



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE ÁREAS URBANAS CON COBERTURA ARBÓREA SEGÚN SUS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

CORREDOR RÍO CALI, CALI COLOMBIA

Guillermo Andrés Albornoz Manyoma

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia

2023

Criterios para la clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea según sus servicios ecosistémicos

Corredor río Cali, Cali Colombia

Guillermo Andrés Albornoz Manyoma

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Ingeniería Ambiental

Directora:

Doctora María Victoria Pinzón Botero

Línea de Investigación:

Planeación y desarrollo territorial

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Administración
Palmira, Colombia

2023

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Guillermo Andrés Albornoz Manyoma

Fecha 11/2023

Resumen

Criterios para la clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea según sus servicios ecosistémicos. Corredor río Cali, Cali Colombia

Es importante tener criterios para clasificar las áreas con cobertura arbórea a partir de la generación de servicios ecosistémicos, para priorizar la conservación y aportar de manera efectiva a los instrumentos de planificación. Estas áreas son un elemento esencial en el espacio urbano porque aportan servicios ecosistémicos, principalmente relacionados con la regulación del clima, el ciclo del agua y la recreación. También, contribuyen a alcanzar los Objetivos de desarrollo sostenible 11 y 15 al incentivar la transformación de las áreas urbanas en espacios sostenibles, inclusivos, seguros y resilientes. La investigación se desarrolló con una metodología flexible que permite adaptarse a diferentes regiones, sirviendo como herramienta para los instrumentos de planificación territorial. La metodología se basó en el análisis bibliométrico y la revisión sistemática de literatura académica y gris, para identificar y evaluar con métodos estadísticos las variables estratégicas territoriales (VTU) para la silvicultura urbana y los servicios ecosistémicos (SE) relacionados con la cobertura arbórea. La investigación propuso criterios relevantes que permiten tomar decisiones de planificación en cuanto a las áreas arbóreas, para caracterizarlas y clasificarlas en categorías con el propósito de generar mayores servicios ecosistémicos urbanos. Se aplicaron los criterios de clasificación al corredor del río Cali, que es uno de los sectores que tiene mayores áreas con cobertura arbórea de la ciudad de Santiago de Cali, obteniendo como resultado que más del 40% de las áreas con cobertura arbórea se clasifican como áreas para la recuperación. La investigación concluyó que las áreas de menor extensión y distribuidas espacialmente en la periferia del corredor del Río Cali son las que tienen mayor relevancia para la preservación. Siendo así, los entes municipales deberían centrar la gestión en los espacios intervenidos y aledaños al río Cali, para aumentar la cobertura arbórea que llevaría a la generación de más servicios ecosistémicos.

Palabras clave: *Silvicultura urbana, ordenamiento territorial, infraestructura verde, arboricultura urbana, gestión forestal, planificación y gestión, espacios verdes.*

Abstract

Criteria for the classification of urban areas with tree cover according to their ecosystem services. Cali River Corridor, Cali Colombia

It is important to have criteria to classify areas with tree cover based on the generation of ecosystem services, in order to prioritize conservation and contribute effectively to planning instruments. These areas are an essential element in the urban space because they provide ecosystem services, mainly related to climate regulation, the water cycle and recreation. They also contribute to achieving Sustainable Development Goals 11 and 15 by encouraging the transformation of urban areas into sustainable, inclusive, safe and resilient spaces. The research was developed with a flexible methodology that can be adapted to different regions, serving as a tool for territorial planning instruments. The methodology was based on bibliometric analysis and systematic review of academic and grey literature, to identify and evaluate with statistical methods the strategic territorial variables (VTU) for urban forestry and ecosystem services (ES) related to tree cover. The research proposed relevant criteria that allow planning decisions to be made regarding tree areas, to characterize them and classify them into categories with the purpose of generating greater urban ecosystem services. The classification criteria were applied to the Cali River corridor, which is one of the sectors with the largest areas with tree cover in the city of Santiago de Cali, obtaining as a result that more than 40% of the areas with tree cover are classified as areas for recovery. The research concluded that the areas of lesser extension and spatially distributed in the periphery of the Cali River corridor are the most relevant for conservation. Thus, the municipal entities should focus their efforts on the intervened areas adjacent to the Cali River in order to increase tree cover, which would lead to the generation of more ecosystem services.

Key words: *Urban forestry, land use planning, green infrastructure, urban arboriculture, forest management, planning and management, green spaces.*

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	I
Abstract.....	II
Lista de figuras.....	V
Lista de tablas	VI
Lista de ecuaciones	VII
Lista de abreviaturas.....	VIII
Introducción	9
1. CONTEXTO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.1 Los desafíos de la planificación urbana.....	11
1.2 La silvicultura urbana a escala internacional	13
1.3 La silvicultura urbana en Colombia.....	18
1.4 Desafíos de la investigación	20
1.4.1 Objetivos.....	22
2. MARCO TEORICO CONCEPTUAL.....	22
2.1 La planificación y gestión de las áreas urbanas con cobertura arbórea.....	22
2.2 La silvicultura urbana como estrategia para la planificación	24
2.3 Las variables territoriales urbanas en la planificación de las áreas con cobertura arbórea	28
2.4 Los servicios ecosistémicos de las coberturas arbóreas urbanas.....	30
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1 Área de estudio	35
3.2 Etapa I: Alistamiento	37
3.2.1 Identificación de VTU y SE	37
3.2.2 Análisis Bibliométricos	39
3.2.3 Revisión sistemática	42
3.3 Etapa II: Variables Territoriales Urbanas (VTU).....	43
3.3.1 Selección de muestra de la cobertura arbórea.....	44
3.3.2 Análisis de clúster - VeTU.....	45
3.4 Etapa III: Servicios Ecosistémicos (SE).....	47
3.4.1 Adaptación del Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV) 48	
3.4.2 Análisis de árboles de decisión - SEp	52
3.5 Etapa IV: Criterios de clasificación	53
3.5.1 Relación VeTU y SEp	54
3.5.2 Formulación de criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea.....	58
3.6 Etapa IV: Caso de estudio corredor Río Cali	59

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	60
4.1 Variables estratégicas Territoriales urbanas VTU	64
4.1.1 Identificación VTU.....	64
4.1.2 Evaluación de VTU	69
4.2 Servicios ecosistémicos priorizados SE.....	76
4.2.1 Identificación de SE	76
4.2.2 Evaluación de SE.....	78
4.3 Criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea	83
4.3.1 Relación de las VeTU y los SEp	83
4.3.2 Formulación de criterios de clasificación.....	87
4.4 Aplicación de criterios al corredor del Río Cali.....	91
5. Conclusiones y recomendaciones	99
5.1.1 Conclusiones	99
5.1.2 Recomendaciones	101
6. REFERENCIAS	103
7. Anexo	114
7.1 Caracterización de tramos del Corredor del Río Cali	115
7.2 Matriz de calificación de la literatura gris	119
7.3 Lista de verificación PRISMA - VTU	123
7.4 Lista de verificación PRISMA SE.....	127
7.5 Matriz de distancias VTU Vs CA.....	133
7.6 Evaluación de expertos	134
7.6.1 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación VeTU.....	134
7.6.2 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación SEp	135
7.6.3 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación VeTU y SEp	136

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Modelos de ordenación de ciudades Green Capital.....	18
Figura 2 Esquema de Variables Territoriales Urbanas (VTU)	29
Figura 3 Diagrama metodológico de la investigación.....	34
Figura 4 Área de estudio. Tramos del corredor del río Cali.....	37
Figura 5 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa I – Alistamiento	38
Figura 6 Mapa de la producción académica por países para la temática de silvicultura urbana y servicios ecosistémicos en el periodo de 2010 a 2022	41
Figura 7 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa II - VTU	44
Figura 8 Esquema para el cálculo de la distancia mínima entre un árbol y las VTU	46
Figura 9 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa III - SE	48
Figura 10. Porcentaje de funciones ecosistémicas relacionadas en la literatura consultada para el periodo de 2010 a 2022.....	49
Figura 11 Diagrama de árbol de decisión para la identificación de los SEp obtenidos de la evaluación del ISEAV	53
Figura 12 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa IV – Criterios de clasificación.....	54
Figura 13 Esquema de los vectores de relación de influencia entre las VeTU y los SEp	58
Figura 14 Frecuencia anual de estudios sobre silvicultura urbana y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023.....	61
Figura 15 Autores relevantes por producción académica y redes de coautoría sobre silvicultura y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023	62
Figura 16 Producción anual por autores sobre silvicultura urbana y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023.....	63
Figura 17 Resultado del diagrama de flujo para la selección de los documentos vinculados con la identificación de las VTU - Diagrama PRISMA	65
Figura 18 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 1	70
Figura 19 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 2.....	70
Figura 20 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 3.....	71
Figura 21 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 4.....	71
Figura 22 Resultado de la correlación de las distancias entre las VTU.....	73
Figura 23 Resultado del dendograma para las distancias de las VTU	73
Figura 24 Resultado de la distribución de distancias de VTU por grupos	75
Figura 25 Mapa resultado de la distribución de distancias de VeTU por grupos	76
Figura 26 Resultado del diagrama de flujo para la selección de los documentos vinculados con la identificación de los SE - Diagrama PRISMA para los SE	77
Figura 27. Ejemplo de la clasificación y digitalización de coberturas para el tramo 1 del corredor del río Cali	79

Figura 28 Estimación de funciones ecosistémicas	80
Figura 29 Resultado del árbol de decisión para los grupos de VTU y SE.....	82
Figura 30 Vectores de relaciones de influencia directa entre las VeTU y los SEp.....	87
Figura 31 Mapa de Criterio 1: Número de VeTU relacionadas con el área de cobertura arbórea	92
Figura 32 Mapa de Criterio 2: Número de SEp relacionados con el área de cobertura arbórea	93
Figura 33 Mapa de Criterio 3: Distancia de la VeTU a la cobertura arbórea.....	94
Figura 34 Mapa de Criterio 4: extensión del área con cobertura arbórea	95
Figura 35 Mapa de Criterio 5: Conectividad de áreas con cobertura	96
Figura 36 Mapa de categorías de clasificación de áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali	98

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Indicadores del análisis Bibliométrico para las temáticas de silvicultura urbana y servicios ecosistémicos en el periodo de 2010 al 2023	40
Tabla 2. Matriz de análisis de relación VeTU	55
Tabla 3. Matriz de análisis de relación SEp.....	56
Tabla 4. Matriz de análisis de relación VeTU y SEp.....	56
Tabla 5. Matriz de categorías de clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea.	59
Tabla 6. Variables Territoriales Urbanas (VTU) Identificadas en la revisión sistemática..	66
Tabla 7. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 1.....	70
Tabla 8. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 2.....	70
Tabla 9. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 3.....	71
Tabla 10. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 4.....	71
Tabla 11. Resultado de Medidas de tendencia, dispersión y distribución de las VTU.....	72
Tabla 12. Indicadores y servicios ecosistémicos seleccionados del análisis bibliométrico y la revisión bibliográfica.....	78
Tabla 13. Funciones, SE y valor de indicadores generados en los grupo de VTU.....	81
Tabla 14. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación VeTU...	84
Tabla 15. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación SEp	85
Tabla 16. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación VeTU y SEp.....	85
Tabla 17. Resultado de la Matriz de análisis de relación VeTU y SEp	86

Tabla 18 Resultado de estimación de criterios de clasificación de las áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali	91
Tabla 19. Resultado de categorías de clasificación de las áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali	97
Tabla 20. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación VeTU	134
Tabla 21. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación SEp .	135
Tabla 22. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación VeTU y SEp	136

Lista de ecuaciones

	Pág.
Ecuación 1. Términos de búsqueda temática	39
Ecuación 2 Muestra población finita	44
Ecuación 3. Función de regulación (<i>FR</i>)	50
Ecuación 4. Función de hábitat (<i>FH</i>)	51
Ecuación 5. función de producción (<i>FP</i>)	51
Ecuación 6. Índice de servicios ecosistémicos para áreas verdes	52
Ecuación 7 alfa de Cronbach.....	57

Lista de abreviaturas

Abreviatura Término

<i>AF</i>	Acceso y uso de plantas frutales
<i>AM</i>	Acceso y uso de especies medicinales
<i>AP</i>	Área permeable
<i>CA</i>	Cobertura Arbórea
<i>CV</i>	Cubierta verde
<i>D</i>	Canopy
<i>DAGMA</i>	Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente
<i>EA</i>	Explotación comercial del área
<i>EGCA</i>	European Green Capital Award
<i>F_H</i>	Función de hábitat
<i>F_P</i>	Función de producción
<i>F_R</i>	Función de regulación
<i>H</i>	Hábitos
<i>ISEAV</i>	Índice de servicios ecosistémicos para áreas verdes
<i>NEX</i>	Proporción nativa / exótica
<i>NI</i>	Número de individuos de árboles
<i>ODS</i>	Objetivo de Desarrollo Sostenible
<i>OMS</i>	Organización Mundial de la Salud
<i>SE</i>	Servicio Ecosistémico
<i>SEp</i>	Servicios Ecosistémicos priorizados
<i>SIG</i>	Sistema de información geográfica
<i>SP</i>	Arpillera
<i>VeTU</i>	Variable estratégicas Territorial Urbana
<i>VTU</i>	Variable Territorial Urbana

Introducción

Las áreas urbanas con cobertura arbórea son un elemento fundamental dentro de la estructura de las ciudades (Konijnendijk 2003; Nowak and Greenfield 2020). Generan servicios ecosistémicos (SE) que contribuyen en la mitigación de las problemáticas ambientales relacionadas con la contaminación, densificación urbana, cambio climático, pérdida de la biodiversidad, afectación de la salud física y mental ciudadana, entre otras (Escobedo, Kroeger, and Wagner 2011; Nyelele and Kroll 2020). Las áreas urbanas aportan beneficios para que desde el ordenamiento del territorio se establezcan mecanismos para recuperar y conservar los ecosistemas naturales urbanos (Rosas-Lusett and Bartorila 2017).

Conservar y recuperar las áreas arbóreas es vital para la preservación de la biodiversidad y los ecosistemas (Bodnaruk et al. 2017; Reyes and Gutiérrez 2010), pero debido al aumento de la urbanización de los centros poblados (NU, 2019; UNFPA, 2019) cada vez son menores estas áreas (Sartori et al. 2019). Si bien las dinámicas actuales de la urbanización global y el cambio de las condiciones tradicionales de ordenamiento territorial plantean desafíos e implicaciones para la sostenibilidad urbana, es importante asegurar los procesos ambientales que conlleven a la conservación de los SE generados de la cobertura (Nitoslawski et al. 2019).

Estimular y promover el crecimiento de las áreas urbanas con cobertura arbórea es una alternativa eficiente para mitigar las problemáticas relacionadas con la expansión de los suelos urbanos y el cambio climático (Yang et al. 2014). Sin embargo, los riesgos de fenómenos socioculturales están principalmente relacionadas con el crecimiento de las áreas urbanas y los procesos erróneos de planificación (Blakely 2007; Hoornweg, Sugar, and Gómez 2011). En el año 2015, la Organización de las Naciones Unidas estableció una agenda internacional para el desarrollo de las naciones y la sostenibilidad ambiental (ONU, 2015). Específicamente, los Objetivos de desarrollo sostenible 11 y 15 establecieron los lineamientos y alcances generales para el ordenamiento del territorio urbano.

