieron menor capacidad para ofrecer SE fueron TUC (0,2), TUD (0,2), ZIC (0,3), AER (0,7) y RFV (0,9). Existe un factor común entre ellas: son las coberturas más artificiales del área y contribuyen muy poco al bienestar de los seres humanos y la vida en general. Los resultados completos de este criterio se muestran en el Anexo H (matriz sin normalización) y Anexo I (matriz ajustada).

Continuando con la presentación de los resultados de los criterios, es turno de la **singularidad** (Anexo K). Las coberturas de la tierra que prestan los servicios más singulares son BDE (1,5), HER y RIO (ambos con 1,3), BRI y MCPN (los dos 1,2). Si bien este fue el criterio con puntaje más bajo, se interpreta que estas coberturas tienen un vínculo especial con otros SE que no se ofrecen masivamente por todas las coberturas. Por ejemplo, se destacan que los BDE, HER y RIO son productores de agua dulce para todas las especies, y también, que los MCPN ofrecen diversidad de SE por su configuración natural mixta.

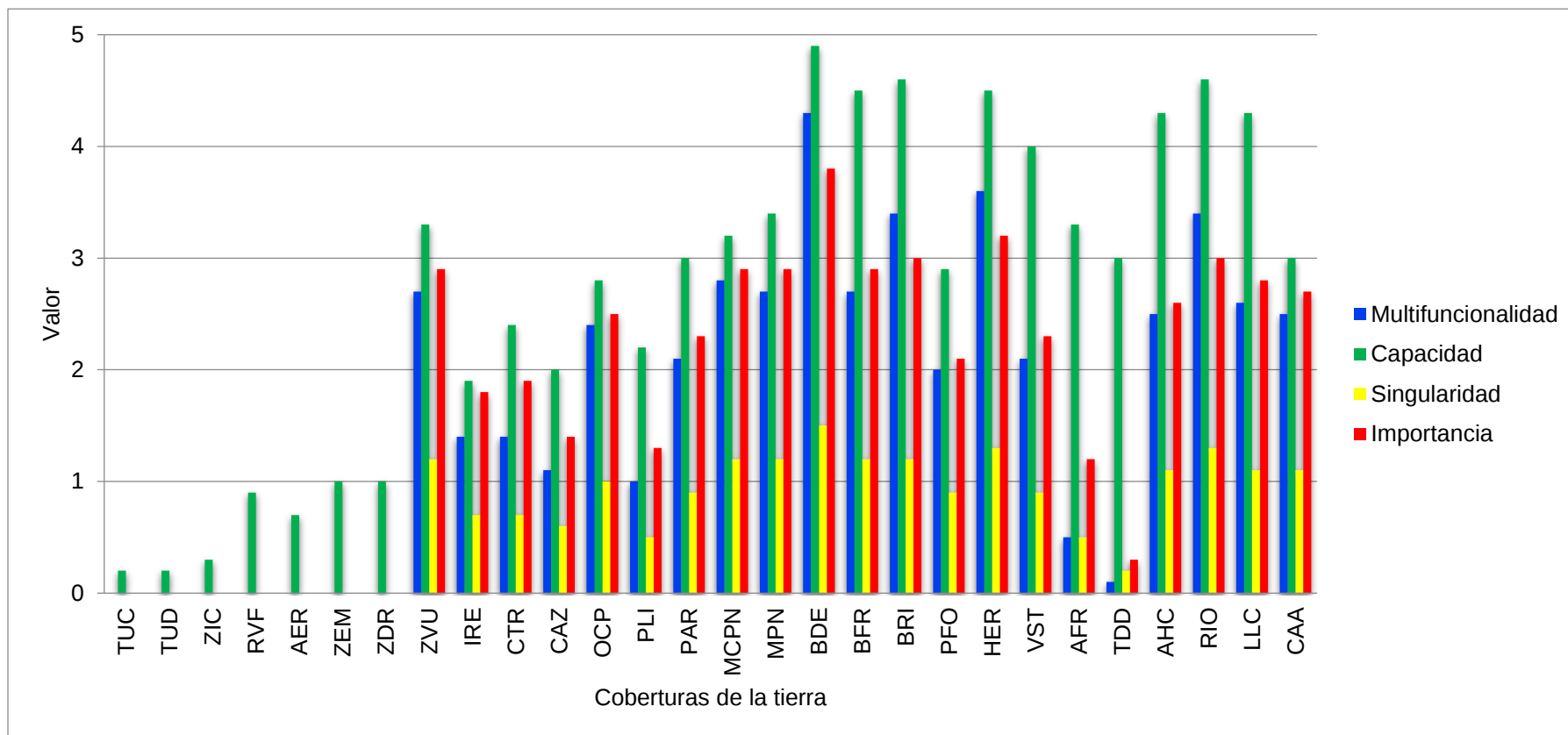
En última instancia, el criterio de **importancia relativa** de las coberturas produjo los siguientes resultados: BDE (3,8), HER (3,2), BRI y RIO (ambos con 3,0) y MCPN (2,9). Estas coberturas proveen los SE que para los integrantes del grupo de investigación son los más estratégicos para el área. Dicha escala puede observarse en la fila «imp. grupo focal» del Anexo F. Por el contrario, las coberturas de menor importancia relativa fueron: TDD (0,3), AFR (1,2), PLI (1,3), CAZ (1,4) e IRE (1,8). Son estas coberturas las que ofrecen SE que no son estrictamente esenciales para el bienestar. Así, por ejemplo, la producción de etanol a partir de biomasa, o el beneficio que puedan tener las tierras degradadas, no son significativos para decidir si su cobertura productora es o no EEM.

Figura 19. Espacialización de los criterios de identificación de EEM. a) multifuncionalidad, b) capacidad, c) singularidad y d) importancia.



Fuente: elaborado a partir de las valoraciones de expertos.

Figura 20. Valores promedio de criterios de SE por unidad de cobertura de la tierra.



Fuente: elaborado a partir de las valoraciones de expertos.

4.4.4. Elementos de la EEM

Con la aplicación de esta metodología se identificaron las coberturas de la tierra que más aportan SE y son parte de la EEM. Pero también, se clasificaron aquellas que podían serlo y otras que definitivamente, no. Las categorías son: es EEM, puede ser EEM y no es EEM. Los resultados aquí expuestos se presentan en el Anexo M y se recomienda su revisión. Para interpretar a cabalidad este resultado, primero se presentarán los elementos pertenecientes a cada clase y su justificación, para luego analizar la distribución espacial de cada uno de estos grupos.

En primer lugar, las coberturas que **no se consideraron como EEM** fueron: AER (2,8), ZIC (1,2), TUD (0,8) y TUD (0,8). Todas se clasificaron como clase 0 (sin relevancia) y cumplieron con menos del 17% del total de la calificación de los cuatro criterios. Definitivamente, estas coberturas no podrían ser elementos de la EEM porque contabilizaron un puntaje realmente bajo cuando se procesó su multifuncionalidad, capacidad, singularidad e importancia relativa. Estas coberturas, más que contribuir, son las encargadas de consumir SE, dado que en ellas se acumula la población del área de estudio y se desarrollan distintas actividades. Es llamativo que las áreas urbanas, dispuestas de forma continua o discontinua, contabilicen un puntaje similar, lo que permite inferir que su propagación en el área de estudio es perjudicial para la oferta de SE.

Fueron catorce (14) las coberturas de la tierra cuya calificación estuvo entre el 17% y el 50% del total de los criterios, y fueron agrupadas como **podrían ser EEM**. Estas coberturas fueron clasificadas en dos clases. En la clase 1 (muy bajo), se agruparon las coberturas de RVF (3,6), ZDR (4,2), PLI (5,2) y CAZ (5,3). Pero, ¿por qué podrían ser EEM? Por ejemplo, las RVF pueden ser doble calzadas, vías principales o la red férrea, que abarcan de forma paralela un área, pero al tiempo pueden acompañarse en sus márgenes de una franja extensa de vegetación, sean plantas o árboles. Así, por ejemplo, esta cobertura sería EEM porque está en capacidad de regular la contaminación del aire y del ruido en el ambiente. Los PLI y la CAZ pueden ser EEM dado que ofrecen SE, quizás no de forma diversa, pero ofrecen biomasa para nutrición y para producir energía. El gran flagelo de estas coberturas son las consecuencias ambientales que tienen al extenderse por toda el área de estudio.

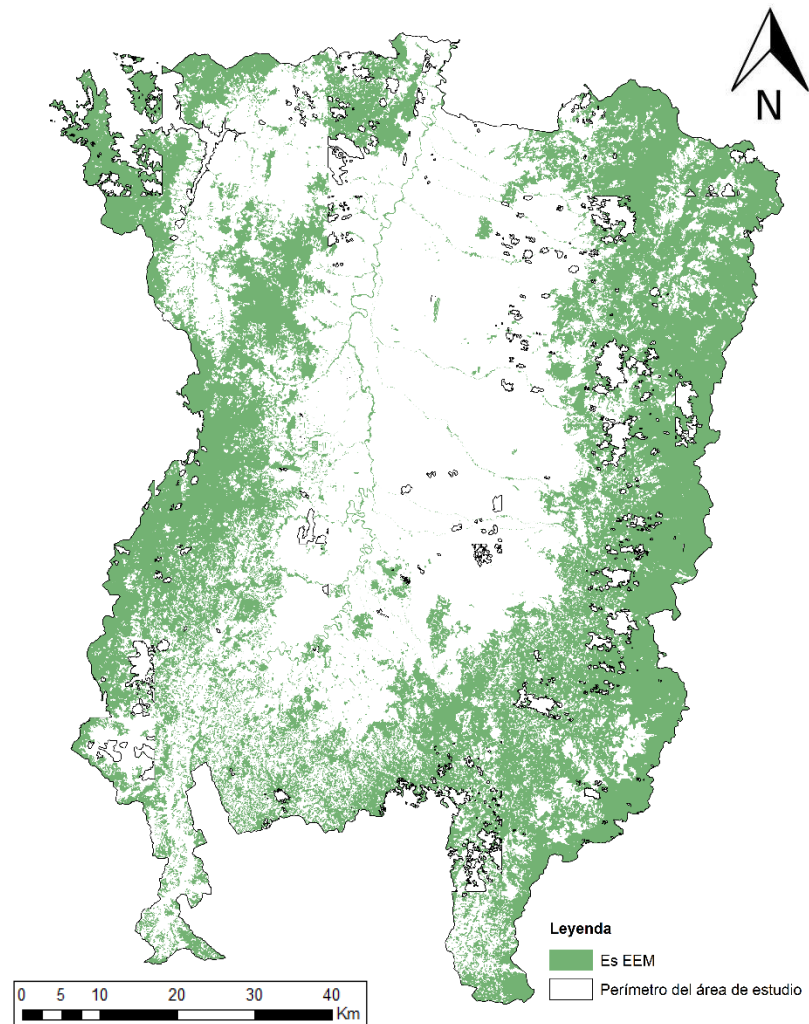
Por su parte, en la clase 2 (bajo), están las coberturas más naturales, las cuales quedaron muy cerca del umbral de otra clase, pero se clasificaron como podrían ser EEM: PFO (8,3), CAA (9,7) y VST (9,8). La cobertura de PFO ofrece SE particulares. Dependiendo de la especie cultivada, participa activamente en la regulación del aire y en el secuestro de carbono, pero su punto débil está en la cantidad de agua que cada especie requiere. La cobertura de CAA genera un gran impacto ambiental, especialmente si son infraestructuras de mayor escala. No obstante, ofrecen beneficios culturales por la recreación, regulan el caudal de los ríos aguas abajo y aprovisionan de energía hidroeléctrica a las poblaciones. La VST también podría ser EEM dependiendo del estado de intervención y de la velocidad recuperación de la vegetación del área.

Por su parte, en la Figura 21, se presentan las diez (10) coberturas de la tierra que se clasificaron como **EEM**, cuya calificación fue mayor al 50% del total de los cuatro criterios. Las ZVU (10,5), MCPN (10,6) y MPN (10,8), son las únicas coberturas seminaturales que son EEM y merecen una mención especial. Las ZVU son EEM porque ofrecen diversos SE, comprendiendo las secciones de regulación y culturales. Estas zonas son las más próximas a los más de 4 millones de habitantes del área de estudio y es realmente importante que sean reconocidas por su aporte al bienestar de la vida, especialmente la nuestra. Las ZVU es una cobertura que mantiene la calidad del aire, regula su temperatura, es hábitat para especies y permite la interacción social con y entre los ecosistemas naturales. El tema de los dos tipos de mosaicos (MCP y MCPN) ya se ha referenciado, pero que sean considerados como EEM revaloriza la existencia de este tipo de coberturas en el área y avala la creación de muchas otras por su carácter polifacético.

Las coberturas más naturales de esta clasificación de EEM tuvieron puntajes excelentes en todos los criterios y ya se podía tener una pista sobre su inclusión en este grupo. Las coberturas de BDE (15,3), HER (13,2), RIO (12,8), BRI (12,8), BFR (11,8), LLC (11,3), AHC (11,0), superaron el 50% de la calificación de los criterios de elección, e inclusive, los primer renqueados lo hicieron de manera holgada. Los AHC proveen numerosos SE, entre los que se destacan el hábitat para especies, la regulación de la calidad del agua, y el valor intrínseco de la existencia de la naturaleza. Es un elemento de la EEM de muchísimo valor, pero, lastimosamente, cuenta con una extensión supremamente reducida en el área de estudio. La cobertura de HER provee agua dulce para todas las especies, participa activamente en el ciclo hidrológico y captura carbono del aire. Por esos y otros motivos, los páramos hacen parte de los ecosistemas más estratégicos en el mundo. El elemento BDE lideró todos los criterios, lo que lo postula como el elemento más valioso de la EEM, en términos ecosistémicos y en términos de extensión, pues ocupa un porcentaje significativo de la superficie del área.

En la Figura 22 se observa que estas clases se distribuyen en un patrón espacial en forma de **anillos o coronas ecológicas**. Mientras los elementos que no son EEM están dispuestos en el núcleo, las coberturas que podrían ser están localizadas en un anillo intermedio y más extenso. Por último, las coberturas que son EEM están localizadas en el anillo periférico que aún conserva las características más naturales. Los elementos que no son EEM ocupan 259 km², el 3% del área. Las coberturas que son EEM abarcan 3.586 km², lo que corresponde al 44% del total y, los elementos que podrían ser EEM tienen un área de 4.294 km², igual al 53% del área de estudio. El carácter funcional del área se puede hipotetizar como una red de flujos provenientes de las áreas verdes que nutren a las manchas rojas en el mapa, manchas cuya área de influencia inmediata es altamente antropizada y se refleja en color amarillo. Las áreas urbanas abarcan elementos de la EEM como RIO, BRI y ZVU, pero también albergan otros que podrían ser EEM (VST, IRE, y RFV). Esta realidad aproxima la figura de una EEM a todos los contextos, incluyendo los urbanos.

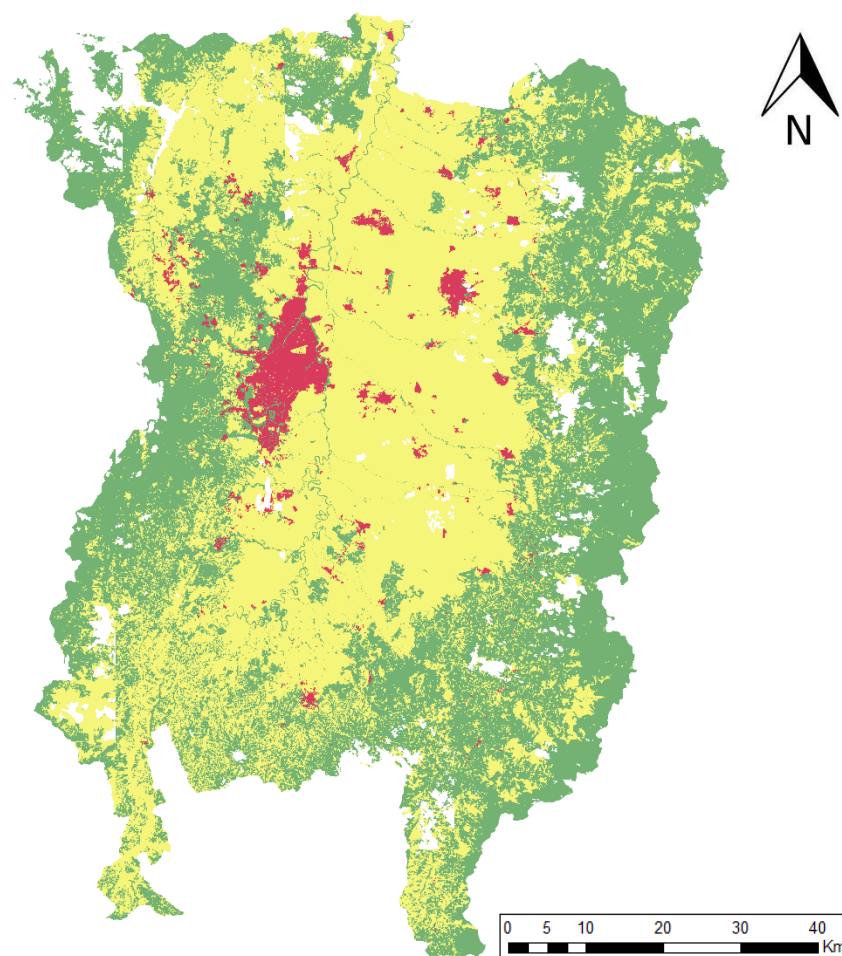
Figura 21. Mapa de la EEM (izquierda), descripción de sus elementos (derecha).



#	Es EEM	Valor	Clase
1	Bosque denso	15,3	4
2	Herbazal (páramos)	13,2	3
3	Bosque ripario (ribereño)	12,8	3
4	Ríos	12,8	3
5	Bosque fragmentado	11,8	3
6	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	11,3	3
7	Áreas húmedas continentales (humedales)	11,0	3
8	Mosaico de pastos con espacios naturales	10,8	3
9	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10,6	3
10	Zonas verdes urbanas	10,5	3

Fuente: elaboración propia en ArcGIS 10. Escala numérica: 1:600.000.

Figura 22. Mapa final de las áreas que son EEM, podrían ser EEM y no son EEM. Espacialización, izquierda. Descripción de sus elementos, derecha.



Fuente: elaboración propia en ArcGIS 10. Escala numérica: 1:600.000.

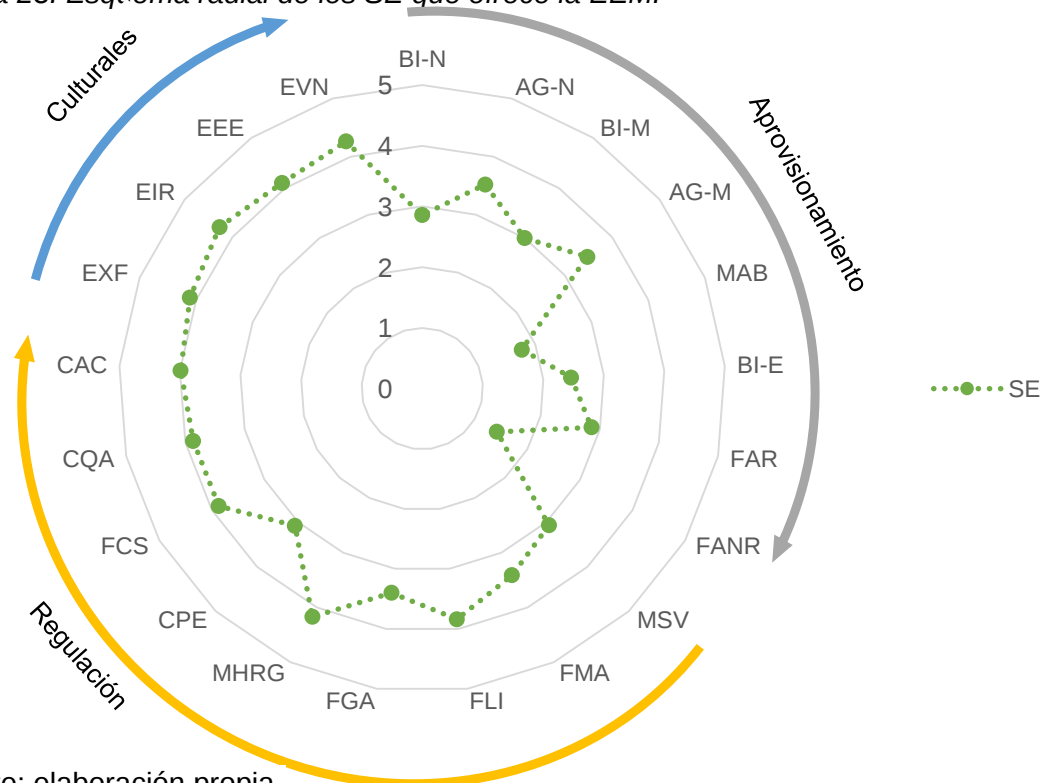
#	Es EEM	Valor	Clase
1	Bosque denso	15,3	4
2	Herbazal (páramos)	13,2	3
3	Bosque ripario (ribereño)	12,8	3
4	Ríos	12,8	3
5	Bosque fragmentado	11,8	3
6	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	11,3	3
7	Áreas húmedas continentales (humedales)	11,0	3
8	Mosaico de pastos con espacios naturales	10,8	3
9	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	10,6	3
10	Zonas verdes urbanas	10,5	3
#	Podría ser EEM	Valor	Clase
11	Vegetación secundaria o en transición	9,8	2
12	Cuerpos de agua artificiales	9,7	2
13	Otros cultivos permanentes	9,1	2
14	Pastos arbolados	8,7	2
15	Plantación forestal	8,3	2
16	Cultivos transitorios	6,7	1
17	Instalaciones recreativas	6,1	1
18	Afloramientos rocosos	5,7	1
19	Caña de azúcar	5,3	1
20	Pastos limpios	5,2	1
21	Zonas de extracción minera	4,4	1
22	Zonas de disposición de residuos	4,2	1
23	Tierras desnudas y degradadas	3,7	1
24	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3,6	1
#	No es EEM	Valor	Clase
25	Aeropuertos	2,8	0
26	Zonas industriales o comerciales	1,2	0
27	Tejido urbano continuo	0,8	0
28	Tejido urbano discontinuo	0,8	0

Además de identificar sus elementos, es necesario reconocer los **SE que provee la EEM**. La Figura 23 es un esquema radial que, a partir de la valoración de los expertos, muestra los SE ofertados por la EEM. Se observa claramente que la EEM oferta a cabalidad SE **culturales** dado que todos ellos superan la valoración 4 (alto). Con este resultado, se tiene que la EEM influye en la dimensión cultural de la población y favorece la interacción física y cercana en la naturaleza, pero también, en la creación de marcos de conocimiento científico o ancestral con los que se aprecia de manera amplia la vida en general.

Por otra parte, la oferta de SE de **regulación** es medianamente alta: cinco SE de regulación clasificaron en la clase 4 (alto), cuatro de ellos lo hicieron en la clase 3 (media). En detalle, la EEM está en capacidad de regular la composición atmosférica y el clima, química del agua, formación de suelo, mantenimiento de hábitat y flujos líquidos (CAC, CQA, FCS, MHRG y FLI). Así las cosas, la EEM regula de forma adecuada las condiciones de vida de las especies, pero no lo hace tan bien considerando la regulación de sustancias tóxicas, flujos de masa, flujos de gases y control de las plagas (MSV, FMA, FGA, y CPE).

En último lugar, es evidente que la oferta de los SE de **aprovisionamiento** es menor a las anteriores teniendo en cuenta que su valoración no superó la clase 3 (media). La EEM tiene una capacidad media de proveer alimentos y agua bebible (BI-N y AG-N), biomasa y agua como materiales (BI-M y AG-M) y, también, oferta biomasa y fuentes renovables para producir energía (BI-E y FAR). No obstante, la EEM tiene una capacidad baja para proveer materiales como minerales (MAB) y energía no renovable (FANR). Junto a los alimentos, estos elementos son ofrecidos por las coberturas que podrían ser EEM.

Figura 23. Esquema radial de los SE que ofrece la EEM.



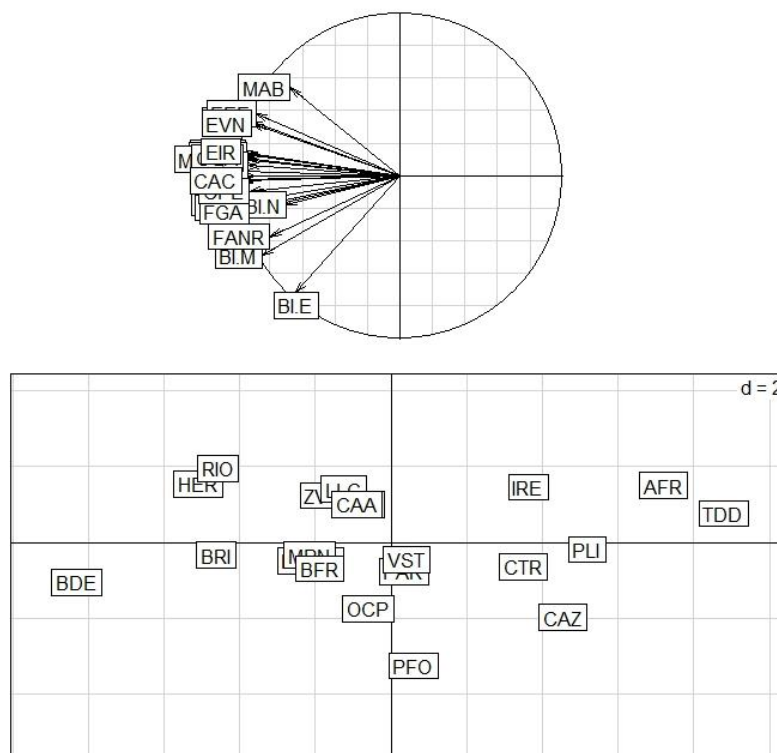
Fuente: elaboración propia.

4.4.5. Análisis multivariado de la EEM

El análisis multivariado de la EEM se desarrolló en RStudio empleando el código presentado en el Anexo N. Allí se especifica cada uno de los pasos ejecutados. Los resultados de este proceso se presentan en dos secciones. Primero, los resultados del análisis estadístico por los cuatro criterios de identificación de la EEM (multifuncionalidad, capacidad, singularidad e importancia), y en segunda instancia, los resultados de aplicar el análisis multivariado a la matriz que relaciona todos los criterios.

La Figura 24 muestra el círculo de correlaciones entre SE para el criterio multifuncionalidad. Los valores más altos se observan en el cuadrante sur-occidental. Se identifica una gran correlación entre los SE, es decir que la mayoría de los servicios aportan significativamente a este criterio. No obstante, los SE de BI-E, MAB y EVN, están visiblemente por fuera de este conglomerado. Mientras los otros 18 SE nutren el criterio, los servicios menos importantes para definir la multifuncionalidad de la EEM son el aprovisionamiento de energía, materiales, y la valoración intrínseca de la existencia natural. De otra parte, el plano factorial indica las coberturas mejor valoradas para este criterio. Las coberturas con características comunes de multifuncionalidad están agrupadas en sectores el plano factorial: a la izquierda están las mejores y más naturales, en el centro las seminaturales y a la derecha las más artificiales y menos multifuncionales.

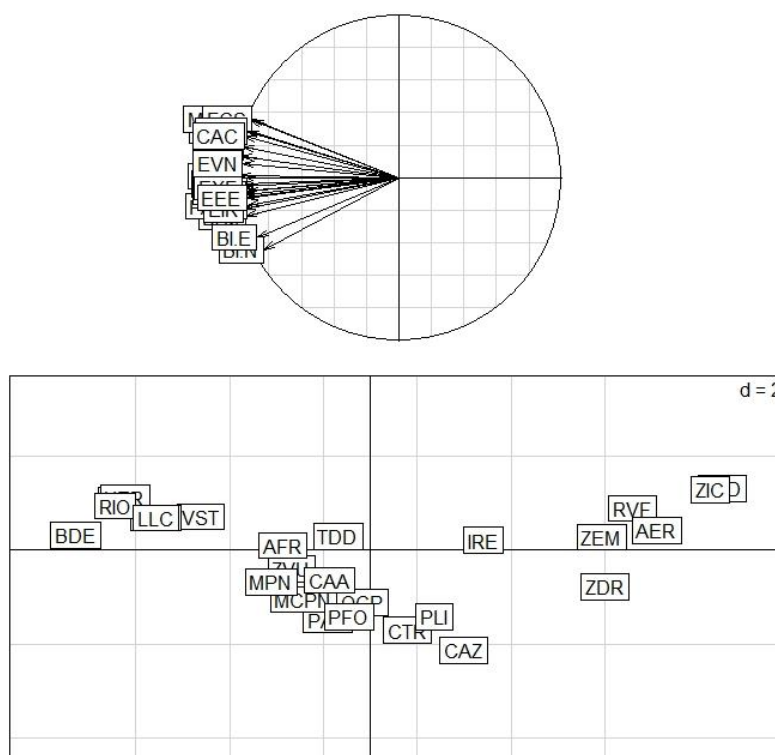
Figura 24. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de multifuncionalidad.



Fuente: elaborado a partir de la valoración de expertos.

La Figura 25 enseña los resultados del análisis multivariado para el criterio de capacidad. La correlación entre los SE es mucho más evidente que en el criterio anterior, lo que permite inferir que, a excepción de BI-E, los elementos de la EEM están capacitados ampliamente para ofrecer los SE valorados. ¿Cuáles fueron esos elementos? El plano factorial responde esta pregunta de manera contundente: los más capacitados para ofrecer estos servicios son los BDE, LLC, RIO, BFR y VST, todos elementos naturales localizados en el sector izquierdo del plano. Mientras las coberturas menos capacitadas para ofrecer estos SE están situados en la derecha (las más artificiales), los elementos seminaturales están en el centro, esto quiere decir que podrían estar capacitadas para proveer algunos SE de la lista.

Figura 25. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de capacidad.

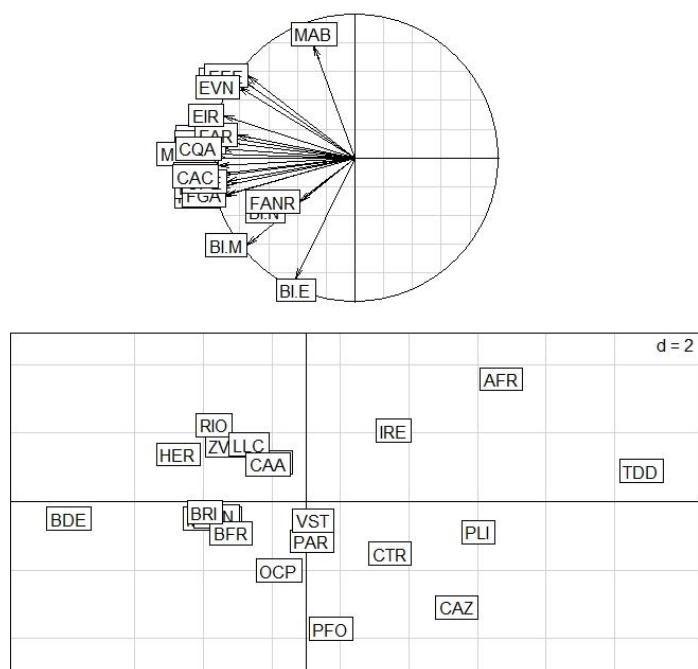


Fuente: elaborado a partir de la valoración de expertos.

La aplicación del análisis multivariado sobre el criterio de singularidad se muestra en la Figura 26. Si bien el plano factorial no agrupó claramente las coberturas, el círculo de correlaciones expresa información supremamente valiosa: hay SE que no están correlacionados. El gráfico expresa que los SE más especializados, entiéndase de producción singular por cobertura, son MAB, BI-E, BI-M, FANR, EVN y EEE. Los cuatro primeros son servicios de aprovisionamiento y los dos últimos servicios culturales. Que no estén correlacionados expresa que muy pocas coberturas ofrecen estos SE, y su inclusión o no como EEM dependerá de la articulación con los otros criterios. Precisamente, el círculo de correlaciones del criterio de importancia relativa expresa que son estos mismos SE los menos importantes, lo que quiere decir que los elementos de la EEM no están obligados

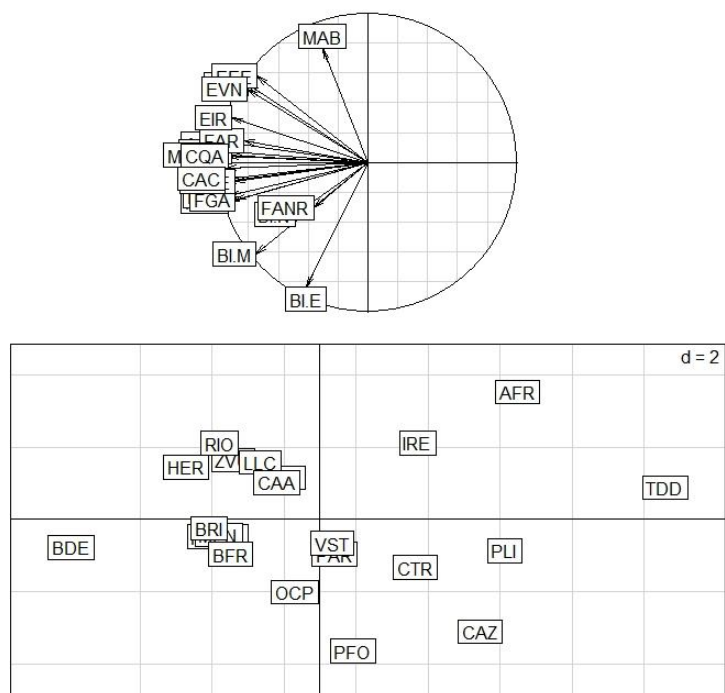
a proveerlos (Figura 27). Así las cosas, las coberturas que ofrecen los SE relativamente más importantes para la EEM se ubican a la izquierda del plano de importancia.

Figura 26. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio de singularidad.



Fuente: elaborado a partir de la valoración de expertos.

Figura 27. Círculo de correlaciones y plano factorial del criterio importancia relativa.

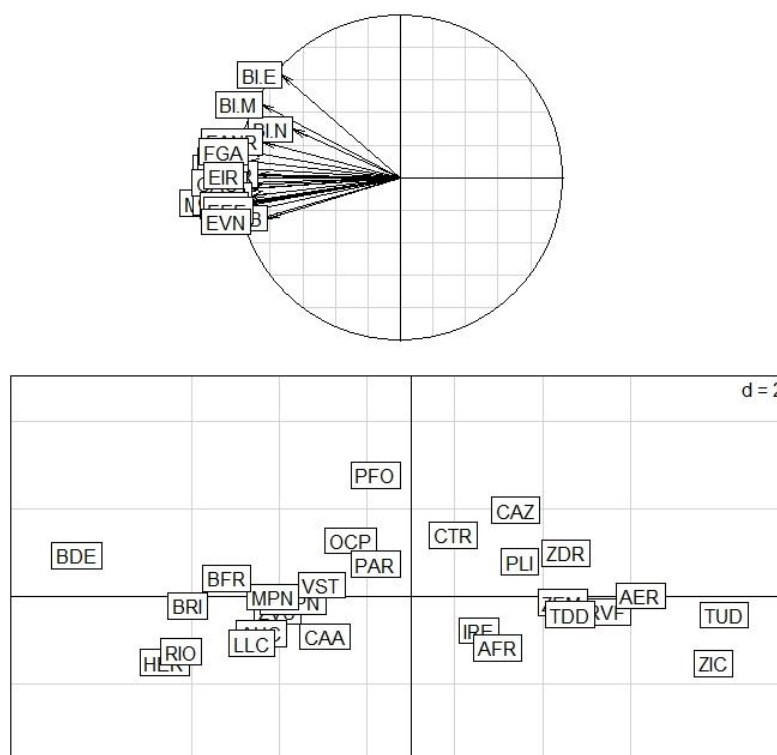


Fuente: elaborado a partir de la valoración de expertos.