El cambio climático global ha aumentado la temperatura terrestre desde que se tiene registro (1867) y en los últimos 15 años han sido las variaciones más intensas (IPCC, 2007). Estas alteraciones en el clima están relacionadas con el crecimiento de las áreas urbanas (Hoornweg, Sugar, and Gómez 2011). Según Blakely (2007) el cambio climático incrementa los riesgos de fenómenos socio naturales que son principalmente concebidos por procesos erróneos de desarrollo.

Con base en lo anterior, esta investigación está enmarcada en la problemática general derivada de la expansión de los suelos urbanos que conllevan a la disminución de las áreas urbanas con cobertura arbórea y al cambio climático. Para afrontar dicha problemática, específicamente, el municipio de Santiago de Cali cuenta con múltiples instrumentos de planificación territorial que pretenden establecer e implementar instrumentos alrededor de la silvicultura urbana. Sin embargo, los instrumentos de planificación carecen de herramientas que contribuyan en la definición y clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea, basado en el aprovechamiento o recuperación de los servicios ecosistémicos, permitiendo identificar los sectores urbanos que requieran una mayor intervención.

Esta investigación tuvo como objetivo proponer criterios para clasificar áreas urbanas con cobertura arbórea a partir de los servicios ecosistémicos que generan. Se estableció como alcance de la investigación el análisis espacial; es decir, la investigación no tiene como propósito ahondar en la ecofisiología, paisajismo, ecología, etc. Por el contrario, con los objetivos específicos se buscó generar información espacial a partir de los datos georreferenciados, en lugar de tomar información temática existente para clasificar el suelo por usos, tratamientos, áreas de actividad u otros. Esto se realizó porque según los datos de colombiaot.gov.co, el 80% de los municipios del país no cuentan con planes de ordenamiento actualizado, razón por la cual, podría ser una limitación tomar como referencia la cartografía temática de los planes de ordenamiento. También, se consideró que la generación de información puede servir para futuras investigaciones a múltiples escalas y en áreas donde no se cuenta con información temática.

Por disponibilidad y escala de la información se excluyeron las variables biofísicas presentes en el territorio (Temperatura, precipitación, humedad, etc.). Se evaluaron los servicios ecosistémicos de las coberturas urbanas a partir de geoprocesamientos de información primaria y secundaria obtenida de estudios previos para periodo no inferiores al año 2010. El área de estudio de la investigación es el corredor del río Cali localizado al sur del área urbana del municipio de Santiago de Cali (Colombia).

La metodología empleada estuvo compuesta por las siguientes 5 etapas. Etapa I – Alistamiento: Definió y empleó métodos de búsqueda bibliográfica para identificar las Variables Territoriales Urbanas (VTU) y los Servicios Ecosistémicos (SE) asociados a las coberturas urbanas. Etapa II – VTU: Empleó el método de análisis de clúster jerárquico para evaluar la estructura del área urbana. Etapa III – SE: Adaptó el Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV), para evaluar mediante indicadores las áreas urbanas con cobertura arbórea. Etapa IV - Criterios de clasificación: Empleó el método de evaluación de expertos para establecer las relaciones entre VTU y los SE. Etapa V - Caso de estudio: aplicó los criterios propuestos y resultantes de la investigación en el corredor río Cali.

1. CONTEXTO Y ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Los desafíos de la planificación urbana

Las áreas urbanas se han convertido en los centros de arribo de las personas que buscan oportunidades de subsistencia y una mejor calidad de vida (Abubakar & A ina, 2019). Según Naciones Unidas (2019; UNFPA, 2019) se estima que para el año 2050 cerca del 68% de la población mundial vivirá en áreas urbanas, generando un mayor impacto en el crecimiento económico mundial y en los recursos naturales, situación que representa un desafío global en la concepción de ciudad que se deseen planificar. Esta tendencia hacia la urbanización incrementa problemas como la pérdida de biodiversidad, detrimentos en los corredores ecológicos, aumento en emisiones de gases, generación de islas de calor,

afectación en la salud y pobreza. Así como también, la limitación en el acceso a los servicios básicos de la población (ONU-Hábitat, 2012; Solecki y Marcotullio, 2013).

Según el informe de los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) (NU, 2019), la Agenda global para el año 2030 ha tenido avances significativos en el propósito general de *poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad*. Sin embargo, existen desafíos importantes que todavía deben ser superados. Unas de las problemáticas que requieren mayor esfuerzo y acciones de intervención son el cambio climático percibido y generado en las ciudades (Ordóñez Barona 2015; Živojinović and Wolfslehner 2015) y, la pérdida de espacios verdes en las áreas urbanas producto de la densificación y la creciente migración de la población rural (Hoornweg, Sugar, and Gómez 2011; Kuchelmeister 2019).

En el marco de esta problemática, el ODS-11 (11.7) denominado *Ciudades y comunidades sostenibles*, plantea la necesidad de convertir los centros poblados en áreas inclusivas, seguras, resilientes y ambientalmente sostenibles (ONU, 2015). Para lograr este objetivo se debe planificar y gestionar el territorio con base en la implementación de infraestructura verde que permita a las urbes ser más resilientes y habitables (Duinker et al., 2015). La importancia de crear y mantener los espacios arborizados se destaca en este objetivo; dado que, estas áreas promueven el desarrollo sostenible, aumentando el bienestar humano y seguridad (FAO 2018). Entre las consecuencias que se les atribuyen a las áreas urbanas con cobertura arbórea está la relación decreciente de los índices de criminalidad (Troy et al, 2012), la participación comunitaria en actividades recreativas (Cohen et al, 2008), el aumento de valor y precio de bienes inmuebles (Wolf 2003, Conway et al., 2010) y, el menor uso de energía eléctrica por la disminución de aire acondicionado y calefacción (Nowak et al., 2013).

En este sentido, y en concordancia con el desarrollo sostenible urbano y la acción climática, el ODS-15 (15.2) denominado *Vida ecosistémica terrestre*, pretende proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres por medio de la gestión del recurso forestal (ONU, 2015). Este objetivo incentiva a establecer y mantener las áreas urbanas con cobertura arbórea como un mecanismo de gestión, para proporcionar herramientas que conserven los SE, tales como, regulación del clima, la

mitigación de la contaminación del aire, entre otros (Escobedo, Kroeger, and Wagner 2011, Zheng et al., 2013).

1.2 La silvicultura urbana a escala internacional

La clasificación de áreas con cobertura arbórea en entornos urbanos ha sido objeto de diversos estudios en los últimos años siendo un tema relevante y actual de investigación (Kong et al. 2021; Konijnendijk 2003). Los estudios e investigaciones buscan desarrollar sistemas eficientes y precisos para clasificar estas áreas con el objetivo de mejorar la planificación y gestión de los espacios verdes urbanos (Simao, Matthijs, and Perfecto 2018). Es así como, Oliveira, Lopes, y Niza (2020), desarrollan un sistema de clasificación basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la cobertura arbórea en zonas urbanas y su aplicación en la planificación y gestión de los espacios verdes. En los últimos años, también se han realizado investigaciones que utilizan técnicas de aprendizaje automático y teledetección para clasificar áreas con cobertura arbórea en entornos urbanos. Un ejemplo de esto es el propuesto por Parmehr, Amati y Fraser (2016), que utilizan imágenes de satélite de alta resolución para automatizar el mapeo de la cobertura y cuantificarla con análisis multitemporales.

La clasificación de las áreas con cobertura arbórea ha sido objeto de un gran número de investigaciones en los últimos años. Estas investigaciones buscan desarrollar sistemas precisos y eficientes para clasificar estas áreas con el objetivo de mejorar la planificación y gestión de los espacios verdes urbanos. Se han utilizado técnicas y herramientas variadas como sistemas basados en SIG, aprendizaje automático, teledetección y ciencia ciudadana (Ward and Johnson 2007). Estas investigaciones han contribuido a un mejor entendimiento de la cobertura arbórea en entornos urbanos, y han proporcionado herramientas y metodologías para evaluar, monitorear y planificar. A medida que la población urbana sigue creciendo, el papel de los árboles urbanos se vuelve cada vez más importante para proporcionar servicios ecosistémicos y mejorar la calidad de vida de las personas.

La planificación e implementación de proyectos relacionados con las áreas urbanas se caracterizan a menudo por presentar dinámicas muy complejas que están directamente

relacionadas con la gestión político-administrativa de las ciudades. En este sentido, la investigación de Yao et. al (2019), parte del reconocimiento de iniciativas globales como las de Corea, Chile, Turquía y el proyecto GREEN SURGE que estudian sistemáticamente la gobernanza de bosques urbanos o la infraestructura verde urbana. Los autores evaluaron las políticas y las prácticas de gobernanza aplicando el marco teórico del Enfoque de Arreglo de Políticas (Policy Arrangement Approach, PAA) en las dimensiones de discursos de políticas, actores, recursos y reglas del juego. Encontraron que es fundamental para la plantación forestal aprovechar los espacios verdes fragmentados generados por la expansión urbana. Destacan que la elaboración de normas durante los proyectos de forestación urbana a gran escala debe ser adaptativa, lo que implica innovación, incentivos, capacidad de autoaprendizaje, monitoreo y evaluación de la intervención y, oportunidades para vincular la ciencia con la política.

Fu y Zhang (2018), evalúan la conceptualización de la teoría de la transición de la sostenibilidad, la perspectiva multinivel y las dinámicas entre escalas de gobernanza. La investigación es realizada a través de un eco-distrito central occidental (WCEND por sus siglas en inglés) en la ciudad de Zhuhai, China. Este modelo de eco-ciudades cambió el esquema de ordenamiento que estaba basado en el crecimiento urbano; es decir, orientado a la industrialización, por un modelo que se orientó a la preservación ecológica, el desarrollo social y el crecimiento económico simultáneamente. Los autores exponen que las interacciones entre actores permiten crear nichos (sociales, tecnológicos e institucionales) y dinámica de escala cruzada en el proceso de transición hacia la sostenibilidad urbana.

Según Jin (2008), el crecimiento económico, la preservación ecológica y el desarrollo social requieren de un equilibrio para llegar a nuevas civilizaciones orientadas hacia la "civilización ecológica". El autor emplea la teoría de la transición de la sostenibilidad para ejemplificar como un ecosistema complejo (WCEND) se rige por un estado dinámico de equilibrio; es decir, los actores que hacen parte del sistema tienen relaciones sociales, culturales, tecnológicas y económicas relativamente independientes, pero al establecer una visión ambiental común generan transformación a largo plazo para la sostenibilidad. También se contempla el marco de la perspectiva multi nivel (MLP por

sus siglas en inglés) que hace referencia a los múltiples niveles que clasifica a los actores en los niveles de nicho, régimen y paisaje.

Entendiendo el concepto de nicho como el espacio protegido donde tienen lugar las innovaciones que integran el sistema; Jin (2008), resalta que WCEND sirve como un caso adecuado para investigar la transición entre políticas y sostenibilidad de nuevas ciudades. En este sentido, el artículo hace aportes destacables al enfatizar en la necesidad del eco-desarrollo -declaración de Cocoyoc 1974- como expresión para señalar la existencia de límites internos y externos que restringen el desarrollo (Estenssoro 2015), así como también, el desarrollo a escala humana y sostenible que evidencia los límites naturales para el crecimiento económico.

El crecimiento progresivo de los asentamientos urbanos también implica abordar la temática de la forestación como un problema de disponibilidad de espacio. Siendo así, Vera et al (2017), plantean en su investigación el objetivo de conocer la disponibilidad de espacios verdes por habitante para la ciudad de Resistencia (Argentina), a partir de la comparación del índice verde y un valor de referencia atribuido a la OMS que relaciona la cantidad de habitantes por área verde (se resalta que no se encontró soporte bibliográfico que concluyera que el valor de 10 m² por habitante fuera definido por la OMS; si bien se carece de un referente en superficie la Agencia Europea de Medioambiente (2002) propone que el tiempo de recorrido de un habitante hacia un área verde accesible sea inferior a 15 minutos). El análisis realizado para los espacios verdes no solo se basó en la cantidad de áreas, sino también en la calidad identificada a partir de clasificarlas jerárquicamente por su valor escénico/paisajístico y posibilidad de acceso físico por los habitantes del área. La arborización debe partir de una adecuada planificación para lograr mejorar la calidad ambiental, fortalecer los ecosistemas y aumentar el bienestar de la población (Bodnaruk et al. 2017).

Rosas-Lusett y Bartorila (2007) afirman que mantener la continuidad de la arborización en las áreas urbanas tropicales aumenta de manera directa la calidad de vida y mitiga los efectos del cambio climático. La investigación en el Humedal Nuevo Amanecer de ciudad Madero (México), midió el impacto ambiental a partir de la forestación de los espacios naturales urbanos y la arborización de calles, utilizando los índices de

funcionalidad de parques y confort térmico e indicadores de diversidad de arbolado urbano, permeabilidad del suelo y densidad de árboles. En total fueron plantados 3.895 árboles, de los cuales el 34% se destinaron a áreas verdes y el 66% a calles conectoras. La purificación del aire, baja de temperaturas y absorción de CO₂ son beneficios cuantificables que soportan los procesos de forestación e incentivan la conservación y restauración. Los autores presentan como estrategia para la sostenibilidad ambiental urbana, conservar y regenerar el bosque natural, conectándolo con los relictos de bosques fragmentados urbanos, por medio de corredores estructurantes entre los espacios naturales que también ayudarían a recuperar la biodiversidad del ecosistema nativo.

En 1987 la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo presenta el Informe denominado *Nuestro futuro común*, el cual es una de las bases de la visión de desarrollo hacia la sostenibilidad. Con base en el ODS 11 y 15, a nivel internacional se han impulsado diversas iniciativas que pretenden restaurar, proteger y conservar los recursos naturales para fortalecer la lucha contra el consumo y la producción excesiva que conlleva a la degradación del planeta, comprometiendo la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras (ONU, 2015). El premio Capital Verde (Green Capital) es otro referente que debe ser considerado como parte de estas iniciativas que pretenden destacar a las ciudades que ejemplifican el lema “Ciudades verdes: aptas para la vida”. (EGCA, 2019).