En último lugar, la Figura 28 presenta el análisis multivariado de la matriz que relaciona y clasifica los elementos son, podrían ser o no son EEM. El círculo de correlación expresa que los servicios de BI-E, BI-M, de la sección de aprovisionamiento de biomasa y energía, son los que menos aportan para identificar la EEM. Por el contrario, los distintos servicios de regulación y culturales son los mejor valorados en el círculo de correlación, lo que permite concluir que, a partir de los cuatro criterios, las coberturas que integran la EEM deben suplir estos SE.

De otra parte, valorando el plano factorial producto del análisis multicriterio, se puede inferir que, con la aplicación de los cuatro criterios, las coberturas con mayor capacidad para ser EEM, se ubican en el cuadrante occidental del plano factorial, las que podrían ser se localizan en el centro y los que no lo son están dispuestas a la derecha. Considerando las características de las coberturas referenciadas y su distribución en el plano, haciendo un barrido de izquierda a derecha, se observa un patrón descendiente y progresivo de naturalidad, es decir que, cuanto más lejos del sector izquierdo se localicen las coberturas en el plano, menos opciones tuvieron de ser EEM. Comparando detalladamente los elementos de la EEM con los resultados del análisis multivariado, se tiene una coincidencia exacta del número y el tipo de coberturas clasificadas en EEM, podría ser EEM o no es EEM. Así pues, el análisis multivariado corrobora el tratamiento de los datos y la elección de los elementos de la EEM.

Figura 28. Círculo de correlaciones y plano factorial de la intersección de los cuatro criterios.



Fuente: elaborado a partir de la valoración de expertos.

4.5. CATEGORÍAS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE OPERAN EN EL ÁREA DE ESTUDIO Y SOBRE LA EEM

Fueron once (11) las categorías de protección ambiental valoradas para el área de estudio, incluyendo siete (7) de carácter nacional y cuatro (4) de tipo regional¹⁵⁵. Mientras la información sobre la categoría, acto normativo, escala, nomenclatura y objetivo se presentan en el Cuadro 17, el inventario de coberturas de la tierra comprendidas en la jurisdicción de todas ellas se presenta en la Figura 29 (página 123). Estos dos productos son suficientes para analizar estos resultados, pero se recomienda visitar el Cuadro 18 y revisar a profundidad el soporte que avala esta información. De esta manera, a raíz de estos productos se desarrolla un análisis general de la aplicación del objetivo de estas categorías de protección ambiental en el área de estudio, para luego hacer hincapié en la relación directa de todas ellas con la EEM.

Analizando el conjunto de normas de manera general, se descubrió que la aplicación de su objetivo es diferenciada: se tienen unas normas que operan sobre el área de estudio mejor que otras y pueden agruparse en tres grandes grupos:

Categorías con aplicación adecuada:

1. La categoría CP ocupa 656 km² en el total del área de estudio, abarcando en un 78% la cobertura HER y en un 7% BDE. La cobertura con mayor grado de intervención antrópica es MPN que ocupa un 5% del área. Teniendo en cuenta que las coberturas más prominentes son las naturales, la aplicación de esta norma es coherente con su objetivo.
2. Los PNN se extienden en 409 km². Las coberturas predominantes bajo la jurisdicción de esta categoría son BDE, HER Y BFR con 52%, 36% y 3%, respectivamente. Los PLI ocupan 2% del área que ordena esta norma. Por lo tanto, es la segunda categoría que aplica que forma adecuada su objetivo en el territorio.
3. La categoría RFPN ordena 752 km² del área, acogiendo las coberturas naturales de BDE (32%), BFR (21%), HER (10%). No obstante, los PLI ocupan 14% del área de jurisdicción de esta categoría. Si bien la mayoría de coberturas son naturales y coherentes con el objetivo de la norma, la presencia de pastos hace que la aplicación de esta norma no sea tan buena como la anterior.
4. 100 km² del área de estudio están cubiertas por los PNR. Las coberturas más sobresalientes que protege la categoría son BDE, con 55%, HER, con 37%, y BFR, con 2%. Nuevamente, la cobertura más artificial son los PLI, pero ocupan solamente un 2% del área.
5. Los DRMI abarcan 15km² del área. Las coberturas que predominan bajo la jurisdicción de esta categoría son BDE (32%), PLI (24%), y BFR (13%). Considerando la naturaleza de esta norma, es positivo que los bosques ocupen casi la mitad de su jurisdicción, sin embargo, los pastos abarcan

¹⁵⁵ Los Planes de Manejo y Ordenamiento de Cuencas (POMCA) del área de estudio se encuentran en desarrollo porque el IDEAM realizó una nueva zonificación hidrográfica a partir del año 2013. Por este motivo, no se tuvieron en cuenta en este análisis.

un cuarto de su área, hecho que permite discutir si esta sería la mejor opción para este tipo de categoría de protección.

Categorías con aplicación regular:

1. Con 2.372 km², la ZRF es la categoría con mayor extensión en el área de estudio. Las coberturas más sobresalientes son los BDE, con 24%, HER y PLI con 20% y MCPN con 11%. Evidentemente, las coberturas más abundantes son naturales y se ajustan al objetivo de la norma, pero las actividades antrópicas han permeado de manera significativa la jurisdicción de la categoría de protección lo que se vuelve mucho más delicado considerando la extensión y la localización del área ordenada.
2. La categoría RNSC ocupa 86 km², su área se distribuye en las coberturas MCPN (21%), BDE y PLI (18% c/u). Bajo la jurisdicción de la norma sobresale la presencia de infraestructura urbana, recreativa, cultivos permanentes y transitorios. Aquí no se discute si la presencia de estas coberturas permite mayor usufructo o mayor conservación, pero se denuncia que los pastos son la tercera cobertura más extensa en la jurisdicción de la norma quebrantando su objetivo.
3. Los DCS se extienden sobre 61 km² del área de estudio. Las coberturas que predominan en su jurisdicción son PLI (90%), BFR (5%) y BDE (2%). Evidentemente, una porción muy alta de la categoría se dedica a pastos lo que permite concluir que su aplicación es más que discutible, sin embargo, se clasifica como regular porque la norma considera la presencia de elementos semi-naturales bajo su jurisdicción.

Categorías con aplicación inapropiada:

1. La norma FPR se extiende por 78 km², y contiene 34% de CAZ, 24% de BRI y 9% de PLI. Es inexcusable que la cobertura predominante en la jurisdicción de la categoría de protección sea la caña de azúcar, mientras la que debería ser tenga la segunda área más extensa. Eso no es todo, la tercera cobertura más extensa atropella contra la norma: los pastos. Este es uno de las categorías más violentadas en el área de estudio, hecho que se verificó con lo observado en la salida de campo.
2. La categoría HRAMSAR abarca 10 km² del área de estudio. Mientras las coberturas con extensión más sobresaliente en la jurisdicción de esta norma son CAZ (57%), RIO (20%), y BRI (14%), aquella que refleja su objetivo abarca muy poca área (AHC, con 1,4%). Esta realidad deja en evidencia que las intenciones del convenio RAMSAR no se sostuvieron con el paso del tiempo dado que en la actualidad el cultivo de caña ocupa área incorrectamente bajo la jurisdicción de la categoría. Hecho que afecta gravemente la supervivencia de las AHC que aún existen.
3. 4 km² del área de estudio están ordenados bajo la figura de RFPR. Las coberturas de la tierra que predominan sobre esta área son MCPN, BFR y PLI con 54%, 26% y 10%, respectivamente. La presencia mayoritaria de coberturas fragmentadas es una realidad crítica que produce un panorama de relictos naturales que atropellan contra el objetivo de la categoría.

Cuadro 17. Categorías de protección ambiental con jurisdicción en el área de estudio.

#	Categoría	Escala	Nomenclatura	Objetivo
1	Ley 99 de 1993, Decreto 1076 de 2015, y Ley 1753 de 2015: Complejo de páramos	Nacional (MADS)	CP	«Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos serán objeto de protección especial» (Num. 4, Art. 1, Ley 99 de 1993) «Las zonas de páramos, subpáramos, los nacimientos de agua y las zonas de recarga de acuíferos como áreas de especial importancia ecológica gozan de protección especial, por lo que las autoridades ambientales deberán adelantar las acciones tendientes a su conservación y manejo, las que podrán incluir su designación como áreas protegidas bajo alguna de las categorías de manejo previstas en el presente decreto» (Art. 2.2.2.1.3.8., Decreto 1076 de 2015) «En las áreas delimitadas como páramos no se podrán adelantar actividades agropecuarias ni de exploración o explotación de recursos naturales no renovables, ni construcción de refinerías de hidrocarburos» (Art. 173, Ley 1753 de 2015)
2	Decreto Ley 2811 de 1974 y Decreto 1076 de 2015: Ronda hídrica	Nacional (MADS)	FPR	«Salvo derechos adquiridos por particulares son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado (..) d. una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho» (Num. d, Art. 83, Decreto Ley 2811 de 1974) «En relación con la protección y conservación de los bosques, los propietarios de predios están obligados a mantener en cobertura boscosa dentro del predio las áreas forestales protectoras (...) b) Una faja no inferior a 30 metros de ancha, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no, y alrededor de los lagos o depósitos de agua» (Num. b, Art. 2.2.1.1.18.2., Decreto 2015 de 1976)
3	Ley 357 de 1997 y Decreto 1076 de 2015: Humedales RAMSAR	Nacional (MADS)	HRAMSAR	«[El Estado colombiano] deberá elaborar y aplicar su planificación de forma que favorezca la conservación de los humedales incluidos en la Lista y en la medida de lo posible el uso racional de los humedales de su territorio» (Art. 3, Ley 357 de 1997) «Distinciones internacionales: las distinciones internacionales tales como Sitios Ramsar, Reservas de Biósfera (AICAS) y Patrimonio de la Humanidad, entre otras, no son categorías de manejo de áreas protegidas, sino estrategias complementarias para la conservación de la diversidad biológica. Las autoridades encargadas de la designación de áreas protegidas deberán priorizar estos sitios atendiendo a la importancia internacional reconocida con la distinción, con el fin de adelantar acciones de conservación que podrán incluir su designación bajo alguna de las categorías de manejo previstas en el presente decreto» (Art. 2.2.2.1.3.7., Decreto 1076 de 2015)
4	Decreto 1076 de 2015: Reserva Forestal Protectora Nacional	Nacional (MADS)	RFPN	«Espacio geográfico en el que los ecosistemas de bosque mantienen su función, aunque su estructura y composición haya sido modificada y los valores naturales asociados se ponen al alcance de la población humana para destinarlos a su preservación, uso sostenible, restauración, conocimiento y disfrute. Esta zona de propiedad pública o privada se reserva para destinarla al establecimiento o mantenimiento y utilización sostenible de los bosques y demás coberturas vegetales naturales (..) la reserva, delimitación, declaración y sustracción de las Reservas Forestales que alberguen ecosistemas estratégicos en la escala nacional, corresponde al MADS, en cuyo caso se denominarán Reservas Forestales Protectoras Nacionales» (Art. 2.2.2.1.2.3., Decreto 1076 de 2015)
5	Ley 2ª de 1959 y Decreto 1076 de 2015: Zonificación Reserva Forestal	Nacional (MADS)	ZRF	«Para el desarrollo de la economía forestal y protección de los suelos, las aguas y la vida silvestre, se establecen con carácter de Zonas Forestales Protectoras y "Bosques de Interés General» (Art. 1, Decreto 1076 de 2015) «Las categorías de protección y manejo de los recursos naturales renovables reguladas por la Ley 2ª de 1959, el Decreto-ley 2811 de 1974, o por la Ley 99 de 1993 (...) mantendrán plena vigencia y continuarán rigiéndose para todos sus efectos por las normas que las regulan. Sin embargo, esas áreas no se considerarán como áreas protegidas integrantes del SINAP, sino como estrategias de conservación in situ que aportan a la protección, planeación, y manejo de los recursos naturales renovables y al cumplimiento de los objetivos generales de conservación del país» (Art. 2.2.2.1.3.1., Decreto 1076 de 2015)

6	Decreto Ley 2811 de 1974 y Decreto 1076 de 2015 Parques Nacionales Naturales	Nacional (PNN)	PNN	«Se denomina sistema de parques nacionales el conjunto de áreas con valores excepcionales para el patrimonio nacional que, en beneficio de los habitantes de la nación y debido a sus características naturales, culturales o históricas, se reserva y declara comprendida en cualquiera de las categorías que adelante se enumeran» (Art. 327. Decreto Ley 2811 de 1974) «El Sistema de Parques Nacionales Naturales forma parte del SINAP y está integrado por los tipos de áreas consagrados en el Artículo 329 del Decreto Ley 2811 de 1974» (Art. 2.2.2.1.2.2., Decreto 1076 de 2015)
7	Decreto 1076 de 2015: Reserva Natural de la Sociedad Civil	Nacional (PNN)	RNSC	«Parte o todo del área de un inmueble que conserve una muestra de un ecosistema natural y sea manejado bajo los principios de sustentabilidad en el uso de los recursos naturales y que por la voluntad de su propietario se destina para su uso sostenible, preservación o restauración con vocación de largo plazo» (Art. 2.2.2.1.2.8., Decreto 1076 de 2015)
8	Decreto 1076 de 2015: Distrito de Conservación de Suelos	Regional (CAR)	DCS	«Espacio geográfico cuyos ecosistemas estratégicos en la escala regional, mantienen su función, aunque su estructura y composición hayan sido modificadas y aportan esencialmente a la generación de bienes y servicios ambientales, cuyos valores naturales y culturales asociados se ponen al alcance de la población humana para destinarlos a su restauración, uso sostenible, preservación, conocimiento y disfrute. Esta área se delimita para someterla a un manejo especial orientado a la recuperación de suelos alterados o degradados o la prevención de fenómenos que causen alteración o degradación en áreas especialmente vulnerables por sus condiciones físicas o climáticas o por la clase de utilidad que en ellas se desarrolla» (Art. 2.2.2.1.2.7., Decreto 1076)
9	Decreto 1076 de 2015: Distrito Regional de Manejo Integrado	Regional (CAR)	DRMI	«Distritos de manejo integrado. Espacio geográfico, en el que los paisajes y ecosistemas mantienen su composición y función, aunque su estructura haya sido modificada y cuyos valores naturales y culturales asociados se ponen al alcance de la población humana para destinarlos a su uso sostenible, preservación, restauración, conocimiento y disfrute» (Art. 2.2.2.1.2.5., Decreto 1076 de 2015)
10	Decreto 1076 de 2015: Parque Natural Regional	Regional (CAR)	PNR	«Espacio geográfico en el que paisajes y ecosistemas estratégicos en la escala regional, mantienen la estructura, composición y función, así como los procesos ecológicos y evolutivos que los sustentan y cuyos valores naturales y culturales asociados se ponen al alcance de la población humana para destinarlos a su preservación, restauración, conocimiento y disfrute» (Art. 2.2.2.1.2.4., Decreto 1076 de 2015)
11	Decreto 1076 de 2015: Reserva Forestal Protectora Regional	Regional (CAR)	RFPR	«Espacio geográfico en el que los ecosistemas de bosque mantienen su función, aunque su estructura y composición haya sido modificada y los valores naturales asociados se ponen al alcance de la población humana para destinarlos a su preservación, uso sostenible, restauración, conocimiento y disfrute. Esta zona de propiedad pública o privada se reserva para destinarla al establecimiento o mantenimiento y utilización sostenible de los bosques y demás coberturas vegetales naturales (..) la reserva, delimitación, declaración, administración y sustracción de las Reservas Forestales que alberguen ecosistemas estratégicos en la escala regional, corresponde a las CAR, en cuyo caso se denominarán Reservas Forestales Protectoras Regionales» (Art. 2.2.2.1.2.3., Decreto 1076 de 2015)

Fuente: COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 2ª de 1959. Bogotá: _____, 1959, 6 p. & _____. Decreto Ley 2811 de 1974. Bogotá: _____, 1974, 71 p. & _____. Ley 99 de 1993. Op. cit. & _____. Ley 357 de 1997. Bogotá: _____, 1997, 11 p. & _____. Ley 1753 de 2015. Bogotá: _____, 2015. 191 p. & COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. Bogotá: _____, 2015. 654 p.

Cuadro 18. Inventario de coberturas de la tierra abarcadas en la jurisdicción de las categorías actuales de protección ambiental que se superponen al área de estudio.

Categoría	Escala	Instrumentos que comprende en área de estudio (AE)	Área total de instru. (km ²)	Área instru. en AE (km ²)	Porcentaje instru. en AE (%)	Coberturas abarcadas en AE	Clase EEM	Área total cobertura en AE (km ²)	Área cobertura en catego. (km ²)	Porcentaje de cobertura gestionada (%)	Inventario coberturas en catego. AE (%)
Ley 99 de 1993, Decreto 1076 de 2015, y Ley 1753 de 2015: Complejo de páramos	Nacional (MADS)	1-Farallones de Cali; 2-Las Hermosas; 3-Guanacas - Puracé - Coconucos; 4-Nevado del Huila - Moras	4.963,4	656,3	13,2	Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	507,7	95,0	77,4
						Bosque denso	Sí	946,6	44,6	4,7	6,8
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	32,4	8,1	4,9
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	24,3	3,0	3,7
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	14,3	3,0	2,2
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	12,8	94,4	2,0
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	9,5	98,2	1,4
						Pastos limpios	Podría	1354,5	8,3	0,6	1,3
						Pastos arbolados	Podría	122,2	1,6	1,3	0,2
						Ríos	Sí	30,7	0,3	0,9	0,0
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	0,1	0,0	0,0
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,1	0,2	0,0
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,0	0,0	0,0
Decreto Ley 2811 de 1974 y Decreto 1076 de 2015: Ronda hídrica	Nacional (MADS)	1-Amalme; 2-Arroyohondo; 3-Asnazú; 4-Bolo; 5-Cali; 6-Canaveralito; 7-Claro; 8-Dagua; 9-Desbaratado; 10-Directos Dpto. Cauca; 11-El Cerrito; 12-Fraile; 13-Guabas; 14-Jamundí; 15-La Quebrada; 16-La Tabla; 17-Meléndez; 18-Mulaló; 19-Palo; 20-Quinamayó; 21-Sabaleta; 22-Sabaletas; 23-Santo Domingo; 24-Saperá; 25-Teta; 26-Timba; 27-Vijes; 28-Yotoco; 29-Yumbo; 30-Zanjón Oscuro	-	77,7	-	Caña de azúcar	Podría	1935,3	26,0	1,3	33,5
						Bosque ripario	Sí	59,6	18,5	31,1	23,9
						Pastos limpios	Podría	1354,5	6,9	0,5	8,9
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	5,7	0,7	7,3
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	5,4	0,7	6,9
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	4,0	0,9	5,2
						Bosque denso	Sí	946,6	3,6	0,4	4,6
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	1,4	0,3	1,9
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	1,3	0,3	1,7
						Tejido urbano continuo	No	166,5	0,8	0,5	1,1
						Pastos arbolados	Podría	122,2	0,8	0,6	1,0
						Zonas de extracción minera	Podría	13,0	0,7	5,6	0,9
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	0,7	0,8	0,9
						Zonas verdes urbanas	Sí	23,6	0,5	2,2	0,7
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,3	0,3	0,4
						Plantación forestal	Podría	121,8	0,3	0,2	0,3
						Tejido urbano discontinuo	No	80,1	0,2	0,3	0,3
						Zonas industriales o comerciales	No	12,6	0,2	1,3	0,2
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	0,1	0,9	0,1
						Instalaciones recreativas	Podría	8,8	0,1	0,9	0,1
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,1	0,2	0,1
						Áreas húmedas continentales (humedales)	Sí	1,5	0,1	3,7	0,1
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	0,0	0,1	0,0
						Cuerpos de agua artificiales	Podría	22,4	0,0	0,0	0,0

Ley 357 de 1997 y Decreto 1076 de 2015: Humedales RAMSAR	Nacional (MADS)	Complejo de humedales: Alto Río Cauca asociado a la Laguna de Sonso	55,2	9,9	17,9	Caña de azúcar	Podría	1935,3	5,6	0,3	56,8
						Ríos	Sí	30,7	2,0	6,5	20,2
						Bosque ripario	Sí	59,6	1,4	2,3	13,9
						Pastos arbolados	Podría	122,2	0,6	0,5	6,3
						Áreas húmedas continentales (humedales)	Sí	1,5	0,1	9,5	1,4
						Pastos limpios	Podría	1354,5	0,1	0,0	1,2
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	0,0	0,0	0,2
Decreto 1076 de 2015: Reserva Forestal Protectora Nacional	Nacional (MADS)	1-Río Meléndez; 2-Cuenca Alta del Río Cali; 3-Río Escalarete y San Cipriano; 4-Río Amaime; 5-Río Dagua; 6-Cerro Dapa - Carisucio; 7-Cuenca del Río Guabas; 8-Río Anchicayá; 9-Hoya Hidrográfica del Río Guadalajara; 10-Yotoco; 11-Ríos Zabaletas y Cerrito	2.255,5	751,7	33,3	Bosque denso	Sí	946,6	242,0	25,6	32,2
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	155,3	18,9	20,7
						Pastos limpios	Podría	1354,5	101,8	7,5	13,6
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	73,2	13,7	9,7
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	57,0	7,5	7,6
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	25,8	5,5	3,4
						Pastos arbolados	Podría	122,2	20,8	17,0	2,8
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	18,7	18,7	2,5
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	18,0	21,0	2,4
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	11,1	2,8	1,5
						Plantación forestal	Podría	121,8	8,7	7,1	1,2
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	5,6	15,4	0,8
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	4,3	31,7	0,6
						Bosque ripario	Sí	59,6	3,3	5,5	0,4
						Tejido urbano discontinuo	No	80,1	1,8	2,2	0,2
						Ríos	Sí	30,7	0,9	2,8	0,1
						Tejido urbano continuo	No	166,5	0,8	0,5	0,1
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	0,7	7,1	0,1
						Caña de azúcar	Podría	1935,3	0,6	0,0	0,1
						Zonas de extracción minera	Podría	13,0	0,4	2,7	0,0
						Zonas verdes urbanas	Sí	23,6	0,3	1,4	0,0
						Cuerpos de agua artificiales	Podría	22,4	0,2	0,7	0,0
Ley 2ª de 1959 y Decreto 1076 de 2015: Zonificación Reserva Forestal	Nacional (MADS)	1-Zona Pacífico; 2-Zona Central	95.053,0	2.371,5	2,5	Bosque denso	Sí	946,6	577,8	61,0	24,4
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	467,6	87,5	19,7
						Pastos limpios	Podría	1354,5	464,1	34,3	19,6
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	263,3	34,5	11,1
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	161,5	19,6	6,8
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	133,1	33,2	5,6
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	125,7	26,6	5,3
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	38,2	38,2	1,6
						Pastos arbolados	Podría	122,2	36,7	30,1	1,5
						Plantación forestal	Podría	121,8	33,0	27,1	1,4
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	16,6	45,2	0,7
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	14,1	16,5	0,6
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	10,2	75,2	0,4
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	9,5	98,4	0,4
						Tejido urbano discontinuo	No	80,1	9,4	11,7	0,4
						Bosque ripario	Sí	59,6	5,7	9,6	0,2
						Tejido urbano continuo	No	166,5	2,4	1,5	0,1
						Ríos	Sí	30,7	1,6	5,4	0,1
						Caña de azúcar	Podría	1935,3	0,5	0,0	0,0
						Cuerpos de agua artificiales	Podría	22,4	0,3	1,3	0,0
						Zonas de extracción minera	Podría	13,0	0,1	0,7	0,0
						Zonas verdes urbanas	Sí	23,6	0,0	0,0	0,0

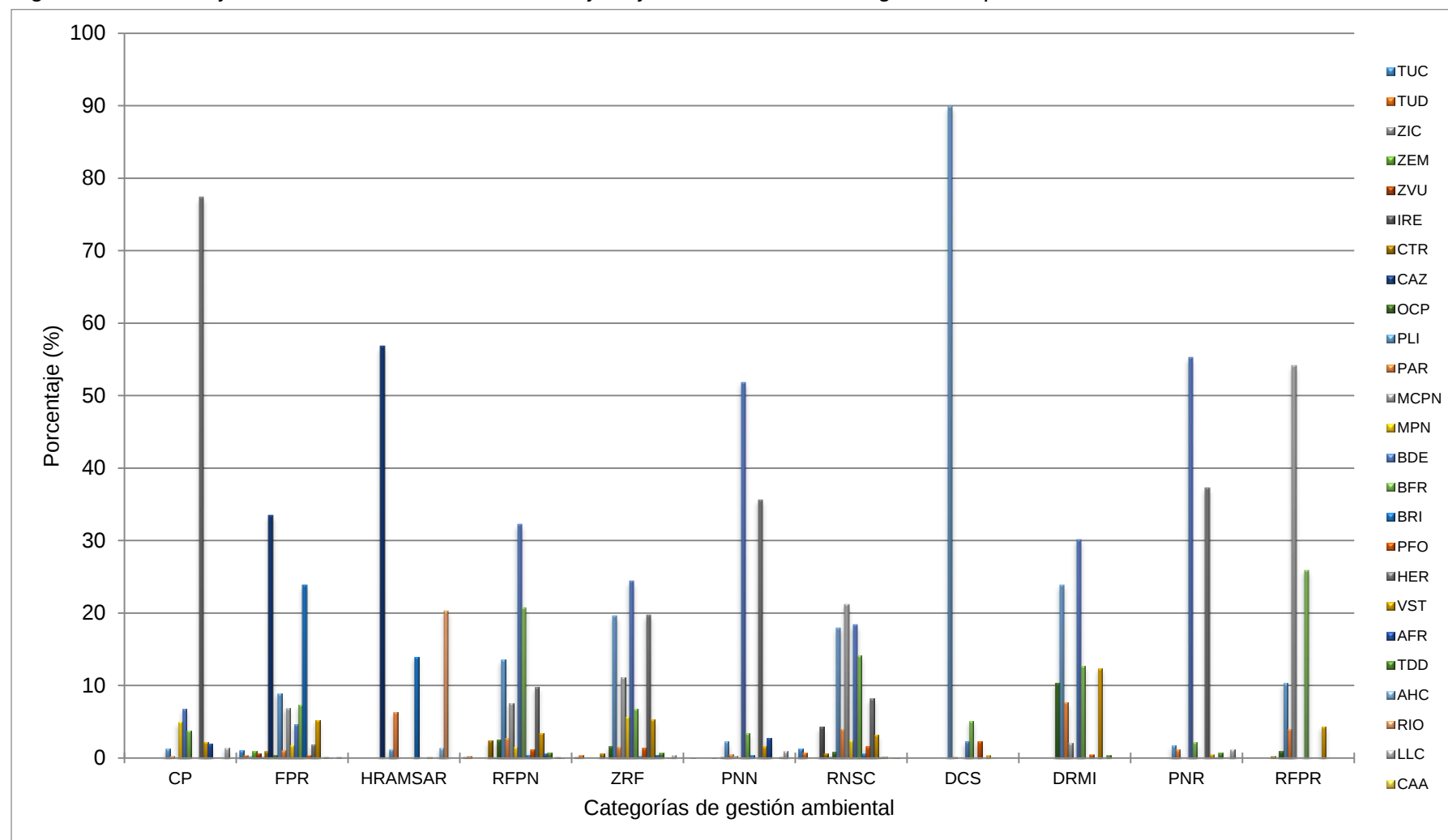
Decreto Ley 2811 de 1974 y Decreto 1076 de 2015 Parques Nacionales Naturales	Nacional (PNN)	1-Nevado del Huila; 2-Las Hermosas; 3-Los Farallones de Cali	4.885,5	409,0	8,4	Bosque denso	Sí	946,6	212,0	22,4	51,8
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	145,7	27,3	35,6
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	14,0	1,7	3,4
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	10,9	80,6	2,7
						Pastos limpios	Podría	1354,5	9,3	0,7	2,3
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	6,4	1,4	1,6
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	3,9	40,3	0,9
						Pastos arbolados	Podría	122,2	2,1	1,8	0,5
						Bosque ripario	Sí	59,6	1,6	2,6	0,4
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	1,1	0,1	0,3
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,5	0,5	0,1
						Ríos	Sí	30,7	0,4	1,4	0,1
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	0,3	0,1	0,1
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	0,2	0,3	0,1
						Tejido urbano discontinuo	No	80,1	0,2	0,3	0,1
						Plantación forestal	Podría	121,8	0,2	0,2	0,1
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,0	0,0	0,0
Decreto 1076 de 2015: Reserva Natural de la Sociedad Civil	Nacional (PNN)	1-Club Campestre de Cali; 2-La Cuchilla; 3-Reserva Miravalle; 4-Cusagui; 5-Parque Ecológico Samuel Álvarez; 6-Refugio Corazones Verdes; 7-El Naranjal; 8-El Progreso; 9-El Porvenir; 10-La Magdalena; 11-El Carare II; 12-Los Volcanes; 13-El Carare; 14-El Fuerte; 15-El Tesoro; 16-La Esperanza; 17-El Edén; 18-San Antonio; 19-Tierrablanca No. 4; 20-El Pailón; 21-El Placer; 22-Las Camelias; 23-Las Manguitas; 24-El Tenjo; 25-Esparta; 26-Jurásico; 27-La Esmeralda; 28-La Lucha; 29-Rosas de la Tarde; 30-La Palma; 31-Las Brisas; 32-Los Cauchos; 33-Masada; 34-Verde Esperanza; 35-Piedra Sentada; 36-La Voluntad de Dios; 37-El Manantial; 38-Cristal; 39-La Cabaña; 40-Buenos Aires; 41-Dinaboy; 42-Bella Vista; 43-La Vega; 44-San Rafael; 45-La Laguna; 46-Tierra Blanca No. 2; 47-El Vesubio; 48-Himalaya; 49-San Rafael	29,7	25,5	85,9	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	5,4	0,7	21,2
						Bosque denso	Sí	946,6	4,7	0,5	18,3
						Pastos limpios	Podría	1354,5	4,6	0,3	17,9
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	3,6	0,4	14,1
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	2,1	0,4	8,2
						Instalaciones recreativas	Podría	8,8	1,1	12,5	4,3
						Pastos arbolados	Podría	122,2	1,0	0,8	4,0
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	0,8	0,2	3,2
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	0,6	0,2	2,4
						Plantación forestal	Podría	121,8	0,4	0,3	1,6
						Tejido urbano continuo	No	166,5	0,3	0,2	1,2
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,2	0,2	0,9
						Tejido urbano discontinuo	No	80,1	0,2	0,2	0,7
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	0,2	0,2	0,7
						Bosque ripario	Sí	59,6	0,1	0,2	0,6
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,0	0,1	0,2
						Caña de azúcar	Podría	1935,3	0,0	0,0	0,1
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	0,0	0,2	0,1
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	0,0	0,2	0,1
						Ríos	Sí	30,7	0,0	0,1	0,1
						Zonas verdes urbanas	Sí	23,6	0,0	0,0	0,0
Decreto 1076 de 2015: Distrito de Conservación de Suelos	Regional (CAR)	1-Cañón de Río Grande	64,2	61,4	95,7	Pastos limpios	Podría	1354,5	55,2	4,1	89,9
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	3,1	0,4	5,1
						Bosque denso	Sí	946,6	1,4	0,1	2,3
						Plantación forestal	Podría	121,8	1,4	1,1	2,2
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	0,3	0,1	0,4
						Pastos arbolados	Podría	122,2	0,1	0,1	0,1

Decreto 1076 de 2015: Distrito Regional de Manejo Integrado	Regional (CAR)	1-El Chilcal; 2-Laguna de Sonso; 3-Distrito de Manejo Integrado Regional Enclave Subxerofítico de Atuncela	39,7	15,1	38,0	Bosque denso	Sí	946,6	4,5	0,5	30,2
						Pastos limpios	Podría	1354,5	3,6	0,3	23,9
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	1,9	0,2	12,6
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	1,9	0,4	12,4
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	1,6	1,6	10,3
						Pastos arbolados	Podría	122,2	1,1	0,9	7,6
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	0,3	0,0	2,0
						Plantación forestal	Podría	121,8	0,1	0,1	0,5
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,1	0,2	0,4
						Ríos	Sí	30,7	0,0	0,0	0,0
						Mosaico de pastos con espacios naturales	Sí	400,4	0,0	0,0	0,0
						Bosque denso	Sí	946,6	16,7	1,8	55,2
						Herbazal (páramos principalmente)	Sí	534,4	11,2	2,1	37,3
Decreto 1076 de 2015: Parque Natural Regional	Regional (CAR)	Parque Natural Regional del Nima	30,3	30,2	99,5	Bosque fragmentado	Sí	821,9	0,6	0,1	2,1
						Pastos limpios	Podría	1354,5	0,5	0,0	1,7
						Lagunas, lagos y ciénagas naturales	Sí	9,6	0,3	3,6	1,1
						Pastos arbolados	Podría	122,2	0,3	0,3	1,1
						Tierras desnudas y degradadas	Podría	36,7	0,2	0,6	0,7
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	0,1	0,0	0,5
						Afloramientos rocosos	Podría	13,6	0,0	0,2	0,1
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,0	0,0	0,0
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	0,0	0,0	0,0
						Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	Sí	763,8	1,9	0,3	54,2
						Bosque fragmentado	Sí	821,9	0,9	0,1	25,9
						Pastos limpios	Podría	1354,5	0,4	0,0	10,3
						Vegetación secundaria o en transición	Podría	472,1	0,2	0,0	4,3
Decreto 1076 de 2015: Reserva Forestal Protectora Regional	Regional (CAR)	1-Reserva Forestal Protectora Regional de Bitaco; 2-Reserva Forestal Protectora Regional La Albania y La Esmeralda	3,6	3,6	100,0	Pastos arbolados	Podría	122,2	0,1	0,1	4,0
						Otros cultivos permanentes	Podría	100,2	0,0	0,0	1,0
						Cultivos transitorios	Podría	85,8	0,0	0,0	0,3
						TOTAL					
						107.380,1					
						4.411,9*					
						4,1					

* Sin superposición son 3.056 km²

Fuente: elaboración propia.

Figura 29. Porcentaje de cada cobertura de la tierra bajo la jurisdicción de las categorías de protección ambiental valoradas.



Fuente: elaboración propia.

Con el panorama general de las categorías de gestión y su relación con las coberturas de la tierra en el área de estudio, es crucial analizar al detalle la relación directa de cada uno de ellos con las coberturas que componen la EEM. A partir del Cuadro 19 y la Figura 30, se sabe que son once las categorías de protección ambiental que ordenan la EEM. La espacialización de cada una de estas categorías evidencia que algunos se intersectan en zonas comunes —e.g. PNN, ZRF y CP en alta montaña de la cordillera central—. Esta situación permite que elementos de la EEM estén reglamentados por un gran número de normas (conteo de filas en Cuadro 19): BFR (10), BDE (9) y MCPN (8), y otros cuatro elementos (7). Al contrario, hay elementos de la EEM que están en la jurisdicción de muy pocas normas como las ZVU (4) y los AHC (2). Esto quiere decir que la normativa ambiental ampara correctamente las coberturas naturales de la periferia del área (piedemonte y alta montaña), pero no hace lo mismo con los elementos de gran valor ecosistémico localizados en el núcleo del área dado que predominan otro tipo de usos, particularmente extensivos.

De otra parte, el Cuadro 19 enseña que las categorías de escala nacional son aquellas que cobijan el mayor número de elementos de la EEM (conteo de columnas en Cuadro 19), destacándose las ZRF y RNSC (9 elementos), PNN (8) y CP (7). A excepción de las RNSC, las categorías de esta escala cubren áreas extensas de la superficie, lo que se puede reconocer como una gestión positiva. Sin embargo, el panorama de la aplicación de la normativa regional está lejos de ser efectivo. Primero, las normas regionales tienen un área de extensión muy pequeña y no abarcan las coberturas de mayor capacidad ecosistémica —los DCS y RFPR ordenan solo dos elementos de EEM—. Este vacío en la normativa ambiental regional es un llamado de atención importante para las instituciones y corporaciones involucradas, puesto que el objetivo de sus reglamentaciones no se refleja en el área de estudio.

Considerar el número de normas que operan sobre los elementos de la EEM ofrece una orientación básica, pero el análisis de aplicabilidad de la normativa se complementa con la localización y la extensión del área de jurisdicción de las categorías de protección. Las normativas de gestión ambiental tienen jurisdicción en el área de estudio, abarcando 4.412 km² en los piedemontes y sectores de alta montaña de las cordilleras central y occidental. Al norte del área de estudio se concentra la mayoría de área ordenada por las normas, llegando a un solapamiento de categorías de protección correspondiente a 1.356 km². Sin esta sobreposición, la extensión de jurisdicción conjunta para el área de estudio es de 3.056 km².

Esta desarticulación de las categorías de protección reduce la eficiencia y la pertinencia de la gestión ambiental en el área de estudio y hace vulnerables elementos de la EEM. Por ejemplo, en la Figura 30 (derecha) se presenta en color verde la EEM cubierta por las categorías de protección (2.124 km² equivalentes al 59% de la EEM), en color rojo la EEM que no está cubierta por las categorías (1.462 km² correspondientes al 41% de la EEM) y en color naranja las áreas cubiertas por las categorías que no son EEM (913 km² que representan el 25% de la EEM). De esta figura se observa un patrón espacial: la EEM cubierta

está en el perímetro del área, la EEM no cubierta se concentra al sur y el área cubierta que no es EEM se localiza en el sector noroccidental.

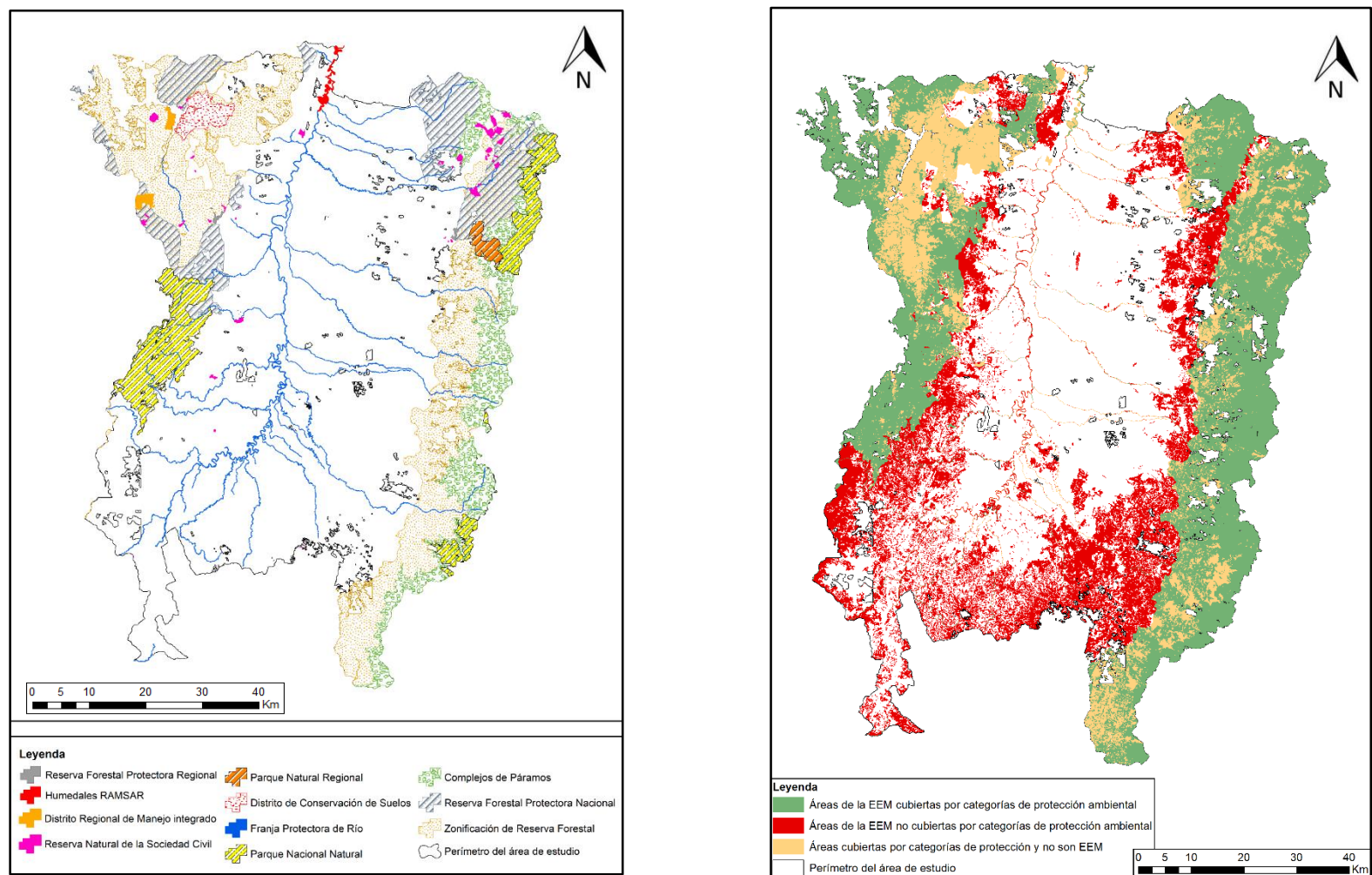
De manera general, la relación entre EEM y normativa nacional y regional parecería positiva dado que el 59% de su área está ordenada. Sin embargo, analizando a detalle cada uno de los diez elementos de la EEM se identificó una variabilidad muy alta de área gestionada (de 4% a 100%). Los elementos que gozan de una cobertura casi total de categorías de protección son LLC y HER (100%), y BDE (87%). Esto es satisfactorio porque los HER y BDE están entre las cuatro coberturas más extensas en área. No obstante, los elementos de RIO (15%), AHC (13,2%) y ZVU (4%) cuentan con menos de una tercera parte de su área bajo ordenamiento. Estas no son coberturas de gran extensión, pero juegan un papel trascendental en la dinámica del sistema socioecológico al ser productoras de diferentes SE como el abastecimiento de agua, la regulación de la calidad del aire y del agua para la población del área de estudio.

Cuadro 19. Categorías nacionales y regionales que gestionan los elementos de la EEM.

Elemento de la EEM	Categorías identificadas											# categorías	Área total de elementos de la EEM en AE (km²)	Área de elemento de la EEM bajo catego. de gestión en AE (km²)	Porcentaje de elemento de la EEM bajo catego. de gestión en AE (%)
	Nacional							Regional							
	CP	FPR	HRAVSAR	RFPN	ZRF	PNN	RNSC	DCS	DRMI	PNR	RFPR				
LLC	x	x		x	x	x	x			x		7	9,6	9,6	100,0
HER	x	x		x	x	x	x			x		7	534,4	533,7	99,9
BDE	x	x		x	x	x	x	x	x	x		9	946,6	820,1	86,6
BRI		x	x	x	x	x	x					6	59,6	26,2	44,0
MCPN	x	x		x	x	x	x		x		x	8	763,8	292,7	38,3
BFR	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	10	821,9	295,2	35,9
MPN	x	x		x	x	x	x		x			7	400,4	140,7	35,1
RIO	x		x	x	x	x	x		x			7	30,7	4,6	15,1
AHC		x	x									2	1,5	0,2	13,2
ZVU		x		x	x		x					4	23,6	0,8	3,6
# coberturas	7	9	3	9	9	8	9	2	5	4	2	Totales	3.586	2.123,8	59,1
Área total de catego. de gestión en AE (km²)	656,3	77,7	9,9	751,7	2.371	409,0	25,5	61,4	15,1	30,2	3,6		4.412		

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. Categorías de protección ambiental con jurisdicción en el área de estudio (izquierda) y su relación con la EEM (derecha).



Fuente: Elaboración propia con datos de SIAC y la valoración de expertos. Escala numérica: 1:600.000.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN

Proponer una estructura ecológica para el sistema socioecológico «área de influencia metropolitana de Santiago de Cali» tiene consecuencias profundas. La primera, y posiblemente la principal, es que conlleva interpretar la dimensión ambiental de un fenómeno antrópico desde una escala supramunicipal. Esto rompe con la estructura de pensamiento y gestión de la institucionalidad, cuyas escalas de proposición y acción se restringen a límites municipal, departamental y nacional.

Así las cosas, plantear una EEM mesoescalar disminuye los fraccionamientos institucionales y apoya la interpretación integrada de fenómenos complejos como los metropolitanos. Fenómenos que, en la actualidad, se valoran desde la perspectiva de la eficiencia en la producción y la solidez del mercado, pero ignorando la dependencia que tienen esos elementos del sistema social de la base natural única y compartida, los ecosistemas naturales (sistema ecológico).

Para sustentar un panorama de integración mesoescalar a cabalidad, esta investigación interpreta el área de estudio como un sistema socioecológico, donde se interrelacionan los subsistemas antrópico y natural de forma evolutiva, recíproca y compleja. Estos subsistemas hacen referencia a la EMC, como lo artificial, y la EEM como lo ecológico, las cuales están ligados de forma profunda por los SE, entendidos como el bienestar que tienen los seres humanos de los ecosistemas.

Bajo este marco analítico, emerge otro elemento de vital importancia en esta la investigación: la capacidad de discutir, si la inclusión matices y de forma clara, la figura normativa de las estructuras ecológicas en Colombia, cuya aplicación discrimina actualmente entre estructura ecológica principal e infraestructura ecológica o complementaria. Estas divisiones son las que cargan de incoherencia al Decreto 3600 de 2007, el cual dificulta la gestión ambiental, pues promueve interpretaciones erradas y distantes de la visión de los progenitores las estructuras ecológicas, asegurando que, por ley, **sus elementos equivalen a instrumentos de la legislación ambiental**. Desde la fecha de expedición de la norma, los Parques Naturales, las Zonas de Reserva Forestal, etcétera, han recibido, de forma descuidada, el apellido de estructura ecológica.

En este trabajo, la estructura ecológica comprende aquellos elementos naturales y seminaturales que más ofrecen SE. Esta definición permite considerar algo muy lógico: si los beneficios que recibe el ser humano de los ecosistemas están en todas las escalas, entonces no se deberían «encapsular» de manera arbitraria por una vía, la jurisdicción de una norma, o perímetro urbano o rural de un municipio o departamento. La visión aquí defendida de estructura ecológica elimina la jerarquización de principal y secundaria en términos ecológicos, manteniendo el objetivo de la norma: un aprovechamiento con enfoque sustentable que garantice el bienestar humano y de la vida en general.

Por lo tanto, la riqueza de considerar una estructura ecológica instrumentalizando el enfoque de los SE es que permite la valoración múltiple de los ecosistemas naturales (compuestos por coberturas naturales y seminaturales en las dimensiones: i) **biofísica**, dado que la regulación y mantenimiento de las condiciones de vida son influenciadas por todos los seres vivos y los ecosistemas; ii) **económica**, teniendo en cuenta que todas las salidas materiales y nutricionales de la naturaleza son el aprovisionamiento, o capital natural, de los grupos humanos; y iii) **social**, ya que las particularidades no consumibles de los ecosistemas influyen en el estado mental y físico de los seres humanos. De esta manera, el potencial de proponer una estructura ecológica desde este enfoque sistémico es que permite la interpretación profunda del sistema socioecológico, abarcando una serie de elementos que por sus características intrínsecas estimulan el funcionamiento del sistema y la existencia de la vida en general.

Otro aporte sustancial de esta investigación es su enfoque espacial y geográfico instrumentalizado en las unidades geográficas de cobertura de la tierra. Estas son unidades concretas e identificables, y su análisis permite conocer las características reales de la superficie terrestre, determinando los tipos de elementos, su localización y su extensión sobre un área de interés. Esta información espacial fue muy valiosa y habilitó a los investigadores para realizar análisis enriquecedores como la realización de un diagnóstico de algunos instrumentos o categorías de gestión y protección ambiental de operación en el área de estudio.

Se descubrió que once (11) categorías de protección ambiental, de ámbito nacional y regional, se superponen en 1.356 km², lo que disminuye la extensión de cobertura de su jurisdicción. La desarticulación entre normas permite discutir la eficacia de la gestión ambiental en el área, considerando que elementos de alto valor ecológico y ambiental, que aquí se llaman EEM, se encuentran desprotegidos en un 41%. Esta desarticulación entre categorías de protección produjo consecuencias graves. Por ejemplo, se encontró que hay normas cuya jurisdicción abarca elementos que no son de su competencia y están allí localizados al margen de la ley, como cultivos para la agroindustria, áreas urbanas y comerciales.

Al tiempo que esto ocurre, una gran proporción de las coberturas de gran aporte al bienestar de todas las especies están desamparados por la normatividad ambiental de carácter nacional y regional. Tales coberturas deberían estar cobijadas partiendo del objetivo de la normativa. Se encontró que, por ejemplo, gran parte de los relictos de bosque, bosques riparios o ribereños, humedales y áreas agrícolas heterogéneas, están por fuera de la jurisdicción de estas normas. La trascendencia de este tipo de ejercicios es que permiten conocer e identificar los problemas difícilmente observables desde las divisiones político-administrativas municipales y departamentales, para actuar y transformar la realidad ambiental en una escala supramunicipal.

Finalmente, este ejercicio podría ser una herramienta de toma de decisiones para el área encargada de la gestión ambiental en un área metropolitana (o en su defecto, para las CAR) dado que, con ciertos ajustes, permite proponer escenarios diferentes y analizar sus resultados. Así, por ejemplo, no solo se ponderarían por igual los criterios para identificar la EEM, sino que en ejercicios futuros se pueden plantear casos hipotéticos donde se priorice alguno o varios criterios para definir los elementos de una EEM particular. Siendo cuatro los criterios aquí establecidos (multifuncionalidad, singularidad, capacidad e importancia relativa) el abanico de escenarios podrá ser tan diverso como se desee proyectar en algún lineamiento de política de gestión ambiental.

CONCLUSIONES

A partir del enfoque sistémico se interpretó el área de estudio como un sistema socioecológico compuesto de elementos naturales, elementos artificiales y sus interrelaciones. Esta apuesta profunda de pensamiento permitió discutir un gran flagelo de la política de asociación urbana vigente en Colombia: los temas ambientales vinculados a los fenómenos metropolitanos. Tomando como caso de estudio el área de influencia metropolitana de Cali, se propuso una solución: definir, plantear, e instrumentalizar una visión alternativa e integral de lo que deberían ser una estructura ecológica que garantice el bienestar de las diferentes formas de vida del área de estudio.

En el área de influencia metropolitana de Cali se identificó una estructura ecológica mesoescalar. Sus elementos fueron las coberturas de la tierra naturales y seminaturales y el criterio de selección fue el nivel de contribución, en términos de servicios ecosistémicos, al bienestar humano. En consecuencia, los elementos que componen la EEM son aquellos de mayor aporte al bienestar humano en términos culturales, regulación y aprovisionamiento. En orden descendente de contribución, los diez elementos de dicha estructura son: bosque denso, herbazal (páramos), ríos, bosque ribereño, bosque fragmentado, lagunas, lagos y ciénagas naturales, áreas húmedas continentales (humedales), mosaico de pastos con espacios naturales, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, zonas verdes urbanas. En conjunto, la EEM ocupa 3.856 km², el 44% del total del sistema socioecológico.

Por otra parte, existen catorce elementos que podrían llegar a considerarse como estructura ecológica, ocupando 4.294 km² (53% del sistema socioecológico). Estos son: vegetación secundaria o en transición, cuerpos de agua artificiales, otros cultivos permanentes, pastos arbolados, plantación forestal, cultivos transitorios, instalaciones recreativas, afloramientos rocosos, caña de azúcar, pastos limpios, zonas de extracción minera, zonas de disposición de residuos, tierras desnudas y degradadas, red vial, ferroviaria y terrenos asociados.

En su mayoría, estos elementos son seminaturales, y dependiendo de los contextos, los porcentajes de ocupación, el tipo de actividad o cultivo, la mixtura de usos y ciclos rotativos, la localización contextual y la jurisdiccional del elemento, entre otros, se identificaron los factores que determinaron cuáles podrían ser EEM y cuáles no. Por último, hay unas coberturas que no contribuyen de forma significativa al bienestar humano y definitivamente no son EEM. En esta categoría se tienen las cuatro (4) coberturas más artificiales del área de estudio: aeropuertos, zonas industriales o comerciales, tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo. Las coberturas que no son EEM ocuparon 259 km², que representan 3% del sistema socioecológico.

Adicionalmente, se concluyó que la proyección y aplicación de las categorías de protección ambiental en el área del sistema socioecológico es inadecuada. En primer lugar, la operación de estas normas es desarticulada y su área de

jurisdicción se sobrepuso en más de 1.350 km². Esta situación afecta gravemente la gestión ambiental de la EEM, amparada en un 59% por la jurisdicción de categorías de protección ambiental, indicando que el 41% de sus elementos están desprotegidos por fuera de la jurisdicción de las normas. Además, se descubrió la existencia de áreas cubiertas por las categorías de protección que no son EEM (913 km² en total).

También, se debe decir que mientras las categorías de escala nacional ordenan mayormente la EEM, las de escala regional lo hacen de forma inoportuna: cuentan con jurisdicción de muy poca extensión, sin abarcar algunos elementos de la EEM. Además, el panorama del tema normativo se complejiza aún más al considerar que su objetivo no se aplica a cabalidad en el área de estudio. Así, por ejemplo, se descubrió que en la jurisdicción de la categoría de protección a humedales está presente el cultivo de la caña de azúcar en un 57%, mientras la extensión de los humedales representa menos del 1,4% de dicha área.

Por último, la información producida y presentada en esta investigación puede considerarse como un insumo clave para la propuesta de lineamientos de gestión ambiental para el sistema socioecológico identificado. Definitivamente, Santiago de Cali es el núcleo de un sistema socioecológico metropolitano y, si llegara a consolidarse legalmente como área metropolitana, su gestión ambiental podría nutrirse sustancialmente de los métodos y resultados de ejercicios de este tipo, para materializar una EEM que provea SE de forma sustentable para toda la población y la vida en general.

BIBLIOGRAFÍA

ABRAMO, Pedro. La ciudad com-fusa: mercado y producción de la estructura urbana en las grandes metrópolis latinoamericanas. En: EURE. 2012. Vol. 38, No, 114; p. 35-69.

ANTIOQUIA. SECRETARIA DE PLANEACIÓN DEPARTAMENTAL. Plan de Ordenamiento Territorial Departamental. _____. 2013. 160 p.

BARRANQUILLA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2008. 75 p.

BARRANQUILLA. JUNTA METROPOLITANA. Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano. _____. 2013. 280 p.

BAYONA, José. Misión para el fortalecimiento del sistema de ciudades. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación, 2014. 115 p.

BENZ, Ursula, *et al.* Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. En: ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing [en línea]. 2004. Vol. 58, No. 3; p. 239-258.

BERTALANFFY, Ludwig. An outline of General System Theory. En: The British Journal for the Philosophy of Science. 1950. Vol. 1, No. 2; p. 134-165.

_____. The history and status of General Systems Theory. En: The Academy of Management Journal. 1972. Vol. 15, No. 4; p. 407-426.

BERUCHASHVILI, Nicolás y BERTRAND, Georges. El geosistema o “sistema territorial natural”. En: BERTRAND, Claude y BERTRAND, Georges. Geografía del medio ambiente. Granada: Universidad de Granada, 2006. p. 97-108.

BLASCHKE, Thomas. Object based image analysis for remote sensing. En: ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2010. Vol. 65, No. 1; p. 2-16.

BUCARAMANGA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2013 - 2027. 170 p.

BURKHARD, Benjamin, *et al.* Ecosystem service potentials, flows and demands- concepts for spatial localisation, indication and quantification. En: Landscape Online. 2014. Vol. 34, No. 1; p. 1-32.

BURKHARD, Benjamin, *et al.* Landscapes’ capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. En: Landscape Online. 2009. Vol. 15, No. 1; p. 1-22.

BURKHARD, Benjamin, *et al.* Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. En: Ecological Indicators [en línea]. 2012. Vol. 21, p. 17-29.

BURLEY, Terence. Land use or land utilization?. En: The Professional Geographer. 1961. Vol. 13. No. 6; p. 18-20.

CAMACHO, Miguel. La encrucijada de los servicios públicos en Cali (1961-2004). Cali: Secretaria de Cultura y Turismo del Valle del Cauca, 2007. 134 p.

CHUVIECO, Emilio. Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio. Madrid: Ariel, 2010. 608 p.

CLARK, Barnaby; PELLIKKA, Petri. Landscape analysis using multiscale segmentation and object orientated classification. En: Recent advances in remote sensing and geoinformation processing for land degradation assessment. 2009. Vol. 8; p. 323-341.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto Ley 2811 de 1974. Bogotá: _____, 1974, 71 p.

_____. Ley 2ª de 1959. Bogotá: _____, 1959, 6 p.

_____. Ley 99 de 1993. Bogotá: _____, 1993. 77 p.

_____. Ley 357 de 1997. Bogotá: _____, 1997, 11 p.

_____. Ley 1625 de 2013. Bogotá: _____, 2013, 37 p.

_____. Ley 1753 de 2015. Bogotá: _____, 2015. 191 p.

COLOMBIA. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. El estado y su organización. Bogotá: DNP, 2005.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Decreto número 3600 de 2007. Bogotá: _____, 2007. 13 p.

_____. Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. Bogotá: _____, 2015. 654 p.

_____. Política Nacional de Gestión Integral de Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos, PNGIBSE. Bogotá: _____, 2012. 134 p.

COMANICIU, Dorin y MEER, Peter. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. En: IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2002. Vol. 24, No. 5; p. 603-619.

COSTANZA, Robert, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. En: Nature. 1997. Vol. 387, No. May; p. 253-260.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Protocolo de información de la capa temática de cobertura y uso del suelo. Santiago de Cali: _____, 2011. 27 p.

CUMMING, Graeme. Conceptual Background on Social-Ecological Systems and Resilience. En: _____. Spatial resilience in social-ecological systems. Londres: Springer, 2011. p. 7-28.

DANLEY, Brian y WIDMARK, Camilla. Evaluating conceptual definitions of ecosystem services and their implications. En: Ecological Economics [en línea]. 2016. Vol. 126, p. 132-138.

DAVIS, Mike. Planet of slums. New York: Verso, 2006. 120 p.

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005 – 2020. Bogotá: _____, 2010. 300 p.

DUARTE, Efraín, *et al.* Santiago. Mapa de cobertura forestal y uso de la tierra año 2015: metodología y resultados preliminares. San Salvador: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2015. 28 p.

ENGLUND, Oskar, *et al.* How to analyse ecosystem services in landscapes—A systematic review. En: Ecological Indicators [en línea]. 2017. Vol. 73, p. 492-504.

ESRI. Band Collection Statistics [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/band-collection-statistics.htm>

_____. Buffer [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de noviembre de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/buffer.htm>

_____. Compute Confusion Matrix [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de marzo de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-confusion-matrix.htm>

_____. Eliminate [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de marzo de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/coverage-toolbox/eliminate.htm>

_____. Erase [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de junio de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/erase.htm>

_____. Merge [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 8 de junio de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/merge.htm>

_____. Multivariate Tools [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de noviembre de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-multivariate-tools.htm>

_____. Raster to Polygon [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de marzo de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon.htm>

_____. Segment Mean Shift Function [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/segment-mean-shift-function.htm>

_____. Topology in ArcGIS [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 25 de julio de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/topologies/topology-in-arcgis.htm>

_____. Train Random Trees Classifier [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 30 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/train-random-trees-classifier.htm>

_____. Understanding segmentation and classification [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 20 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-segmentation-and-classification.htm>

FALLA, Marcela, *et al.* Un modelo físico de ordenamiento territorial para el Valle del Cauca a partir de su sistema de ciudades. Cali: Universidad de San Buenaventura, 2009. 302 p.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION. Servicios ecosistémicos y biodiversidad: evaluación y valoración [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 2 de junio de 2017]. En: <http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/valuation/es/>

FUNDACIÓN AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES. Sustentabilidad de la cadena productiva de la soja argentina y la región. Buenos Aires: Departamento de Desarrollo Sostenible, 2007. 281 p.

GEORGE, Pierre. El medio ambiente. Barcelona: OIKUS-TAU, 1972. 128 p.

GETIS, Arthur; GETIS, Judith; BJELLAND, Mark y FELLMAN, Jerome. Introduction to Geography. New York: McGraw-Hill, 2011. 453 p.

GLIGO, Nicolo. Entorno de la sustentabilidad ambiental del desarrollo agrícola latinoamericano: factores y políticas. En: GALLOPÍN, Gilberto. (comp.). El futuro ecológico de un continente: una visión prospectiva de la América Latina, Volumen II. México D.F.: Universidad de las Naciones Unidas, 2001. p. 305-324.

GÓMEZ-BAGGETHUN, Erik, *et al.* The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. En: Ecological Economics [en línea]. 2010. Vol. 69, No. 6; p. 1209-1218.

GOOGLE. Formularios [en línea]. _____. [Consultado el 8 de agosto de 2017]. En: <https://www.google.com/forms/about/>

GROOT, Rudolf de; WILSON, Matthew y BOUMANS, Roelof. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. En: Ecological Economics. 2002. Vol. 41, No. 3; p. 393-408.

GULINCK, Hubert, *et al.* A framework for comparative landscape analysis and evaluation based on land cover data, with an application in the Madrid region (Spain). En: Landscape and Urban Planning. 2001. Vol. 55, No. 4; p. 257-270.

HABERMAS, Jürgen. Knowledge and human interests. 2 ed. Londres: Heinemann Educational Books, 1972. 392 p.

HAGGETT, Peter. Geografía: una síntesis moderna. 3 ed. Barcelona: Omega, 1994. 669 p.

HAINES-YOUNG, Roy y POTSCHIN, Marion. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): consultation on Version 4. Nottingham: University of Nottingham, 2013. 34 p.

HAMMEN, Thomas van der. Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 1998. 142 p.

HAMMEN, Thomas van der y ANDRADE, Germán. Estructura ecológica principal de Colombia: primera aproximación. Bogotá: IDEAM, 2003. 74 p.

HARPER, Charles. Environment and society: human perspectives on environmental issues. 3 ed. New Jersey: Pearson & Prentice Hall, 2004. 482 p.

HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. Extract Segments [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 10 de febrero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/segmentonly.html>

_____. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 14 de enero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/flaash.html>

_____. Seamless Mosaic [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 21 de enero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/MosaicSeamless.html>

HARRIS, Richard. Remote sensing. En: GREGORY, Derek; JOHNSTON, Ron; PRATT, Geraldine, WATTS, Michael; WHATMORE, Sarah (eds.). The dictionary of human geography. 5 ed. Oxford: Blackwell, 2009. p. 643-644.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE *Land Cover* adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Bogotá: _____, 2010. 72 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Report on land use, land-use change and forestry. Oslo: GRID-Arendal, 2000. 375 p.

JACOBS, Sander, *et al.* «The Matrix Reloaded»: A review of expert knowledge use for mapping ecosystem services. En: Ecological Modelling. 2015. Vol. 295, p. 21-30.

JAMES, Timothy. Remote sensing of environmental change. En: HOLDEN, Joseph. An Introduction to Physical Geography and the Environment. 3 ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2012. p. 740-778.

JOHNSTON, Ron. Quantitative methods. En: GREGORY, Derek; JOHNSTON, Ron; PRATT, Geraldine, WATTS, Michael; WHATMORE, Sarah (eds.). The dictionary of human geography. 5 ed. Oxford: Blackwell, 2009. p. 123-125.

JOHNSON, Brian y ZHIXIAO, Xie. Unsupervised image segmentation evaluation and refinement using a multi-scale approach. En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. 66, No. 4; p. 473-483.

JONGMAN, Rob. Ecological networks and greenways in Europe: reasoning and concepts. En: Journal of Environmental Sciences. 2003. Vol. 15, No. 2; p. 173-181.

KLAPKA, Pavel, *et al.* Spatial organisation: development, structure and approximation of geographical systems. En: Moravian Geographical Reports. 2010. Vol. 18, No. 3; p. 53-65.

KOSCHKE, Lars, *et al.* A multi-criteria approach for an integrated land-cover-based assessment of ecosystem services provision to support landscape planning. En: Ecological Indicators. 2012. Vol. 21, p. 54-66.

LI, Xiaoxiao, *et al.* Object-based land-cover classification for metropolitan Phoenix, Arizona, using aerial photography. En: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. Vol. 33; p. 321-330.

LÖW, Fabian; KNÖFEL, Patrick y CONRAD, Christopher. Analysis of uncertainty in multi-temporal object-based classification. En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 105; p. 91-106.

MAKINDE, Esther, *et al.* Object Based and Pixel Based Classification Using Rapideye Satellite Imager of ETI-OSA, Lagos, Nigeria. En: Geoinformatics FCE CTU. 2016. Vol. 15, No. 2; p. 59-70.

MÁRQUEZ, Germán y VALENZUELA, Elizabeth. Estructura ecológica y ordenamiento territorial ambiental: aproximación conceptual y metodológica a partir del proceso de ordenación de cuencas. En: Gestión y Ambiente. 2008. Vol. 11, No. 2; p. 137-148.

MARTÍNEZ, Pedro. La planificación y la gestión interesalar municipal y metropolitana: casos áreas metropolitanas de Valle de Aburrá (AMVA) y centro occidente (AMCO). Cali: Universidad del Valle, 2014. 177 p.

_____. La producción del espacio en la ciudad latinoamericana: el modelo del impacto del capitalismo global en la metropolización. En: Hallazgos. 2014. Vol. 12, No. 23; p. 211-229.

MARTÍNEZ, Pedro y BUITRAGO, Oscar. Cali, una metrópoli regional en movimiento: la planeación municipal y los procesos de metropolización. Cali: Universidad del Valle, 2011. 131 p.

MARTÍNEZ, Pedro y PATIÑO, Zaida. Área metropolitana del sur del Valle y norte del Cauca AMVACA: definición, caracterización y propuesta de conformación. Cali: Universidad del Valle, 2015. 266 p.

MASSIRIS, Ángel. Determinantes de los planes de ordenamiento territorial. En: Perspectiva Geográfica. 1998. Vol. 1, No. 2; p. 7-70.

_____. Ordenación del territorio en América Latina. En: Scripta Nova. 2002. Vol. 6, No. 125; p. 741-798.

MEDELLÍN. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2014. 71 p.

MILLENIUM ECOSYSTEM ASSESTMENT. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005. 155 p.

NASA JPL. ASTER Global Digital Elevation Model [Data set]. Sioux Falls: _____, 2009.

NEDKOV, Stoyan; BOYANOVA, Kremena y BURKHARD, Benjamin. Quantifying, modelling and mapping ecosystem services in watersheds. En: CHICHARO, Luis; MÜLLER, Felix y FOHRER, Nicola (eds.). Ecosystem services and river basin ecohydrology. Dordrecht: Springer, 2015. p. 133-150.

PÁRAMO, Pablo. La falsa dicotomía entre investigación cualitativa y cuantitativa. En: _____ (ed.). La investigación en ciencias sociales: estrategias de investigación. 2 ed. Bogotá: Universidad Distrital de Colombia. 2013. p. 23-32.

PEET, Richard. Modern geographical thought. Oxford: Blackwell, 1998. 342 p.

PEREIRA. JUNTA METROPOLITANA. Plan Integrado de Desarrollo Metropolitano. _____. 2012. 170 p.

PEREIRA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2000. 55 p.

PLANET LABS. Applications of the RapidEye Red Edge Band. San Francisco: _____. 2016, 8 p.

POTSCHIN, Marion y HAINES-YOUNG, Roy. Ecosystem services: exploring a geographical perspective. En: Progress in Physical Geography. 2011. Vol. 35, No. 5; p. 575-594.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. ForLoop [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 10 de marzo de 2017]. En: <https://wiki.python.org/moin/ForLoop>

REBORATTI, Carlos. Ambiente y sociedad: conceptos y relaciones. Buenos Aires: Ariel, 2000. 253 p.

RICHARDS, John. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1999. p. 240.

RINCÓN, Juan y BARRETO, Idaly. Técnicas de muestreo para investigadores sociales. En: PÁRAMO, Pablo (ed.). La investigación en ciencias sociales: estrategias de investigación. 2 ed. Bogotá: Universidad Distrital de Colombia. 2013. p. 33-44.

RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude y SLACK, Brian. The geography of transport systems. 3 ed. New York: Routledge, 2013. p. 226.

RODRÍGUEZ, José. Geografía y planificación territorial. En: Entorno Geográfico [en línea]. 2014. No. 10; p. 8-31.

RODRÍGUEZ, Militza y ROSALES, Judith. Cobertura de la tierra, usos asociados y análisis de paisaje en el corredor ribereño bajo Orinoco. En: Copérnico. 2008. Vol. 5, No. 9; p. 15-23.

RSTUDIO. About RStudio [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 10 de noviembre de 2017]. En: <https://www.rstudio.com/products/rstudio/>

SALAS-ZAPATA, Walter; RIOS-OSORIO, Leonardo y ÁLVAREZ-DEL CASTILLO, Javier. Marco conceptual para entender la sustentabilidad de los sistemas socioecológicos. En: Ecología Austral [en línea]. 2012. Vol. 22, No. 1; p. 74-79.

SALITCHEV, Konstantin. Cartografía. La Habana: Pueblo y Educación, 2009. 182 p.

SAN JOSÉ DE CÚCUTA. SECRETARÍA DE PLANEACIÓN MUNICIPAL. Plan de Ordenamiento Territorial. _____. 2014. 185 p.

ŞATIR, Onur y BERBEROĞLU, Süha. Land use/cover classification techniques using optical remotely sensed data in landscape planning. En: OZYAVUZ, Murat (ed.). Landscape Planning. Rijeka: InTech, 2012. p. 21-54.