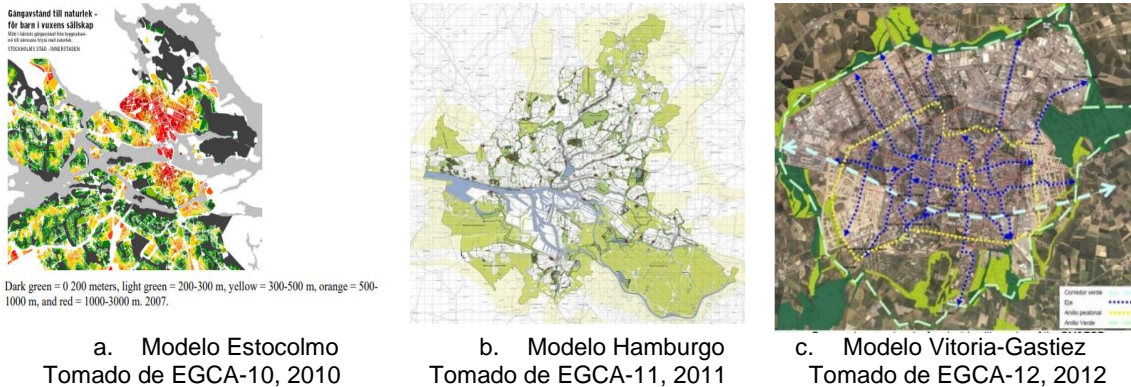
Cömertler (2017) resalta que las características principales para lograr una visión de ciudad con relevancia en las áreas urbanas con cobertura arbórea (ciudades verdes) es la composición del uso sostenible del suelo, las políticas e implicaciones del transporte verde, la calidad del aire y del agua, la calidad ambiental acústica, el uso de recursos de energía limpia y las instalaciones de infraestructura contemporáneas, la innovación ecológica y el empleo sostenible, el rendimiento energético, la gestión ambiental integrada y la conservación de áreas naturales y la biodiversidad. La conectividad entre áreas verdes, a través de la arborización y posterior consolidación de bosques urbanos, conforma uno de los componentes principales de la estructura ecológica de una región, proporcionando diversos servicios ecosistémicos como lo son los culturales, provisión, regulación, soporte (Gómez-Baggethun et al., 2013., FAO, 2017).

Al Mantener la continuidad de la arborización en las áreas urbanas se aumenta de manera directa la calidad de vida de los habitantes y mitiga los efectos climáticos de las áreas urbanas (Rosas-Lusett and Bartorila 2017). Dado lo anterior, resulta importante conocer como las ciudades galardonadas con el premio Capital Verde han afrontado la planificación de las áreas verdes y la forestación. Los modelos de las ciudades que son un referente en la visión e implementación de ciudades sostenibles mantienen un indicador para evaluar la evolución de una ciudad en pro del “Verde”, este es la distancia a la que viven los ciudadanos de un área verde pública sea menor a 300 metros. Copenhague tiene aproximadamente un 20% del total de habitantes localizados en zonas con una distancia superior a 300 metros de un área verde pública, que en términos globales está por encima de las ciudades en desarrollo.

Es importante precisar que el término área verde hace referencias a ambientes que por su importancia ecosistémica sirven para salvaguardar y regenerar especies de la región. Estas zonas pueden ser parques, bosques, tierras agrícolas, e incluso zonas acuáticas, tales como: lagos, playas, las riberas de los ríos, entre otras. La Figura 1 a. Modelo Estocolmo muestra la distancia en metros a áreas verde, donde las tonalidades verdes son las más cercanas y las rojas las más lejanas. Esta ciudad cuenta con aproximadamente 1.000 parques y más de 200 reservas naturales regionales que se conectan. Una condición importante es el acceso a las áreas verdes públicas, cerca del 95% viven a menos de 300 metros. El tamaño total de las áreas verdes era para el 2010 de 6.870 hectáreas (EGCA, 2010).

La Figura 1 b. Modelo Hamburgo presenta el 9% de áreas verdes públicas, el 5% área boscosa propiedad de la ciudad y el 8% áreas de reservas naturales de la ciudad. La estructura verde fue basada en el concepto de espacios abiertos para el desarrollo ecológico y social. Para el 2011 el 89% de la población contaba con un área verde a una distancia máxima de 300 metros (EGCA, 2011). La Figura 1 c. Modelo Vitoria-Gastiez muestra la concepción verde de esta ciudad, se basa en diseñar los parques como pequeños jardines urbanos para el uso públicos que formen una red y, junto a avenidas, bulevares y plazas, se conecten con el Cinturón Verde (Green Belt) para crear un sistema riguroso de biodiversidad urbana. Para el 2012, cerca del 100% de la población vivía a menos de 300 metros de distancia de algún espacio abierto y verdes (EGCA, 2012).

Figura 1 Modelos de ordenación de ciudades Green Capital



A nivel local, el Plan de Ordenamiento del municipio de Santiago de Cali (2014) destaca que en los procesos ambientales la cobertura arbórea es importante para las conexiones entre las diversas estructuras de la ciudad. La continuidad y conectividad de todos los elementos de la estructura garantiza la conservación y restauración de los ecosistemas. La estructura ecológica se puede clasificar en principal, que son todas las áreas de conservación, protección ambiental y en complementarias, que son todos los elementos con valor ambiental que hacen parte de los sistemas estructurantes. A partir de conexión entre la estructura principal y complementaria por medio de corredores arborizados se logra balancear la oferta ambiental y mejorar la calidad ambiental que posibiliten la continuidad de los flujos ecosistémicos a lo largo del área urbana.

1.3 La silvicultura urbana en Colombia

En Colombia, desde 1978 se tienen estudios sobre las coberturas arbóreas en los centros urbanos, ciudades como Santa Marta, Leticia y Bucaramanga cuentan con estudios sobre arbolado urbano. Asimismo, Bogotá en 2007, Pereira en 2010, Medellín en 2015, Barranquilla en 2015 y Cali en 2019 adaptaron manuales y/o planes de silvicultura urbana junto a otros mecanismos de planificación. En general, los manuales y/o planes se enfocan principalmente en los aspectos técnicos sobre las especies. Sin embargo, carecen de métodos o herramientas en la definición y clasificación de áreas específicas para establecer las coberturas arbóreas basadas, en el aprovechamiento o recuperación de los servicios ecosistémicos.

La silvicultura urbana en Colombia es un campo en crecimiento que busca integrar la gestión de los recursos forestales en el contexto de las ciudades. A medida que las ciudades colombianas crecen, la planificación y el manejo de las áreas verdes urbanas se vuelven cada vez más importantes para mejorar la calidad de vida de las personas y promover un desarrollo sostenible. En Colombia, varias ciudades han desarrollado planes y manuales de silvicultura urbana para guiar la gestión de los recursos forestales en el contexto urbano. Por ejemplo, Bogotá cuenta con el Plan de Árboles y Bosques de la ciudad, que tiene como objetivo aumentar la cobertura vegetal en la ciudad y mejorar la calidad del aire y del agua. Medellín cuenta con el Plan de Árboles y Bosques Urbanos, que busca mejorar la calidad de vida de los habitantes de la ciudad a través de la conservación y restauración de los ecosistemas urbanos. Otras ciudades como Cali, Barranquilla y Bucaramanga también cuentan con planes y manuales similares para la gestión de los recursos forestales en el contexto urbano.

En cuanto a las investigaciones realizadas en Colombia sobre la silvicultura urbana, varias instituciones y universidades han avanzado en este campo. Por ejemplo, el Instituto Alexander von Humboldt ha llevado a cabo investigaciones sobre ecología y conservación de los ecosistemas urbanos (Alcaldía Mayor de Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente 2019; Mejía 2016; Ruíz_T., Otero_G., Ramírez_A. and Trespacios_G 2008). La Universidad Nacional de Colombia ha llevado a cabo investigaciones en la silvicultura urbana en Bogotá y Medellín, teniendo como temas principales la biodiversidad en áreas urbanas, la gestión de los árboles, bosques urbanos, y la mitigación del cambio climático en las ciudades (Alcaldía Mayor de Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente 2019; Correa et al. 2013; Otaya Burbano Leodán Andrés Sánchez Zapata, Botero Fernández, and Morales Soto 2006; Tovar-Corzo 2013). En el 2019 la Corporación Autónoma de Occidente (CVC) realizó el Encuentro Nacional de Silvicultura Urbana donde se presentaron diferentes ponencias, resaltando la gobernanza, manejo integral, evaluación de los servicios ecosistémicos y métodos de intervención para la cobertura arbórea urbana.

En general, la silvicultura urbana en Colombia ha sido objeto de estudio en diferentes instituciones y universidades, con el objetivo de promover una gestión sostenible de los árboles urbanos y mejorar la calidad de vida de las personas. Los estudios e investigaciones se han enfocado en temas como la conservación y restauración de los

ecosistemas urbanos, la mitigación del cambio climático, la mejora de la calidad del aire, agua y la promoción de un desarrollo sostenible.

Comprender las variaciones resultantes de la composición y distribución de la población, junto a las alteraciones en las condiciones climáticas, ayuda a plantear alternativas para lograr mitigar la problemática de pérdida de los servicios ecosistémicos en las áreas urbanas. La conservación y recuperación del componente forestal de una ciudad contribuye en la continuidad de la estructura ecológica integral (principal y complementaria) que se fundamenta en las interacciones entre el espacio natural y el construido. Siendo así, es importante considerar que los componentes de la estructura urbana tienen relaciones que forman dependencia intrínseca, donde la espacialidad territorial es fundamental porque constituye la expresión física de la ciudad (Schjetnan, Calvillo., y Peniche 2008). El componente forestal como parte integral de la estructura ecológica urbana-rural es el factor decisivo en la conectividad ecosistémica de la estructura urbana (natural y artificial) y, una adecuada planificación permitirá encaminar el territorio hacia la sostenibilidad ambiental que, a su vez, potenciará los servicios que genera la naturaleza a los habitantes.

1.4 Desafíos de la investigación

A lo largo de esta investigación se ha resaltado la importancia que han tenido los temas relacionados con la silvicultura urbana para la planificación del territorio. Sin embargo, la revisión bibliográfica evidencia una falta de valoraciones multiservicio (Haase et al. 2014). Pocos estudios discuten la relación entre la biodiversidad, elementos urbanos y los SE, pero existe consenso en que la cobertura arbórea, como parte integral de la estructura ecológica urbana-rural, es un factor decisivo para la conectividad ecosistémica (natural y artificial), que junto a una adecuada planificación permitiría encaminar el territorio hacia la sostenibilidad ambiental y potenciará los SE percibidos por los ciudadanos (Bodnaruk et al. 2017; Reyes and Gutiérrez 2010; Yao et al. 2019). Estudios académicos y artículos divulgativos presentan que lo deseado para los centros urbanos es tener, aproximadamente, un árbol por cada tres habitantes (Forero Sanclemente and García Bueno 2015; Giraldo Ospina and Vásquez-Varela 2021). Teniendo en cuenta este indicador, el aumento de la densidad poblacional y los limitados análisis que integren a los

SE generados por las coberturas arbóreas (Dobbs, Escobedo, and Zipperer 2011, Tovar 2007), es necesario adelantar acciones para asegurar un desarrollo territorial urbano sostenible.

Según el informe Cali en Cifras (2022) elaborado por el Departamento Administrativo de Planeación (DAP), se proyecta para el año 2023 una tasa anual de crecimiento poblacional de 0,8%. Es así, como el municipio tendrá aproximadamente 2.297.230 habitantes, de los cuales el 98% vivirán en el área urbana (21% del total del área municipal) y el 2% en el área rural (79% del área municipal). Estas cifras evidencian que el municipio está por encima de las estimaciones presentadas por el Fondo de Población de las Naciones Unidas para el año 2025 (2019; UNFPA, 2019). Adicionalmente, el censo arbóreo de 2015 mostró que el área urbana del municipio de Santiago de Cali tenía una relación de un árbol por catorce habitantes, evidenciando un notable déficit de cobertura. El resultado de este indicador más el aumento poblacional (DAP,2022; POT, 2014) evidencia la necesidad de adelantar investigaciones que contribuyan a definir las bases que permitan la toma de decisiones para lograr disminuir el déficit de cobertura arbórea y aumentar los SE.

El municipio cuenta con diversos instrumentos de política pública que contienen análisis importantes y recomendaciones técnicas sobre especies a sembrar, tales como: El Estatuto de Silvicultura Urbana (acuerdo 0353 de 2013), Metodología para Compensación Ambiental por Intervención Arbórea (Resolución 4133.0.21.441 del 2014), Manual para el Manejo de las Coberturas Vegetales, Plan de Gestión Ambiental 2012 – 2019 (Resolución No. 4133.010.21.0.1547 de 2019) y Plan de Silvicultura Urbana (Resolución No. 4133.010.21.0.1530 de 2019). Sin embargo, se carece de herramientas que contribuyan en la definición y clasificación de áreas específicas para establecer las coberturas arbóreas basado en el aprovechamiento o recuperación de los servicios ecosistémicos. A raíz de la problemática planteada, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué criterios se deben establecer para clasificar las áreas urbanas con cobertura arbórea según la generación de servicios ecosistémicos?

1.4.1 Objetivos

Objetivo General

Proponer criterios para clasificar áreas urbanas con cobertura arbórea a partir de los servicios ecosistémicos que generan. Caso corredor río Cali, Cali (Colombia)

Objetivos Específicos

1. Identificar y evaluar las variables estratégicas territoriales urbanas que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea.
2. Identificar y evaluar los servicios ecosistémicos asociados a las áreas urbanas con cobertura arbórea.
3. Relacionar las variables estratégicas territoriales urbanas y los servicios ecosistémicos priorizados para proponer criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea.
4. Aplicar los criterios de clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea para el corredor del río Cali, Cali (Colombia).

2. MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1 La planificación y gestión de las áreas urbanas con cobertura arbórea

Dentro del ámbito del ordenamiento territorial se han propuestos diversos conceptos enmarcados en fomentar la preservación, el uso sostenible y la efectiva incorporación de los espacios urbanos con cobertura arbórea. Un enfoque que se destaca en esta investigación es la planificación espacial Integrada que, según Carpenter (et al. 2009), es fundamental en el ordenamiento territorial para el manejo de áreas naturales del espacio urbano. Este enfoque promueve la integración de políticas y acciones de planificación en diferentes niveles y sectores, considerando la interrelación entre el medio ambiente, la sociedad y la economía. Tiene como objetivo garantizar la conservación y el uso sostenible de las áreas con cobertura natural, mediante la coordinación de acciones entre los

responsables de la toma de decisiones, la participación ciudadana y el enfoque de múltiples escalas. Además, se enfoca en la conectividad de los espacios verdes y su integración en la trama urbana para fomentar la biodiversidad y proporcionar servicios ecosistémicos (Angelstam et al. 2019; Eggers et al. 2019)

Otro enfoque relevante es la planificación adaptativa que, según Olsson (2006), se centra en la gestión flexible y ajustable de las áreas verdes y recursos naturales en función de cambios y desafíos. Esta aproximación reconoce la necesidad de adaptarse a nuevas condiciones y desafíos a medida que surgen mediante la evaluación continua, la retroalimentación y la revisión de las políticas y acciones de planificación. Este enfoque es importante para garantizar la resiliencia y la sostenibilidad a largo plazo de las áreas con cobertura arbórea, porque proporciona herramientas para la gestión efectiva y da respuesta adecuada a los cambios ambientales y sociales. Se enfoca en la creación de estructuras y procesos de gobernanza que dinamicen la toma de decisiones adaptadas a cada territorio y la colaboración entre los actores involucrados en la gestión de los recursos de las áreas urbanas (Olsson et al. 2006).