SCHOLTE, Samantha; TEEFFELEN, Astrid van y VERBURG, Peter. Integrating socio-cultural perspectives into ecosystem service valuation: A review of concepts and methods. En: Ecological Economics [en línea]. 2015. Vol. 114, p. 67-78.

SCHULTZ, Bruno, *et al.* Self-guided segmentation and classification of multi-temporal Landsat 8 images for crop type mapping in southeastern Brazil. En: Remote Sensing [en línea]. 2015. Vol. 7, No. 11; p. 14482-14508.

SOJA, Edward. Postmetropolis: critical studies of cities and regions. Los Ángeles: Blackwell, 2000. 600 p.

SOUSA, Celio de, *et al.* Analysis of Rapideye's Red edge band for image segmentation and classification. En: Proceedings of the 4th GEOBIA [en línea]. 2012. Vol. 79, p. 518-523.

STANFORD UNIVERSITY. Matrix Operations [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 13 de septiembre de 2017]. En: <http://ee263.stanford.edu/notes/matrix-primer-lect2.pdf>

STEFANSKI, Jan; MACK, Benjamin y WASKE, Björn. Optimization of object-based image analysis with random forests for land cover mapping. En: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing [en línea]. 2013. Vol. 6, No. 6; p. 2492-2504.

TONKISS, Fran. Cities by design: the social life of urban form. Cambridge: Polity Press, 2013. 218 p.

UNWIN, Tim. El lugar de la geografía. 2 ed. Madrid: Cátedra, 1995. 288 p.

VALERO, Oscar. Aplicación de la geomática para determinar la cobertura del uso actual del suelo a partir de imágenes de satélite (RapidEye) y su comparación con el shapefile uso de suelo. Caso de estudio: municipio de Tibana (Boyacá). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2015. 7 p.

VÁSQUEZ, Edgar. Historia del desarrollo económico y urbano en Cali. Cali: Cámara de Comercio de Cali, 1990. 28 p.

VINUESA, Julio. Sobre el concepto de área metropolitana, citado por, MARTÍNEZ, Pedro. La planificación y la gestión interescalar municipal y metropolitana: casos áreas metropolitanas de Valle de Aburrá (AMVA) y centro occidente (AMCO). Cali: Universidad del Valle, 2014. 177 p.

WILHEIM, Jorge. Sao Paulo: los problemas de su metropolización y su gestión. En: Ambiente y Desarrollo. 1987. Vol. 3, No. 1 y 2; p. 47-60.

YUJNOSKY, Oscar. La estructura interna de la ciudad: el caso latinoamericano. Buenos Aires: SIAP, 1971. 163 p.

Anexo A. Clasificación de coberturas de la tierra

La geografía estudia procesos que ocurren a distintas escalas espaciales. Para cada una de estas escalas, es necesario recolectar datos de forma rápida, eficiente y precisa, para no alterar los resultados del fenómeno que se desea estudiar. La teledetección es un método de recolección de datos que responde a todos estos requerimientos, permitiendo conocer y estudiar los ambientes, físicos, químicos, biológicos y culturales, de la superficie terrestre¹⁵⁶. La teledetección se vincula a esta investigación dado que algunas coberturas de la tierra son los elementos de la EEM. Por tal motivo, en esta porción del documento se presentarán los fundamentos metodológicos con los que se clasificaron las coberturas de la tierra del área de estudio.

La principal justificación para proponer y realizar esta clasificación de coberturas de la tierra es que la información temática oficial no era la más adecuada para esta investigación. Los datos de coberturas existentes o estaban a una escala espacial muy baja —1:100.000 de IDEAM¹⁵⁷— o la brecha temporal era tan amplia que las coberturas difícilmente representaban con exactitud las condiciones actuales de la superficie terrestre en el área de estudio —la capa de coberturas de la CVC¹⁵⁸ tiene información que cubre el rango de 1996 a 2010—. Otro factor que dificultó el uso de datos espaciales era que el área de estudio se localizó en la jurisdicción de las instituciones CVC y CRC y, al momento de unificar la información oficial proporcionada por ellas, se descubrió una serie de incongruencias entre límites y contenidos. Debido a todas estas dificultades, se optó por realizar la clasificación de imágenes satelitales *RapidEye*. En esta sección de la metodología se presentan los fundamentos de la clasificación, así como cada una de las etapas distintivas del proceso.

Por otra parte, con la realización de dos salidas de campo se afianzó y actualizó la interpretación geográfica del área de estudio por parte de los investigadores. En la Figura 31 presentan particularidades de la realidad ambiental identificada en estas salidas. Las imágenes de los numerales a, b y c hacen referencia a la visita en campo dirigida al embalse La Salvajina (Suárez, Cauca) y la vía regional Cali-Popayán. No son tomadas por los investigadores, pero corresponden fielmente a lo observado sobre: (a) río Cauca y la geomorfología del municipio de Suárez; (b) configuración mixta de coberturas de la tierra en Santander de Quilichao; (c) contexto ambiental del embalse La Salvajina.

Las imágenes de los numerales d, e y f de la Figura 31 refieren al recorrido en lancha del río Cauca por los municipios de Jamundí, sur de Cali, Candelaria, Palmira y perímetro norte de Cali, realizado el 4 de noviembre de 2016. En este caso, el registro fotográfico fue tomado directamente por los investigadores. El numeral (d) muestra la ribera occidental del río Cauca dejando en evidencia la presencia de infraestructura de vivienda de la ciudad de Cali al margen inmediato del cauce. La imagen (e) presenta como en el flanco oriental (Palmira) el cultivo

¹⁵⁶ CHUVIECO. Op. cit.

¹⁵⁷ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. cit.

¹⁵⁸ CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA. Op. cit.

de la caña de azúcar se extiende hasta rozar el margen inmediato del río Cauca. Por último, con la foto (f) se revela que ambas riveras del río Cauca aún cuentan con su vegetación prístina en algunos tramos del recorrido entre Jamundí, Cali, Candelaria y Palmira.

Figura 31. Contextualización en campo de área de estudio. Sector sur del área (a, b y c), río Cauca y sus riberas (d, e y f).



Foto: GOOGLE EARTH (a, b y c) y MAURICIO TABARES MOSQUERA (d, e y f).

La ejecución de salidas de campo con destinos estratégicos fue significativamente provechosa para los investigadores teniendo en cuenta que actualizó y profundizó su conocimiento geográfico del área, permitiendo identificar patrones de coberturas de la tierra y conflictos ambientales

particulares. La riqueza metodológica del trabajo en campo es que aportó de forma sustancial a cada una de las fases de esta investigación.

También, es importante resaltar que la información espacial producida en esta fase se almacenó y procesó en una *Geodatabase* para garantizar la integridad, el manejo eficiente, y el procesamiento exitoso de los datos. Igualmente, cada uno de estos productos contó con el «Sistema de Coordenadas planas UTM Datum WGS84 Zona 18» para evitar cualquier error o irregularidad que pudiese producirse si se trabajaran con sistemas de coordenadas diferentes. Para facilitar el entendimiento del procedimiento y los productos obtenidos en esta fase metodológica, se recomienda revisar algunos términos claves referenciados durante esta sección (Cuadro 20).

Cuadro 20. Terminología de teledetección empleada en ese documento.

Banda espectral: categorías discretas de ondas electromagnéticas que comparten características similares	Radiación electromagnética: forma de energía en tránsito donde los campos eléctricos y magnéticos varían simultáneamente. Todos los objetos de la tierra pueden reflejar, absorber o emitir energía
Espectro electromagnético: el nombre que reciben los diferentes tipos de luz y energía en el universo. Incluye ondas radiales, microondas, radiación infrarroja, luz visible, luz ultravioleta, rayos X, y rayos gamma	Radiancia: es la cantidad de luz que «ve» el sensor del objeto observado en vatios / (estereorradián / m ²). Variable medida directamente por instrumentos de teledetección
Firma espectral: las características de reflectancia de un objeto o superficie en todo el espectro electromagnético	Reflectancia: es una propiedad del material que se observa. Es la energía que refleja la superficie receptora. En el proceso de corrección de una imagen, es conveniente convertir los valores de radiancia a reflectancia
Imagen análoga: son imágenes de tono continuo, e.g. negativos de fotografía, diapositivas e impresiones	Resolución espacial: determinada por el tamaño de píxel. Medida en metros cuadrados sobre el terreno
Imagen digital: representación pictórica compatible con computadora dividida en una cuadrícula de píxeles bidimensional	Resolución espectral: consiste en el número de bandas espectrales (y su ancho de banda) que puede captar un sensor
Número digital (ND): cuantificación del reflejo promedio que registró el sensor para el área de superficie de cada píxel	Resolución radiométrica: número de valores que puede ser almacenado por píxel. Depende de la escala binaria del sensor (1bit, 2bits, 4bits, 8bits, 16bits o 32bits)
Píxel: unidad finita y mínima de área en una imagen. Término que proviene de la contracción de las palabras « <i>picture elements</i> » (elementos de imagen)	Resolución temporal: frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre

Fuente: elaborado a partir de CHUVIECO. Op. cit. & JAMES. Op. cit.

El proceso de clasificación de coberturas de la tierra se ejecutó en un computador de las siguientes especificaciones técnicas. En hardware: procesador Intel Core i5 de tercera generación, 4 gigabytes de memoria RAM, 1 Terabyte de disco duro, pantalla LED de 19 pulgadas. En software: sistema operativo Windows 7, licencia institucional de la Universidad del Valle de ArcGIS 10, y versión de prueba de ENVI 5.1. Al año 2017, la configuración de este equipo corresponde a la gama tecnológica baja o casi media, sin embargo, fue posible

ejecutar con esta máquina todos los procesos indicados en esta sección de forma exitosa.

I. Fundamentos de la metodología de clasificación de coberturas de la tierra

La teledetección es cualquier técnica con la que se obtiene información a la distancia de un objeto y el ambiente¹⁵⁹. La base de este proceso de recolección de datos es que «la vegetación, la forma del terreno y la cobertura del suelo pueden tener firmas espectrales distintivas, lo que significa que emiten y reflejan la radiación electromagnética de diferentes maneras»¹⁶⁰. En este orden de ideas, el objetivo formal de la teledetección es «detectar, medir y analizar la radiación electromagnética de la superficie terrestre»¹⁶¹. Para afrontar dicha tarea, la teledetección es dependiente de las características de su insumo clave de procesamiento: las imágenes.

Aunque los datos de teledetección no se encuentran exclusivamente en forma de imágenes, este es el formato más común y útil para los estudios geográficos y ambientales. La utilidad de estas imágenes en teledetección depende de las características del contenido como «la forma, el tamaño, los patrones espaciales, el tono y la textura»¹⁶². En conjunto, estas características determinan la calidad y el tipo de información que puede obtenerse de la imagen. Las primeras tres características se explican por sí mismas teniendo en cuenta que describen las particularidades espaciales de las entidades presentes en una imagen. No obstante, el tono es el color que describe el brillo de la superficie detectado por el sensor. En un ejercicio de interpretación de imágenes, muchos objetos pueden clasificarse de forma exitosa a partir del tono: lo verde será vegetación, mientras un tono café podría ser suelo desnudo o cultivos, y lo gris se relacionará con áreas construidas.

La característica textura merece una mención especial. La textura es «la variación tonal en una imagen en función de la escala»¹⁶³. Es decir que, mientras el tono o color describe la información espectral de los píxeles de una imagen, la textura describe la variación espacial de dicha información espectral bajo un efecto de aglomeración de píxeles. Así, es posible identificar texturas ásperas, rugosas y suaves comparando, por ejemplo, un área de pastos limpios con una de bosque natural. Ambas coberturas son vegetación, pero su textura rugosa varía sustancialmente. En conclusión, el rol de la textura es igual o más importante que el del tono para la interpretación de imágenes.

¹⁵⁹ CHUVIECO. Op. cit. & HARRIS, Richard. Remote sensing. En: GREGORY, Derek, *et al.* (eds.). The dictionary of human geography. 5 ed. Oxford: Blackwell, 2009. p. 643-644. & JAMES. Op. cit.

¹⁶⁰ HARRIS. Op. cit., p. 643.

¹⁶¹ JAMES, Timothy. Remote sensing of environmental change. En: HOLDEN, Joseph. An Introduction to Physical Geography and the Environment. 3 ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2012. p. 744.

¹⁶² *Ibíd.*, p. 745

¹⁶³ *Ibíd.*, p. 745.

Las imágenes de sensores remotos proveen información de gran calidad sobre la superficie de la tierra que puede usarse para desarrollar análisis globales y locales de monitoreo, así como detección de cambios espaciales¹⁶⁴. A partir de su interpretación humana y asistida por computadora, estas imágenes deben convertirse de información de píxeles y valores digitales a una clasificación categórica de coberturas de la tierra. Esta clasificación se realiza de dos formas: automática o supervisada. Los métodos de clasificación pueden ser supervisados o no supervisados, diferenciándose por el grado de intervención del usuario. En la clasificación no supervisada no se establece ninguna clase con antelación, pero es necesario determinar el número máximo de clases a clasificar. El procedimiento consta de una serie de pasos, en cada paso se identifican los dos individuos más próximos, se hace una clase con ellos y se sustituyen por el centroide de la clase resultante¹⁶⁵. El proceso se detiene cuando se ha alcanzado un número de clases igual al establecido por el usuario.

La clasificación supervisada toma como base la disponibilidad de áreas de entrenamiento. Se trata de áreas de las que se conoce con seguridad la clase a la que pertenecen y que servirán para generar una firma espectral característica de cada una de las clases¹⁶⁶. Obtener las características de reflectividad de estas clases implica una consulta a las imágenes. El método supervisado de clasificación tiende a arrojar resultados más precisos que el método no supervisado, ya que hay muchas pruebas estadísticas que se pueden aplicar a las muestras de entrenamiento para determinar qué tan representativas son las clases y qué tan espectralmente diferenciables son de las demás¹⁶⁷. Este antecedente perfiló la elección del método supervisado para clasificar las coberturas de la tierra del área de estudio. Sin embargo, otro antecedente orientó el ajuste de este modelo de clasificación: el problema técnico de los píxeles.

En los inicios, la técnica más usada para clasificar las coberturas de la tierra era basada en píxeles. El fundamento principal de esta técnica era analizar las propiedades espectrales de cada pixel de un área de interés. Con el desarrollo tecnológico de la obtención de datos por sensores remotos, la técnica de clasificación por píxeles presentó dos grandes conflictos: i) la técnica no toma en cuenta información espacial y espectral de los vecinos; ii) los datos están en función de la resolución del sensor que capturó la imagen¹⁶⁸. La Figura 32 representa esta situación conocida como el "problema de los píxeles". Cuando los píxeles son relativamente más grandes o pequeños que los objetos de la superficie terrestre, la clasificación tradicional orientada por píxeles no es la mejor elección para mapear coberturas de la tierra. En esta situación, cuando los métodos basados en píxeles se aplican a las imágenes de satélite de alta resolución se produce un efecto de "sal y pimienta" que hace más inexacta la

¹⁶⁴ BENZ, Ursula, *et al.* Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *En*: ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing [en línea]. 2004. Vol. 58, No. 3; p. 239-258.

¹⁶⁵ CHUVIECO. Op. cit.

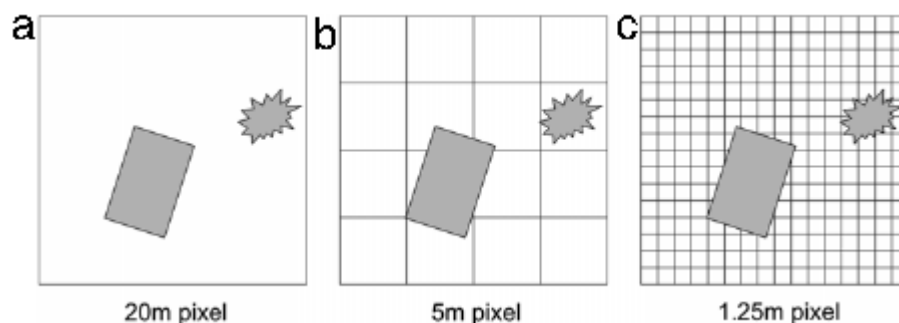
¹⁶⁶ *Ibíd.*

¹⁶⁷ JAMES. Op. cit.

¹⁶⁸ MAKINDE. Op. cit.

clasificación¹⁶⁹. Para solucionar esta problemática se desarrollaron otros métodos de procesamiento de información remota. Entre ellos está la clasificación orientada a objetos geográficos.

Figura 32. Relación entre objetos de la superficie terrestre y la resolución espacial de imágenes.



a) baja resolución, píxeles más grandes que objetos. b) mediana resolución, píxeles más pequeños que objetos. c) alta resolución, píxeles mucho más pequeños que objetos
Fuente: BLASCHKE, Thomas. Object based image analysis for remote sensing. *En*: ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing. 2010. Vol. 65, No. 1; p. 3.

Una alternativa al método de clasificación de coberturas basado en píxeles es el método de análisis de imágenes a partir de objetos geográficos (GEOBIA). El argumento de este nuevo enfoque es «fusionar los píxeles adyacentes en objetos homogéneos en términos espectrales y espaciales, para conducir el proceso de clasificación tomando estos objetos como la unidad mínima de análisis»¹⁷⁰. Cabe destacar que el objeto geográfico es referido al tipo de cobertura de la tierra que se desea clasificar. Esta característica del método GEOBIA garantiza la producción de información espacial que corresponde idealmente a las características del mundo real porque el proceso de asociar píxeles con propiedades espectrales y espaciales similares permite captar la diversidad de la superficie terrestre. En general, el método GEOBIA produce mejores resultados (entre 84% y 89% de precisión) que el dirigido por píxeles¹⁷¹. Por estas razones, el método de clasificación GEOBIA se considera la opción más apropiada por la mayoría de los investigadores en la actualidad y es la técnica empleada en esta investigación.

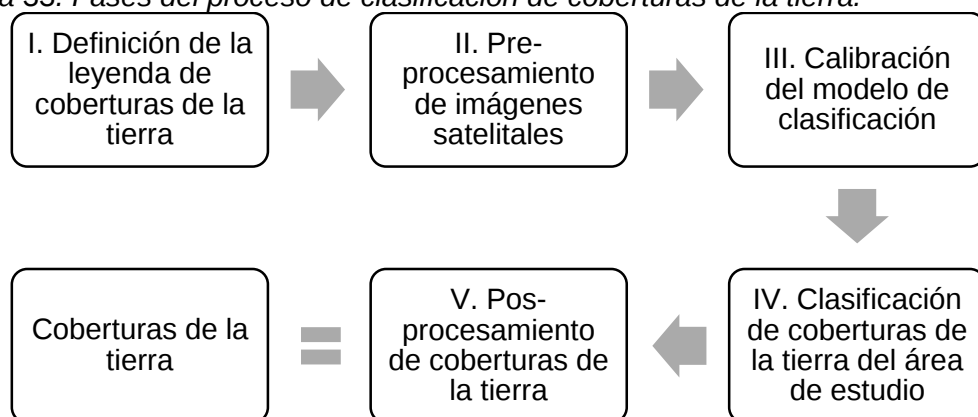
A grandes rasgos, el proceso de clasificación de coberturas de la tierra ejecutado en este trabajo fue semiautomático dado que constó de tres etapas: 1) encontrar los objetos, 2) muestrear los objetos y 3) clasificar los objetos. Sin embargo, fue necesario ejecutar procesos auxiliares en fases específicas para que la clasificación de coberturas fuera exitosa. En consecuencia, la clasificación de coberturas de la tierra se sintetiza en cinco grandes fases. La Figura 33 muestra sintéticamente las fases de clasificación y la conexión de sus productos para alcanzar el objetivo deseado.

¹⁶⁹ *Ibíd.*

¹⁷⁰ SOUSA, *et al.* Op. cit., p. 518.

¹⁷¹ BLASCHKE. Op. cit. & SOUSA. Op. cit. & MAKINDE. Op. cit.

Figura 33. Fases del proceso de clasificación de coberturas de la tierra.



Fuente: elaboración propia.

II. Definición de la leyenda de coberturas de la tierra

El primer paso para clasificar coberturas de la tierra es definir, a conciencia y en función al objetivo de investigación propuesto, una leyenda que incluya los tipos de coberturas deseados y los niveles de especificidad requeridos. Este proceso es clave porque su resultado determinará el funcionamiento, extensión y precisión de las fases metodológicas del proceso de clasificación de coberturas. En esta investigación, se adaptó la leyenda CORINE *Land Cover* propuesta para Colombia con base en las particularidades del área de estudio y con relación al objetivo de identificar la EEM. Por este motivo, es necesario presentar las características principales de esta leyenda de coberturas.

En 1985, la Unión Europea inició el proyecto CORINE con la intención de recopilar información sobre el estado del medio ambiente en Europa¹⁷². El producto principal de esta iniciativa se publicó en 1994: la leyenda de coberturas de la tierra CORINE *Land Cover*. Esta leyenda incluyó 44 clases de coberturas de la tierra clasificadas en una nomenclatura jerárquica de seis niveles que representan todos los tipos de coberturas existentes en el continente europeo.

Entre las potencialidades de la leyenda de coberturas de la tierra CORINE *Land Cover* se destaca que su estructura jerárquica reproduce un orden escalar explícito, conservando las características de las coberturas de la tierra entre sus niveles. Este orden lógico y espacial garantiza la adición de nuevos niveles y clases de coberturas para estudios más detallados¹⁷³. Otro elemento adicional es que la leyenda CORINE tuvo gran acogida en la comunidad científica, lo que significó el establecimiento de un lenguaje académico común de coberturas de la tierra. Sin embargo, su mayor limitante emerge al exportar esta leyenda a contextos de estudio por fuera de Europa porque algunas coberturas no serán representativas y deben ser modificadas. En ese sentido, para solventar ese problema, la leyenda CORINE *Land Cover* aplicada para Colombia por parte del

¹⁷² BURKHARD, *et al.* Landscapes' capacities to provide ecosystem services - A concept for land-cover based assessments. Op. cit.

¹⁷³ INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. cit.

IDEAM propone cinco categorías principales¹⁷⁴. Estas categorías coinciden a las propuestas por la Unión Europea, pero se realizaron modificaciones entre niveles para que la leyenda respondiera al contexto de la superficie terrestre de Colombia.

Ahora bien, a partir de la leyenda CORINE *Land Cover* aplicada para Colombia, en esta fase metodológica de la investigación, se clasificaron 28 coberturas de la tierra del área de estudio a escala 1:25.000. Para la adaptación de esta leyenda de coberturas a esta investigación se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La UMC, o la superficie menor que puede ser representada sobre un mapa, en este caso de escala 1:25.000, es de 10.000 mt², cifra equivalente a una (1) hectárea¹⁷⁵.
- Los niveles 1 y 2 de la leyenda permanecen iguales a la metodología original de CORINE *Land Cover* de Europa.
- El nivel 3 de la leyenda fue seleccionado como el óptimo porque reproduce una escala espacial regional y se ajusta al objetivo de proponer una EEM.
- El cultivo de la caña de azúcar, cobertura de la tierra clasificada en el nivel 4 de nuestra leyenda, fue la única clasificada de este nivel por las implicaciones multidimensionales que tiene este cultivo en la región.

Con base a estas observaciones, el Anexo B que contiene la descripción completa de las coberturas de la tierra clasificadas en este ejercicio. Allí se presentan los detalles de cada cobertura a profundidad, incluyendo su descripción, ilustración y simbología empleada en la cartografía temática.

III. Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Este proceso de clasificación de coberturas tuvo como insumo principal las 32 imágenes satelitales de la constelación *RapidEye*. PROCÁLCULO, compañía proveedora de soluciones espaciales en Colombia, proporcionó estas imágenes en 32 cuadrantes de 25x25 km (625 km²), capturados en los años: 2013 (5 cuadrantes), 2014 (4), 2015 (21) y 2016 (2), respectivamente. Las características completas de estas imágenes se presentan en el Cuadro 21. Es importante resaltar que el proveedor entregó las imágenes *RapidEye* con un nivel de preprocesamiento 3A *RapidEye Product Ortho*. Este proceso garantiza que las imágenes cuenten con correcciones radiométricas y geométricas, y referenciadas a la proyección cartográfica «Sistema de Coordenadas UTM Datum WGS84 Zona 18». Pese a esta afirmación y con base en la literatura¹⁷⁶, se descubrió anomalías en los valores digitales de algunos cuadrantes por lo que fue necesario pre-procesar este conjunto de imágenes.

¹⁷⁴ Ibíd.

¹⁷⁵ SALITCHEV. Op. cit.

¹⁷⁶ DUARTE, *et al.* Op. cit.

Cuadro 21. Características espectrales y espaciales de las imágenes RapidEye.

Parámetros	Valores		
Bandas espectrales, longitud de onda (en μm) y su aplicación en teledetección	(1) Azul	0,440 - 0,510	Buena penetración en el agua. Útil para la discriminación de suelo, vegetación, y elementos antrópicos. Sensible a bruma atmosférica
	(2) Verde	0,520 - 0,590	Alguna penetración en el agua, pero sensible a la turbiedad. Reflectancia alta con la vegetación útil para determinar su vigor. Sensible a bruma atmosférica
	(3) Rojo	0,630 - 0,635	Absorción alta de la clorofila vegetal y alta reflectancia en suelos. Muy buena para diferenciar suelo de vegetación y para reconocer elementos antrópicos.
	(4) Borde del rojo	0,690 - 0,730	Útil para diferenciar tipos de vegetación y sus diferentes niveles de vitalidad. Resalta ampliamente la estructura de la hoja y la clorofila vegetal. Banda exclusiva de las imágenes <i>RapidEye</i>
	(5) Infrarrojo cercano	0,760 - 0,850	Alta reflectancia de la vegetación y absorción alta del agua. Mejor banda para discriminar los tipos de vegetación y el vigor de la planta. Excelente para reconocer superficies de agua y la humedad del suelo
Distancia del muestreo sobre el terreno (nadir)	6,5 mt		
Tamaño del pixel (orto rectificado)	5 mt		
Ancho de observación	77 km		
Tiempo de revisita	Diario		
Hora de cruce por el ecuador	11:00 a.m. (aproximadamente)		
Capacidad de adquisición de imágenes	4 millones de km^2 diarios		

Fuente: JAMES. Op. cit. & VALERO, Oscar. Aplicación de la geomática para determinar la cobertura del uso actual del suelo a partir de imágenes de satélite (*RapidEye*) y su comparación con el *shapefile* uso de suelo. Caso de estudio: municipio de Tibana (Boyacá). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, 2015. 7 p. & PLANET LABS. Applications of the RapidEye Red Edge Band. San Francisco: _____. 2016, 8 p.

Regularmente, es necesario procesar las imágenes de sensores remotos después de su recepción, especialmente si fueron tomadas en fechas y por sensores diferentes¹⁷⁷. Este procesamiento puede implicar una rectificación que nos permite «compensar cualquier distorsión o radiométrica o geométrica de la imagen que pueda haber resultado durante su adquisición a través del

¹⁷⁷ ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

sensor»¹⁷⁸. Las imágenes *RapidEye* 3A empleadas en este ejercicio contaron con una geometría correcta: las coordenadas correspondían a su punto de localización geográfica siguiendo el «Sistema UTM Datum WGS84 Zona 18». No obstante, las imágenes presentaron irregularidades en los valores de reflectancia puesto que su fecha de captura se distribuyó en 4 años diferentes, y fue necesario realizar una **corrección radiométrica y atmosférica** a cada una de ellas.

Mientras las correcciones geométricas se relacionan a la superficie terrestre capturada por la imagen, las radiométricas abordan los valores digitales de cada píxel tomados por el sensor. Son muchos los factores que alteran la reflectancia de una imagen, pero se reconoce que las condiciones atmosféricas son las más inciden¹⁷⁹. Para corregir una imagen en términos radiométricos, los valores de reflectancia son ajustados con base en un modelo que ajusta el brillo del píxel y así representar las características reales de luminosidad de la escena. Las herramientas *Band Math* y *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes* (FLAASH) de ENVI, se emplearon para realizar esta corrección.

Band Math es un tipo de calculadora que permite realizar distintas operaciones matemáticas entre todas las bandas espectrales utilizando el archivo de metadatos de la imagen satelital. Con el archivo de metadatos se convierten los valores digitales de la imagen a datos de radiancia. Como demuestra Duarte¹⁸⁰, esto se hace ingresando en el campo **Enter an expression de Band Algebra > Band Math** la siguiente fórmula:

$$\text{Radiancia (L)} = ND * 10$$

El factor de escala radiométrica de **10** se ingresó para convertir el resultado de cada banda espectral de unidades de watts por estereorradián por metro cuadrado ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$) a centímetros cuadrados ($W/(cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)¹⁸¹. Con la corrección radiométrica, se ajusta el formato de unidades que recibe la herramienta encargada de ejecutar la corrección atmosférica: FLAASH de ENVI.

FLAASH es una herramienta de corrección atmosférica que corrige las longitudes de onda en las regiones visibles del espectro, permitiendo calcular la reflectancia de la superficie y ajustar la incidencia del vapor del agua y los aerosoles en la visualización de la imagen satelital¹⁸². Esta herramienta se encuentra en el menú **Radiometric Correction > Atmospheric Correction Module > FLAASH Atmospheric Correction**, de ENVI. Este módulo identifica la configuración de la escena y los parámetros del sensor *RapidEye* de forma automática, ingresando correctamente latitud y longitud de la escena, altitud del

¹⁷⁸ JAMES. Op. cit., p. 777.

¹⁷⁹ Ibíd.

¹⁸⁰ DUARTE, *et al.* Op. cit.

¹⁸¹ Ibíd.

¹⁸² HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 14 de enero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/flaash.html>

sensor (km), elevación del terreno (km), tamaño de píxel (mt) y la fecha y hora del vuelo (hh:mm:ss).

Adicionalmente, FLAASH realiza la corrección atmosférica empleando el modelo *Moderate resolution atmospheric Transmission* (MODTRAN) de la *US Air Force*¹⁸³. Básicamente, MODTRAN es una base de datos que contiene estimaciones promedio de las condiciones atmosféricas para todo el mundo, tomando en cuenta indicadores de vapor del agua y la temperatura del aire¹⁸⁴. Considerando la localización del área de estudio de esta investigación, la opción seleccionada del modelo fue **FLAASH > Atmospheric Model > Tropical**.

El pre-procesamiento de los 32 cuadrantes *RapidEye* se realizó **uno a la vez**, aplicando en cascada las herramientas **Band Math y FLAASH**. La evidencia del pre-procesamiento de imágenes es la identificación adecuada de la firma espectral para distintos tipos de cobertura. En la Figura 34 se observa la incidencia del ajuste radiométrico realizado sobre las firmas espectrales de las coberturas: superficies de agua (b), suelo desnudo (c), y bosque denso (d). Si se comparan cada una de estas firmas espectrales con las curvas típicas de reflectancia (a, derecha) se tiene que: i) el porcentaje de reflectancia está normalizado (eje Y), y ii) la versión corregida se ajusta mucho mejor a los valores esperados que la versión original. También, se observa que la banda 1 (azul) sufrió el mayor ajuste entre todas las cinco bandas de la imagen *RapidEye* porque esta es una de las bandas más susceptibles a la bruma atmosférica.

Con los 32 cuadrantes corregidos en términos radiométricos y atmosféricos se creó un **mosaico** de imágenes para el área de estudio. Un mosaico es una unión entre dos o más imágenes satelitales¹⁸⁵. Este proceso de creación de una gran imagen se realiza con base en la georreferenciación que tienen los cuadrantes involucrados. Con la localización correcta de cada una de las imágenes emerge otra dificultad técnica en el proceso de creación del mosaico: la respuesta espectral capturada por el sensor en cada una de las imágenes está determinada por la fecha o las condiciones atmosféricas de captura.

Para que la superposición de imágenes sea lo mejor posible es necesario considerar los aspectos de antigüedad de la imagen y presencia de nubes¹⁸⁶. Como primer criterio, las imágenes antiguas irán debajo de las más actuales, de esta forma se prioriza la información más actualizada posible. Por su parte, las nubes juegan un rol determinante en el ordenamiento de las imágenes que componen el mosaico: las imágenes con presencia de nubes irán debajo porque la intención es clasificar la mayor superficie posible del área de estudio. Por último, para evitar errores de cualquier tipo en el perímetro de los archivos ráster producidos, se estableció un buffer de 1 km en el borde de toda el área del mosaico, el cual fácilmente fue removido en el producto final. La aplicación de estos criterios permitió elaborar un mosaico con una presentación de calidad.

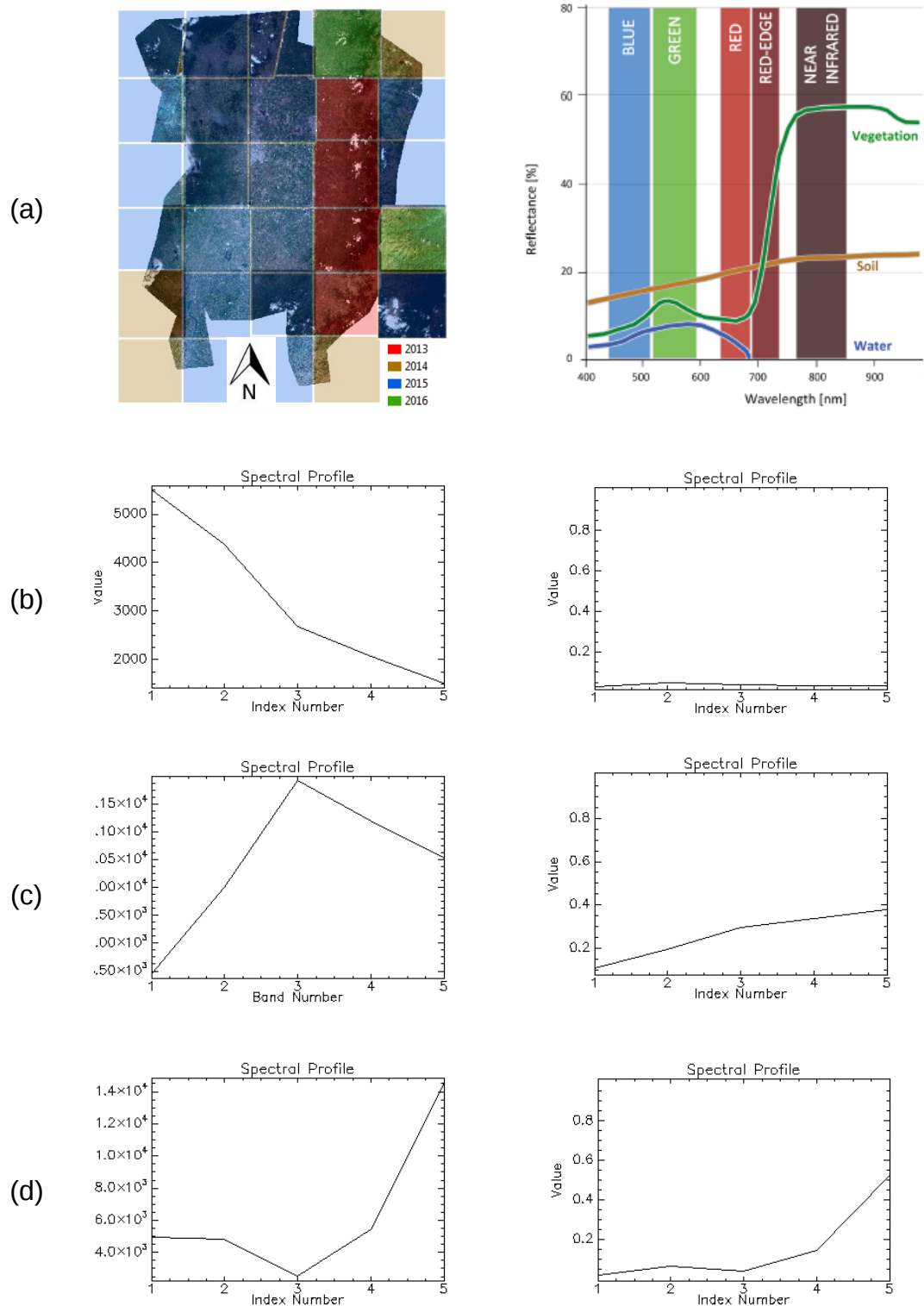
¹⁸³ DUARTE, *et al.* Op. cit.