Adicionalmente, se contempla la importancia de articularlos con la gobernanza ambiental que, según Folke (et al. 2005), permite integrar la participación de múltiples actores, tales como, entidades municipales, comunidades locales y entes no gubernamentales, para la toma de alternativas y decisiones alrededor del recurso forestal urbano. Siendo así, Sarkki (et al. 2015), expresa que la gobernanza ambiental pretende aunar esfuerzos para la coordinación y cooperación entre los diversos sectores sociales y normativos para lograr un manejo efectivo y equitativo de las áreas urbanas. Además, se enfoca en la creación de marcos institucionales y mecanismos de participación ciudadana que promuevan la gestión sostenible de los recursos naturales.

Autores como Lawrence (et al. 2013) destacan como los procesos relacionados con la silvicultura son fortalecidos desde la gobernanza con la toma de decisiones y administración para la planificación de las áreas urbanas. Kooiman (2003) señala que desde la concepción de la gobernanza se dan las herramientas para definir los lineamientos que atienden las demandas del territorio, es decir, la totalidad de las interacciones en las que participan actores públicos y privados para resolver problemas y

crear oportunidades sociales, así como también, cumple las funciones de atender a las instituciones y establece las bases normativas. La gobernanza implica decisiones, negociaciones y una variedad de relaciones de poder entre las partes interesadas para determinar quién obtiene, qué, cuándo y cómo (FAO 2018).

En este contexto y para esta investigación, la planificación espacial integrada (Carpenter 2009) y la planificación adaptativa (Olsson 2006) fundamentaron las herramientas clave para proponer los criterios de clasificación. Lo anterior, porque estos dos enfoques proponen el análisis espacial de las áreas a partir de los elementos urbanos y la cobertura arbórea, estableciendo la influencia desde lo espacial entre cada uno de ellos. La gobernanza ambiental (Folke 2005, Kooiman 2003 y Sarkki 2015) fue otra consideración que complementó las bases de la propuesta de los criterios, ya que facilita a las instituciones generar lineamientos para los instrumentos de política pública sobre las especies arbóreas y su localización.

2.2 La silvicultura urbana como estrategia para la planificación

Según Kong y Ying (2021; 2022), se introdujo el concepto de silvicultura urbana en los años sesenta en Norteamérica y en los años ochenta en Europa. Posteriormente, se concibió en Latinoamérica como la rama especializada en el establecimiento, manejo y ordenación del arbolado urbano, con el fin de aprovechar sus características naturales, proveer servicios ecosistémicos a las poblaciones urbanas y permitir la interacción armónica entre las diferentes actividades y elementos que conforman el suelo urbano y su articulación ecosistémica con el suelo rural. También, ordena los bosques naturales o artificiales en zonas urbanas, periurbanas, suburbanas y marginales, que tiene como finalidad potenciar los servicios ecosistémicos que presta el arbolado en la ciudad (Cali 2013; Krajer Ostoić and Konijnendijk van den Bosch 2015).

En la literatura es posible encontrar términos que denotan la importancia de los árboles dentro de la planificación urbana, tales como: Arbolado urbano (Pérez Miranda et al., 2018; Iglesias & Calaza, 2016; Tovar, 2006), forestación urbana (Domínguez et al. 2009), arborización (Reyes and Gutiérrez 2010) enverdecimiento urbano (Nowak, David J; Dwyer,

John F; Childs 1997), bosques urbanos (Jim and Chen 2009; Salbitano et al. 2017), espacios verdes urbanos (Wolch, Byrne, and Newell 2014) y cobertura arbórea (Nowak et al. 1996; Salbitano et al. 2017). Si bien, existen diferencias entre cada uno de los términos es concluyente que, debido al crecimiento de la urbanización, las áreas urbanas con cobertura arbórea tienen un rol fundamental para mejorar la calidad de vida de los habitantes (Bolund and Hunhammar 1999; Endreny et al. 2017).

La FAO (2017), define a los bosques urbanos como redes o sistemas compuestos por grupos de árboles y árboles individuales ubicados en las áreas urbanas y periurbanas; es decir, incluye tanto la cobertura arbórea en áreas públicas como parques, reservas forestales, separadores viales, y áreas privadas (jardines). Previamente, Konijnendijk (2006) planteó que los bosques urbanos son la espina dorsal de la infraestructura verde que conecta las áreas urbanas a las rurales, mejorando la huella ambiental de las ciudades. Tovar (2006), complementó al asignarle a los bosques urbanos las características para aportar al control de la contaminación, son reguladores del clima, moderadores de temperatura, protegen contra el viento, controlan la erosión estabilizando los taludes, protegen los cuerpos de agua y aportan al paisaje, a la recreación/cultura y al hábitat/nichos

El concepto de bosques urbanos relacionado con las coberturas arbóreas hace parte de la silvicultura y la infraestructura verde, incluyendo parques y áreas abiertas, bosques naturalizados, techos y paredes verdes y jardines que proporcionan beneficios para la vida ecosistémica y para los habitantes de la ciudad (Konijnendijk, Ricard, Kenney y Randrup, 2006., Allen, 2012). Al alterar la estructura del bosque urbano se afectan funciones que maximizan el bienestar humano en las ciudades; tales como, la captura de carbono, la regulación de la temperatura, la provisión de agua, la generación de oxígeno, el amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales, la protección y recuperación de suelo, la contención del ruido, la protección de la biodiversidad, y el goce del paisaje y la recreación (Nowak et al., 2006., Reyes and Gutiérrez 2010).

Las áreas urbanas con cobertura arbórea se enmarcan en las diferentes tipologías de áreas urbanas, porque tienden a ser un elemento distintivo no solo de la estética y el valor paisajístico, sino que también influye en la calidad del aire, la regulación térmica, la

biodiversidad y la interacción social en el tejido urbano. Es decir, las áreas urbanas con cobertura arbórea van desde la tipología funcional de zonas urbanas que categoriza las áreas en función del uso (Hoyt 1939 y Burgess 1925), pasando por la tipología morfológica que se basa en la forma y configuración de las áreas urbanas (Lynch 1960), tipología de accesibilidad y conectividad que se enfoca en las conexiones de los diferentes servicios y facilidades urbanas. (Hansen 1959), hasta la tipología de estructura espacial que analiza las áreas urbanas con base en la organización espacial con respecto al centro y las áreas periféricas. (Christaller 1933).

El crecimiento en las actividades en silvicultura urbana ha propiciado las siguientes ramas de investigación que en conjunto han robustecido la gestión del recurso forestal, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos y acentuando la sostenibilidad de las áreas urbanas:

- La selección y establecimiento de especies óptimas para cada entorno urbano (Etshekape, Atangana, and Khasa 2018; Jiang et al. 2019).
- La gestión del riesgo en las actividades relacionadas con las especies como lo son la poda o el manejo integrado de plagas (Vogt, Hauer, and Fischer 2015).
- La mitigación y mejoramiento en la calidad del aire, agua y suelos para la sostenibilidad ambiental (Irga, Burchett, and Torpy 2015; Konijnendijk et al. 2006; Nitoslowski et al. 2019).
- La gestión relacionada a la educación ambiental y participación comunitaria con políticas públicas para el bienestar de los ciudadanos (Kitchen 2013; Yaoqi Zhang et al. 2007).
- La planificación urbanas enfocada al recurso forestal (Alvey 2006; Capotorti et al. 2019; Jim 2004; Zheng et al. 2019).

La silvicultura urbana contribuye a la planificación y gestión integrándose en los instrumentos de política pública. Se destaca la compensación arbórea como un instrumento empleado para articularse a la estructura urbana a través de la restitución y siembra de las áreas urbanas afectadas por talas o erradicación, logrando la sostenibilidad ambiental (Plan de Silvicultura Urbana de Cali, 2019). Restablecer estas áreas contribuye a garantizar los servicios como la capturar de material particulado emitido por un agente

contaminador, reducir la temperatura atmosférica que es exacerbada por la irradiación de calor que produce el pavimento, mejorar la infiltración y captura de las aguas lluvia evitando inundaciones y, aumenta el bienestar y la calidad de vida al mejorar la estética de la ciudad proporcionando áreas de descanso (Vargas y Balmaceda, 2011).

Las compensaciones están basadas en la intervención por el acceso al uso y/o aprovechamiento de recursos naturales y por pérdida de biodiversidad (Sarmiento et al. 2015). Siendo así, las compensaciones en las áreas urbanas surgen como elemento complementario cuando las acciones de prevención y mitigación no dan respuesta suficiente para atender los impactos en la pérdida de la biodiversidad generados por el desarrollo urbanístico y, es necesario suplir áreas a través de la equivalencia ecológica. Según el ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, las compensaciones ambientales se definen como:

“Las acciones que tienen como objeto resarcir a la biodiversidad por los impactos o efectos negativos que no puedan ser evitados, corregidos, mitigados o sustituidos y que conlleven pérdida de la biodiversidad en los ecosistemas naturales terrestres y vegetación secundaria; de manera que se garantice la conservación efectiva de un área ecológicamente equivalente donde se logre generar una nueva categoría de manejo o estrategia de conservación permanente” (MADS, Manual para la pérdida de la biodiversidad, 2012)

Para la investigación se toman como referentes a Nowak (1996), Salbitano y FAO (2017), asumiendo la cobertura arborea como el área ocupada por las copas de grupos de árboles o árboles individuales localizados tanto en áreas públicas como privadas. También se entenderá que las áreas urbanas con cobertura arborea hacen parte de las diferentes tipologías de áreas urbanas.

2.3 Las variables territoriales urbanas en la planificación de las áreas con cobertura arbórea

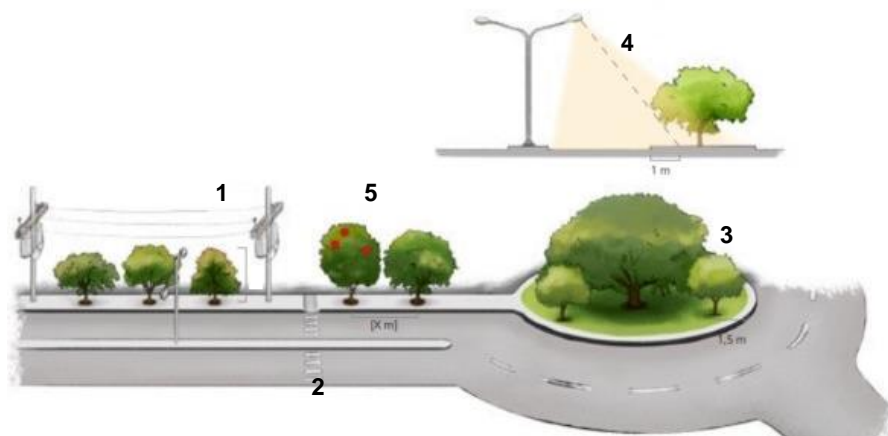
En la planificación y gestión del territorio la clasificación de los espacios urbanos es determinante para evaluar fenómenos como el crecimiento urbano, la distribución de servicios públicos y bienestar humano. Autores como Nor and Abdullah (2019), destacan que las áreas urbanas pueden ser clasificadas con base en criterios que representen la estructura y función de patrones paisajísticos de las áreas verdes o con cobertura arbórea. Yang (2014), por su parte, resalta que las políticas ambientales y los elementos urbanos naturales o socioeconómicos son las que determinan la tendencia o clases para la diversas intervenciones de las áreas urbanas.

Hernández Torres y Monayar (2016; 2022) presentan a las variables urbanas como aquellos elementos que conforman de manera integral la estructura natural o artificial del sistema físico espacial urbano con dependencia y relaciones entre sí. En este sentido, Schjetnan, Calvillo., and Peniche (2008) expresan que las variables o elementos que clasifican la estructura urbana con impactos ambientales representan la visión general de la ciudad, denotando las relaciones internas donde lo espacial es esencial para la expresión del territorio. Las variables deben armonizar con la cobertura arbórea de tal forma que favorezcan la implementación de proyectos para el desarrollo urbano. Por lo tanto, es importante considerar las características físicas y biológicas de las especies, para favorecer las funciones ecosistémicas dentro de los procesos de arborización urbana (Gustavsson 2002; Skärbäck 2007).

Un enfoque de las VTU es el presentado en el Manual de silvicultura de Barranquilla, donde se enfatiza que, a causa de la poca planificación y acelerado proceso de urbanización, el área urbana carece de espacios para la densificación de la cobertura arbórea. Así las cosas, plantea que se deben aplicar criterios integrales para seleccionar espacios adecuados que garanticen y maximicen los SE a lo largo del tiempo. Es imperativo realizar análisis del territorio teniendo con base en la distribución de las VTU, para evitar posibles conflictos con entornos circundante, y así, aportar para la creación de espacios urbanos sostenibles y habitables (Zea, Fonseca, and Balseiro 2015). La Figura 2

muestra un esquema de las variables territoriales, en el cual se ejemplifica el entorno de los espacios urbanos y su cobertura arbórea.

Figura 2 Esquema de Variables Territoriales Urbanas (VTU)



- | | | | | |
|--|--|---|---|--|
| 1. Servicios públicos:
vegetación bajo
líneas de transmisión | 2. Jerarquización
vial: distancia de
siembra a vía | 3. Espacio público:
distancia de la
vegetación al borde
de glorieta. | 4. Separador:
Vegetación cercana
a luminarias | 5. Espacio público:
peatonal: Caída de
flores y frutos |
|--|--|---|---|--|

Fuente: Tomada del Manual de silvicultura urbana de Barranquilla, 2015

Las VTU representan los componentes de la estructura principal de soporte de las áreas urbanas, desempeñando un papel fundamental en la planificación y la configuración de los espacios. Autores como Pierre George (1981) resalta múltiples variables para analizar patrones geográficos y procesos de desarrollo urbano regional, Jan Gehl (2010) analiza cómo la distribución y el diseño de las variables territoriales alteran la vida urbana, Michael Hough (1995) y Elizabeth K. Meyer (2008) abordan la planificación desde los espacios urbanos y el paisaje y, como las variables territoriales aportan a la sostenibilidad y a la calidad de vida.

En esta investigación al identificar y comprender las variables se pudo obtener una visión más clara de la dinámica y evolución entorno a las áreas con cobertura arbórea. Siendo así, las VTU fueron un elemento relevante desde la planificación territorial porque ayudan a identificar los desafíos y oportunidades para recuperar o maximizar los beneficios generados por las coberturas arbóreas. En consecuencia, la investigación adoptó el concepto de Variables Territoriales Urbanas (VTU) como los elementos interconectados

que constituyen la estructura natural y artificial del entorno físico de una ciudad, con dependencia y relaciones mutuas, y que tienen un impacto ambiental importante en el desarrollo urbano, por ejemplo, las vías, los equipamientos, las redes de servicios públicos, etc.

2.4 Los servicios ecosistémicos de las coberturas arbóreas urbanas

El concepto de Servicios Ecosistémicos a lo largo del tiempo se ha redefinido. Una de las definiciones más relevantes es la de Constanza (1997), quien los define como los servicios y bienes de los ecosistemas que representan de una manera directa o indirecta los beneficios que obtiene el ser humano de las funciones que son los procesos naturales de los ecosistemas. Posteriormente, se comprendió como la capacidad que poseen los ecosistemas para proporcionar diversos bienes y servicios de forma directa o indirecta con el fin de satisfacer las diferentes necesidades humanas (De Groot, Wilson, and Boumans 2002). En la actualidad la definición más utilizada es la propuesta en el foro de Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés) (2005), que los define como todos los beneficios que la población obtiene de los ecosistemas.