¹⁸⁴ HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. Op. cit.

¹⁸⁵ DUARTE, *et al.* Op. cit.

¹⁸⁶ *Ibíd.*

Figura 34. 32 cuadrantes RapidEye, fecha de adquisición y firmas espectrales ajustadas.



Fecha de adquisición, composición natural (bandas 321) (a, izquierda). Curvas típicas de reflectancia espectral de algunas coberturas (a, derecha). Comparación entre la firma espectral original (izquierda) y la calibración radiométrica (derecha) de: agua (b), suelo desnudo (c), y bosque denso (d). Fuente: PLANET LABS. Op. cit.

La creación del mosaico empleando los 32 cuadrantes *RapidEye* se realizó con la herramienta **Mosaicking > Seamless Mosaic** de ENVI. Esta herramienta es intuitiva y cuenta con las opciones necesarias para aplicar los criterios de antigüedad y de cobertura nubosa. Con la opción **Seamless Mosaic > Add Scenes** se cargaron todas las 32 imágenes al tiempo para ahorrar tiempo. Con las imágenes cargadas se establecieron parámetros para:

- **Valores de datos a ignorar:** los ND de una imagen tienen valores entre 0 (cero) y 255. Los valores de 0 (cero) corresponden a los píxeles de fondo de la escena, y por tal motivo, este valor se ingresó en **Seamless Mosaic > Data Ignore Value**. Realizar este proceso disminuyó el tamaño del archivo *tagged image file format* (TIFF) del mosaico, evitando posibles interferencias de los valores del fondo de la imagen con el resto de píxeles¹⁸⁷.
- **Orden de la escena:** se priorizaron las imágenes más actuales con menor presencia de nubes. La configuración se ejecuta empleando los controles de **Seamless Mosaic > Order**.
- **Distancia de difuminado entre cuadrantes:** se estableció una distancia prudente de solapamiento entre imágenes para asegurar un mosaico de superficie continua y sin vacíos. La distancia de **200** píxeles (1 km) se ingresó en **Seamless Mosaic > Seamlines > Feathering > Feathering Distance**.

El proceso de la creación del mosaico siguió la directriz de presentar las imágenes más actuales con menor presencia de nubes, pero esto no quiere decir que se eliminó totalmente la cobertura nubosa. La presencia de nubes en una imagen de satélite se considera contaminación y afecta directamente el procesamiento y la discriminación de coberturas de la tierra¹⁸⁸. Por tal motivo, fue necesario **enmascarar y extraer la superficie de nubes** restante en el mosaico. Esto se realizó de forma manual, empleando la herramienta **Edit > Create Features** de ArcGIS, para digitalizar a una escala de 1:5.000 la cobertura nubosa restante del mosaico. Digitalizar con dicha escala garantizó la identificación total de las nubes disminuyendo los errores de sub/sobre estimación de área. El mosaico se presenta en la Figura 35 (a, página 155).

Posteriormente, esta área de nubes digitalizada funcionó como una «máscara» con la que se extrajo la superficie nubosa del mosaico. Es decir, la capa de nubes borró su área correspondiente de la imagen. Este proceso se realizó con la herramienta **Spatial Analyst toolbox > Extraction toolset > Extract by Mask** de ArcGIS.

Otro de los problemas que aparece en la clasificación de coberturas de la tierra a partir de imágenes satelitales es la alta correlación estadística entre bandas espectrales¹⁸⁹. En este caso, la introducción de bandas correlacionadas en la

¹⁸⁷ HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. Seamless Mosaic [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 21 de enero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/MosaicSeamless.html>

¹⁸⁸ DUARTE, *et al.* Op. cit.

¹⁸⁹ CHUVIECO. Op. cit.

clasificación no aporta más información y lo que se hace es eliminar los componentes que absorban un escaso porcentaje de la varianza original para quedarse con los que absorban mayor variabilidad¹⁹⁰. Esto se hace encontrando un nuevo conjunto de ejes ortogonales que tienen su origen en la media de los datos y que se rotan para maximizar la varianza de los datos¹⁹¹. Es decir que, el valor medio de reflectancia de cada píxel se compara con el valor de los vecinos para cada banda espectral. Es precisamente con las bandas de mayor variabilidad que la segmentación de imágenes de satélite funciona mejor¹⁹². Para identificar las bandas menos correlacionadas se empleó la herramienta ***Spatial Analyst toolbox > Multivariate toolset > Band Collection Statistics*** de ArcGIS. Esta herramienta calcula estadísticas para un conjunto de bandas de ráster, y produce un archivo de texto que contiene la matriz de correlación entre cada una de las bandas de la imagen¹⁹³. De esta forma se identificaron las bandas menos correlacionadas de las imágenes *RapidEye*.

En el Cuadro 22 se presenta la matriz de **correlación entre bandas espectrales** para el mosaico con imágenes *RapidEye* del área de estudio. La conclusión principal es que las tres bandas menos correlacionadas para este conjunto de datos fueron la banda 1 (azul), banda 3 (rojo) y banda 5 (infrarrojo), siendo la banda infrarroja la que aporta la mayor variabilidad de las tres. Esto se demuestra con el valor negativo de los datos de la banda 5 con la banda 1 y la banda. Por otra parte, las bandas más correlacionadas fueron la banda 2 (verde) y la banda 4 (borde del rojo), y no se tuvieron en cuenta para la clasificación de coberturas. Una ganancia adicional de seleccionar las tres bandas espectrales que absorben la mayor variabilidad es la reducción de las dimensiones del conjunto de datos. Esto acelera el procesamiento de los datos y al tiempo disminuye el tamaño de los productos, facilitando la ejecución iterativa de la calibración del modelo de clasificación. Esta es la etapa siguiente en la metodología de clasificación de coberturas de la tierra.

Cuadro 22. Matriz de correlación entre bandas para el mosaico RapidEye.

Banda	1	2	3	4	5
1	1	0,92518	0,88385	0,65577	-0,08385
2	0,92518	1	0,91135	0,79994	0,06421
3	0,88385	0,91135	1	0,77618	-0,15875
4	0,65577	0,79994	0,77618	1	0,31395
5	-0,08385	0,06421	-0,15875	0,31395	1
$\bar{X}$	0,67619	0,740136	0,682526	0,709168	0,227112

Fuente: elaboración propia.

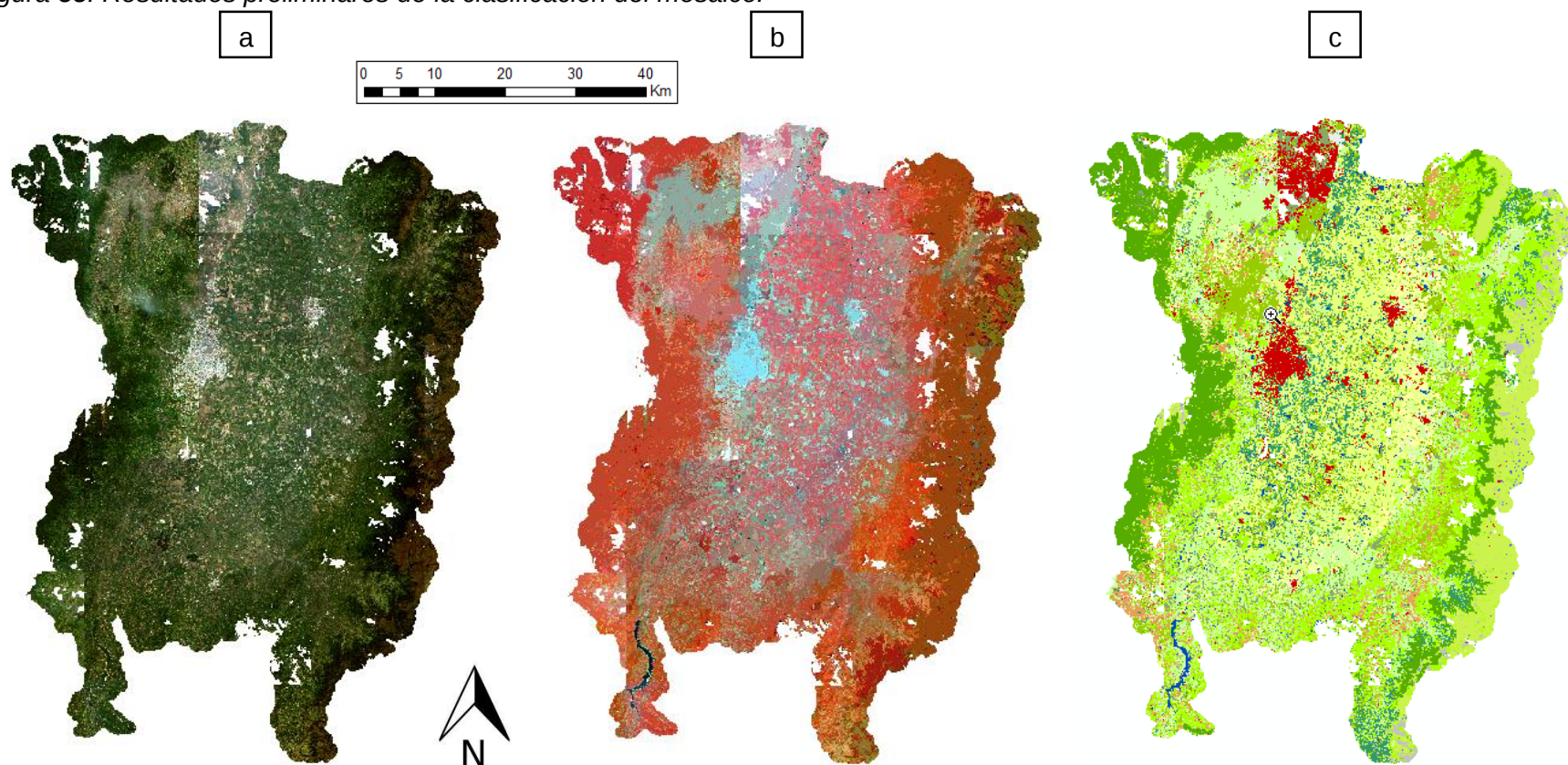
¹⁹⁰ *Ibíd.*

¹⁹¹ RICHARDS, John. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1999. p. 240.

¹⁹² HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. Extract Segments [en línea]. Harris Geospatial Solutions, 2017. [Consultado el 10 de febrero de 2017]. En: <http://www.harrisgeospatial.com/docs/segmentonly.html>

¹⁹³ ESRI. Band Collection Statistics [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/band-collection-statistics.htm>

Figura 35. Resultados preliminares de la clasificación del mosaico.

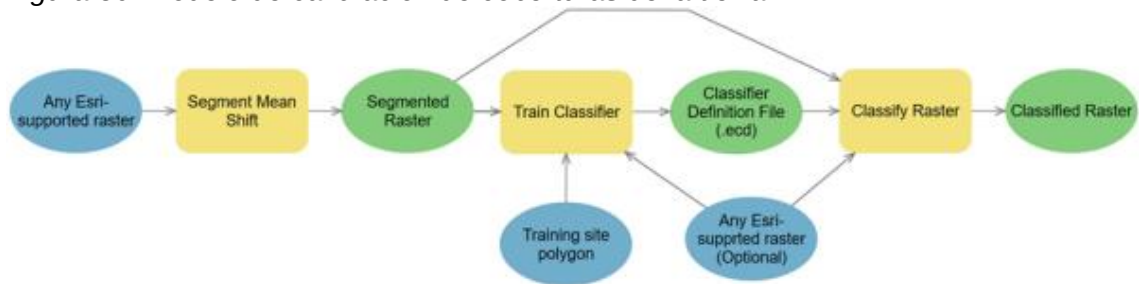


(a) color natural (bandas 321), (b) segmentación. (c) clasificación automática (Kappa de 84%). Escala numérica 1:600.000. Fuente: elaboración propia.

IV. Calibración del modelo de clasificación

La clasificación de las características de una imagen de satélite es una herramienta que ayuda a la automatización del análisis de datos de teledetección. El proceso de clasificación es complejo e involucra diferentes fases en secuencia. Las fases del modelo de clasificación de esta investigación incluyen: **i) segmentación, ii) muestreo, iii) entrenamiento, iv) clasificación y v) evaluación de precisión** (Figura 36). Decir que el proceso de clasificación está articulado, quiere decir que la configuración y los productos parciales de cada fase sirven de insumo para la siguiente fase y al final contribuyen al resultado esperado que es la clasificación el resultado final de clasificado. Frente a este panorama, la solución es calibrar el modelo de clasificación completo en un área menor, ajustando de forma iterativa la configuración hasta alcanzar un resultado óptimo, cuyos parámetros puedan ejecutarse para todo el mosaico¹⁹⁴. Esta estrategia de procesamiento iterada produjo resultados excelentes de clasificación. Por lo tanto, la calibración del modelo es el componente más profundo y técnico de la clasificación de coberturas de la tierra del área de estudio.

Figura 36. Modelo de calibración de coberturas de la tierra.



Fuente: ESRI. Understanding segmentation and classification [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 20 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-segmentation-and-classification.htm>

El primer componente del modelo de calibración es la segmentación. La segmentación es el proceso de dividir una imagen en muchos objetos agrupando píxeles vecinos con características espectrales y espaciales comunes¹⁹⁵. Como se ha dicho, la **segmentación** tiene ventajas sobre las técnicas de clasificación de coberturas tradicionales orientadas por píxeles. Para que la clasificación represente fielmente la realidad de la superficie terrestre, es crucial configurar la manera cómo son agrupados los píxeles para crear los segmentos. Esta agrupación no es perfecta y la literatura hace hincapié en que no hay algoritmo de segmentación que delimite de forma correcta todos los objetos de una

¹⁹⁴ SOUSA, et al. Op. cit. & MAKINDE, et al. Op. cit.

¹⁹⁵ CLARK, Barnaby; PELLIKKA, Petri. Landscape analysis using multiscale segmentation and object orientated classification. En: Recent advances in remote sensing and geoinformation processing for land degradation assessment. 2009. Vol. 8; p. 323-341. & SOUSA, et al. Op. cit. & MAKINDE, et al. Op. cit.

imagen¹⁹⁶. Cada algoritmo tiene sus ventajas y desventajas, las que deben tenerse en cuenta al momento de optar por uno en particular.

En esta clasificación de coberturas de la tierra se empleó el algoritmo de segmentación llamado *Mean Shift Segmentation* propuesto por Comaniciu y Meer¹⁹⁷. Este algoritmo tiene como característica principal que, al mismo tiempo que agrupa píxeles adyacentes de características espectrales similares, permite controlar la cantidad de suavizado espacial y espectral durante el proceso de agrupamiento para obtener las entidades de interés¹⁹⁸. La disponibilidad de estos parámetros es clave para segmentar una imagen en función de sus características de captura (resoluciones espectro-espacio-temporales de la imagen) y de los objetivos perseguidos con la clasificación. Sin embargo, su principal desventaja es que requiere un número significativo de pruebas piloto y tiempo para ajustar los parámetros que produzcan una segmentación óptima de los objetos de la imagen.

Una buena segmentación es aquella en la que: «(i) las áreas son uniformes y homogéneas, (ii) las áreas son significativamente diferentes de las vecinas, (iii) las áreas tienen un interior simple sin muchos agujeros, y (iv) los límites de las áreas son simples, estables y espacialmente precisos»¹⁹⁹. En la Figura 37 se muestra un ejemplo interesante de segmentación de uno de los cuadrantes calibrados empleando *Mean Shift*. Puede notarse que la imagen segmentada replica las cuatro características referenciadas de una buena segmentación.

Técnicamente, *Mean Shift* utiliza una ventana móvil que calcula un valor medio de píxeles para determinar cuáles deben incluirse en cada segmento, y a medida que la ventana se mueve por la imagen, vuelve a calcular de forma iterativa el valor para asegurarse de cada uno de los segmentos sea adecuado²⁰⁰. El resultado es una agrupación de los píxeles de la imagen en un segmento caracterizado por un color medio. Para realizar la segmentación de la imagen se empleó la herramienta ***Spatial Analyst > Segmentation and Classification > Segment Mean Shift*** de ArcGIS 10. Luego de realizar 44 pruebas piloto, esta fue la configuración definitiva de esta herramienta:

¹⁹⁶ JOHNSON, Brian y ZHIXIAO, Xie. Unsupervised image segmentation evaluation and refinement using a multi-scale approach. En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. 66, No. 4; p. 473-483. & SCHULTZ, Bruno, *et al.* Self-guided segmentation and classification of multi-temporal Landsat 8 images for crop type mapping in southeastern Brazil. En: Remote Sensing [en línea]. 2015. Vol. 7, No. 11; p. 14482-14508.

¹⁹⁷ COMANICIU, Dorin y MEER, Peter. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. En: IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2002. Vol. 24, No. 5; p. 603-619.

¹⁹⁸ ESRI. Segment Mean Shift Function [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de febrero de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/segment-mean-shift-function.htm>

¹⁹⁹ JOHNSON y ZHIXIAO. Op. cit., p. 474.

²⁰⁰ ESRI, Segment Mean Shift Function. Op. cit.

Figura 37. Ejemplo de segmentación en el área de estudio.

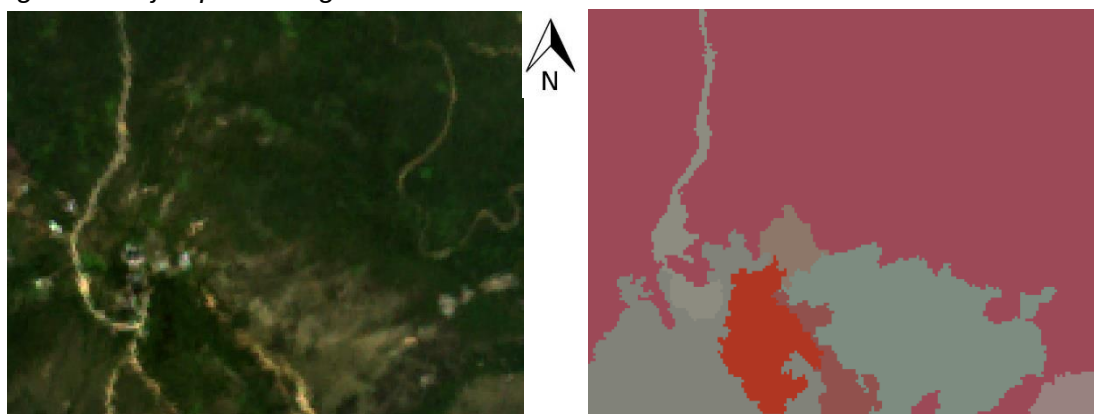


Imagen en color natural (izquierda, bandas 3-2-1), imagen segmentada (derecha, bandas 1-3-5). Nótese como en la derecha se agruparon los diferentes tipos de vegetación en color rojo y el suelo desnudo en color gris. Escala numérica 1:5.000. Fuente: elaboración propia.

- **Detalle espectral (1 a 20):** ajusta qué tan importantes son las diferencias espectrales de los objetos en la imagen. Se ingresó en **Segment Mean Shift > Spectral Detail** un valor de **15** porque se observó que mientras los valores altos sobre-segmentaban la imagen y creaban demasiados segmentos, los bajos sub-segmentaban el área sin diferenciar los objetos deseados.
- **Detalle espacial (1 a 20):** establece un nivel de importancia a la proximidad espacial entre los objetos de la imagen. Un valor de **15** se aplicó en **Segment Mean Shift > Spatial Detail** dado que los valores más altos dividieron áreas continuas en muchas partes pequeñas (e.g. área urbana), y los bajos no establecieron un límite aceptable entre objetos fácilmente diferenciables (e.g. ríos y áreas o agrícolas).
- **Tamaño mínimo de segmento (píxeles):** determina el área necesaria para que un bloque de píxeles sea un objeto, y si no cumple esta cuota, se une automáticamente al vecino más semejante. Considerando que la UMC de un mapa a escala 1:25.000 es de una (1) hectárea²⁰¹ y que un píxel *RapidEye* tiene 25 mt², en **Segment Mean Shift > Min Segment Size** se ingresó un valor de **400**²⁰².

El producto segmentado del mosaico se presenta en la Figura 35 (b, página 155). Esta imagen se creó con las bandas menos correlacionadas (1-3-5). A grandes rasgos, la combinación de sus colores expresa lo siguiente:

- Las variaciones de rojo son los objetos con alto contenido de vegetación.
- El gris representa los pastos.
- El azul grisáceo muestra las infraestructuras urbanas o construidas.

²⁰¹ SALITCHEV. Op. cit.

²⁰² Resultado de dividir la UMC de una hectárea por el tamaño de píxel *RapidEye* en metros (10.000 mt²/25 mt² = 400).

- El color café enseña los objetos con vegetación exigua y suelo desnudo.
- El azul oscuro indica los objetos con agua.

Esta descripción general permite interpretar el producto segmentado, sin embargo, es clave considerar las cifras del Cuadro 23 para entender la riqueza del proceso de segmentación del mosaico. Este cuadro dimensiona la resolución espacial de la imagen *RapidEye* a escala del área de estudio y permite apreciar la disminución de datos, así: más de 300 millones de píxeles (900 millones entre las tres bandas espectrales) a 386.304 objetos de UMC de una (1) hectárea con la segmentación, y finalmente, a menos de 69 mil objetos con la fase posterior de vectorización. Esta reducción del conjunto de datos es una propiedad «oculta» de la imagen segmentada del mosaico que favoreció y agilizó la planeación y ejecución de distintas pruebas porque acotó sustancialmente el volumen de los datos a procesar. Lo más significativo es que con este tratamiento, el producto de coberturas reflejó perfectamente la superficie de la tierra del área de estudio a una escala de 1:25.000, con objetos mayores a una (1) hectárea.

Cuadro 23. Cifras del proceso de segmentación.

Elemento	Área (en mt ²)	Elemento	Número
Píxel <i>RapidEye</i>	25	Píxeles área (por banda espectral)	325.600.000
Área estudio*	8.140.000.000	Objetos segmentación (1 ha = 400 píxeles)	386.052
		Vectorización (objeto mínimo 1 ha)	68.793

*1 km² equivale a 1.000.000 mt²

Fuente: elaboración propia.

Con este conjunto de parámetros se segmentó una muestra del 20% del área de estudio, es decir, siete (7) de los 32 cuadrantes. Los siete cuadrantes fueron seleccionados teniendo en cuenta su distribución geográfica y tratando de garantizar que dentro de ellos se observara la presencia de diferentes tipos de coberturas. Xiaoxiao Li, *et al.*²⁰³, sustentó que esta es una forma eficiente de tratar áreas de estudio muy extensas y de superficie heterogénea. El proceso de extracción de esta muestra se realizó mediante un **muestreo intencional**. Este tipo de muestreo no es probabilístico y se sustenta en el conocimiento previo del problema para aproximarse a la representatividad de las muestras²⁰⁴. Hay muchos tipos de muestreos intencionales, pero el que orientó este proceso fue un **muestreo con casos de máxima variación** dado que se tomaron en cuenta «todas las características consideradas relevantes de los individuos a estudiar en busca de obtener la mayor heterogeneidad entre ellos»²⁰⁵. Esta técnica de muestreo dirigió la calibración del modelo de clasificación porque garantizó

²⁰³ LI, Xiaoxiao, *et al.* Object-based land-cover classification for metropolitan Phoenix, Arizona, using aerial photography. *En*: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. Vol. 33; p. 321-330.

²⁰⁴ RINCÓN y BARRETO. Op. cit.

²⁰⁵ *Ibíd.*, p. 42.

abarcó en un área menor el total de clases de coberturas de la tierra a clasificar. Por lo tanto, la característica que se buscó en los siete (7) cuadrantes fue la inclusión de diferentes tipos de cobertura para asegurar una calibración óptima del modelo de clasificación.

Con los objetos identificados, el paso siguiente de la calibración consistió en extraer y analizar información espectral para las coberturas de la tierra definidas en la leyenda. En la clasificación de coberturas de la tierra orientada a objetos es imposible saber con certeza a qué clase de cobertura corresponde cada segmento. Por lo tanto, es necesario extraer la información espectral característica de las coberturas deseadas a través de un muestreo. Dadas las características del ejercicio, se apeló a un muestreo no probabilístico, en este caso «por cuotas». **El muestreo por cuotas** presupone un buen conocimiento de la forma cómo los individuos están distribuidos, asumiendo que hay estratos (grupos de individuos similares) y que el investigador los conoce ampliamente²⁰⁶. En este contexto, los estratos son las clases de coberturas de la tierra definidas en la leyenda y se admite que el investigador no se equivoca identificándolas en la imagen.

El muestreo espectral se realizó sobre la imagen segmentada (bandas 1-3-5), con la herramienta ***Spatial Analyst > Image classification > Training Sample Manager***. Esta herramienta consulta los valores espectrales de cada una de las muestras en la imagen, para luego consolidar un conjunto de muestras para cada clase de cobertura. En la literatura, el número de las muestras es variable, pero se reconoce que un número mayor de sitios de entrenamiento produce resultados más precisos²⁰⁷. En este trabajo, se aceptó el mínimo de **60 muestras** por tipo de cobertura propuesto por Clark y Pellikka²⁰⁸ porque aportó la información requerida por el modelo sin excesos.

Cada una de estas muestras de entrenamiento abarcó píxeles pertenecientes a la clase de interés. Las muestras se tomaron sobre la imagen segmentada en polígonos que contenían un mínimo de 100 píxeles, un tamaño significativo desde el punto de vista estadístico²⁰⁹. Para lograrlo, se apeló a un tratamiento estadístico de descarte de datos atípicos con valores de +20% y -20% de la media registrada. Esto aseguró que el conjunto de todas las 60 muestras de cada de cobertura presentara la menor variación estadística de valores espectrales.

De otra parte, en la Figura 38 se presenta el **muestreo** de uno de los siete cuadrantes de calibración (izquierda) con los parámetros estadísticos para tres coberturas identificadas (derecha). En este cuadrante se reconocieron 15 tipos de cobertura para las que se crearon 60 polígonos por clase. Las coberturas con menos píxeles (e.g. cuerpos de agua artificiales) no alcanzaron la cuota de los 60 polígonos por su área de cobertura, pero como la calibración se replicó para otros seis cuadrantes, se completó el número establecido. La caña de azúcar se

²⁰⁶ Ibíd.

²⁰⁷ CHUVIECO. Op. cit.

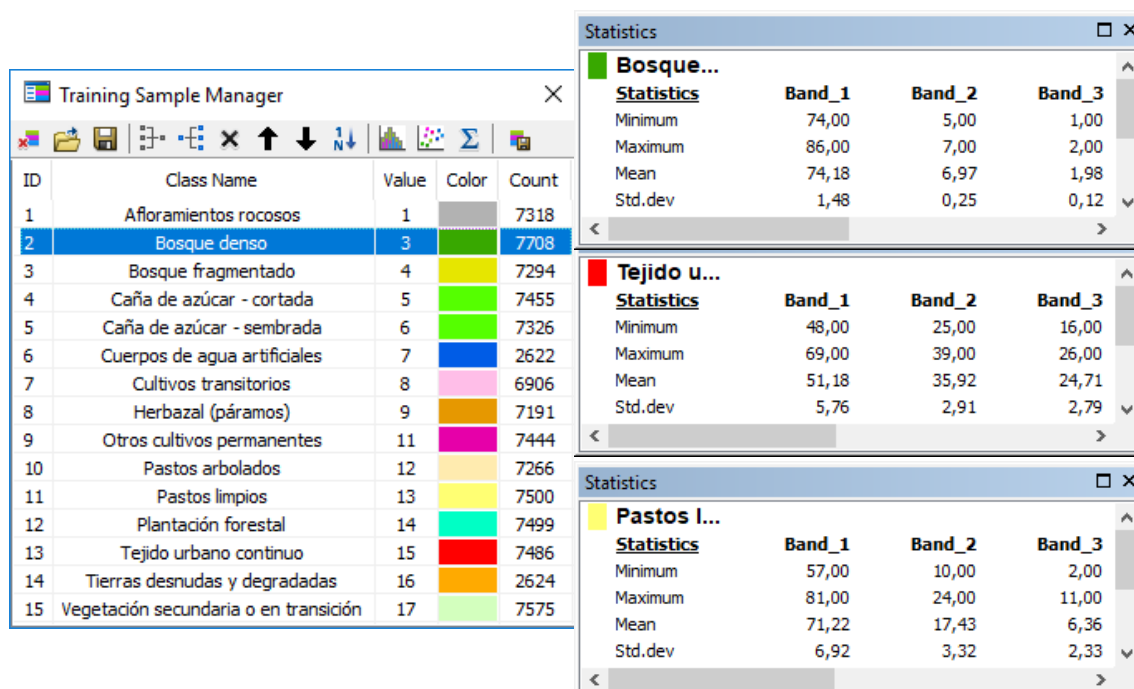
²⁰⁸ CLARK y PELLIKKA. Op. cit.

²⁰⁹ ESRI, Understanding segmentation and classification. Op. cit.

dividió estratégicamente en dos clases (cortada y cosechada) porque la ausencia y presencia respectiva de vegetación hizo que su firma espectral variara demasiado. Luego del proceso de clasificación, se consolidó una sola cobertura de «caña de azúcar». En la columna *value* de la tabla de atributos, se ingresó un valor que es un código establecido por el usuario para identificar cada cobertura. Con la aplicación de estas reglas se produjeron conjuntos de muestras con la menor variabilidad posible (ver fila Std.dev en la Figura 38, derecha).

Antes de avanzar a las etapas posteriores, se tuvo que resolver la siguiente situación: con las 60 muestras estadísticamente correctas por cobertura, se debía entrenar y clasificar los datos para luego validar los resultados con ese mismo conjunto de datos. Para superar esta situación, se tuvo en cuenta lo siguiente. Löw, Knöfel, y Conrad²¹⁰, clasificaron y validaron de forma independiente coberturas de la tierra tomando una proporción de 50% de datos para clasificar y 50% para validar, haciendo un gran muestreo para todo su modelo de clasificación. Esta estrategia disminuye ampliamente los tiempos de muestreo. En el caso de esta investigación, para esta etapa de calibración se replicó lo planteado por estos autores, pero tomando en cuenta el número de 60 muestras por cobertura de la tierra, y se ajustó una proporción aleatoria de **60% (36 muestras)** de datos para clasificar y **40% (24 muestras)** para validar. De esta manera, el modelo contó con mayor información para producir las clases sin menospreciar considerablemente la etapa de validación.

Figura 38. Resultados del muestreo en uno de los cuadrantes de calibración.



Fuente: elaboración propia usando la herramienta *Training Sample Manager* de ArcGIS 10.

²¹⁰ LÖW, Fabian; KNÖFEL, Patrick y CONRAD, Christopher. Analysis of uncertainty in multi-temporal object-based classification. En: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. Vol. 105; p. 91-106.

Para realizar esta división se aplicó un **muestreo estratificado** sobre el conjunto de datos. Este tipo de muestreo consiste en «realizar un muestreo aleatorio simple por cada estrato [grupo de individuos muy similares entre sí y diferente de los demás]»²¹¹. Esto quiere decir que todas las muestras pertenecientes a una clase de cobertura tuvieron la misma probabilidad de selección para los grupos de clasificación y validación. Con la solución propuesta en términos teóricos, se tuvo que proyectar su instrumentalización de forma automática en el software.

ArcGIS 10 no cuenta con una herramienta que directamente ejecute un muestreo estratificado, pero con la integración de dos herramientas fue posible realizarlo. Dichas herramientas fueron: **Analysis > Extract > Select y Geostatistical Analyst > Utilities > Subset Features** de ArcGIS 10. Mientras la primera selecciona las coberturas de la tierra por su nombre automáticamente, la segunda divide ese conjunto de datos seleccionado en las proporciones deseadas y exporta los dos grupos de datos para clasificar y validar. Así las cosas, con la clarificación del vínculo entre las muestras con cada una de las fases posteriores de calibración, se procedió a la etapa de entrenamiento y clasificación de los datos.

Cuando se dispone de un conjunto de clases y sus firmas espectrales características a partir de una muestra, el paso siguiente consta en adjudicar una clase a cada uno de los segmentos del área a clasificar. Esto se conoce como el **entrenamiento y clasificación de los datos**. El objetivo del proceso de entrenamiento es «proporcionar información espectral sobre las clases en la imagen a partir de la cual se puede desarrollar una firma espectral representativa para cada cobertura»²¹². Si cada clase de la imagen tiene una firma única, entonces la clase a la que pertenece cada píxel puede determinarse fácilmente a partir de la muestra. En el paso anterior se obtuvo una muestra estadísticamente correcta de 60 segmentos por cobertura, pero en esta etapa se debía entrenar y clasificar los datos para luego validar los resultados con ese mismo conjunto de segmentos muestreados. Para superar esta situación sin repetir muestreos se tuvieron en cuenta algunas consideraciones.

Con los primeros métodos de entrenamiento se obtenían resultados poco precisos, sin embargo, al refinarlos, se elaboraron técnicas de entrenamiento más avanzadas que se conocen hoy en día (algoritmos basados en inteligencia artificial)²¹³. Estos métodos se basan en el uso de redes neuronales artificiales que imitan el funcionamiento de las neuronas reales en las tareas de aprendizaje. Son muchos los algoritmos de entrenamiento y clasificación de datos, sin embargo, el trabajo desarrollado por Şatir y Berberoğlu²¹⁴, clarifica a sobremano el asunto.

²¹¹ RINCÓN y BARRETO. Op. cit., p. 40.

²¹² JAMES. Op. cit., p. 772.

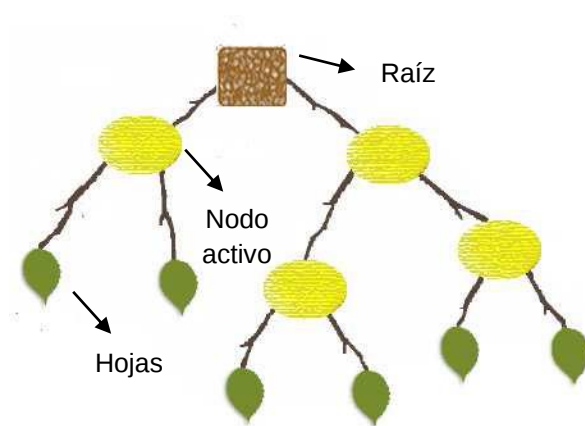
²¹³ CHUVIECO. Op. cit. & ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

²¹⁴ ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

A partir de una serie de criterios (precisión, velocidad, versatilidad de configuración, precisión con diferente tamaño de muestra y estabilidad), Şatır y Berberoğlu²¹⁵ compararon algoritmos diferentes de clasificación y concluyeron que el algoritmo *Random Trees* (árboles de decisión) es el mejor en precisión, estabilidad, precisión con diferentes muestras, seguido por *Support Vector Machine* (SVM). Mientras *Random Trees* se ejecuta más rápido en una computadora estándar, SVM requiere una máquina poderosa de procesamiento, detalle muy importante considerando los recursos disponibles para esta investigación. Por estas ventajas, el algoritmo *Random Trees* fue seleccionado.