Los SE de las áreas urbanas se han priorizado a partir del modelo de Varsovia que se base en el enfoque interdisciplinario para la gestión sostenible y la valoración de los servicios (Mujica, Karis, and Ferraro 2022; Szumacher and Malinowska 2013). En este sentido, el Manual de Servicios Ecosistémicos en gestión urbana TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) propone una metodología para estimar el valor de la economía espacial de los ecosistemas. A partir de la valoración de los SE se pueden detallar los costos y beneficios de las estrategias en la planificación para mejorar la sostenibilidad de las áreas urbanas. También, facilita la integración de consideraciones ambientales en la planificación y toma de decisiones urbanas (TEEB 2010).

Las diferentes experiencias de las ciudades para la planificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea han evidenciado la importancia de incorporar soluciones basadas en la naturaleza (SBN) (CODS. 2020). También, puede ser una estrategia efectiva para promover el desarrollo urbano sostenible. Estas soluciones buscan abordar los desafíos

del cambio climático a través de la creación de nuevas infraestructuras que utilizan elementos naturales. Para las áreas urbanas los SE son suministrados por los distintos elementos naturales como árboles, cuerpos de agua, huertas, pastos, etc., estos elementos constituyen espacios urbanos seminaturales o artificiales como plazas, jardines, estanques, suelos vivos, etc. (Keeler et al. 2019; Mujica, Karis, and Ferraro 2022). Los parques inundables y los techos verdes son ejemplos de SBN que pueden mejorar la resiliencia de las ciudades frente a los problemas relacionados con las alteraciones en el clima. (CODS. 2020).

La cobertura arbórea como elemento fundamental de las áreas urbanas provee diversos beneficios. Roy (2012), muestra que la literatura ha evidenciado que los árboles urbanos aportan beneficios económicos particularmente en el aumento del valor de los inmuebles, sociales en el aumento de la calidad de vida, sanitarios en el alivio del estrés y, visuales y estéticos en la mejora de la calidad escénica. En cuanto a los SE provistos por los árboles urbanos, las investigaciones han evaluado el almacenamiento y secuestro de carbono (Nowak et al. 2013; Shen et al. 2020), la mejora de la calidad del aire (Escobedo, Kroeger, and Wagner 2011; Leung et al. 2011), la atenuación de las aguas pluviales (Berland et al. 2017; Phillips et al. 2019), la conservación de la energía (Carver, Unger, and Parks 2004; Tsoka, Leduc, and Rodler 2021), la preservación del hábitat (Alvey 2006; Turner-Skoff and Cavender 2019; Wood and Esaian 2020), la reducción del ruido (Banerjee, Banerjee, and Palit 2021), la conservación de microclimas (Jim and Chen 2009b) y la recreación (Dobbs, Kendal, and Nitschke 2014).

Según Jim y Chen (2009^a), cuantificar y valorar los SE permiten comparar de manera directa las alternativas de uso de la tierra y facilita el análisis de los costos y beneficio de políticas de sostenibilidad urbana. En este sentido, esta investigación evaluó los SE a partir de indicadores estimados con herramientas de análisis de información geográfica (Brown and Fagerholm 2015; Gaudereto et al. 2018; Paudyal et al. 2015) para contrastar las diferentes áreas urbanas del corredor del río Cali. Esto, teniendo en cuenta que los avances en la sostenibilidad de las áreas urbanas dependen del correcto funcionamiento de sus ecosistemas dada la influencia directamente en el bienestar humano y las actividades económicas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el propósito de dar respuesta a la pregunta que suscitó esta investigación sobre los criterios para clasificar las áreas urbanas con cobertura arbórea, se planteó una metodología variada de acuerdo a la demanda de cada objetivo específico. El enfoque de la investigación está determinado por el análisis espacial del territorio, la metodología se basó en el análisis multivariable cuantitativo y aplicado, integrando métodos estadísticos de clúster jerárquico, árbol de decisión y matriz de análisis estructural. Además, se emplearon los sistemas de información geográfica (SIG) para almacenar, calcular, visualizar y consultar los datos obtenidos de los análisis. La Figura 3 presenta cada una de las 5 etapas metodológicas:

- **Etapa I denominada Alistamiento:** Esta etapa abordó parcialmente los objetivos 1 y 2 logrando *identificar las VTU y los SE asociados con las áreas urbanas y coberturas arbóreas*. Se realizó a partir de la evaluación de la literatura temática académica y literatura gris por medio de análisis bibliométrico y revisión sistemática. Estos dos métodos se utilizaron para ampliar el rango de búsqueda evitando el sesgo de ubicación de los documentos y líneas de investigación.

Las VTU y los SE se identificaron a partir de la revisión uno a uno del material bibliográfico seleccionado.

- **Etapa II denominada VTU:** Esta etapa complementó el objetivo 1 logrando *evaluar las VTU*. Se realizó a partir del análisis de clúster jerárquico (dendrograma) determinado por la relación espacial de distancia entre la cobertura arbórea (censo arbóreo) y las VTU. Con este proceso se determinaron las Variables estratégicas Territoriales Urbanas (VeTU). Este método se utilizó para agilizar el procesamiento de los datos manteniendo la rigurosidad para obtener las variables estratégicas según la distancia a la cobertura arbórea.

Las VTU se evalúan a partir de la distancia a la cobertura arbórea identificada (individuo arboreo) en el censo. Las VeTU son las VTU que tienen menor distancia a la cobertura arbórea.

- **Etapas III denominada SE:** Esta etapa complementó el objetivo 2 logrando *evaluar los SE*. Se realizó a partir de la adaptación del cálculo del Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV) y árbol de decisión para estimar los indicadores e inferir los Servicios Ecosistémicos priorizados (SEp). Este método se utilizó para facilitar la toma de datos y agilizar el procesamiento de cada función ecosistémica.

Los SE se evaluaron a partir de calcular el Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV) obtenido de la digitalización y caracterización de las coberturas.

- **Etapas IV denominada criterios de clasificación:** Esta etapa abordó el objetivo 3 logrando relacionar los resultados de las etapas previas para finalmente proponer criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea. Se realizó a partir de una matriz de relación de influencia de las VeTU y los SEp calificada por expertos (encuesta a expertos) para integrarla con los resultados previos. Este método se utilizó para abarcar diferentes enfoques profesionales y académicos que permitieran dilucidar las relaciones de influencia.
- **Etapas V denominada caso de estudio:** Esta etapa se aplicaron los criterios de clasificación al caso del corredor del río Cali.

Figura 3 Diagrama metodológico de la investigación

Etapa I Alistamiento

Delimitó por tendencias de redes de coautoría y región la relevancia del tema de investigación de acuerdo a la búsqueda por palabras claves. Este método se escogió porque es de libre acceso y permite procesar las diversas bases de datos institucionales.

Identificó por co-ocurrencia las VTU y los SE asociados a la cobertura arbórea. Este método se escogió porque es objetivo y riguroso para la selección por evidencias y reducción del sesgo.

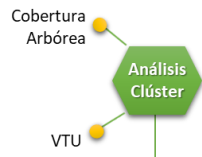


Documentos seleccionados

- VTU
- SE

Etapa II VTU

Evaluó las VTU por agrupamiento según la distancia. Este método se escogió porque permite procesar gran cantidad de datos, es de libre acceso, detecta patrones y reduce la complejidad en el procesamiento de datos.



- VeTU

Etapa III SE

Evaluó los SE por indicadores de cobertura. Este método se escogió porque logra segmentar grandes cantidades de áreas y reduce la complejidad de la estimación.

Identificó los SEp según la relación entre las VeTU y los indicadores de cobertura. Este método se escogió porque elimina la subjetividad y permite jerarquizar las funciones ecosistémicas y los SEp

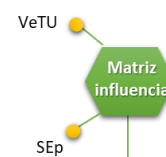


- SE

- SEp

Etapa IV Criterios

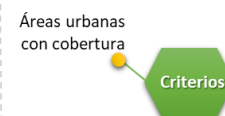
Relacionó las VeTU y los Sep por evaluación de expertos. Este método se escogió porque integra diversos enfoques profesionales y académicos.



- Criterios

Etapa V Caso de estudio

Aplicó los criterios propuestos obtenidos de la metodología de investigación.



Clasificación áreas urbanas

● Entrada ● Método ● Resultado

SE: Servicios Ecosistémicos
SEp: Servicios Ecosistémicos priorizados
ISAV: Índice de servicios ecosistémicos para áreas verdes

VTU: Variables Territoriales Urbanas
VeTU: Variables estratégicas Territoriales Urbanas

3.1 Área de estudio

La investigación se desarrolló en el Corredor del Río Cali que se localiza al norte del área urbana del municipio del Santiago de Cali (Colombia). En un contexto general, el municipio de Santiago de Cali tiene una superficie total de 562.8¹ Km² de las cuales el 21% corresponde al área urbana, el 3% corresponde al área de expansión urbana y el 76% corresponde al área rural (Cali en Cifras, 2022). Tiene una población de 2,280,907 habitantes. Cuenta con una estructura ecológica principal compuesta por las áreas Protegidas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) del Parques Nacionales Naturales (PNN) Farallones de Cali y Sistema Municipal de Áreas Protegidas (SIMAP) del río Meléndez y las áreas de Especial Importancia Ecosistémica como: Cinturones ecológicos (Agua Blanca, río Cali y Navarro, bosques y guaduales, ecoparques (cerros tutelares, Río Pance, Lago de las Garzas, Villa del Lago), parques, zonas verdes, recurso hídrico superficial con sus áreas forestales protectoras, entre otros (POT, 2014). Se destaca que el área urbana del municipio es atravesada por los ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Meléndez, Lili, Pance y Cauca que conforman el sistema hídrico principal y estos sistemas ecosistemas estratégicos contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes y a mitigar los impactos ambientales, por ser sumideros naturales de contaminantes atmosféricos, fuentes naturales de refrigeración, hábitats naturales para la vida silvestre y, sistemas naturales de control de inundaciones..

El área del corredor del río Cali representa el 13.5% del total del área urbana y cuenta con aproximadamente 12.0%² del total de cobertura arbórea de la ciudad. El corredor del río Cali se extiende desde el pie de monte (Comuna 1) hasta la zona plana del río Cauca (Comuna 6) representando los patrones ambientales de precipitación, altura y temperatura de la ciudad. Así como también, los patrones socioeconómico y comercial que se presentan en las áreas de actividad: Industrial, Mixta, Residencial neta, Residencial, Espacio público. También contiene las áreas de tratamiento urbanístico de consolidación básica, consolidación moderada, equipamientos de gran escala, nodo de equipamientos y renovación urbana.

¹ Por medio de los Acuerdos 15 del 11 de agosto del 1988, 10 del 10 de agosto 1998 y 134 del 10 de agosto del 2004, se dividió el municipio en 22 comunas para el área urbana y 15 corregimientos para el área rural.

² Dato actualizado a 29 de marzo de 2019 según el censo arbóreo.

Según el Plan de Ordenamiento Territorial (2014) el Corredor del Río Cali hace parte del proyecto denominado “*Corredores Ambientales como revitalizadores de los ríos*”. Este proyecto pretende articular las diferentes áreas urbanas a través de la recuperación de la conectividad ecológica, integrando los elementos naturales y construidos, aprovechando los ejes viales como conectores que se incorporen a la estructura ecológica, las dinámicas sociales, económicas y culturales que pueden hacer parte de los procesos de forestación urbana.

La heterogeneidad de elementos que conforman el corredor del río Cali representa la totalidad del área urbana. Razón por la cual, para la investigación, el corredor se dividió en cuatro tramos con el propósito de agrupar zonas homogéneas para intervenir a menor escala y lograr analizar las áreas urbanas con cobertura arbórea a partir de los servicios ecosistémicos que generan. Se establecieron los siguientes criterios para definir los tramos:

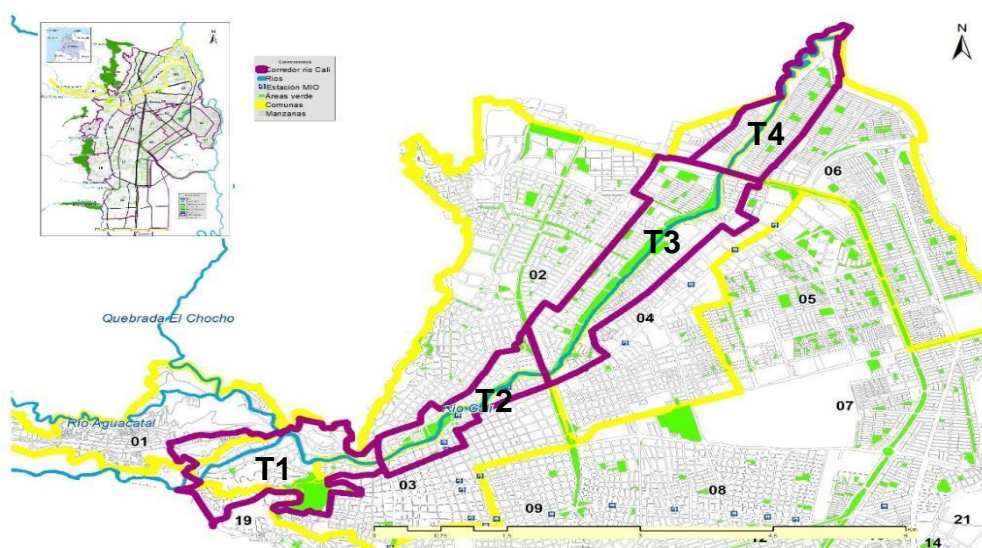
- Valor ambiental: Hace referencia a las áreas con baja ocupación residencial/comercial y alta presencia de elementos naturales.
- Jerarquización vías: Hace referencia a los elementos que conforman la red vial, tales como: Vías (arterias y marginales), ciclovías y separadores viales
- Trazo urbanístico: Hace referencia a la trama urbanística conformada por predios y construcciones que mantienen baja relación de área construida.
- Áreas de interés: Hace referencia a las áreas según el uso de suelo, equipamientos, tipologías de construcción, condiciones socioeconómicas (barrios y estrato) y nivel de consolidación.

La Figura 4 Área de estudio. Tramos del corredor del río Cali. presenta de color morado los 7,45 km². que conforman el área del Corredor del Río que se detallan en el Anexo 1. Caracterización de tramos del Corredor del Río Cali:

- Tramo 1 - T1: Tiene una extensión aproximada de 2.04 km² conformado por 13 barrios y 5.241 árboles.

- Tamo 2 – T2: Tiene una extensión aproximada de 1.18 km² conformado por 13 barrios y 3.446 árboles.
- Tramo 3 – T3: Tiene una extensión aproximada de 2, 2.83 km² conformado por 15 barrios y 4.862 árboles
- Tramo 4 – T4: Tiene una extensión aproximada de 1.40 km² conformado por 4 barrios y 2.909 árboles

Figura 4 Área de estudio. Tramos del corredor del río Cali.



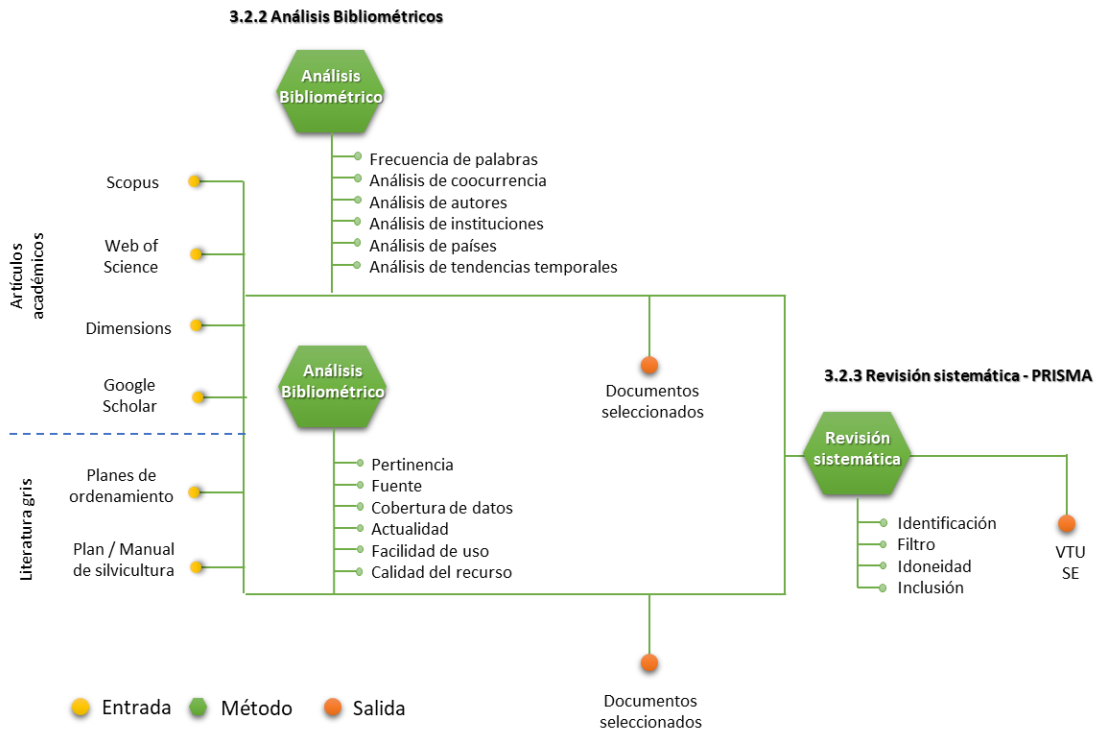
Nota: Los datos geográficos son tomados de POT del municipio de Santiago de Cali (2014)

3.2 Etapa I: Alistamiento

3.2.1 Identificación de VTU y SE

Para Identificar las VTU que influyen en la distribución espacial de la Cobertura arbórea y los SE asociados a dichas coberturas, se empleó el método propuesto en la Figura 5 que consistió en adaptar el modelo de la de la declaración PRISMA 2009 (Moher et al. 2009; Urrútia and Bonfill 2010) para la selección y revisión sistemática de literatura de artículos académicos de bases de datos indexadas y literatura gris.

Figura 5 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa I – Alistamiento



Esta etapa inició con el análisis bibliométrico para identificar de manera objetiva la contribución de países, instituciones y autores en el desarrollo de la silvicultura urbana y los servicios ecosistémicos generados por la cobertura arbórea (Wiesel et al. 2021; Ying et al. 2022). Posteriormente y con los resultados del análisis bibliométrico, se realizó la revisión sistemática empleando la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) que según Yepes-Nuñez et al. (2021) y Kong et al (2021), ayuda a la toma de decisiones basada en la evidencia obtenida de revisiones sistemáticas y permite a los investigadores seleccionar, evaluar y sintetizar el estado del conocimiento de una temática.

Para la identificación de VTU y SE se seleccionaron artículos académicos de las bases de datos Scopus, Web of Science (WOS), Dimensions y Google Scholar (Harzing and Alakangas 2016; Matsler et al. 2021). Para la literatura gris se seleccionaron instrumentos de planificación y manuales de silvicultura urbana de ciudades colombianas.

3.2.2 Análisis Bibliométricos

▪ *Artículos académicos*

El análisis bibliométrico para los artículos académicos se realizó por medio de indicadores obtenidos de la librería Bibliometrix en ambiente de lenguaje R (Aria and Cuccurullo 2017; Urban et al. 2023). Se utilizaron los reportes en formato .bib, .ris y .csv de las bases de datos Web of Science, Google scholar, Dimensions, Scopus y portales de entidades oficiales, para ser visualizados en los software publish-or-perish y vosviewer. El análisis permitió establecer el contexto multidimensional de la distribución, frontera y tendencia de la literatura en dos pasos (Ying et al. 2022).

Se estableció la ecuación de búsqueda a partir de palabras claves que, según la Oficina Internacional de Educación UNESCO-OIE (2007), los términos especializados para esta investigación son Silvicultura Urbana y Servicios Ecosistémicos. Asimismo, se establecieron restricciones según los términos claves por medio de conectores booleanos, se excluyeron las publicaciones anteriores al año 2010 y se limitó a las áreas de investigación de ciencias ambientales y de planificación territorial. La ecuación 1 presenta la estructura general utilizada en cada una de las bases de datos:

(TITLE-ABS-KEY//()) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA)) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD)) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR()))

Ecuación 1. Términos de búsqueda temática

Una vez identificado el total de los documentos que cumplieron con los parámetros de la ecuación, se evaluaron los siguientes indicadores en Bibliometrix para cada base de datos:

- Frecuencia de palabras: Por medio de la función `wordcloud(dtm)` se identifican las palabras más frecuentes de los registros de las búsquedas en las bases de datos.
- Análisis de coocurrencia: Por medio de la función `cooccurrencePlot(dtm)` se identifican las palabras que aparecen juntas con mayor frecuencia.
- Análisis de autores: Por medio de la función `authorCooccurrence(data)` se identifican los autores más productivos y coautores en el tema.

- Análisis de instituciones: Por medio de la función `institutionalAnalysis(data)` se identifican las instituciones que más han contribuido en el tema
- Análisis de países: Por medio de la función `countryAnalysis(data)` se identifican los países que más han contribuido en el tema.
- Análisis de tendencias temporales: Por medio de la función `trendsAnalysis(data)` se identifican las tendencias en el número de publicaciones sobre el tema.

La Tabla 1 presenta la evaluación de los indicadores que permitió identificar que, si bien la base de datos Google Scholar contiene mayor cantidad de documentos, también carece de estructura para realizar el análisis de tendencia por fuentes, localización y coautores. Por tal razón, se excluyeron los registros que no fueron coincidentes con las bases de datos Scopus, WOS y Dimension. Una vez seleccionados los registros de las bases de datos para la revisión sistemática, se depuran los resultados de la Ecuación 1. Términos de búsqueda temática, generando un único registro con la información bibliométrica para identificar las bases para la revisión sistemática.

Tabla 1 Indicadores del análisis Bibliométrico para las temáticas de silvicultura urbana y servicios ecosistémicos en el periodo de 2010 al 2023

Base de datos	Autores	Documentos	Tasa anual de crecimiento	Palabras clave del autor	Citas promedio por documento	Fuentes
Scopus	1350	411	5.48	1201	33.09	109
WOS	2042	627	5.48	2144	23.68	68
Dimension	347	75	23.83	1	22.85	51
Google Scholar	2078	980	-	-	-	-

Nota: Datos tomados de bases de datos Scopus, WOS, Dimension, Google Scholar

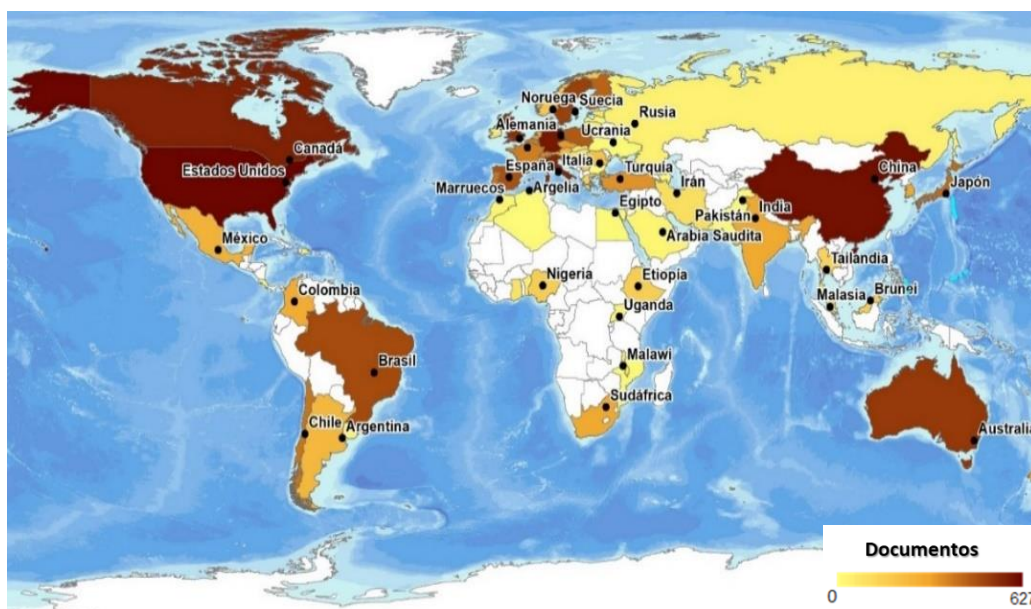
▪ **Literatura gris**

El análisis para la literatura gris se realizó mediante cuatro pasos en la revisión de instrumentos de planificación y planes/manuales de silvicultura urbana relevantes según la localización geográfica. A diferencia del análisis para los artículos académicos que se realiza de manera masiva y sistemática (librería Bibliometrix), el análisis para la literatura

gris no cuenta con bases de datos que aglomeren la información. Por lo tanto, no se evaluaron los mismos indicadores que en los artículos académicos, por el contrario, se establecieron parámetros de evaluación y selección uno a uno para determinar de manera subjetiva los instrumentos de planificación.

En el primer paso se realizó el análisis de producción académica por ubicación geográfica para seleccionar los países que tienen mayor influencia en el estudio de la Silvicultura Urbana y los servicios ecosistémicos. Siendo así, la Figura 6 muestra que los países con mayor relevancia en publicación son Estados Unidos (592), China (287), Alemania (162), Canadá (140), Italia (131), Reino Unido (128) Australia (118), Suecia (93), Brasil (59), España (57), Polonia (51), Finlandia (48) y Japón (38).

Figura 6 Mapa de la producción académica por países para la temática de silvicultura urbana y servicios ecosistémicos en el periodo de 2010 a 2022



El segundo paso delimitó la selección a producción de literatura de estudios en aplicaciones relevantes y representativas en temas de planificación urbana con base en los reconocimientos internacionales del European Green Capital y World City Prize. Por medio de estas dos distinciones se recopilieron las acciones ejecutadas desde nivel urbano global que permitieron el desarrollo sostenible del territorio, identificando con zonas

saludables que mejoran la calidad de vida de sus ciudadanos y conserven los elementos naturales.

En el tercer paso se seleccionaron para el entorno local los planes/manuales de silvicultura de las áreas urbanas de Bogotá, Barranquilla, Cali, Cartagena, Manizales, Medellín y Pereira. Por medio de estos instrumentos se obtuvo un contexto de las tendencias y características generales, así como también, se observaron los avances alcanzados y políticas implementadas por las diferentes instituciones gubernamentales. Si bien Santa Marta, Leticia y Bucaramanga cuenta instrumento de planificación en silvicultura urbana, para el desarrollo de la investigación no se logró tener acceso a los documentos técnicos.

El cuarto paso se realizó una vez identificadas las ciudades relevantes por producción académica y reconocimientos aplicados, se analizaron y evaluaron los instrumentos de planificación para valorarlos por medio de una matriz de calificación (ver anexo Matriz de calificación de la literatura gris). Según Alison Cooke (2001), quien presentó lineamientos para revisar y valorar la información obtenida de las diversas fuentes de internet, definir parámetros para evaluar la información, es una estrategia que permite orientar al análisis de la temática estudiada.

Para la investigación se adaptaron los parámetros de calificación: pertinencia, fuente, cobertura de datos, actualidad del instrumento, aplicabilidad, calidad global de recurso. Cada uno varían entre 1 a 5, siendo 1 el valor más bajo y 5 el valor más alto. Es decir, se le asignó una calificación baja a los instrumentos que no aportaran información en el contexto de esta investigación y se le asignó una calificación alta a los instrumentos que contribuyeron a la identificación de VTU y SE.

3.2.3 Revisión sistemática

La revisión sistemática se realizó con el modelo PRISMA que proporciona un enfoque riguroso y estandarizado para síntesis de literatura obtenido en el análisis bibliométrico, garantizando la relevancia y confiabilidad de los documentos seleccionados. Así como también, minimizando el sesgo e influencias sobre la selección. El método está compuesto por 4 etapas, las cuales emplearon criterios de inclusión y exclusión como elemento

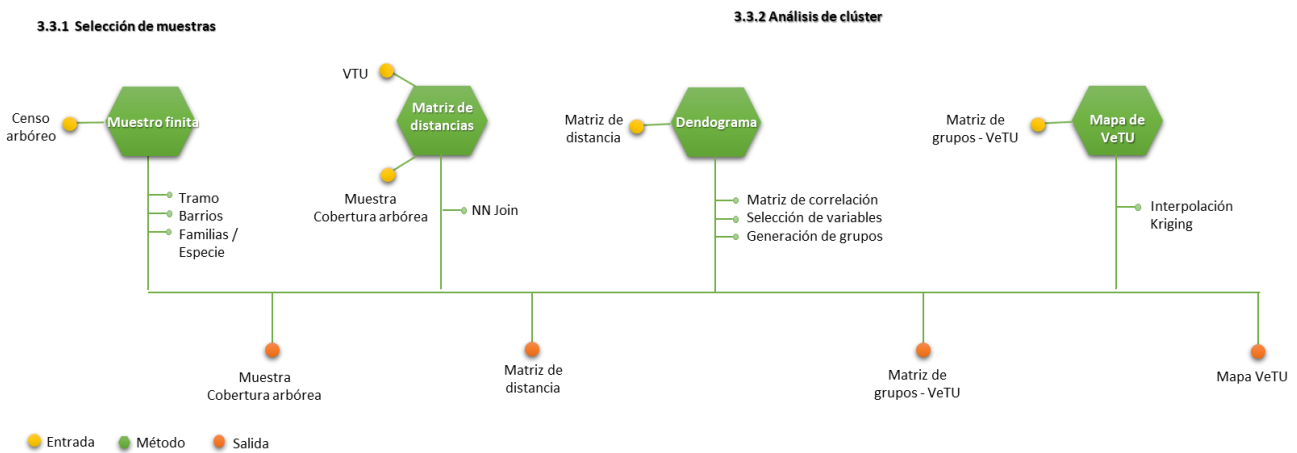
fundamental para la identificación de las VTU que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea y sus SE. Las etapas fueron las siguientes:

- **Identificación:** Hace referencia a la selección de información clasificada según la fuente.
- **Filtro:** Hace referencia a la delimitación y eliminación de la información que no está relacionada con las VTU y los SE.
- **Idoneidad:** Hace referencia a pertinencia de los documentos para identificar las VTU y los SE.
- **Inclusión:** Hace referencia a la consolidación de la información para la identificar las VTU y los SE.