El algoritmo *Random Trees* requiere un análisis exhaustivo de las respuestas espectrales de las clases de cobertura y del conjunto de datos auxiliares. Básicamente, consiste en ir haciendo preguntas a cada segmento cuya respuesta positiva o negativa conducirá a otra pregunta, para finalmente obtener la clase de cobertura a la que pertenece²¹⁶. En la Figura 39 se observa la estructura de un árbol de decisión: «una raíz (punto inicial), un nodo activo (nodo de reglas) y las hojas (clases de cobertura)»²¹⁷. La raíz es el punto inicial del árbol, los nodos activos tienen las reglas para crear las hojas, y estas hojas son la salida o segmentos que pertenecen a la misma clase o son asignados a otra clase en particular.

Figura 39. Arquitectura de un árbol de decisión.



Fuente: ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

Un árbol de decisión se construye a partir del conjunto de muestras, que contiene los segmentos completamente descritos a partir de una clase de cobertura y un conjunto de atributos. Los atributos son una colección de propiedades espaciales y espectrales que contiene toda la información sobre un segmento. Finalmente, es común que los árboles de decisión operen con unas muestras de entrada, unas reglas de división y unas reglas de finalización. Todos estos parámetros se ingresaron en la herramienta que entrenó los datos: *Train Random Trees Classifier* de ArcGIS.

Train Random Trees Classifier es una técnica poderosa y versátil que puede trabajar con imágenes segmentadas y con otros datos auxiliares. Esta herramienta es un clasificador supervisado de aprendizaje automático basado en la construcción de una multitud de árboles de decisión, la elección y clasificación de subconjuntos aleatorios de muestras para cada árbol y el uso de

²¹⁵ ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

²¹⁶ CHUVIECO. Op. cit.

²¹⁷ ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit., p. 33.

la salida del árbol más frecuente como la clasificación general²¹⁸. Esta herramienta se localiza en **Spatial Analyst > Segmentation and Classification > Train Random Trees Classifier** de ArcGIS. Estos fueron los parámetros empleados:

- **Número máximo de árboles:** es la cantidad de árboles que conforman el bosque. Al aumentar el número de árboles se obtendrán dos cosas: a) tasas de precisión más elevadas (esta mejora se estabiliza al final) y b) el tiempo de procesamiento aumenta de forma lineal. Ingresando un valor de **50** se obtuvieron los mejores resultados. Valores superiores no mejoraron la precisión.
- **Profundidad máxima de cada árbol:** en la analogía esto representa el número de ramas del árbol (nodos activos). La profundidad es otra forma de indicar la cantidad de reglas que puede crear cada árbol para llegar a una decisión. Un valor de **30** nodos activos fue empleado y no hubo necesidad de un mayor número de reglas de decisión para asignar una clase.
- **Número máximo de muestras por clase:** la cantidad de muestras que se van a utilizar para definir cada clase. Se estableció un valor de **0** para que el sistema empleará todos los segmentos muestreados.
- **Archivo ráster auxiliar:** existe la opción de incorporar datos ráster adicionales para generar atributos. Fueron probados en esta opción un DEM y el *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), pero el primero produjo una clasificación más estable y precisa (conclusión compartida con Şatir y Berberoğlu²¹⁹), por lo tanto, ese fue el usado en esta investigación.
- **Atributos usados:** conjunto de atributos espaciales y espectrales de todos los segmentos usados en la clasificación. Estos fueron: **COLOR** (valores RGB de la imagen), **COUNT** (número de píxeles de cada segmento), **COMPACTNESS** (grado de circularidad de un segmento), **RECTANGULARITY** (grado de rectangularidad de un segmento), **MEAN** (ND promedio del ráster auxiliar para cada segmento), y **STD** (desviación estándar de los ND del ráster auxiliar por segmento). Los dos últimos atributos se habilitan con la capa auxiliar. En este caso, el DEM.

El resultado de la fase de entrenamiento es un archivo *esri classifier definition* (ecd) con el algoritmo de entrenamiento *Random Trees* que contiene las firmas espectrales características de cada una de las clases de coberturas entrenadas. Este archivo de entrenamiento es el insumo principal empleado en la penúltima fase del modelo: **la clasificación**. El entrenamiento de datos y su clasificación son procesos complementarios, mientras que con el entrenamiento se crea la firma espectral característica de cada cobertura en la imagen, con la clasificación

²¹⁸ ESRI. Train Random Trees Classifier [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 30 de febrero de 2017].
En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/train-random-trees-classifier.htm>

²¹⁹ ŞATIR y BERBEROĞLU. Op. cit.

se extrapolan estos atributos y se determina por semejanza los tipos de cobertura al que pertenece cada uno de los segmentos²²⁰.

La herramienta **Classify Raster** de ArcGIS realiza una clasificación de la imagen tal y como se especifica en el archivo «ecd» creado en el entrenamiento. Esta herramienta contiene todos los clasificadores compatibles. De este modo, el archivo de definición de clasificador generado en el entrenamiento activará el clasificador correspondiente cuando se ejecute la herramienta de clasificar: en este caso el algoritmo *Random Trees*²²¹. Esta herramienta se localiza en **Spatial Analyst > Segmentation and Classification > Classify Raster**, y esta fue la configuración empleada:

- **Ráster de entrada:** es la imagen que se desea clasificar. En este campo se ingresó el producto **ráster segmentado** a partir de las bandas 1-3-5.
- **Archivo de definición de clasificador de Esri:** es el archivo con la información de entrenamiento de las muestras. En este caso, el archivo ingresado es el «ecd» **entrenado con el algoritmo *Random Trees***.
- **Ráster auxiliar:** existe la opción de incorporar ráster auxiliares para generar atributos y adicionar información al clasificador. El **DEM** se empleó como capa auxiliar porque en las pruebas generó una clasificación más estable y precisa.

El entrenamiento automático y la clasificación de los datos son los procesos que abarcan la mayor cantidad de tiempo de procesamiento del modelo de clasificación propuesto. Para el entrenamiento y clasificación de cada uno de los siete cuadrantes de la fase de calibración fueron necesarias siete horas (aproximadamente 1 hora por cuadrante). Ya con la imagen clasificada, el último paso del modelo de clasificación es la validación del producto.

La **evaluación de la precisión** es una parte importante de cualquier proyecto de clasificación. Lo que se pretende es evaluar la exactitud que tuvo el modelo para clasificar cada cobertura de la imagen. Dicha estimación nace del análisis de una serie de áreas de prueba obtenidas del mismo modo que las áreas de entrenamiento, permitiendo obtener una apreciación real de los errores²²². La lógica del proceso de validación es contrastar la clase de cobertura clasificada con la realidad del terreno en la localización de cada una de las áreas de prueba. La forma más habitual de evaluar la precisión de un mapa clasificado es tomar las áreas de prueba y compararlas con los datos clasificados de una matriz de confusión²²³.

Una matriz de confusión es método simple y apropiado de estimar los errores en la clasificación. Con este tipo de análisis, se obtiene, no sólo una caracterización del error cometido, sino también una medida sobre el ajuste de las clases

²²⁰ HARRIS. Op. cit.

²²¹ ESRI, Understanding segmentation and classification, Op. cit.

²²² CHUVIECO. Op. cit.

²²³ ESRI, Understanding segmentation and classification, Op. cit.

consideradas a la realidad y de los parámetros utilizados para caracterizarlas²²⁴. Por lo tanto, la matriz puede emplearse como información de retro-alimentación para ajustar alguna fase del modelo de clasificación. La matriz se compone de las clases reales en el terreno en las filas (información del usuario) y de las clases obtenidas tras la clasificación en las columnas (información del modelo). Esta relación cruzada debe interpretarse como el número de segmentos que perteneciendo a la clase fila han sido clasificados en la clase columna. Así es posible estimar el número de segmentos clasificados correctamente e incorrectamente para cada clase de cobertura. Un ejemplo de matriz de confusión se presenta en el Cuadro 24. El índice de acuerdo *kappa* ofrece una evaluación general de la precisión de la clasificación.

Cuadro 24. Ejemplo de matriz de confusión.

Clase	c_1	c_2	c_3	Total	U_Accuracy*	Kappa
c_1	49	4	4	57	0,8594	-
c_2	2	40	2	44	0,9091	-
c_3	3	3	59	65	0,9077	-
Total	54	47	65	166	-	-
P_Accuracy**	0,9074	0,8511	0,9077	-	0,8916	-
Kappa	-	-	-	-	-	0,8357

* La exactitud del usuario muestra falsos positivos, donde los píxeles se clasifican incorrectamente como una clase conocida cuando deberían haberse clasificado como algo diferente. Es una sobrestimación de las clases.

** La exactitud del productor es un falso negativo, donde los píxeles de una clase conocida se clasifican como algo diferente a una clase. Es la subestimación de clases.

Fuente: ESRI. Compute Confusion Matrix [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de marzo de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/compute-confusion-matrix.htm>

En esta investigación, la estimación de la precisión tomó como base un conjunto de puntos aleatorios a partir de los datos de referencia que fueron comparados con el producto clasificado en una matriz de confusión²²⁵. Los datos de referencia son los 60 segmentos muestreados para cada clase, pero como se explicó, mientras en la etapa de clasificación se tomó el 60% de las muestras, en la fase de validación ingresaron el **40% de las muestras (24 segmentos aleatorios)**. Llegados a esta etapa, el proceso automático de clasificación de coberturas de la tierra está completo. Sin embargo, tras una serie de experimentos, repetir el modelo completo de clasificación generó excelentes resultados. En ese sentido, la verdadera calibración del modelo completo se realizó por medio de iteraciones automáticas programadas.

Una **iteración** significa repetir un proceso hasta alcanzar el resultado o modelo de representación que más se acerque a la realidad. Como la clasificación de coberturas de la tierra es dependiente de las muestras ingresadas, en la búsqueda de un resultado con un alto grado precisión, el ajuste del modelo se resolvió calibrando el proceso de clasificación con diferentes datos de entrada

²²⁴ CHUVIECO. Op. cit.

²²⁵ ESRI, Understanding segmentation and classification, Op. cit.

de forma iterativa. Esto representa ejecutar el proceso de clasificación sobre la imagen de interés y comparar los resultados una y otra vez hasta obtener un producto optimizado²²⁶. Lo que se pretende con estas iteraciones es experimentar para mejorar la fiabilidad del modelo. En la fase de calibración el modelo se iteró **20 veces** utilizando diferentes conjuntos de datos para el entrenamiento y la validación mediante un muestreo estratificado. Se reconoce que un número de 20 iteraciones es un número pequeño comparado con las 100 iteraciones de Löw, Knöfel, y Conrad²²⁷, pero estas fueron suficientes para identificar las clases que mejoraban o empeoraban el rendimiento del modelo.

El proceso de clasificación iterativo se programó en archivos de conjuntos de órdenes o *script*. El *script* es una línea de comandos programada en lenguaje *Python* 2.7.12 que ejecuta de forma estructurada un proceso, en este caso, el modelo de clasificación de coberturas. El lenguaje de programación *Python* es muy usado en informática, tanto así que es el lenguaje base para correr ArcGIS sin interfaz gráfica. Ejecutar ArcGIS mediante línea de comandos es una opción que asegura estabilidad, eficiencia, confianza, y mayor destino de recursos del computador para el proceso realizado.

La estructura de los *scripts* desarrollados, se presentan de forma completa en los Anexo D (*script* de muestreo estratificado) y Anexo E (*script* de clasificación de coberturas). Ambos inician con un encabezado que tiene el título y la descripción propia de cada *script*. Luego, se puede identificar cómo se articularon cada una de las fases mencionadas en el modelo de calibración mediante un llamado a cada una de las herramientas empleadas —división de muestra, entrenamiento, clasificación y evaluación de precisión (Figura 36, página 156)— La estructura del *script* está jerarquizada, lo que quiere decir que hay procesos dependientes de otros siendo ejecutados en un orden específico. Esta estructura se asemeja a la rama de un árbol.

Al ejecutar el *script* el usuario debe ingresar la dirección y el nombre de los insumos requeridos por el proceso —imagen, muestras, etcétera—. A partir de este momento el proceso se realiza de forma automática hasta su finalización. El núcleo operativo del *script* yace en el comando **ForLoop** de *Python*. Este comando permite crear bucles de procesamiento con los bloques de datos que el usuario ingresa siguiendo la secuencia apropiada, para luego crear un **Range** o número de veces que se ejecute dicho bucle²²⁸. Por ejemplo, para este ejercicio todos los productos se nombraron con un sufijo que indicó el número de iteración con el que fueron creados, y así el *script* relacionó cada bloque de datos con sus productos respectivos para cada fase.

²²⁶ STEFANSKI, Jan; MACK, Benjamin y WASKE, Björn. Optimization of object-based image analysis with random forests for land cover mapping. *En: IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [en línea]. 2013. Vol. 6, No. 6; p. 2492-2504.

²²⁷ LÖW; KNÖFEL y CONRAD. Op. cit.

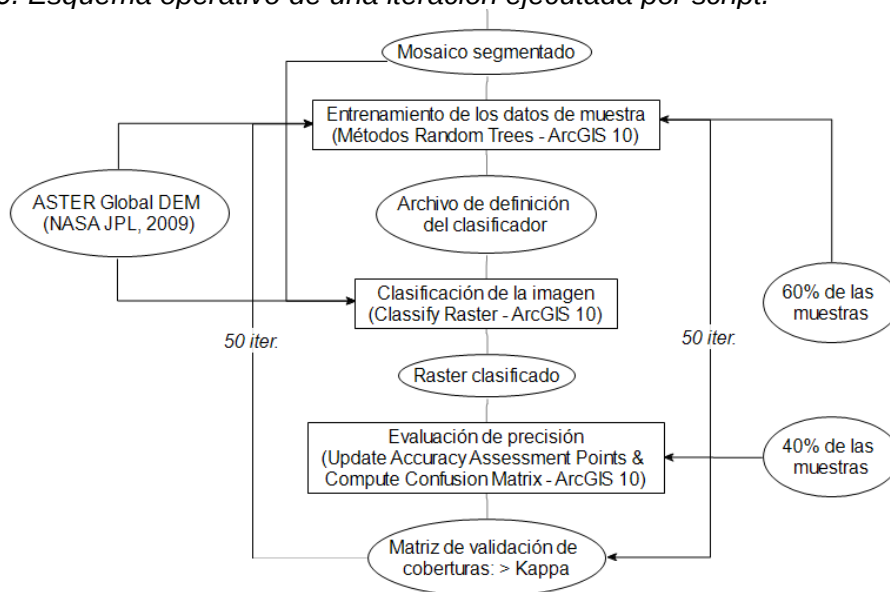
²²⁸ PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. ForLoop [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 10 de marzo de 2017]. *En:* <https://wiki.python.org/moin/ForLoop>

En conclusión, a partir de siete cuadrantes o imágenes, en la fase de calibración se ajustó el modelo de clasificación de coberturas. Sin esta fase de ejecución de pruebas no hubiese sido posible correr el modelo sin errores para el total del área de estudio.

V. Clasificación de coberturas de la tierra del área de estudio

Mientras en la fase de calibración se procesó una porción de área, en esta fase se clasificó el área de estudio completa. Esto quiere decir que se ejecutaron todas las fases de calibración con los *scripts* sobre el mosaico de imágenes *RapidEye*. El diagrama operativo de los procesos ejecutados con los *scripts* se presenta en la Figura 40. Mientras en la fase de calibración el modelo se iteró 20 veces, en esta etapa de clasificación se ejecutaron **50 iteraciones** utilizando diferentes conjuntos de datos para el entrenamiento y la validación. Löw, Knöfel, y Conrad²²⁹ ejecutaron 100 iteraciones en su modelo de clasificación, pero ellos no calibraron el modelo en una fase previa. Esto quiere decir que ejecutar este modelo calibrado de clasificación 50 veces es un número amplio y riguroso para obtener resultados precisos, estables y coherentes con las características de la superficie terrestre del área de estudio.

Figura 40. Esquema operativo de una iteración ejecutada por script.



Fuente: elaboración propia

El tiempo de procesamiento de la clasificación de coberturas sobre el mosaico fue extenso. El computador empelado ejecutó este proceso entre 28 a 30 horas continuas. Es un tiempo de procesamiento extenso considerando la complejidad de las tareas involucradas. Sin embargo, esto refleja que es posible realizar este tipo de tareas en un equipo de configuración media de *hardware* sin inconvenientes.

²²⁹ LÖW; KNÖFEL y CONRAD. Op. cit.

A partir de las reglas de muestreo, se consolidaron un total de **3.567 muestras** en los siete cuadrantes procesados —promedio de 510,8 muestras por cuadrante—. Es decir que la clasificación del mosaico se realizó con **2.115 muestras (60%)**, la validación tuvo como base **1.427 muestras (40%)**. Este gran conjunto de muestras corresponde a las 16 clases especificadas en el Cuadro 25, izquierda. Producto de la calibración, se identificó una serie de coberturas de la tierra difíciles de clasificar de forma automática porque presentan características espaciales y espectrales similares a otras. Por ejemplo, el modelo se confundió en clasificar los distintos tipos de bosques o el tejido urbano discontinuo, por tal motivo, las coberturas del Cuadro 25, en las columnas del centro y derecha, se capturaron de forma manual en la etapa final de la clasificación: el pos-procesamiento.

Cuadro 25. Coberturas clasificadas de forma automática (izquierda), las capturadas por el usuario de forma manual (centro), y las identificadas de forma semi-automática (derecha).

#	Clase de cobertura de la tierra y su nomenclatura					
	Clasificadas		Digitalizadas		Etiquetadas	
1	Afloramientos rocosos	AFR	Instalaciones recreativas	IRE	Aeropuertos	AER
2	Bosque denso	BDE	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	RVF	Áreas húmedas continentales (humedales)	AHC
3	Bosque fragmentado	BFR	Ríos	RIO	Bosque ribereño	BRI
4	Caña de azúcar - cortada	CAZ	Zonas de disposición de residuos	ZDR	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	MCPN
5	Caña de azúcar - sembrada		Zonas de extracción minera	ZEM	Mosaico de pastos con espacios naturales	MPN
6	Cuerpos de agua artificiales	CAA	Zonas industriales o comerciales	ZIC	Tejido urbano discontinuo	TUD
7	Cultivos transitorios	CTR	Zonas verdes urbanas	ZVU		
8	Herbazal (páramos principalmente)	HER				
9	Lagunas lagos y ciénagas naturales	LLC				
10	Otros cultivos permanentes	OCP				
11	Pastos arbolados	PAR				
12	Pastos limpios	PLI				
13	Plantación forestal	PFO				
14	Tejido urbano continuo	TUC				
15	Tierras desnudas y degradadas	TDD				
16	Vegetación secundaria o en transición	VST				

Fuente: elaboración propia.

Con estas muestras y la configuración de dos *scripts*, el modelo de clasificación se iteró 50 veces empleando conjuntos de datos aleatorios. La matriz de confusión del Cuadro 26 enseña que el índice Kappa de precisión obtenido en la iteración 16 de 50 fue del 84%. Este resultado está entre el 84% y 89% de precisión alcanzado por otros investigadores²³⁰. Sin embargo, se alcanzó ese porcentaje clasificando 16 tipos diferentes de coberturas; un gran logro considerando que los otros ejercicios no superan la mitad de ese número de coberturas para un área más pequeña y homogénea.

²³⁰ BLASCHKE. Op. cit. & SOUSA. Op. cit. & MAKINDE. Op. cit.

Analizando la matriz de confusión detalladamente, es evidente que hubo unas coberturas de la tierra mejor clasificadas que otras. En el Cuadro 26, mientras la clasificación de las coberturas de LLC, AFR y TUC presentaron el mejor rendimiento del clasificador —94% y 100%—, la clasificación de las VST, PLI y PAR tuvieron el rendimiento más bajo del modelo —69% y 79%—. Esto se puede entender por la extensión menor, distribución concentrada y menor número de muestras del primer grupo sobre el área mayor, distribución heterogénea y superior cantidad de muestras del segundo grupo en el área de estudio.

La clasificación automática tuvo un rendimiento muy alto, sin embargo, fue clara la presencia del efecto de «sal y pimienta» en el producto²³¹. Si se observa el centro del área de estudio en la Figura 35 (c, página 155), se evidencia un efecto de atomización de las áreas destinadas al cultivo de caña de azúcar. Las fracciones corresponden a segmentos que, por la maduración diferenciada del cultivo y la cantidad de agua por riego, produjeron una firma espectral particular. También, al norte del área se clasificaron de forma equivocada segmentos como tejido urbano continuo. Esta área tuvo una particularidad: el proveedor de la imagen reemplazó el cuadrante original con otro capturado en otra fecha debido a la nubosidad. En los tres mapas de la Figura 35 se observa esa irregularidad. Este tipo de situaciones se solucionaron con una revisión manual en la etapa de pos-procesamiento.

²³¹ CLARK y PELLIKKA. Op. cit.

Cuadro 26. Matriz de confusión de la clasificación del mosaico. Iteración número 16 de 50.

Clase	AFR	BDE	BFR	CAZ	CAZ	CAA	CTR	HER	LLC	OCP	PAR	PLI	PFO	TUC	TDD	VST	Total	U_Acc.	Kappa
AFR	46	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0,94	0,00
BDE	0	66	6	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	75	0,88	0,00
BFR	0	3	140	0	1	0	0	4	0	1	1	3	2	0	0	8	163	0,86	0,00
CAZ	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	3	0	62	0,90	0,00
CAZ	0	0	0	0	75	0	1	0	0	1	5	1	2	0	0	8	93	0,81	0,00
CAA	0	0	1	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0,98	0,00
CTR	0	0	2	0	1	1	60	0	0	0	1	7	0	0	0	3	75	0,80	0,00
HER	2	3	2	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	72	0,90	0,00
LLC	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	1	0	0	0	0	25	0,96	0,00
OCP	0	0	3	0	0	0	1	0	0	58	0	5	1	0	0	7	75	0,77	0,00
PAR	0	0	0	4	1	0	1	0	0	0	74	10	0	0	1	3	94	0,79	0,00
PLI	0	0	2	6	2	0	5	0	0	5	10	128	1	2	0	6	167	0,77	0,00
PFO	0	0	4	0	0	0	1	0	0	0	0	3	90	0	0	1	99	0,91	0,00
TUC	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	114	3	1	121	0,94	0,00
TDD	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	3	0	2	98	0	107	0,92	0,00
VST	0	0	6	0	8	0	2	0	0	7	4	4	0	0	0	83	114	0,73	0,00
Total	48	72	166	72	88	61	72	72	24	72	96	168	96	120	105	120	1452	0,00	0,00
P_Acc.	0,96	0,92	0,84	0,78	0,85	0,98	0,83	0,90	1,00	0,81	0,77	0,76	0,94	0,95	0,93	0,69	0,00	0,85	0,00
Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,84

Fuente: elaborado en ArcGIS 10.

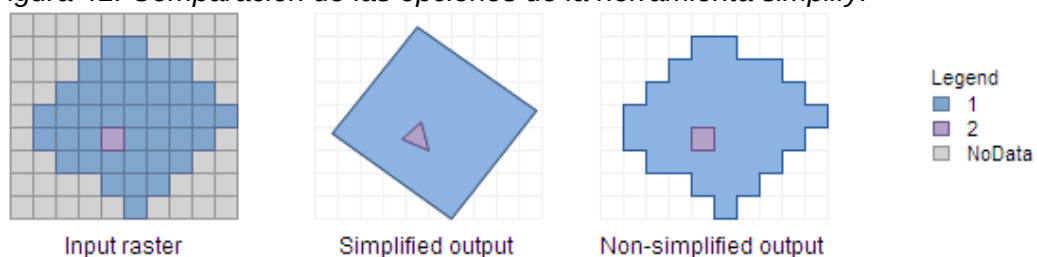
VI. Pos-procesamiento de coberturas de la tierra

La calibración que se hizo en los siete cuadrantes, aunque prometedora por los índices de *kappa* tan altos que se obtuvieron, demostró no ajustarse exactamente al aplicarse a toda el área de estudio dado que los cuadrantes se capturaron en años diferentes y en meses diferentes. De ahí que la etapa de etiquetado tuviera que ser profunda. Eso tuvo que ver, entre otras cosas, con la variación de las etapas de crecimiento de la vegetación observables en cada cuadrante, ya que, al ser imágenes tomadas de diferentes meses del año, en algunas cuadrantes la vegetación se observaba seca y, de repente, al pasar al siguiente cuadrante, mojada. Ese caso fue recurrente en toda la extensión del área de estudio.

En pocas palabras, el pos-procesamiento es la etapa de control de calidad del producto de coberturas de la tierra²³². Esto implica la intervención directa del usuario para ajustar el producto clasificado en tres fases diferentes: i) digitalización, ii) etiquetado, y iii) corrección de topología. No obstante, la imagen clasificada debe convertirse a polígono para ejecutar cada una de estas fases. Convertir datos de formato ráster a polígono es una conversión bastante común en el procesamiento de datos geográficos.

Técnicamente, lo que se hace es agrupar entidades de área como bloques de celdas contiguas con valores iguales en un solo polígono²³³. La herramienta de ArcGIS 10 empleada para la transformación se localiza en **Conversion > From Raster > Raster to Polygon**. Es una herramienta bastante sencilla y el único parámetro ajustado corresponde a la activación de la opción **Raster to Polygon > Simplify**. Como muestra la Figura 41, lo que se pretende es suavizar el límite de cada polígono de salida porque muy difícilmente todas las coberturas de la tierra clasificadas tengan límites en formas de celdas con ángulos rectos de 90 grados.

Figura 41. Comparación de las opciones de la herramienta simplify.



Fuente: ESRI, Raster to Polygon. Op. cit.

Luego de la conversión, el agrupamiento de celdas con la opción de simplificación de borde produjo polígonos de área menor de una (1) hectárea. Con la intención de mantener la UMC de una (1) hectárea correspondiente a la escala 1:25.000, la solución fue combinar estos polígonos pequeños a sus

²³² DUARTE, *et al.* Op. cit.

²³³ ESRI. Raster to Polygon [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de marzo de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon.htm>

colindantes. La herramienta de ArcGIS ubicada en **Coverage > Data Management > Generalization > Eliminate** permitió realizar este ajuste con precisión. El método de eliminación de polígonos empleado corresponde a la opción **Eliminate > Polygon Option > Border**, es decir que el polígono pequeño se combinó con el polígono contiguo con que comparte el borde más largo. Esta es la opción recomendada y produjo buenos resultados²³⁴.

Con las coberturas de la tierra clasificadas en formato polígono se ejecutaron tres fases de control de calidad del producto. La **digitalización** de coberturas se realizó para ingresar de forma manual aquellas que no se clasificaban correctamente de forma automática. Por más que se ajusten las muestras y el modelo de clasificación, siempre habrá un solapamiento de la reflectancia entre algunas coberturas —tierra desnuda, áreas urbanas discontinuas, zonas mineras, bosque ribereño, entre otras— por lo que deben ser capturadas de forma interactiva por el usuario²³⁵.

Por otra parte, una vez se produjo de forma automática la capa de coberturas de la tierra con el *script*, se realizó una edición manual para corregir los errores identificables contrastando la capa clasificada con la imagen *RapidEye* del mosaico. Es un proceso similar a la revisión ejecutada por Clark y Pellikka²³⁶, aquí los hemos denominado **etiquetado**. Este proceso fue realizado para el total del mosaico y se generó una grilla para orientar el avance de las áreas revisadas.

La etapa de pos-procesamiento se completó con la combinación de los datos digitalizados y los etiquetados. Este proceso de «fusión» entre entidades de distintas fuentes requirió tener una base (capa de coberturas), unos objetos de menor área (elementos digitalizados), una interacción entre ellos dos, y una revisión geométrica de la capa final de coberturas. La relación entre los objetos y la base es de eliminación y unión, es decir, el área de cada objeto se borró de la base para luego unirse exactamente en la misma localización. Esto se realizó empleando en conjunto las herramientas **Analysis > Overlay > Erase y Data Management > General > Merge**. *Erase* crea una capa de salida superponiendo entidades —la base y los objetos en este caso— y conserva el área de la base que no estuvo superpuesta²³⁷. La herramienta *Merge* permite combinar entidades para crear una nueva capa de salida²³⁸. En este caso, la base contaba con vacíos que coincidían con el área de los objetos y lo que permitió *Merge* es “llenar” ese vacío con el objeto mismo. Para validar estos procesos fue necesario revisar la geometría de la capa de coberturas con reglas topológicas.

²³⁴ ESRI. Eliminate [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 22 de marzo de 2017]. [En: http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/coverage-toolbox/eliminate.htm](http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/coverage-toolbox/eliminate.htm)

²³⁵ CLARK y PELLIKKA. Op. cit.

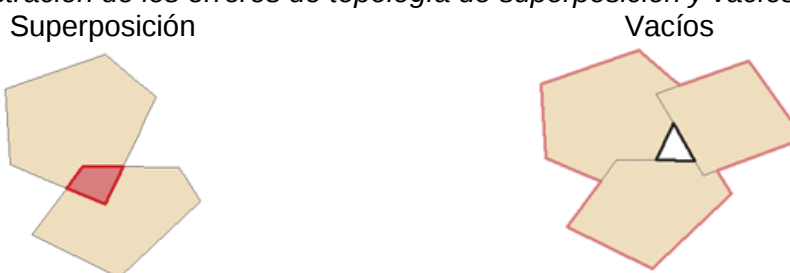
²³⁶ *Ibíd.*

²³⁷ ESRI. Erase [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 5 de junio de 2017]. [En: http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/erase.htm](http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/analysis-toolbox/erase.htm)

²³⁸ ESRI. Merge [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 8 de junio de 2017]. [En: http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/merge.htm](http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/data-management-toolbox/merge.htm)

Las **reglas topológicas** definen las relaciones espaciales permitidas entre las entidades²³⁹. El usuario es quien decide este tipo de relaciones con base a sus intereses. En este caso, las reglas topológicas se emplearon para validar la geometría de la capa de coberturas de la tierra en la fase de pos-procesamiento. El objetivo fue crear una capa de coberturas continua, sin superposiciones, y con bordes perfectamente delimitados. Por tal motivo, las reglas topológicas aplicadas fueron **Polygon Rules > Must Not Overlap** —para revisar que no existan bordes superpuestos entre entidades— y **Polygon Rules > Must Not Have Gaps** —para eliminar áreas de vacío entre coberturas—. La Figura 42 presenta las situaciones que estas dos reglas permitieron identificar.

Figura 42. Ilustración de los errores de topología de superposición y vacíos.



Fuente: ESRI, Topology. Op. cit.

La regla de *Must Not Overlap* permitió identificar las áreas de superpuestas (color rojo de la Figura 42, izquierda) y la regla de *Must Not Have Gaps* posibilitó reconocer los vacíos entre polígonos adyacentes (color negro de la Figura 42, derecha), pero la solución de estas situaciones se realizó de forma semi-automática con el criterio del usuario. Así las cosas, la solución para *Must Not Overlap* constó de un *Merge* entre las entidades superpuestas asignando la porción de área cubierta a la clase de cobertura correcta. Para *Must Not Have Gaps* se aplicó una solución conjunta con *Create Features* y *Merge* donde se creó un objeto nuevo llenando el vacío y se unió dicho objeto con la clase adyacente de cobertura correcta. Por último, se recuerda que cada uno de estos ajustes topológicos tuvo en cuenta la UMC de una (1) hectárea.

Finalmente, con estas correcciones se tuvo una capa de coberturas de la tierra geométricamente correcta y geográficamente contextualizada a la realidad del área de estudio. Con este insumo tan valioso se procedió a identificar la EEM del área de influencia metropolitana de Cali. Ese es el componente abarcado en la siguiente sección de la metodología.

El modelo de clasificación automática de las coberturas realizó gran parte del trabajo, no obstante, se identificaron falencias como el efecto de “sal y pimienta” o la asignación errada de clases, que se solucionaron con la intervención directa de los investigadores. Se digitalizaron siete (7) coberturas de la leyenda a una escala de 1:5.000 (Cuadro 25, centro, página 169). Digitalizar con dicha escala garantizó una identificación ideal de cada una de esas coberturas. Para algunas

²³⁹ ESRI. Topology in ArcGIS [en línea]. _____, 2017. [Consultado el 25 de julio de 2017]. En: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/topologies/topology-in-arcgis.htm>

coberturas se usó como guía la información espacial publicada de forma gratuita en la web por la CVC, CRC, IGAC, Google Earth, IDEAM y *Open Street Maps*. Estos datos agilizaron la captura digital de dichas coberturas para el área de estudio.

El etiquetado es la segunda fase del pos-procesamiento. Esta actividad involucró la identificación de seis (6) coberturas de la tierra (Cuadro 25, derecha, página 169), y al mismo tiempo, una revisión de cada cuadrante procesado para verificar la fidelidad de la capa de coberturas con la realidad del terreno. El etiquetado no fue un proceso complejo, pero requirió rigurosidad y tiempo considerando la extensión del área de estudio.