3.3 Etapa II: Variables Territoriales Urbanas (VTU)

Para evaluar las VTU urbanas que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea, se empleó el método de análisis de conglomerados o clúster jerárquico a partir de la digitalización de las VTU y la cobertura de los árboles. Primero, se realizó el análisis espacial de la cobertura arbórea para seleccionar una muestra según la ubicación por barrios, familia y tramos del corredor del río Cali. Segundo, se calculó una matriz de distancias que es el resultado de establecer la distancia entre la muestra de la cobertura arbórea con cada VTU o seleccionar el valor de la VTU para la cobertura, por ejemplo, valor de densidad poblacional. Tercero, se determinaron los grupos o clúster de jerarquía por medio del análisis de conglomerados para seleccionar las VeTU. La Figura 7 ejemplifica el método utilizado.

Figura 7 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa II - VTU



Como datos de entrada se utilizaron las bases de datos geográficas del POT de Santiago de Cali y el censo arbóreo en formato .gdb (polígonos, puntos y líneas) obtenidas de los portales institucionales. El análisis de distancia se realizó con librería NNJoin y el análisis de clúster se realizó en ambiente de Jupyter Notebook. El objetivo de evaluar las VTU identificadas en la etapa I fue generar un mapa de clasificación del área de estudio según las VTU.

3.3.1 Selección de muestra de la cobertura arbórea

Según el Censo Arbóreo del año 2015, el área urbana del municipio de Cali tiene 141.304 árboles, de los cuales 16.458 se localizan dentro del área del corredor del río Cali. Para representar la distribución de la cobertura arbórea dentro de cada tramo se seleccionó una muestra mediante un muestreo estratificado por barrios (STR), ya que, según Jin and Yang (2020), es el método que tiene mejor desempeño comparado con el muestreo aleatorio simple (SRS) y el muestreo sistemático (SS). Utilizando la Ecuación 2 se caracterizaron las coberturas arbóreas según los barrios de cada tramo del corredor del río Cali, encontrando que el 3.7% de la muestra de la cobertura está en el tramo 1, el 2.4% en el tramo 2, el 3.4% en el tramo 3 y el 2.1% en el tramo 4.

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N - 1) + Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}$$

Ecuación 2 Muestra población finita

Donde: n es el tamaño de la muestra, N es el tamaño de población (tramo 1: 5.241, tramo 2: 3.446, tramo 3: 4.862, tramo 4: 2.909), Z es el nivel de confianza (95% para un valor de alfa de 1,96), p es probabilidad que ocurra el evento (50%), q es la probabilidad que no ocurra el evento (50%) y e es el error máximo aceptado de (3%)

3.3.2 Análisis de clúster - VeTU

Mediante el análisis de clúster se agruparon las variables con el criterio de homogeneidad (patrón) de distancia a la muestra de cobertura arbórea. Los grupos resultantes se formaron con todas las VTU, sin embargo, cada grupo jerarquiza la VTU según el criterio de homogeneidad. Las VeTU se seleccionaron como las variables que más influyen en la distribución de cobertura arbórea según el criterio de homogeneidad de distancia.

- ***Matriz de distancias***

Una vez seleccionada las muestras por tramos se calculan la matriz de distancia que es el resultado de la mínima distancia entre la cobertura arbórea y cada uno de los elementos de las VTU. Para realizarlo, se emplea el plugin NN Join de Qgis que une dos capas vectoriales (muestra y VTU) en función de las relaciones de vecinos más cercanos. Por ejemplo, la Figura 8 muestra como al realizar múltiples circunferencias con centro en el árbol con identificador 3G1103 y radio de 25,05 metros se intercepta con un elemento de la VTU Transporte, mientras que a 110,60 m se intercepta con un elemento de la VTU Equipamiento.

Figura 8 Esquema para el cálculo de la distancia mínima entre un árbol y las VTU



ID_ARBOL	Transporte	Equipamiento	Espacio público	Drenajes	Vía
3G1103	25,05	110,60	24,59	30,85	12,53

Nota: Datos tomados de POT de Cali (2014)

▪ **Dendograma**

Con el resultado de la matriz de distancia se realiza el análisis de cluster (conglomerados) que según Nor and Abdullah (2019), los análisis con dendrogramas han sido utilizados para visualizar y entender los patrones de agrupamiento en estas áreas de bosques urbanos, expone que *"el análisis de conglomerados utilizando dendrogramas permite identificar patrones de agrupamiento en las áreas de bosques similares en términos de su estructura, composición y diversidad de especies"*. Se emplea este análisis porque en el campo de la silvicultura permite agrupar áreas de bosques similares en términos de su estructura, composición y diversidad de especies.

Producto de la distribución espacial de la cobertura arbórea a partir del cálculo de distancias para cada VTU, se crea una matriz con los valores para cada árbol de la muestra por tramo con el propósito de generar el análisis de conglomerados jerárquico a partir de las librerías de Python. Se inició importando las librerías y la matriz con los valores de distancia para cada árbol. Posteriormente, se creó una matriz de correlación para identificar los coeficientes de correlación que permitan seleccionar las variables

independientes (normalizadas). Finalmente, se creó el dendograma para identificar el grupo de cada registro de la matriz de distancias.

- **Mapa de VeTU**

Para generar el mapa resultado de esta etapa se toma el resultado de los grupos obtenidos del dendograma (Grupos VTU) para asociarlo a cada registro de la muestra. Es decir, a la matriz de distancia de variables conformada por los 3385 registros de la muestra, se adicionó el valor correspondiente del grupo que oscilan entre 0 y n. Luego, por medio de interpolación Kriging se genera una superficie digital tomando como campo de magnitud el grupo. Cada punto de datos termina en un solo grupo donde el eje “x” del dendrograma representa las muestras en los datos y el eje “y” representa la distancia entre esas muestras. Para esta investigación, se definió como línea de corte la altura 16. Por lo tanto, cada polígono resultante de la superficie digital se agrupó por subgrupos desde 0-0 hasta n-i.

3.4 Etapa III: Servicios Ecosistémicos (SE)

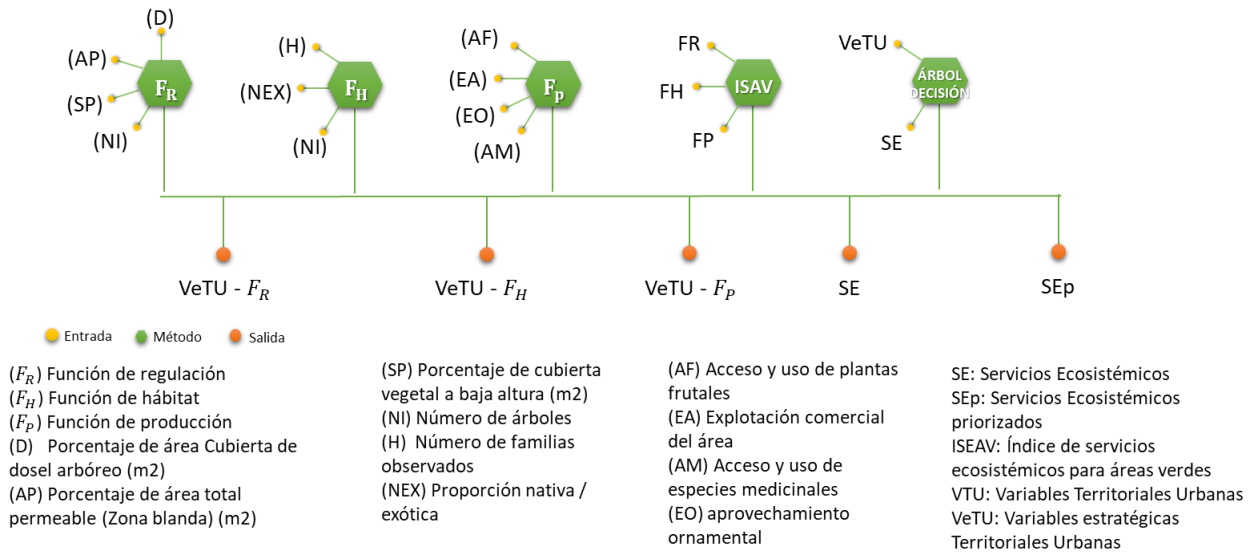
Para evaluar los SE asociados a las áreas urbanas con cobertura arbórea se establecieron indicadores que permiten cuantificar los bienes y servicios producidos por las Áreas urbanas con cobertura arbórea (Alam, Dupras, and Messier 2016; Dobbs, Escobedo, and Zipperer 2011; Dobbs, Kendal, and Nitschke 2014; Roeland et al. 2019; Speak et al. 2018). Teniendo en cuenta el alcance de la investigación y, en consecuencia, con la identificación obtenida en la etapa I de los Servicios Ecosistémicos, se seleccionaron aquellos servicios que permiten ser inferidos y/o cuantificados con herramientas de sistemas de información geográfica y sensores remotos, se clasificaron según las funciones ecosistémicas de Regulación, Hábitat (apoyo o soporte) y Producción (abastecimiento o provisionamiento).

Los servicios asociados a la función cultural (información) se excluyeron porque si bien 4 de las 5 investigaciones revisadas proponen métodos para cuantificarlos, no se enmarcan en el alcance de la investigación y mayormente los beneficios que se perciben son de carácter cualitativo e intangibles con limitación en la información (Gaudereto et al.

2018; Tian et al. 2022). La priorización de los SE se realizó con el análisis de árbol de decisión que integró el resultado de la etapa 3.3. La Figura 9 ejemplifica el método utilizado.

Figura 9 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa III - SE

3.4.1. Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV)



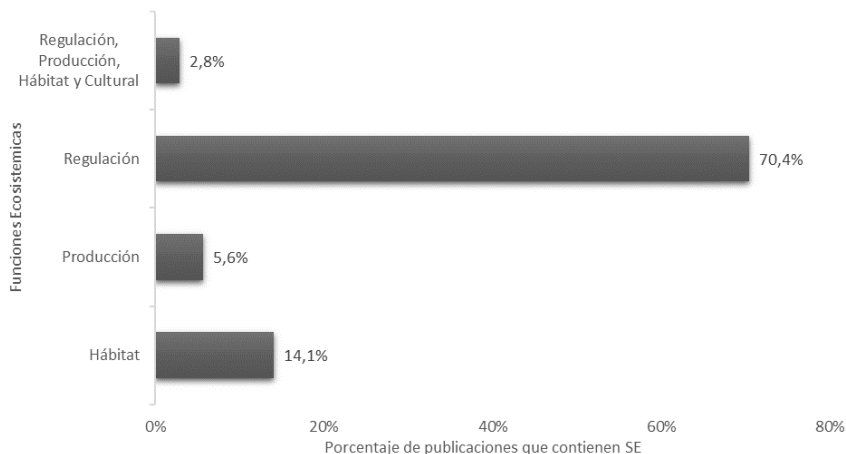
3.4.1 Adaptación del Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV)

El ISEAV propuesto por Gaudereto (2018) permite cuantificar las funciones ecosistémicas de regulación (FR), hábitat (FH) y producción (FP) a partir de la integración de múltiples indicadores que representan la calidad de los bienes y servicios producidos por los ecosistemas urbanos, como lo son: los parques, plazoletas, jardines, cementerios, bosques urbanos, pastos y entre otros (Szumacher & Malinowska, 2013). Para esa investigación se adaptó el método propuesto del ISEAV modificando los indicadores conforme a los servicios obtenidos de la literatura y el contexto del corredor del río Cali.

Dentro de las 115 publicaciones analizadas se identificaron 18 documentos relevantes para esta investigación para la temática de servicios ecosistémicos y silvicultura urbana (ver Anexo Lista de verificación PRISMA SE). La Figura 10 muestra que los servicios ecosistémicos de las funciones de regulación son los más estudiados en la

silvicultura urbana, específicamente los relacionados con la calidad del aire y fenómenos climáticos, representando el 25% sobre el total de servicios identificados.

Figura 10. Porcentaje de funciones ecosistémicas relacionadas en la literatura consultada para el periodo de 2010 a 2022



El ISEAV adaptado se calcula entre una escala de 0 a 10, donde 0 representa la mínima y 10 la máxima capacidad de los SE proporcionados en las áreas urbanas con cobertura arbórea. Cuando el cálculo de los índices de las funciones ecosistémicas (F_R , F_H y F_P), considere un mismo indicador para más de una función, se le asigna una ponderación al indicador equivalente al número de servicios asociados. Es decir, si para la función de regulación el indicador D de porcentaje de área total cubierta con dosel de árboles y arbustos esté asociado a n servicios, se le asigna una ponderación de n quedando $D = D_{(n)}$. Para estimar los indicadores se utilizaron herramientas de sistemas de información geográfica y fotogrametría para clasificar y digitalizar las áreas del corredor del río Cali. La escala para representar los servicios ecosistémicos es de 1:5.000 con exactitud horizontal 2,60 metros (confianza 95%). Es decir, las zonas cartografiadas tienen áreas superiores al 6,76 m²

- Función de regulación (F_R)

Se entiende como la capacidad de regular procesos para el sostenimiento de los ciclos biogeoquímicos y otros procesos de la biosfera (Costanza et al. 1998). Se calculó a

partir de la Ecuación 3. Función de regulación (F_R) que integró los indicadores de Cubierta de dosel arbóreo, superficie permeable, densidad arbórea y cubierta vegetal.

$$F_R = \frac{D_{(5)} + AP_{(5)} + SP_{(3)} + NI_{(5)}}{2,8}$$

Ecuación 3. Función de regulación (F_R)

Fuente: adaptado de Gaudereto (2018)

Donde D representa el porcentaje del total de área en metros cuadrados de Cubierta de dosel arbóreo. Para estimar este indicador se realiza una clasificación supervisada entrenada por puntos tomados en campo. El porcentaje obtenido se divide entre 10 para tener valores entre 0 y 10 para este indicador.

AP representa el porcentaje del total de área en metros cuadrados de la superficie permeable. Es decir, áreas compuestas de suelos porosos, estructurales que permitan el crecimiento de raíces con roca triturada, áreas o gravas y demás superficies que permitan la absorción del agua. Para estimar este indicador se realiza una clasificación supervisada entrenada por puntos tomados en campo. El porcentaje obtenido se divide entre 10 para tener valores entre 0 y 10 para este indicador.

SP representa el porcentaje del total de área en metros cuadrados con cubierta vegetal a baja altura (arbustales y herbazales). Para estimar este indicador se realiza una clasificación supervisada. El porcentaje obtenido se divide entre 10 para tener valores entre 0 y 10 para este indicador.