Anexo B. Descripción de las coberturas de la tierra para el área de estudio

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Descripción	Contiene	Fotografía
1. Áreas artificializadas	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.1. Tejido urbano continuo		Son espacios conformados por edificaciones y los espacios adyacentes a la infraestructura edificada. Las edificaciones, vías y superficies cubiertas artificialmente cubren más de 80% de la superficie del terreno	• Centro de aglomeraciones y centros históricos • Zonas de habitación periféricas • Parqueaderos y áreas cubiertas por asfalto o cemento • Estructuras y edificaciones artificializadas con área mayor a una (1) hectárea	
		Simbología RGB 204 0 0				Panorámica urbana de Cali. Fuente: El País
		1.1.2. Tejido urbano discontinuo		Son espacios conformados por edificaciones y zonas verdes. Las edificaciones, vías e infraestructura construida cubren la superficie del terreno de manera dispersa y discontinua, ya que el resto del área está cubierta por vegetación	• Casas individuales, con jardín y espacios verdes • Manzanas menos densas con espacios verdes al interior • Parques y áreas verdes urbanas con área menor a una (1) hectárea	
		Simbología RGB 248 0 0				Sur de Santiago de Cali. Fuente: Cali.gov
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales		Son las áreas cubiertas por infraestructura artificial (terrenos cimentados, alquitranados, asfaltados o estabilizados), sin presencia de áreas verdes dominantes, las cuales se utilizan también para actividades comerciales o industriales	• Áreas de producción industrial • Centros de investigación y desarrollo • Centros comerciales y de exposiciones con su infraestructura • Equipamientos con área mayor a una (1) hectárea de: seguridad pública y penal; centros hospitalarios y psiquiátricos; universidades, escuelas; infraestructura de telecomunicaciones; bases militares; plantas de tratamiento de aguas; subestaciones eléctricas	
		Simbología RGB 255 204 0				Zona industrial ACOPI. Fuente: inelco.com

		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		Son espacios artificializados con infraestructuras de comunicaciones como carreteras, autopistas y vías férreas; se incluye la infraestructura conexa y las instalaciones asociadas tales como: estaciones de servicios, andenes, terraplenes y áreas verdes	• Infraestructura vial como carreteras, autopistas, puentes y parqueaderos • Infraestructura férrea como vías, intercambiadores, estaciones de abordaje, sitios de mantenimiento y zonas verdes conexas a las estaciones	
		Simbología RGB 194 194 194				Ferrocarril del Pacífico. Fuente: El País
		1.2.4. Aeropuertos		Comprende la infraestructura donde funciona una terminal aérea. Incluye las pistas de aterrizaje y carreteo, los edificios, las superficies libres, las zonas de amortiguación y la vegetación asociada	• Aeropuertos militares, comerciales y deportivos • Terminales de pasajeros, talleres, bodegas, parqueaderos • Pistas de aterrizaje y carreteo • Superficies cubiertas de vegetación y los espacios asociados	
		Simbología RGB 150 140 80				Aeropuerto Bonilla Aragón. Fuente: El País
	1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera		Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras, de construcción, y producción de residuos de diferente origen	• Arenales; canteras; gravilleras • Infraestructuras industriales asociadas (fábricas de cemento) • Superficies de agua con área menor a una (1) hectárea producto de la extracción • Los sitios de extracción a cielo abierto o abandonados sin vegetación	
		Simbología RGB 211 23 255				Fábrica San Marcos. Fuente: El País

		1.3.2. Zonas de disposición de residuos		Son espacios en los que se depositan residuos urbanos, restos de construcción, desechos industriales y material estéril de minas	• Vertederos públicos o de municipalidades • Vertederos industriales de residuos líquidos y sólidos • Edificios, parqueaderos y carreteras asociadas con el vertedero, con área menor a una (1) hectárea	 Relleno sanitario Colomba-El Guabal, Yotoco. Fuente: El País
		Simbología RGB 137 137 137				
1.4. Zonas verdes artificializadas , no agrícolas		1.4.1. Zonas verdes urbanas		Comprende las áreas cubiertas por vegetación dentro del tejido urbano con tamaño superior a 1 hectárea, incluyendo parques urbanos y cementerios	• Cementerios con zonas verdes • Jardines ornamentales • Parques, estanques de parques, áreas cubiertas por césped • Parques botánicos y zoológicos incluidos o al lado del “tejido urbano” • Espacios arbolados ubicados entre los edificios del “tejido urbano”	 Parque La Flora, Cali. Fuente: Google Earth
		Simbología RGB 180 215 158				
		1.4.2. Instalaciones recreativas		Son los terrenos dedicados a las actividades de camping, deporte, parques de atracción, golf, hipódromos y otras actividades de recreación y ocio, incluyendo los parques habilitados para esparcimiento, no incluidos dentro del “tejido urbano”	• Áreas de carreras automovilísticas • Zonas arqueológicas declaradas • Parques botánicos y zoológicos no incluidos en “tejido urbano” • Campos de fútbol y la infraestructura asociada • Fincas y condominios recreativos ubicados en las afueras de las ciudades o a lo largo de las vías • Zonas de pastos en áreas de entrenamiento militar	 Club Campestre de Cali. Fuente: El País
		Simbología RGB 255 50 50				

2. Áreas de producción agrícola	2.1. Cultivos transitorios	2.1.1. Otros cultivos transitorios		Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año. También suelos en preparación para próximos cultivos transitorios	Cultivos de: • Cereales: arroz, maíz, sorgo, cebada, trigo • Oleaginosas y leguminosas: algodón, ajonjolí, frijol, soya, maní • Hortalizas: cebolla, zanahoria, remolacha • Tubérculos: papa, yuca, flores a cielo abierto	 Frijol Cargamanto. Fuente: FENALCE
		Simbología RGB 255 255 166				
	2.2. Cultivos permanentes	2.2.1. Otros cultivos permanentes		Comprende las áreas dedicadas a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar. También suelos en preparación para próximos cultivos permanentes	Cultivos de: • Herbáceas: caña panelera, plátano y banano • Arbustivos: café y cacao • Arbóreos: palma africana y árboles frutales	 Cultivo de café. Fuente: El País
			2.2.1.2. Caña de azúcar	Cobertura compuesta por el cultivo de caña de azúcar y su infraestructura asociada. Es un cultivo industrial para la producción de azúcar, que se corta cada 12 meses, y una duración de la plantación de aproximadamente cinco años	• Cultivos de caña de azúcar con área mayor a una (1) hectárea • Suelos en preparación y de corte reciente para próximos cultivos de caña de azúcar • Infraestructura asociada con el cultivo de caña de azúcar con área menor a una (1) hectárea (vías, campamentos, bodegas)	 Caña de azúcar. Fuente: ASOCAÑA
		Simbología RGB 231 160 89	Simbología RGB 233 255 122			

	2.3. Pastos	2.3.1. Pastos limpios		Esta cobertura comprende las tierras ocupadas por pastos limpios con un porcentaje de cubrimiento mayor a 70% de la unidad; la realización de prácticas de manejo (limpieza, enclavamiento y/o fertilización) y el nivel tecnológico utilizados, impiden la presencia o el desarrollo de otras coberturas.	• Pastos limpios con área mayor a una (1) hectárea • Zonas de pastos limpios sujetas a inundaciones temporales con área menor de 1 hectárea • Pastos con presencia esporádica de arbustales y cultivos • Infraestructuras asociadas con los pastos manejados (viviendas rurales, cercas vivas)		Pastos limpios. Fuente: El País
		Simbología RGB 204 255 153					
		2.3.2. Pastos arbolados		Cobertura que incluye las tierras cubiertas con pastos, en las cuales se han estructurado potreros con presencia de árboles de altura superior a cinco metros, distribuidos en forma dispersa. En Colombia, se ubican en general sobre áreas planas ganaderas de climas cálidos.	• Pastos arbolados con área mayor a una (1) hectárea • Pastos arbolados con zonas inundables con área mayor a una (1) hectárea • Infraestructuras asociadas con los pastos arbolados con área menor a una (1) hectárea (corrales o establos)		Pastos arbolados: Fuente: Banco de la República de Colombia
		Simbología RGB 51 153 102					
	2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales		Comprende las superficies ocupadas por coberturas de cultivos y pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, el patrón de distribución de las coberturas no puede ser representado individualmente, como parcelas con tamaño mayor a 6 hectáreas. Las áreas de cultivos y pastos ocupan entre 30% y 70% de la superficie total de la unidad	• Mezcla de parcelas de pastos y cultivos con relictos de bosques, arbustales y vegetación secundaria, con área mayor a seis (6) hectáreas • Infraestructuras asociadas con los cultivos y los pastos manejados (viviendas rurales, vías, corrales)		Mosaico de cultivos, pastos y áreas naturales. Fuente: IDEAM
		Simbología RGB 214 153 0					

		2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales		Constituida por las superficies ocupadas por coberturas de pastos en combinación con espacios naturales. En esta unidad, las parcelas de pastos presentan un área menor a 6 hectáreas. Las coberturas de pastos representan entre 30% y 70% de la superficie total del mosaico.	• Mezcla de pastos con relictos de bosques, arbustales y vegetación secundaria, con área mayor a seis (6) hectáreas • Infraestructuras asociadas con los pastos manejados con área menor a una (1) hectárea (viviendas rurales, vías, corrales)	 Mosaico de pastos y zonas naturales. Fuente: IDEAM
		Simbología RGB 191 158 65				
3. Bosques y áreas seminaturales	3.1. Bosques	3.1.1. Bosque denso		Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente arbóreos, los cuales forman un estrato de copas (dosel) continuo. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva sin alterar su estructura original.	• Áreas con una cobertura densa de palmas naturales con área superior a una (1) hectárea. • Áreas con una cobertura densa de guadua y extensión mayor a una (1) hectárea. • Formaciones arbóreas secundarias regeneradas de manera natural	 Bosque denso en Farallones de Cali. Fuente: cali.gov
		Simbología RGB 86 172 0				
		3.1.3. Bosque fragmentado		Comprende los territorios cubiertos por bosques naturales cuya continuidad horizontal está afectada por la inclusión de otros tipos de coberturas como pasto, cultivos o vegetación en transición. Los bosques fragmentados tienden a presentarse en la periferia urbana y zonas de colonización	• Parches de bosque natural generalmente de forma geométrica con área mayor a una (1) hectárea	 Bosque fragmentado. Fuente: Banco de la República de Colombia
		Simbología RGB 170 255 0				

		3.1.4. Bosque ripario (ribereño)		Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arbórea ubicada en las márgenes de cursos de agua permanentes o temporales. Mientras en las regiones de sabanas se conoce como bosque de galería o cañadas, las franjas de bosque en cursos de agua son conocidas como bosque ribereño en las zonas andinas	• Bosque ribereño con área superior a una (1) hectárea • Coberturas de asociaciones de palma y guadua a lo largo de los márgenes de los ríos, con altura y densidad de bosque natural	
		Simbología RGB 0 168 132				Bosque ribereño. Fuente: El País
		3.1.5. Plantación forestal		Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. Esta cobertura presenta un patrón geométrico regular, constituido por filas y columnas de árboles generalmente de la misma edad.	• Plantaciones de coníferas o latifoliadas con área mayor a una (1) hectárea. • Zonas quemadas dentro de la plantación con área mayor a una (1) hectárea. • Parcelas de plantaciones en proceso de aprovechamiento (zonas en tala). • Infraestructura asociada con área menor a una (1) hectárea (vías, campamentos, aserraderos)	
		Simbología RGB 137 168 101				Plantación forestal en La Cumbre, Valle del Cauca. Fuente: Google Earth
	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	3.2.1. Herbazal (páramos)		Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes sustratos, los cuales forman una cobertura densa. Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o su intervención ha sido selectiva y no ha alterado su estructura original ni sus características funcionales	• Coberturas naturales de herbáceas de páramo y subpáramo • Coberturas de herbazales quemados • Coberturas de arbustales	
		Simbología RGB 204 242 77				Páramo en PNN Farallones. Fuente: CVC

		3.2.3. Vegetación secundaria o en transición		Comprende aquella cobertura vegetal en proceso de sucesión natural producto de la intervención o por la destrucción de la vegetación primaria. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos o en áreas agrícolas abandonadas.	• Áreas de arbustos con extensión mayor a una (1) hectárea. • Pequeños fragmentos de pastos y arbustos en sucesión con área mayor a una (1) hectárea.	 Vegetación en transición. Fuente: El Tiempo
		Simbología RGB 153 204 0				
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.2. Afloramientos rocosos		Áreas en las que la superficie del terreno está constituida por capas de rocas expuestas y sin/exiguo desarrollo de vegetación. En la región andina, se localizan principalmente en las áreas de fuerte pendiente, donde predominan los sustratos de rocas duras y resistentes. Los afloramientos rocosos son producto de la dinámica natural del terreno	• Áreas de afloramientos rocosos con área superior a una (1) hectárea • Áreas rocosas con cobertura vegetal escasa que representa menos de 30% de la superficie	 Afloramiento rocoso en PNN Farallones. Fuente: Mauricio Tabares Mosquera
		Simbología RGB 194 194 194				
		3.3.3. Tierras desnudas y degradadas		Esta cobertura corresponde a las superficies de terreno desprovistas de vegetación o con escasa cobertura vegetal, debido a la ocurrencia de procesos tanto naturales como antrópicos de erosión y degradación extrema	• Zonas de tierras desnudas y degradadas con área superior a una (1) hectárea. • Zonas semidesérticas, con vegetación seca y ocurrencia de procesos de erosión. • Áreas de rocas, cantos rodados o cascajo en laderas empinadas en las que se presenta una cobertura vegetal escasa que representa menos de 30% de la superficie	 Cárcavas. Fuente: CVC
		Simbología RGB 236 236 236				

4 y 5. Áreas húmedas y superficies de agua	4.1. Áreas húmedas continentales	4.1.1 Áreas húmedas continentales (humedales)		En las planicies aluviales se forman cuerpos de agua denominados humedales que están asociadas con las áreas de desborde de los grandes ríos con el nivel freático a nivel del suelo en forma temporal o permanente	• Cuerpos de agua ubicados en las llanuras de inundación de los ríos con área mayor a una (1) hectárea • Cuerpos de agua con presencia de vegetación acuática con área mayor a una (1) hectárea	
		Simbología RGB 51 204 204				Humedal del Valle del Cauca. Fuente: CVC
	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos		Corriente natural de agua que fluye con continuidad, posee un caudal considerable y desemboca en el mar, en un lago o en otro río. Esta cobertura comprende los cauces principales de las cuencas hidrográficas que componen el área de estudio	• Cursos de agua naturales con área de polígono mayor a una (1) hectárea	
		Simbología RGB 0 204 242				Río Cauca. Fuente: CVC
		5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales		Superficies o depósitos de agua naturales de carácter abierto o cerrado, que pueden estar conectadas con un río o con el mar. En la zona andina hay cuerpos de agua (lagos y lagunas) situados en alta montaña que constituyen las áreas de nacimiento de ríos	• Lagunas u otros cuerpos agua naturales con área mayor a una (1) hectárea	
		Simbología RGB 51 102 255				Laguna de páramo en PNN Farallones. Fuente: Mauricio Tabares Mosquera

		5.1.4. Cuerpos de agua artificiales		Esta cobertura comprende los cuerpos de agua de carácter artificial que fueron creados por el hombre para almacenar agua, usualmente con el propósito de generación de electricidad y el abastecimiento de acueductos, aunque también para prestar otros servicios como: control de caudales e inundaciones, riego y con fines turísticos y recreativos	• El cuerpo de agua y las áreas secas expuestas en períodos de vaciado y estiaje • La infraestructura asociada con área menor a una (1) hectárea (presa, generador, transformador) • Las islas presentes en los cuerpos de agua con área menor a una (1) hectárea • Lagunas para irrigación de cultivos	
		Simbología RGB 0 77 168				Embalse Salvajina. Fuente: El País

Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Op. cit.

Anexo C. Descripción de los SE valorados en la consulta a expertos

Sección	División	Grupo	Comprende	Ilustración
1. Aprovechamiento: todas las salidas nutricionales, materiales y energéticas de los sistemas vivos	1.1. Nutrición: esta división abarca todas las salidas de los sistemas vivos que son el aprovisionamiento nutricional y alimenticio de la sociedad	1.1.1. Biomasa	• Cultivos de cereales, vegetales, frutas • Presencia silvestre de bayas, frutas, setas • Animales encerrados y sus productos • Acuicultura • Pesca comercial y de subsistencia • Cacería de animales	 Piña Oro Miel. Fuente: Agencia UN
		1.1.2. Agua	• Agua superficial extraída de ríos, lagos y otros cuerpos de agua abiertos o subterráneos para beber.	 Captación de agua. Fuente: El Tiempo
	1.2. Materiales: esta división comprende todas las salidas de los sistemas vivos que aprovisionan de materias primas a la humanidad	1.2.1. Biomasa	• Fibras y otros materiales de plantas, algas y animales para uso directo o procesado (madera, flores, huesos, celulosa, algodón, caucho, cera, resina) • Materiales genéticos de toda la biota para producir bioquímicos y farmacéuticos	 Extracción de madera. Fuente: CVC

		1.2.2. Agua	• Agua superficial sin propósito bebible (uso doméstico, riego, consumo de ganado, uso industrial)	 Riego por goteo en cultivo de tomate. Fuente: Agencia UNAL
		1.2.3. Materiales abióticos metálicos y no metálicos	• Minerales metálicos • Pigmentos • Material de construcción (arcilla/barro)	 Extracción de oro en Suárez, Cauca. Fuente: Revista Semana
	1.3. Energía: esta división incluye todas las salidas de los sistemas vivos que la humanidad emplea para la producción de energía	1.3.1. Biomasa	• Combustible de madera • Leña • Paja • Cultivos para quema y producción de energía • Excremento • Grasa • Aceites	 Quema de leña en producción de panela. Fuente: Radio UNAL

		1.3.2. Fuente abiótica renovable	• Hidroeléctrica • Viento	 Embalse La Salvajina, Cauca. Fuente: El País
		1.3.3. Fuente abiótica no renovable	• Combustibles fósiles y sus derivados • Carbón • Petróleo • Gas	 Carbón. Fuente: Portafolio.co
2. Regulación y mantenimiento: las formas en que los organismos vivos pueden moderar el entorno ambiental que afecta la actuación humana	2.1. Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras molestias: a través de procesos biogeoquímicos, las coberturas de la tierra naturales y seminaturales están en capacidad de filtrar efluentes, descomponer residuos tóxicos y eliminar agentes patógenos nocivos en el ambiente	2.1.1. Mediación por sistemas vivos	• Bio-remediación, filtración, dilución y secuestro biofísicoquímica de contaminantes en los ecosistemas • Adsorción de metales pesados y compuestos orgánicos en los ecosistemas (combinación de factores bióticos y abióticos) • Infraestructura verde para reducir el ruido y los olores	 Humedal Guarino, Jamundí. Fuente: CVC

	2.2. Regulación de flujos: las coberturas naturales y seminaturales regulan diversos flujos en el ambiente. Por ejemplo, la cubierta vegetal previene la erosión del suelo y regula los flujos de agua, pero también, crea amortiguadores contra los eventos naturales reduciendo los daños que puedan causar las tormentas, avalanchas, etcétera	2.2.1. Flujos de masa	• Estabilización y control de la tasa de erosión • Cobertura vegetal en pendientes • Amortiguación y atenuación de los flujos de masa • Transporte y almacenamiento de sedimentos por ríos y lagos	 Vegetación en pendientes. Fuente: Portafolio Agrícola
		2.2.2. Flujos de líquido	• Mantenimiento del ciclo hidrológico • Captación efectiva de la precipitación por cobertura vegetal • Protección contra inundaciones por la cobertura vegetal	 Páramo en PNN Las Hermosas. Fuente: parquesnacionales.gov.co
		2.2.3. Flujos de gases / aire	• Protección contra tormentas • Ventilación y transpiración • Vegetación natural o plantada que sirve de cinturón de protección y permite la ventilación del aire	 Barrera natural arbustiva. Fuente: CVC

	2.3. Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas: mediante procesos biogeoquímicos, las coberturas de la tierra naturales y seminaturales mantienen condiciones aptas para la vida de todas las especies. Es así que se regulan los hábitats de las especies, se fijan nutrientes formadores de suelo, se purifica la composición química del agua y se regula el clima y la composición de la atmósfera	2.3.1. Mantenimiento del ciclo de vida, hábitat y protección de reserva genética	• Polinización y dispersión de semillas por insectos, aves y otros animales • Hábitats de reproducción y cría de plantas y animales (pastizales, microestructura de ríos)	 Río Cauca, hábitat de cría y reproducción de fauna. Fuente: El País
		2.3.2. Control de plagas y enfermedades	• Regulación de especies invasoras • Control de enfermedades en cultivos y poblaciones humanas	 Los bosques son reserva de organismos erradicadores de plagas. Fuente: CVC
		2.3.3. Formación y composición del suelo	• Meteorización física, química y biológica • Descomposición / mineralización de material orgánico • Fijación de nutrientes	 Formación de material orgánica. Fuente: ICA

		2.3.4. Mantenimiento de la composición química del agua	• Purificación de agua • Amortiguación de sedimentos • Desnitrificación • Remineralización de fósforo	 Los humedales filtran contaminantes. Humedal Timbique, Palmira. Fuente: CVC
		2.3.5. Composición atmosférica y regulación del clima	• Reducción de los gases de efecto invernadero • Secuestro de carbono • Regulación del clima local y regional • Mantenimiento de la calidad del aire • Regulación de los patrones de temperatura y precipitación	 Zona verde urbana de Cali. Fuente: Panoramio
3. Cultural: las salidas no materiales, y normalmente no consumibles, de los sistemas vivos que afectan el estado físico y mental de las personas	3.1. Interacción física e intelectual: la interacción con la naturaleza ofrece oportunidades recreativas que desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la salud mental y física de los seres humanos. También, los animales y las plantas han sido fuente de inspiración para gran parte del arte, ciencia, cultura y el diseño	3.1.1. Experiencia física	• Recreación • Turismo	 Viaje en parapente. Fuente; El Tiempo

		3.1.2. Intelectual y representativa	• Ciencia • Arte • Educación • Entretenimiento	 Paisaje del Valle del Cauca. Fuente: El País
	3.2. Interacción simbólica y espiritual: la naturaleza es un elemento común en la mayoría de las principales religiones. El patrimonio natural, el sentimiento espiritual de pertenencia, el conocimiento tradicional y las costumbres conexas son importantes para crear un sentido de pertenencia	3.2.1. Espiritual y/o emblemática	• Simbólico • Sagrado • Religioso • Fauna y flora emblemática • Lugares sagrados	 Kwet Wala, casa sagrada de tribu Nasa. Fuente: pradera-valle.gov.co
		3.2.2. Existencia y valor intrínseco natural	• Valoración de especies silvestres • Legado generacional natural • Creencia ética y moral por la naturaleza	 Puma en PNN Las Hermosas. Fuente: parquesnacionales.gov.vo

Fuente: elaborado a partir de HAINES-YOUNG y POTSCHIN. Op. cit.

Anexo D. Estructura del script de muestreo estratificado

```
# -----
# Stratified Random Selection, Merge and Centroids
# By: "Territorios" Research Group
# Created on: 2017-03-28
# -----

# Import arcpy module
from arcpy import env
import os
from arcpy.sa import *
arcpy gp.overwriteOutput = 1

os.system('cls')

# Set of arguments
dirbase = raw_input('Workspace directory: ')
dirout = raw_input('Output directory: ')
inputShapefile = raw_input('Input data: ')

print "-----"
print "   Running script: Stratified Random Selection, Merge and Centroids   "
print "-----"

# Workspace
#outputDirectory = r"H:\X\Pruebatile_607\escript\Tile607.gdb"
arcpy.env.workspace = dirbase
outputDirectory = arcpy.env.workspace

# Set of variables
inputData = inputShapefile
#inputData = "MS_607_TMS_a"

# PROCESS 1: SELECT CLASSES
for a in range(1, 16): # Number of classes
    print "We're on time %d" % (a)
    outputClass = "MS_607_TMS_class_" + str(a)
    where_clause = "Classvalue = " + str(a)
    # Execute Select
    arcpy.Select_analysis(inputData, outputClass, where_clause)
    print "Done with " + outputClass

# PROCESS 2: SUBSET FEATURES
# Data sets (40% and 60%)
inputClasses = arcpy.ListFeatureClasses("MS_607_TMS_class*")
for b in inputClasses:
    for c in range(1, 21): # Number of groups of 40% and 60% to be created
        output60p = b.split("_")[-2] + "_" + b.split("_")[-1] + "_" + "MS_607_TMS_60p" + "_" + "iteration" + "_" + str(c)
        output40p = b.split("_")[-2] + "_" + b.split("_")[-1] + "_" + "MS_607_TMS_40p" + "_" + "iteration" + "_" + str(c)
        # Execute SubsetFeatures
        arcpy.SubsetFeatures_ga(b, output60p, output40p, "60", "PERCENTAGE_OF_INPUT")
        print "class " + str(b)
        print "Done with SubsetFeatures class " + "iteration " + str(c)

# PROCESS 3: MERGE
# Merge feature classes representing 40% of the records
for d in range(1, 21): # Number of groups of 40% to be merged
    inputFile40 = "MS_607_TMS_40p_iteration_" + str(d)
    listElements40 = arcpy.ListFeatureClasses(inputFile40)
    print "New group", listElements40
    outputFile40 = "MS_607_TMS_40p_all_merge" + "_" + str(d)
    arcpy.Merge_management(listElements40, outputFile40)
    print "Done with merge class " + outputFile40

# Number of groups of 60% to be merged
inputFile60 = "MS_607_TMS_60p_iteration_" + str(d)
listElements60 = arcpy.ListFeatureClasses(inputFile60)
print "New group", listElements60
outputFile60 = "MS_607_TMS_60p_all_merge" + "_" + str(d)
arcpy.Merge_management(listElements60, outputFile60)
print "Done with merge class " + outputFile60

# PROCESS 4: FEATURE TO POINTS (CENTROIDS)
outFeatureClassPts = outputFile40 + "_pts"
# Use FeatureToPoint function to find a point inside polygon
arcpy.FeatureToPoint_management(outputFile40, outFeatureClassPts, "INSIDE")
print "Done finding centroids " + outFeatureClassPts

print "Finished!"
```

Anexo E. Estructura del script de clasificación de coberturas

```
# -----
# Created on: 2017-03-23
# By: "Territorios" Research Group
# Description: it runs Random Trees, Classify Raster, Updated Accuracy Assessment Points and Confusion Matrix
# -----

# Import arcpy module
import arcpy, os, sys, string
from arcpy import env
from arcpy.sa import *
arcpy gp.overwriteOutput = 1

os.system('cls')

# Set of arguments
dirbase = raw_input('Workspace directory: ')
dirout = raw_input('Output directory: ')
inputSegmented = raw_input('Enter segmented file name: ')
inputDEM = raw_input('Enter DEM name: ')

print "-----"
print "    Running script: Images Classification    "
print "-----"

# Set the workspace for ListFeatureClasses
arcpy.env.workspace = dirbase #r"D:\Workspace\Procalculo\MeanShift\Tile607.gdb"

# Local variables:
Segmentation = dirbase + "\\" + inputSegmented # r"D:\Workspace\Procalculo\MeanShift\Tile607.gdb\MS_607_spe15_spa15_531"
DEM_30m = dirbase + "\\" + inputDEM
output = dirout # r"D:\Workspace\Procalculo\MeanShift"

# PROCESS: Train Random Trees Classifier
# List of segments (60 percent of the total)
inputData = arcpy.ListFeatureClasses("MS_607_TMS_60p_all_merge_")
for a in inputData:
    if a[-3:] <> "pts": # This is used in order to avoid listing point features classes
        outputFileECD = output + "\\" + a.split("_")[-7] + "_" + a.split("_")[-6] + "_" + a.split("_")[-1] + ".ecd"
        print a
        # Run: Train Random Trees Classifier
        arcpy gp.TrainRandomTreesClassifier_sa(Segmentation, a, outputFileECD, DEM_30m, "50", "30", "0",
"COLOR;MEAN;STD;COUNT;COMPACTNESS;RECTANGULARITY")
        print "Done with " + a

    # PROCESS: Classify Raster
    # Output for Classify Raster
    outputFileCR = a.split("_")[-7] + "_" + a.split("_")[-6] + "_" + a.split("_")[-1] + "_cr"
    # Run: Classify Raster
    arcpy gp.ClassifyRaster_sa(Segmentation, outputFileECD, outputFileCR, DEM_30m)
    print "Done with " + outputFileCR

    # PROCESS: Updated Accuracy Assessment Points
    # List of feature classes for Updated Accuracy Assessment Points
    updateAAP = arcpy.ListFeatureClasses("*_pts")
    for b in updateAAP:
        print b
        # Output for UAAP feature classes
        outputFileUAAP = a.split("_")[-7] + "_" + a.split("_")[-6] + "_" + a.split("_")[-1] + "_uaap"
        #Run: Update Accuracy Assessment Points
        arcpy gp.UpdateAccuracyAssessmentPoints_sa(outputFileCR, b, outputFileUAAP, "CLASSIFIED")
        print "Done with " + outputFileUAAP

    # PROCESS: Compute Confusion Matrix
    # Output for Compute Confusion Matrix
    outputFileCMM = a.split("_")[-7] + "_" + a.split("_")[-6] + "_" + a.split("_")[-1] + "_cmm"
    # Run: Compute Confusion Matrix
    arcpy gp.ComputeConfusionMatrix_sa(outputFileUAAP, outputFileCMM)
    print "Done with " + outputFileCMM

print "Finished!"
```

Anexo F. Matriz de oferta de SE y criterios para identificar la EEM

	Servicio ecosistémico Cobertura de la tierra	Oferta de SE																				$\bar{x}$ SE	Multi_1 = $\sum$ SE / (21*5)	Multi_2 = Cuenta SE>1 / 21	$\bar{x}$ Multi_1 & Multi_2	Clase Multi.	Factor clase Multi.				
		Nutrición		Materiales			Energía			Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos			Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual											
		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR		MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR							EEE	EVN		
Áreas artificializadas	TUC																														
	TUD																														
	ZIC																														
	RVF																														
	AER																														
	ZEM																														
	ZDR																														
Áreas de producción agrícola	ZVU	2.8	2.8	2.6	2.6	2.2	2.2	2.6	0.8	2.6	3.4	3.4	4.2	3.8	3.4	3.2	2.8	4.2	4.8	4.6	4.6	4.8	3.3	0.7	1.0	0.8	4	0.8			
	IRE	1.6	1.0	1.2	1.0	1.4	1.2	2.0	0.8	1.8	1.8	2.0	2.2	2.8	1.4	1.4	1.4	3.0	4.0	3.2	3.8	3.8	2.0	0.4	0.9	0.6	3	0.7			
	CTR	5.0	1.0	2.6	1.0	0.3	2.6	1.7	0.7	2.0	1.9	1.9	1.9	2.6	2.1	2.4	1.7	2.3	2.4	2.7	2.6	2.7	2.1	0.4	0.8	0.6	3	0.7			
	CAZ	2.6	0.7	3.0	0.9	0.1	4.1	2.0	1.3	1.6	1.4	1.4	1.7	2.0	1.1	2.1	1.3	1.9	1.0	1.9	1.1	0.9	1.6	0.3	0.8	0.5	3	0.7			
	OCF	4.0	2.0	3.0	2.3	0.7	3.7	2.6	1.7	2.9	3.3	3.0	2.9	3.4	2.9	3.0	2.4	3.6	3.1	3.6	2.6	3.0	2.8	0.6	1.0	0.8	4	0.8			
	PLI	2.6	0.9	1.3	1.1	0.1	1.4	1.1	0.7	1.7	1.6	1.7	1.4	1.6	1.1	1.6	1.9	2.0	1.9	1.7	1.4	1.1	1.4	0.3	0.9	0.6	3	0.7			
	PAR	3.0	2.4	2.9	2.0	0.7	2.3	1.7	1.6	2.6	2.9	2.9	2.9	2.9	2.6	2.7	3.1	3.1	2.9	3.0	3.1	2.9	2.6	0.5	1.0	0.7	4	0.8			
	MCPN	3.6	3.0	3.3	2.6	1.0	2.7	2.6	1.4	3.3	3.6	3.3	3.4	4.1	4.1	3.7	3.3	4.0	4.0	4.3	4.1	4.3	3.3	0.7	1.0	0.8	4	0.8			
Bosques y áreas seminaturales	MPN	2.7	3.4	3.1	2.9	1.3	2.4	2.3	1.7	3.4	3.7	3.6	3.7	4.1	3.7	4.0	3.4	4.1	3.7	4.3	3.6	3.9	3.3	0.7	1.0	0.8	4	0.8			
	BDE	3.4	5.0	4.9	4.7	1.4	3.4	3.9	1.9	4.0	4.9	5.0	4.7	5.0	3.9	4.9	4.9	5.0	4.7	5.0	4.9	5.0	4.3	0.9	1.0	0.9	5	1.0			
	BFR	2.9	3.4	3.6	3.9	1.3	3.0	3.0	1.4	3.1	3.7	3.9	3.4	3.4	3.0	3.9	3.7	3.7	3.4	3.6	3.1	3.4	3.2	0.6	1.0	0.8	4	0.8			
	BRI	2.0	4.0	3.4	3.9	1.7	2.9	3.1	1.6	3.6	3.0	3.7	3.9	4.1	3.0	4.0	4.0	4.1	3.7	3.9	3.3	4.0	3.4	0.7	1.0	0.8	5	1.0			
	PFO	1.7	1.9	4.0	2.0	1.0	4.7	2.1	2.1	2.6	3.4	2.9	3.9	2.6	1.7	2.6	2.3	3.3	1.9	2.7	1.0	1.1	2.5	0.5	0.9	0.7	4	0.8			
	HER	2.0	4.3	2.9	4.3	1.7	1.9	3.1	1.1	2.6	3.3	4.3	3.4	4.4	2.9	4.7	4.7	4.9	4.0	4.6	4.7	4.9	3.6	0.7	1.0	0.9	5	1.0			
	VST	2.1	2.7	2.7	2.6	1.4	2.7	1.9	1.0	2.6	3.3	3.0	2.9	3.0	2.6	3.4	2.6	3.1	2.9	2.9	2.3	2.6	2.6	0.5	1.0	0.7	4	0.8			
	AFR	0.6	0.9	0.4	0.4	2.6	0.3	2.1	1.4	0.6	1.0	0.4	1.0	1.0	0.7	0.9	0.6	0.4	3.3	3.3	3.4	3.3	1.4	0.3	0.3	0.3	1	0.3			
Áreas húmedas y Superficies de agua	TDD	0.3	0.3	0.1	0.1	1.6	0.4	0.9	1.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0	0.2		
	AHC	3.3	2.2	2.2	2.7	1.9	2.1	1.9	1.2	2.6	2.9	3.8	2.3	4.3	2.2	3.3	3.8	3.2	4.2	3.9	4.1	4.0	3.0	0.6	1.0	0.8	4	0.8			
	RIO	3.0	4.1	2.2	4.1	3.3	2.1	3.8	1.8	2.8	2.6	3.4	2.6	4.3	2.4	3.7	4.0	3.4	4.2	4.3	4.2	4.1	3.4	0.7	1.0	0.8	5	1.0			
	LLC	2.9	3.0	1.8	3.1	1.8	1.9	2.3	1.3	2.7	3.0	4.0	2.4	4.2	2.2	3.3	4.1	3.3	4.4	4.2	4.4	4.2	3.1	0.6	1.0	0.8	4	0.8			
	CAA	2.9	4.3	1.9	4.2	1.9	1.9	3.1	1.2	2.4	3.3	4.1	2.7	3.3	2.1	2.7	3.3	3.3	4.2	3.4	3.0	2.8	3.0	0.6	1.0	0.8	4	0.8			
	Sing_1 = Suma / (19*5)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.3	0.5	0.5	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.6	0.6									
	Sing_2 = Cuenta SE>1 / 19	0.9	0.7	0.9	0.8	0.6	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9									
	1 - (x̄ Sing_1 & Sing_2)	0.3	0.4	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2									
	Clase Esp.	1	2	1	2	3	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1									
	Factor clase Esp.	0.3	0.5	0.3	0.5	0.7	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3									
Importancia (x̄ grupo focal)	4.4	4.6	3.9	4.3	2.7	3.3	4.3	2.7	3.4	4.3	4.7	3.7	4.6	3.3	4.3	4.4	4.1	3.7	3.3	3.4	4.3										
Clase Imp.	5	5	4	5	3	3	5	3	4	5	5	4	5	3	5	5	4	4	3	4	5										
Factor clase Imp.	1.0	1.0	0.8	1.0	0.7	0.7	1.0	0.7	0.8	1.0	1.0	0.8	1.0	0.7	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.8	1.0										

Anexo G. Matriz de demanda de SE

		Demanda de SE																						
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales		Energía		Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos		Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual					
Cobertura de la tierra		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR	EEE	EVN	x SE	
Áreas artificializadas	TUC	4,2	5,0	4,5	4,3	4,7	2,7	2,8	4,3	4,5	4,2	4,7	4,5	3,0	4,3	2,0	4,8	4,7	4,7	4,3	4,2	4,2	4,1	
	TUD	3,8	4,5	4,0	4,0	4,3	2,5	3,0	4,0	4,3	4,0	4,3	3,8	3,2	4,5	2,3	5,0	4,7	4,7	4,3	4,2	4,0	4,0	
	ZIC	2,7	4,2	4,7	4,8	4,7	3,5	3,3	4,2	4,2	3,7	4,7	4,7	3,2	4,0	1,8	4,7	4,5	2,8	3,3	2,2	2,8	3,7	
	RVF	0,5	0,7	1,7	2,8	4,2	2,0	2,5	4,7	3,3	3,3	3,2	3,8	3,0	1,8	2,0	2,3	3,2	2,3	2,7	1,7	2,2	2,6	
	AER	1,5	3,0	2,2	2,3	3,5	1,7	2,8	4,2	3,5	2,8	3,3	4,3	2,8	3,3	2,0	3,5	5,0	2,2	2,3	2,2	1,7	2,9	
	ZEM	0,7	1,8	1,5	3,7	4,3	1,7	1,2	3,8	2,3	3,3	3,5	3,8	2,8	2,8	2,7	3,2	3,0	0,8	0,8	0,7	1,0	2,4	
	ZDR	0,2	0,7	1,5	2,0	2,0	1,2	1,3	3,0	3,5	3,8	4,0	4,0	3,2	4,0	3,5	4,0	4,2	0,5	0,7	0,7	1,7	2,4	
	ZVU	0,0	0,5	0,7	2,3	1,0	0,3	0,8	1,3	1,5	1,7	1,7	2,2	2,8	3,3	1,8	3,0	3,2	4,0	3,8	3,5	4,0	2,1	
Áreas de producción agrícola	IRE	1,8	2,8	1,8	3,5	1,8	1,2	2,2	2,5	2,3	2,0	2,8	2,7	3,3	3,3	1,5	4,0	3,8	4,8	3,3	3,3	3,5	2,8	
	CTR	1,3	0,8	1,7	4,2	0,8	1,2	1,0	2,3	2,3	2,0	2,8	1,7	3,5	3,8	4,0	3,8	4,2	1,2	1,0	1,0	1,5	2,2	
	CAZ	0,8	1,0	1,8	5,0	0,8	2,3	1,8	2,8	2,5	2,3	3,3	3,2	4,0	3,8	4,3	3,8	4,5	1,0	1,0	0,8	1,5	2,5	
	OCP	1,3	1,3	1,7	3,5	0,8	1,2	1,2	2,5	2,7	2,2	3,0	1,7	3,5	3,7	4,2	3,8	4,2	1,2	1,0	1,0	1,5	2,2	
	PLI	0,7	0,8	0,7	2,8	0,3	0,2	0,7	1,5	2,0	2,2	2,2	1,5	3,3	3,2	3,7	3,5	3,5	1,0	1,0	0,8	1,8	1,8	
	PAR	0,7	0,8	0,7	2,3	0,5	0,2	0,5	1,3	2,0	1,8	2,0	1,3	3,5	3,0	3,7	3,5	3,5	1,0	1,0	0,8	1,8	1,7	
	MCPN	0,8	0,8	0,8	2,8	0,3	0,8	1,5	1,5	2,2	2,0	2,0	1,3	3,5	3,3	4,0	3,7	4,0	1,2	1,0	1,0	1,8	1,9	
Bosques y áreas seminaturales	MPN	0,8	0,8	0,7	2,7	0,3	0,2	0,8	1,5	2,2	2,0	2,0	1,3	3,5	3,0	3,8	3,5	3,8	1,0	1,0	0,8	1,8	1,8	
	BDE																							
	BFR																							
	BRI																							
	PFO	0,7	0,5	1,2	2,8	0,3	0,2	0,5	1,5	2,8	2,5	2,0	2,0	4,0	3,0	3,7	3,5	3,8	1,5	1,0	0,8	1,5	1,9	
	HER																							
	VST																							
	AFR																							
Áreas húmedas y Superficies de agua	TDD																							
	AHC																							
	RIO																							
	LLC																							
	CAA	0,8	0,0	0,7	3,8	1,0	0,8	0,7	0,8	2,2	1,8	2,7	1,8	3,8	2,3	2,2	3,7	3,7	3,8	2,0	2,5	2,7	2,1	

Anexo H. Matriz de capacidad de SE (oferta – demanda) [sin transformar]

		Capacidad de SE (Oferta – Demanda)																						̄ SE
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales			Energía			Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos			Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual		
Cobertura de la tierra		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR	EEE	EVN	̄ SE	
Áreas artificializadas	TUC	-4,2	-5	-4,5	-4,3	-4,7	-2,7	-2,8	-4,3	-4,5	-4,2	-4,7	-4,5	-3	-4,3	-2	-4,8	-4,7	-4,7	-4,3	-4,2	-4,2	-4,1	
	TUD	-3,8	-4,5	-4	-4	-4,3	-2,5	-3	-4	-4,3	-4	-4,3	-3,8	-3,2	-4,5	-2,3	-5	-4,7	-4,7	-4,3	-4,2	-4	-4	
	ZIC	-2,7	-4,2	-4,7	-4,8	-4,7	-3,5	-3,3	-4,2	-4,2	-3,7	-4,7	-4,7	-3,2	-4	-1,8	-4,7	-4,5	-2,8	-3,3	-2,2	-2,8	-3,7	
	RVF	-0,5	-0,7	-1,7	-2,8	-4,2	-2	-2,5	-4,7	-3,3	-3,3	-3,2	-3,8	-3	-1,8	-2	-2,3	-3,2	-2,3	-2,7	-1,7	-2,2	-2,6	
	AER	-1,5	-3	-2,2	-2,3	-3,5	-1,7	-2,8	-4,2	-3,5	-2,8	-3,3	-4,3	-2,8	-3,3	-2	-3,5	-5	-2,2	-2,3	-2,2	-1,7	-2,9	
	ZEM	-0,7	-1,8	-1,5	-3,7	-4,3	-1,7	-1,2	-3,8	-2,3	-3,3	-3,5	-3,8	-2,8	-2,8	-2,7	-3,2	-3	-0,8	-0,8	-0,7	-1	-2,4	
	ZDR	-0,2	-0,7	-1,5	-2	-2	-1,2	-1,3	-3	-3,5	-3,8	-4	-4	-3,2	-4	-3,5	-4	-4,2	-0,5	-0,7	-0,7	-1,7	-2,4	
	ZVU	2,8	2,3	1,9	0,3	1,2	1,9	1,8	-0,5	1,1	1,7	1,7	2	1	0,1	1,4	-0,2	1	0,8	0,8	1,1	0,8	1,2	
Áreas de producción agrícola	IRE	-0,2	-1,8	-0,6	-2,5	-0,4	0	-0,2	-1,7	-0,5	-0,2	-0,8	-0,5	-0,5	-1,9	-0,1	-2,6	-0,8	-0,8	-0,1	0,5	0,3	-0,7	
	CTR	3,7	0,2	0,9	-3,2	-0,5	1,4	0,7	-1,6	-0,3	-0,1	-1	0,2	-0,9	-1,7	-1,6	-2,1	-1,9	1,3	1,7	1,6	1,2	-0,1	
	CAZ	1,7	-0,3	1,2	-4,1	-0,7	1,8	0,2	-1,5	-0,9	-0,9	-1,9	-1,5	-2	-2,7	-2,2	-2,5	-2,6	0	0,9	0,3	-0,6	-0,9	
	OCP	2,7	0,7	1,3	-1,2	-0,1	2,5	1,4	-0,8	0,2	1,1	0	1,2	-0,1	-0,8	-1,2	-1,4	-0,6	2	2,6	1,6	1,5	0,6	
	PLI	1,9	0	0,6	-1,7	-0,2	1,3	0,5	-0,8	-0,3	-0,6	-0,5	-0,1	-1,8	-2	-2,1	-1,6	-1,5	0,9	0,7	0,6	-0,7	-0,3	
	PAR	2,3	1,6	2,2	-0,3	0,2	2,1	1,2	0,2	0,6	1	0,9	1,5	-0,6	-0,4	-1	-0,4	-0,4	1,9	2	2,3	1	0,9	
	MCPN	2,7	2,2	2,5	-0,3	0,7	1,9	1,1	-0,1	1,1	1,6	1,3	2,1	0,6	0,8	-0,3	-0,4	0	2,8	3,3	3,1	2,5	1,4	
	MPN	1,9	2,6	2,5	0,2	1	2,3	1,5	0,2	1,3	1,7	1,6	2,4	0,6	0,7	0,2	-0,1	0,3	2,7	3,3	2,7	2	1,5	
Bosques y áreas seminaturales	BDE	3,4	5	4,9	4,7	1,4	3,4	3,9	1,9	4	4,9	5	4,7	5	3,9	4,9	4,9	5	4,7	5	4,9	5	4,3	
	BFR	2,9	3,4	3,6	3,9	1,3	3	3	1,4	3,1	3,7	3,9	3,4	3,4	3	3,9	3,7	3,7	3,4	3,6	3,1	3,4	3,2	
	BRI	2	4	3,4	3,9	1,7	2,9	3,1	1,6	3,6	3	3,7	3,9	4,1	3	4	4	4,1	3,7	3,9	3,3	4	3,4	
	PFO	1	1,4	2,8	-0,8	0,7	4,5	1,6	0,6	-0,3	0,9	0,9	1,9	-1,4	-1,3	-1,1	-1,2	-0,5	0,4	1,7	0,2	-0,4	0,6	
	HER	2	4,3	2,9	4,3	1,7	1,9	3,1	1,1	2,6	3,3	4,3	3,4	4,4	2,9	4,7	4,7	4,9	4	4,6	4,7	4,9	3,6	
	VST	2,1	2,7	2,7	2,6	1,4	2,7	1,9	1	2,6	3,3	3	2,9	3	2,6	3,4	2,6	3,1	2,9	2,9	2,3	2,6	2,6	
	AFR	0,6	0,9	0,4	0,4	2,6	0,3	2,1	1,4	0,6	1	0,4	1	1	0,7	0,9	0,6	0,4	3,3	3,3	3,4	3,3	1,4	
	TDD	0,3	0,3	0,1	0,1	1,6	0,4	0,9	1,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0	0,1	0,1	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	
Áreas húmedas y Superficies de agua	AHC	3,3	2,2	2,2	2,7	1,9	2,1	1,9	1,2	2,6	2,9	3,8	2,3	4,3	2,2	3,3	3,8	3,2	4,2	3,9	4,1	4	3	
	RIO	3	4,1	2,2	4,1	3,3	2,1	3,8	1,8	2,8	2,6	3,4	2,6	4,3	2,4	3,7	4	3,4	4,2	4,3	4,2	4,1	3,4	
	LLC	2,9	3	1,8	3,1	1,8	1,9	2,3	1,3	2,7	3	4	2,4	4,2	2,2	3,3	4,1	3,3	4,4	4,2	4,4	4,2	3,1	
	CAA	2,1	4,3	1,2	0,4	0,9	1,1	2,4	0,4	0,3	1,5	1,4	0,8	-0,5	-0,2	0,5	-0,3	-0,3	0,4	1,4	0,5	0,1	0,9	

Anexo I. Matriz de capacidad de SE (oferta – demanda) [normalizada]

		Capacidad SE																							
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales		Energía		Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos		Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual						
Cobertura de la tierra		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	COA	CAC	EXF	EIR	EEE	EYN	̄ x SE		
Áreas artificializadas	TUC	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2		
	TUD	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,2		
	ZIC	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0,3		
	RVF	2	2	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9		
	AER	2	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0,7		
	ZEM	2	1	2	0	0	1	2	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1,0		
	ZDR	2	2	2	1	1	2	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	2	2	1	1,0		
	ZVU	4	4	4	3	3	4	4	2	3	4	4	4	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3,3		
Áreas de producción agrícola	IRE	2	1	2	1	2	3	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2	3	3	1,9		
	CTR	5	3	3	1	2	3	3	2	2	2	2	3	2	1	2	1	1	3	4	3	3	2,4		
	CAZ	4	2	3	0	2	4	3	2	2	2	1	2	1	1	1	1	1	2	3	3	2	2,0		
	OCP	4	3	3	2	2	4	3	2	3	3	2	3	2	2	2	2	2	4	4	3	3	2,8		
	PLI	4	3	3	1	2	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	3	3	3	2	2,2		
	PAR	4	3	4	2	3	4	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	4	4	4	3	3,0		
	MCPN	4	4	4	2	3	4	3	2	3	3	3	4	3	3	2	2	2	4	4	4	4	3,2		
	MPN	4	4	4	3	3	4	3	3	3	4	3	4	3	3	3	2	3	4	4	4	4	3,4		
Bosques y áreas seminaturales	BDE	5	5	5	5	3	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4,9		
	BFR	4	5	5	5	3	4	4	3	4	5	5	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	4,5		
	BRI	4	5	5	5	4	4	4	3	5	4	5	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	4,6		
	PFO	3	3	4	2	3	5	3	3	2	3	3	4	2	2	2	2	2	3	4	3	2	2,9		
	HER	4	5	4	5	4	4	4	3	4	4	5	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4,5		
	VST	4	4	4	4	3	4	4	3	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	4	4,0		
	AFR	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	4	3,3		
	TDD	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3,0		
Áreas húmedas y Superficies de agua	AHC	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	5	4	5	4	4	5	4	5	5	5	5	4,3		
	RIO	4	5	4	5	4	4	5	4	4	4	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	4,6		
	LLC	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	5	4	5	4	4	5	4	5	5	5	5	4,3		
	CAA	4	5	3	3	3	3	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3,0		

Anexo J. Matriz de multifuncionalidad

		Multifuncionalidad																					Multi_1 = ΣSE / (21*5)	
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales			Energía			Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos			Mantenimient o de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual		
Cobertura de la tierra		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR	EEE	EYN		
Áreas artificializadas	TUC																							
	TUD																							
	ZIC																							
	RVF																							
	AER																							
	ZEM																							
	ZDR																							
	ZVU	2,3	2,3	2,2	2,2	1,8	1,8	2,2	0,7	2,2	2,8	2,8	3,5	3,2	2,8	2,7	2,3	3,5	4,0	3,8	3,8	4,0	2,7	
Áreas de producción agrícola	IRE	1,1	0,7	0,8	0,7	0,9	0,8	1,3	0,5	1,2	1,2	1,3	1,5	1,9	0,9	0,9	0,9	2,0	2,7	2,1	2,5	2,5	1,4	
	CTR	3,3	0,7	1,7	0,7	0,2	1,7	1,1	0,5	1,3	1,2	1,2	1,2	1,7	1,4	1,6	1,1	1,5	1,6	1,8	1,7	1,8	1,4	
	CAZ	1,7	0,5	2,0	0,6	0,1	2,8	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0	1,1	1,3	0,8	1,4	0,9	1,2	0,7	1,2	0,8	0,6	1,1	
	OCP	3,3	1,7	2,5	1,9	0,6	3,1	2,1	1,4	2,4	2,7	2,5	2,4	2,9	2,4	2,5	2,0	3,0	2,6	3,0	2,1	2,5	2,4	
	PLI	1,7	0,6	0,9	0,8	0,1	1,0	0,8	0,5	1,1	1,0	1,1	1,0	1,0	0,8	1,0	1,2	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	1,0	
	PAR	2,5	2,0	2,4	1,7	0,6	1,9	1,4	1,3	2,1	2,4	2,4	2,4	2,4	2,1	2,3	2,6	2,6	2,4	2,5	2,6	2,4	2,1	
	MCPN	3,0	2,5	2,7	2,1	0,8	2,3	2,1	1,2	2,7	3,0	2,7	2,9	3,5	3,5	3,1	2,7	3,3	3,3	3,6	3,5	3,6	2,8	
	MPN	2,3	2,9	2,6	2,4	1,1	2,0	1,9	1,4	2,9	3,1	3,0	3,1	3,5	3,1	3,3	2,9	3,5	3,1	3,6	3,0	3,2	2,7	
Bosques y áreas seminaturales	BDE	3,4	5,0	4,9	4,7	1,4	3,4	3,9	1,9	4,0	4,9	5,0	4,7	5,0	3,9	4,9	4,9	5,0	4,7	5,0	4,9	5,0	4,3	
	BFR	2,4	2,9	3,0	3,2	1,1	2,5	2,5	1,2	2,6	3,1	3,2	2,9	2,9	2,5	3,2	3,1	3,1	2,9	3,0	2,6	2,9	2,7	
	BRI	2,0	4,0	3,4	3,9	1,7	2,9	3,1	1,6	3,6	3,0	3,7	3,9	4,1	3,0	4,0	4,0	4,1	3,7	3,9	3,3	4,0	3,4	
	PFO	1,4	1,5	3,3	1,7	0,8	3,9	1,8	1,8	2,1	2,9	2,4	3,2	2,1	1,4	2,1	1,9	2,7	1,5	2,3	0,8	1,0	2,0	
	HER	2,0	4,3	2,9	4,3	1,7	1,9	3,1	1,1	2,6	3,3	4,3	3,4	4,4	2,9	4,7	4,7	4,9	4,0	4,6	4,7	4,9	3,6	
	VST	1,8	2,3	2,3	2,1	1,2	2,3	1,5	0,8	2,1	2,7	2,5	2,4	2,5	2,1	2,9	2,1	2,6	2,4	2,4	1,9	2,1	2,1	
	AFR	0,2	0,3	0,1	0,1	0,9	0,1	0,7	0,5	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	
	TDD	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,1	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Áreas húmedas y Superficies de agua	AHC	2,8	1,9	1,9	2,2	1,6	1,8	1,6	1,0	2,1	2,4	3,1	1,9	3,6	1,9	2,8	3,1	2,7	3,5	3,2	3,4	3,3	2,5	
	RIO	3,0	4,1	2,2	4,1	3,3	2,1	3,8	1,8	2,8	2,6	3,4	2,6	4,3	2,4	3,7	4,0	3,4	4,2	4,3	4,2	4,1	3,4	
	LLC	2,4	2,5	1,5	2,6	1,5	1,6	1,9	1,1	2,2	2,5	3,3	2,0	3,5	1,9	2,8	3,4	2,8	3,7	3,5	3,7	3,5	2,6	
	CAA	2,4	3,6	1,6	3,5	1,6	1,6	2,6	1,0	2,0	2,8	3,4	2,2	2,8	1,8	2,2	2,8	2,8	3,5	2,9	2,5	2,3	2,5	

Anexo K. Matriz de singularidad

		Singularidad																					Multi_1 = ΣSE / (21*5)
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales			Energía			Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos			Mantenimient o de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual	Interacción simbólica y espiritual		
Cobertura de la tierra		BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR	EEE	EYN	
Áreas artificializadas	TUC																						
	TUD																						
	ZIC																						
	RVF																						
	AER																						
	ZEM																						
	ZDR																						
	ZVU	0,9	1,4	0,9	1,3	1,5	0,7	0,9	0,4	0,9	1,1	1,1	1,4	1,3	1,1	1,1	0,9	1,4	1,6	1,5	1,5	1,6	1,2
Áreas de producción agrícola	IRE	0,5	0,5	0,4	0,5	0,9	0,4	0,7	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,5	0,5	0,5	1,0	1,3	1,1	1,3	1,3	0,7
	CTR	1,7	0,5	0,9	0,5	0,2	0,9	0,6	0,4	0,7	0,6	0,6	0,6	0,9	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7
	CAZ	0,9	0,4	1,0	0,4	0,1	1,4	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,4	0,7	0,4	0,6	0,3	0,6	0,4	0,3	0,6
	OCP	1,3	1,0	1,0	1,1	0,5	1,2	0,9	0,9	1,0	1,1	1,0	1,0	1,1	1,0	1,0	0,8	1,2	1,0	1,2	0,9	1,0	1,0
	PLI	0,9	0,4	0,4	0,6	0,1	0,5	0,4	0,4	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5
	PAR	1,0	1,2	1,0	1,0	0,5	0,8	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
	MCPN	1,2	1,5	1,1	1,3	0,7	0,9	0,9	0,7	1,1	1,2	1,1	1,1	1,4	1,4	1,2	1,1	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,2
	MPN	0,9	1,7	1,0	1,4	0,9	0,8	0,8	0,9	1,1	1,2	1,2	1,2	1,4	1,2	1,3	1,1	1,4	1,2	1,4	1,2	1,3	1,2
Bosques y áreas seminaturales	BDE	1,1	2,5	1,6	2,4	1,0	1,1	1,3	0,9	1,3	1,6	1,7	1,6	1,7	1,3	1,6	1,6	1,7	1,6	1,7	1,6	1,7	1,5
	BFR	1,0	1,7	1,2	1,9	0,9	1,0	1,0	0,7	1,0	1,2	1,3	1,1	1,1	1,0	1,3	1,2	1,2	1,1	1,2	1,0	1,1	1,2
	BRI	0,7	2,0	1,1	1,9	1,1	1,0	1,0	0,8	1,2	1,0	1,2	1,3	1,4	1,0	1,3	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,3	1,2
	PFO	0,6	0,9	1,3	1,0	0,7	1,6	0,7	1,1	0,9	1,1	1,0	1,3	0,9	0,6	0,9	0,8	1,1	0,6	0,9	0,3	0,4	0,9
	HER	0,7	2,1	1,0	2,1	1,1	0,6	1,0	0,6	0,9	1,1	1,4	1,1	1,5	1,0	1,6	1,6	1,6	1,3	1,5	1,6	1,6	1,3
	VST	0,7	1,4	0,9	1,3	1,0	0,9	0,6	0,5	0,9	1,1	1,0	1,0	1,0	0,9	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9
	AFR	0,2	0,4	0,1	0,2	1,7	0,1	0,7	0,7	0,2	0,3	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5
	TDD	0,1	0,1	0,0	0,1	1,0	0,1	0,3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
Áreas húmedas y Superficies de agua	AHC	1,1	1,1	0,7	1,3	1,3	0,7	0,6	0,6	0,9	1,0	1,3	0,8	1,4	0,7	1,1	1,3	1,1	1,4	1,3	1,4	1,3	1,1
	RIO	1,0	2,1	0,7	2,1	2,2	0,7	1,3	0,9	0,9	0,9	1,1	0,9	1,4	0,8	1,2	1,3	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
	LLC	1,0	1,5	0,6	1,6	1,2	0,6	0,8	0,7	0,9	1,0	1,3	0,8	1,4	0,7	1,1	1,4	1,1	1,5	1,4	1,5	1,4	1,1
	CAA	1,0	2,2	0,6	2,1	1,3	0,6	1,0	0,6	0,8	1,1	1,4	0,9	1,1	0,7	0,9	1,1	1,1	1,4	1,1	1,0	0,9	1,1

Anexo L. Matriz de importancia relativa

		Importancia																						
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales		Energía		Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos		Mantenimiento o de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual		Multi_1 = ΣSE / (21*5)			
				BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E		FAR	FANR	MSV	FMA	FLI	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA		CAC	EXF	EIR
Áreas artificializadas	Cobertura de la tierra																							
	TUC																							
	TUD																							
	ZIC																							
	RVF																							
	AER																							
	ZEM																							
	ZDR																							
Áreas de producción agrícola	ZVU	2,8	2,8	2,2	2,6	1,5	1,5	2,6	0,5	2,2	3,4	3,4	3,5	3,8	2,3	3,2	2,8	3,5	4,0	3,1	3,8	4,8	2,9	
	IRE	1,6	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	2,0	0,5	1,5	1,8	2,0	1,8	2,8	0,9	1,4	1,4	2,5	3,3	2,1	3,2	3,8	1,8	
	CTR	5,0	1,0	2,1	1,0	0,2	1,7	1,7	0,5	1,7	1,9	1,9	1,5	2,6	1,4	2,4	1,7	1,9	2,0	1,8	2,1	2,7	1,9	
	CAZ	2,6	0,7	2,5	0,9	0,1	2,8	2,0	0,9	1,3	1,4	1,4	1,4	2,0	0,8	2,1	1,3	1,5	0,8	1,2	1,0	0,9	1,4	
	OCP	4,0	2,0	2,5	2,3	0,5	2,5	2,6	1,1	2,4	3,3	3,0	2,4	3,4	1,9	3,0	2,4	3,0	2,6	2,4	2,1	3,0	2,5	
	PLI	2,6	0,9	1,1	1,1	0,1	1,0	1,1	0,5	1,4	1,6	1,7	1,2	1,6	0,8	1,6	1,9	1,7	1,5	1,1	1,2	1,1	1,3	
	PAR	3,0	2,4	2,4	2,0	0,5	1,5	1,7	1,0	2,1	2,9	2,9	2,4	2,9	1,7	2,7	3,1	2,6	2,4	2,0	2,6	2,9	2,3	
	MCPN	3,6	3,0	2,7	2,6	0,7	1,8	2,6	1,0	2,7	3,6	3,3	2,9	4,1	2,8	3,7	3,3	3,3	3,3	2,9	3,5	4,3	2,9	
Bosques y áreas seminaturales	MPN	2,7	3,4	2,6	2,9	0,9	1,6	2,3	1,1	2,9	3,7	3,6	3,1	4,1	2,5	4,0	3,4	3,5	3,1	2,9	3,0	3,9	2,9	
	BDE	3,4	5,0	4,0	4,7	1,0	2,3	3,9	1,2	3,3	4,9	5,0	3,9	5,0	2,6	4,9	4,9	4,2	3,9	3,3	4,0	5,0	3,8	
	BFR	2,9	3,4	3,0	3,9	0,9	2,0	3,0	1,0	2,6	3,7	3,9	2,9	3,4	2,0	3,9	3,7	3,1	2,9	2,4	2,6	3,4	2,9	
	BRI	2,0	4,0	2,9	3,9	1,1	1,9	3,1	1,0	3,0	3,0	3,7	3,2	4,1	2,0	4,0	4,0	3,5	3,1	2,6	2,7	4,0	3,0	
	PFO	1,7	1,9	3,3	2,0	0,7	3,1	2,1	1,4	2,1	3,4	2,9	3,2	2,6	1,1	2,6	2,3	2,7	1,5	1,8	0,8	1,1	2,1	
	HER	2,0	4,3	2,4	4,3	1,1	1,2	3,1	0,8	2,1	3,3	4,3	2,9	4,4	1,9	4,7	4,7	4,0	3,3	3,0	3,9	4,9	3,2	
	VST	2,1	2,7	2,3	2,6	1,0	1,8	1,9	0,7	2,1	3,3	3,0	2,4	3,0	1,7	3,4	2,6	2,6	2,4	1,9	1,9	2,6	2,3	
	AFR	0,6	0,9	0,4	0,4	1,7	0,2	2,1	1,0	0,5	1,0	0,4	0,8	1,0	0,5	0,9	0,6	0,4	2,7	2,2	2,9	3,3	1,2	
Áreas húmedas y Superficies de agua	TDD	0,3	0,3	0,1	0,1	1,0	0,3	0,9	0,8	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,5	0,3	0,5	0,4	0,3	
	AHC	3,3	2,2	1,9	2,7	1,3	1,4	1,9	0,8	2,1	2,9	3,8	1,9	4,3	1,5	3,3	3,8	2,7	3,5	2,6	3,4	4,0	2,6	
	RIO	3,0	4,1	1,9	4,1	2,2	1,4	3,8	1,2	2,3	2,6	3,4	2,1	4,3	1,6	3,7	4,0	2,9	3,5	2,9	3,5	4,1	3,0	
	LLC	2,9	3,0	1,5	3,1	1,2	1,3	2,3	0,9	2,2	3,0	4,0	2,0	4,2	1,5	3,3	4,1	2,8	3,7	2,8	3,7	4,2	2,8	
	CAA	2,9	4,3	1,6	4,2	1,3	1,3	3,1	0,8	2,0	3,3	4,1	2,2	3,3	1,4	2,7	3,3	2,8	3,5	2,3	2,5	2,8	2,7	

Anexo M. Matriz de EEM

		EEM (Promedio de Capacidad; Multifuncionalidad; Singularidad; Importancia)																						ΣCriterios	Clase EEM
		Servicio ecosistémico		Nutrición		Materiales			Energía			Regulación de residuos, sustancias tóxicas y otras	Regulación de flujos			Mantenimiento de condiciones físicas, químicas y biológicas				Interacción física e intelectual		Interacción simbólica y espiritual			
	Cobertura de la tierra	BI-N	AG-N	BI-M	AG-M	MAB	BI-E	FAR	FANR	MSV	FMA	FLJ	FGA	MHRG	CPE	FCS	CQA	CAC	EXF	EIR	EEE	EVN			
Áreas artificializadas	TUC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0	
	TUD	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0	
	ZIC	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	1,2	0	
	RVF	0,4	0,4	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,6	1	
	AER	0,4	0,2	0,2	0,2	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	2,8	0	
	ZEM	0,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,2	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	4,4	1	
	ZDR	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,4	0,4	0,2	4,2	1	
	ZVU	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,5	0,2	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	10,5	3	
Áreas de producción agrícola	IRE	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	6,1	1	
	CTR	0,8	0,3	0,4	0,2	0,1	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	6,7	1	
	CAZ	0,5	0,2	0,4	0,1	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	5,3	1	
	OCP	0,6	0,4	0,5	0,4	0,2	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	9,1	2		
	PLI	0,5	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	5,2	1	
	PAR	0,5	0,4	0,5	0,3	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	8,7	2	
	MCPN	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,4	0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	10,6	3	
	MPN	0,5	0,6	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	10,8	3	
Bosques y áreas seminaturales	BDE	0,7	0,9	0,8	0,8	0,3	0,6	0,7	0,4	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	15,3	4	
	BFR	0,5	0,7	0,6	0,7	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	11,8	3	
	BRI	0,4	0,8	0,6	0,7	0,4	0,5	0,6	0,3	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	12,8	3	
	PFO	0,3	0,4	0,6	0,3	0,3	0,7	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	8,3	2	
	HER	0,4	0,8	0,5	0,8	0,4	0,4	0,6	0,3	0,5	0,6	0,8	0,6	0,8	0,5	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	13,2	3	
	VST	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	9,8	2	
	AFR	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,5	0,5	5,7	1	
	TDD	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	3,7	1	
Áreas húmedas y Superficies de agua	AHC	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,7	0,4	0,7	0,4	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	11,0	3	
	RIO	0,6	0,8	0,4	0,8	0,6	0,4	0,7	0,4	0,5	0,5	0,7	0,5	0,8	0,4	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	12,8	3	
	LLC	0,5	0,6	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,7	0,4	0,7	0,4	0,6	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	11,3	3	
	CAA	0,5	0,8	0,3	0,6	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,6	0,4	0,5	0,3	0,4	0,5	0,4	0,6	0,5	0,5	0,5	9,7	2	

Anexo N. Código empleado para realizar el análisis multivariado

```
#### Análisis de componentes principales (PCA) para CAPACIDAD ECOSISTÉMICA ####
# Paso 1: importar datos #
datos_cap=read.table("clipboard",header=TRUE,row.names = 1)
# Paso 2: visualizar tabla #
(datos_cap)
# Paso 3: Resumir de datos #
summary(datos_cap)
# Paso 4: Llamar de librería ADE4 para análisis multivariado #
require(ade4)
# Paso 5: Realizar análisis de componentes principales #
acp_cap=dudi.pca(datos_cap)
acp_i_cap=inertia.dudi(acp,col.inertia = TRUE)
# Paso 6: Crear gráficos #
windows()
par(mfrow=c(2,1))
s.corcircle(acp_cap$co)
s.label(acp_cap$i)
# Paso 7: Crear clusters #
s.class(acp_cap$i,cluster$cluster)

#### Análisis de componentes principales (PCA) para MULTIFUNCIONALIDAD ####
# Paso 1: importar datos #
datos_multi=read.table("clipboard",header=TRUE,row.names = 1)
# Indicar que hay celdas con valores no available (na) #
datos_multi=na.omit(datos_multi)
# Paso 2: Visualizar tabla #
(datos_multi)
# Paso 3: Resumir de datos #
summary(datos_multi)
# Paso 4: Llamar librería ADE4 para análisis multivariado #
require(ade4)
# Paso 5: Realizar análisis de componentes principales #
acp_multi=dudi.pca(datos_multi)
acp_i_multi=inertia.dudi(acp_multi,col.inertia = TRUE)
# Paso 6: Crear de gráficos#
windows()
par(mfrow=c(2,1))
s.corcircle(acp_multi$co)
s.label(acp_multi$i)
# Paso 7: Crear clusters #
s.class(acp_multi$i,cluster$cluster)

#### Análisis de componentes principales (PCA) para ESPECIALIDAD ####
# Paso 1: importar datos #
datos_esp=read.table("clipboard",header=TRUE,row.names = 1)
# Indicar que hay celdas con valores no available (na) #
datos_esp=na.omit(datos_esp)
# Paso 2: visualizar tabla #
(datos_esp)
# Paso 3: Resumir de datos #
summary(datos_esp)
# Paso 4: Llamar de librería ADE4 para análisis multivariado #
require(ade4)
# Paso 5: Realizar análisis de componentes principales #
acp_esp=dudi.pca(datos_esp)
acp_i_esp=inertia.dudi(acp,col.inertia = TRUE)
# Paso 6: Creación de gráficos#
windows()
par(mfrow=c(2,1))
s.corcircle(acp_esp$co)
s.label(acp_esp$i)
# Paso 7: Creación de clusters #
s.class(acp_esp$i,cluster$cluster)

#### Análisis de componentes principales (PCA) para IMPORTANCIA RELATIVA ####
# Paso 1: importar datos #
datos_imp=read.table("clipboard",header=TRUE,row.names = 1)
# Indicar que hay celdas con valores no available (na) #
datos_imp=na.omit(datos_imp)
# Paso 2: visualizar tabla #
(datos_imp)
# Paso 3: Resumir de datos #
summary(datos_imp)
# Paso 4: Llamar de librería ADE4 para análisis multivariado #
require(ade4)
# Paso 5: Realizar análisis de componentes principales #
acp_imp=dudi.pca(datos_imp)
acp_i_imp=inertia.dudi(acp,col.inertia = TRUE)
# Paso 6: Creación de gráficos#
windows()
par(mfrow=c(2,1))
s.corcircle(acp_imp$co)
s.label(acp_imp$i)
# Paso 7: Creación de clusters #
s.class(acp_imp$i,cluster$cluster)

#### Análisis de componentes principales (PCA) para ESTRUCTURA ECOLÓGICA METROPOLITANA ####
# Paso 1: importar datos #
datos_eem=read.table("clipboard",header=TRUE,row.names = 1)
# Paso 2: visualizar tabla #
(datos_eem)
# Paso 3: Resumir de datos #
summary(datos_eem)
```

```

# Paso 4: Llamar de librería ADE4 para análisis multivariado #
require(ade4)
# Paso 5: Realizar análisis de componentes principales #
acp_eem=dudi.pca(datos_eem)
acp_i_eem=inertia.dudi(acp,col.inertia = TRUE)
# Paso 6: Creación de gráficos#
windows()
par(mfrow=c(2,1))
s.corcircle(acp_eem$co)
s.label(acp_eem$li)
# Paso 7: Creación de clusters #
s.class(acp_imp$li,cluster$cluster)

```