NI representa el número de árboles. Para estimar este indicador se utilizan los registros del censo arbóreo para cuantificar la cantidad de árboles por manzana y posteriormente normalizar el resultado para tener valores entre 0 y 10.

- La función de hábitat (F_H)

Se entiende como la capacidad de mantener los procesos de conservación de factores biológicos y evolutivos de la naturaleza (Costanza et al. 1998). Se calculó a partir de la Ecuación 4. Función de hábitat (F_H) que integró los indicadores de riqueza de especies y densidad arbórea:

$$F_H = \frac{H + NEX + NI}{2.7}$$

Ecuación 4. Función de hábitat (F_H)

Fuente: adaptado de Gaudereto (2018)

Donde H representa el número de familias observadas. Es decir, número de especies por familias. Para estimar este indicador se utilizan los atributos de cada registro del censo arbóreo para cuantificar la cantidad de familias por manzana y posteriormente normalizar el resultado para tener valores entre 0 y 10.

NEX Porcentaje de especies nativas y las exóticas. Para estimar este indicador se utilizan los atributos de cada registro del censo arbóreo para cuantificar la cantidad de individuos por manzana. El porcentaje obtenido se divide entre 10 para tener valores entre 0 y 10

NI representa el número de árboles. Para estimar este indicador se utilizan los registros del censo arbóreo para cuantificar la cantidad de árboles por manzana y posteriormente normalizar el resultado para tener valores entre 0 y 10.

- Función de Producción (F_P)

Se entiende como la capacidad para los procesos suministros de materias primas, alimentos y biomasa (Costanza et al. 1998). Se calculó a partir de la Ecuación 5. función de producción (F_P) que integró los indicadores de especies arbóreas:

$$F_P = \frac{AF + EA + AM_{(2)} + EO}{1.2}$$

Ecuación 5. función de producción (F_P)

Fuente: adaptado de Gaudereto (2018)

Donde AF representa el acceso y uso de plantas frutales. Se estima mediante una calificación de 0 a 3 a partir de la cantidad de especies identificadas en el censo arbóreo.

EA representa la explotación comercial del área. Se estima mediante una calificación de 0 a 3 a partir de la cantidad de especies identificadas en el censo arbóreo.

AM representa el acceso y uso de especies medicinales. Se estima mediante una calificación de 0 a 3 a partir de la cantidad de especies identificadas en el censo arbóreo.

EO representa el aprovechamiento ornamental del área. Se estima mediante una calificación de 0 a 3 a partir de la cantidad de espacios identificados en la ortoimagen

Finalmente, el índice se calculó con álgebra de mapas con base en la Ecuación 6. Índice de servicios ecosistémicos para áreas verdes. El resultado toma valores entre 0 y 10, representando capacidad alta para proporcionar SE las áreas que tienen valores entre 7-10, capacidad media para proporcionar SE las áreas que tienen valores entre 4 – 6 y capacidad baja para proporcionar SE las áreas que tienen valores entre 0 – 3.

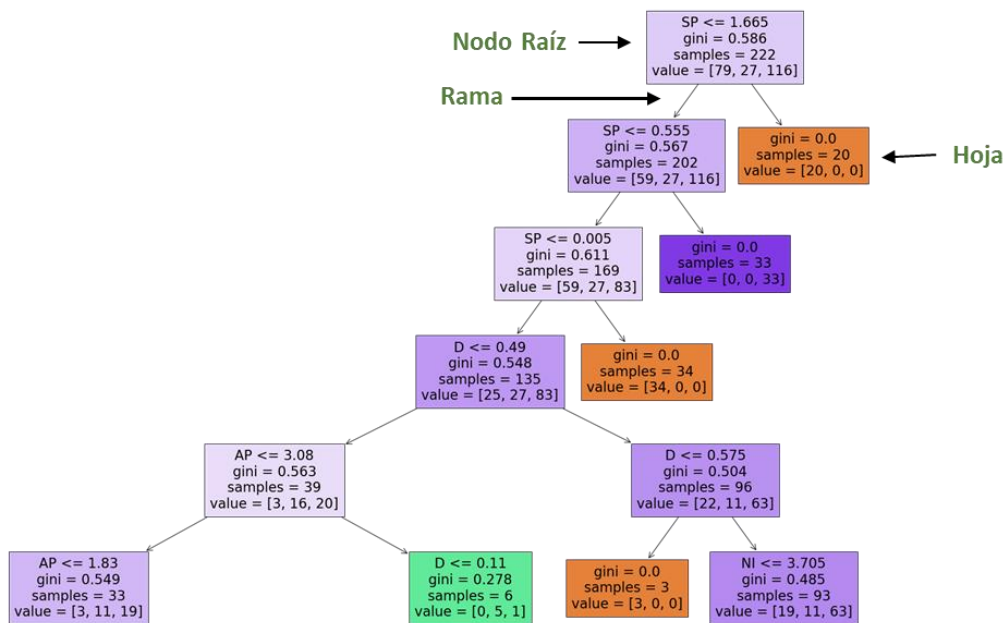
$$ISEAV = \frac{F_R + F_H + F_P}{3}$$

Ecuación 6. Índice de servicios ecosistémicos para áreas verdes
Fuente: Gaudereto (2018)

3.4.2 Análisis de árboles de decisión - SEp

Para la investigación se empleó el análisis de árbol para inferir los Servicios Ecosistémicos priorizados (SEp) del indicador que mejor discrimina el ISEAV 3.4.1. El análisis se realizó a partir del resultado de la evaluación de los grupos de VTU obtenido en la fase 3.3.2 y la evaluación de los SE mediante indicadores obtenidos en la fase 3.4.1. El proceso inicia con la identificación del nodo raíz que representa el indicador de la función ecosistémica que mejor discrimina los grupos de las VTU y establece la condición para el valor de corte para dicho indicador. Continúa con las ramas que representan la dirección para el cumplimiento de la condición, es decir, las ramas que tiene orientación hacia la derecha confirman la condición del nodo, por el contrario, las ramas con orientación hacia la izquierda rechazan la condición del nodo. El proceso de cada cumplimiento de la condición finaliza con las hojas que representan la categoría específica en las que se clasifican los grupos de las VTU según el ISEAV que representa los servicios ecosistémicos generados. La Figura 11 ejemplifica los nodos, ramas y hojas que forman las clases alta (naranja), medias (morado) y bajas (verde) del resultado del ISEAV:

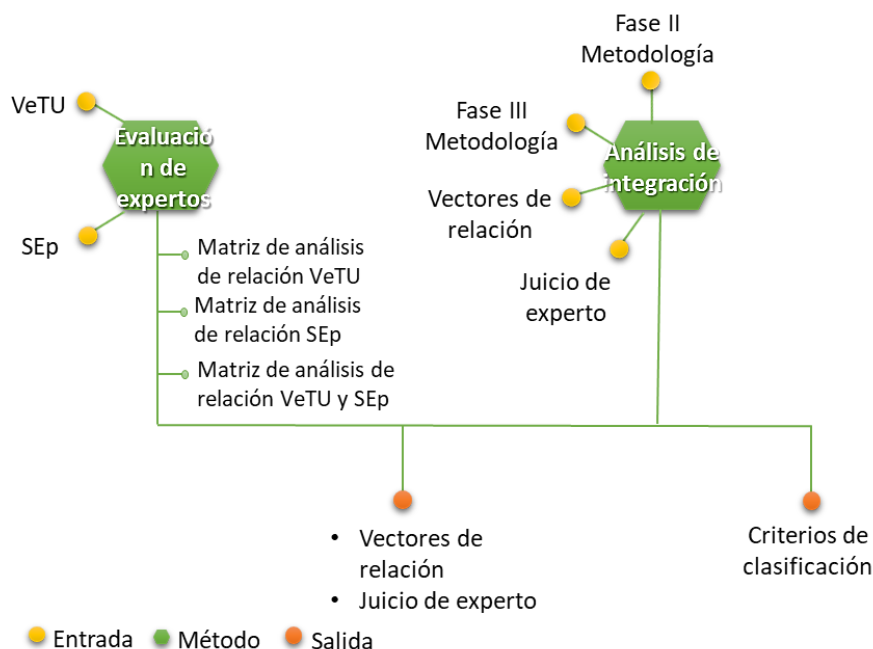
Figura 11 Diagrama de árbol de decisión para la identificación de los SEp obtenidos de la evaluación del ISEAV



3.5 Etapa IV: Criterios de clasificación

Para proponer los criterios de clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea se tuvieron en cuenta los resultados de las evaluaciones de las VeTU, SEp (Objetivos específicos 2 y 3) y las matrices de análisis de relación (evaluación de expertos). Este proceso se realizó por medio de un análisis de integración que, con base en el alcance de la investigación, seleccionó los elementos fundamentales que determinan las posibles categorías de las áreas urbanas con cobertura arbórea según los servicios ecosistémicos. La Figura 12 ejemplifica el método utilizado.

Figura 12 Diagrama metodológico de la investigación para la etapa IV – Criterios de clasificación



3.5.1 Relación VeTU y SEp

Para relacionar las VeTU y los SEp se realizó una evaluación o juicio de expertos diseñada con base en los principios del análisis estructural (Garza Villegas and Cortez Alejandro 2017; Rosales, León, and Ortiz-Paniagua 2023). Cada experto evaluó tres matrices: La primera matriz de doble entrada relacionó el grado de influencia entre las VeTU, la segunda matriz de doble entrada relacionó el grado de influencia entre los SEp y, la tercera matriz relacionó el grado de influencia entre las VeTU y los SEp.

En la evaluación participaron 6 expertos con amplia trayectoria académica y profesional en temas de silvicultura urbana y ordenamiento territorial (ver anexo 7.6). Teniendo en cuenta a Villegas, Cortez y Godet (2017; 2007), los expertos evaluaron cada matriz bajo los siguientes valores: En caso de no existir influencia positiva entre la VeTU y/o el SEp, se calificó con el valor de cero (0). En caso contrario, si existe influencia positiva, se calificó con cuatro puntuaciones: Uno (1) débil, dos (2) mediana, tres (3) fuerte o (P) potencial.

La Tabla 2 calificó el grado de incidencia entre las Variables Estratégicas. Para cada pareja de VeTU se planteó la siguiente pregunta: *¿Qué grado de influencia tiene la $VeTU_i$ sobre la $VeTU_j$ para la localización de áreas urbanas con cobertura arbórea?* La pregunta evalúa el efecto positivo que podría ejercer una VeTU sobre otra VeTU con respecto a la ubicación espacial de un área con cobertura arbórea. Es decir, teniendo como objetivo la cantidad de áreas urbanas con cobertura arbórea, una variable como el espacio público para el arbolado puede tener una influencia significativamente positiva en la selección de ubicaciones. Sin embargo, dicha influencia puede ser alterada por la variable jerarquización vial, con una vía cercana de alto tráfico.

Tabla 2. Matriz de análisis de relación VeTU

$VeTU_i \backslash VeTU_j$	Servicio Públicos	Amenaza	Jerarquización vial	Espacio Publico	Equipamiento
Servicio Públicos					
Amenaza					
Jerarquización vial					
Espacio Publico					
Equipamiento					

La Tabla 3 calificó el grado de incidencia entre servicios priorizados. Para cada pareja de SEp se planteó la siguiente pregunta: *¿Qué grado de influencia ejerce el SEp_i sobre las áreas con cobertura arbórea para beneficio del SEp_j ?* La pregunta evalúa cómo un servicio puede modificar la interrelación de las especies arbóreas con otros componentes del ecosistema. Es decir, valora el nivel de beneficio que un servicio como regulación de la calidad del aire puede ejercer sobre un área riberena u de ladera para alterar la prevención de erosión del suelo.

Tabla 3. Matriz de análisis de relación SEp

SEp_j \ SEp_i	Regulación del clima / Radiación	Regulación del ciclo del agua	Prevención de erosión del suelo	Almacenamiento de Carbono	Regulación de la calidad del aire/filtración	Regulación de emisiones
Regulación del clima / Radiación						
Regulación del ciclo del agua						
Prevención de erosión del suelo						
Almacenamiento de Carbono						
Regulación de la calidad del aire/filtración						
Regulación de emisiones						

La Tabla 4 calificó el grado de incidencia de la variable estratégica sobre el servicio priorizado. Para cada pareja de VeTU-SEp se planteó la siguiente pregunta: *¿Qué grado de influencia tiene la VeTU_i sobre las áreas con cobertura arbórea para beneficiar el SEp_j?* La pregunta consideró cómo una variable puede afectar la presencia y calidad de las áreas con cobertura arbórea y, a su vez, cómo esto influye en la provisión de los servicios. Siendo el caso, un equipamiento educativo podría alterar positivamente las áreas aledañas con cobertura arbórea, generando un incremento en la regulación de la calidad del aire.

Tabla 4. Matriz de análisis de relación VeTU y SEp

SEp_j \ $VeTU_i$	Regulación del clima / Radiación	Regulación del ciclo del agua	Prevención de erosión del suelo	Almacenamiento de Carbono	Regulación de la calidad del aire/filtración	Regulación de emisiones
Servicio Públicos						
Amenaza						
Jerarquización vial						
Espacio Público						
Equipamiento						

Para medir la confiabilidad y consistencia entre las calificaciones de cada matriz según el resultado de las evaluaciones realizadas por los expertos, se calculó el coeficiente de alfa de Cronbach que permitió identificar si las preguntas utilizadas en la evaluación midieron de manera consistente el objetivo de relacionar las VeTU y los SEp. El coeficiente se calculó a partir de la ecuación 7 (Cronbach 1951; Rodríguez-Rodríguez and Reguant-Álvarez 2020).

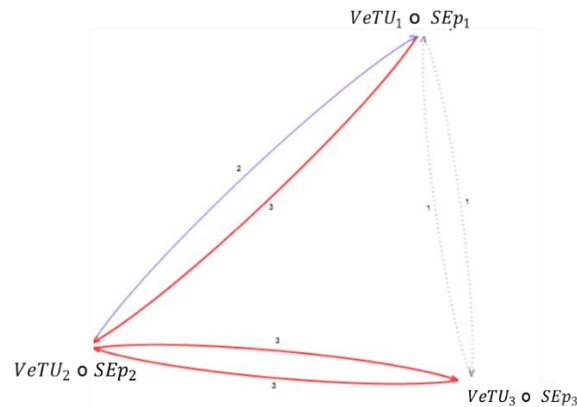
$$\alpha = \frac{k \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s_t^2} \right)}{k - 1}$$

Ecuación 7 alfa de Cronbach

Siendo k la calificación del experto, s_i la varianza de la calificación y s_t la varianza de las calificaciones totales de cada matriz. Cuando el coeficiente se acerca a valores de cero representa baja fiabilidad entre las calificaciones y cuando se acerca a valores de uno representa alta fiabilidad.

Con el resultado de las matrices de evaluación de cada experto y los valores de alfa de Cronbach, se consolidó una matriz que sintetizó las calificaciones y comentarios de los expertos. Posteriormente, con la matriz consolidada se identificaron las magnitudes de relaciones (valores entre 0 y 4) entre VeTU y/o SEp, para generar los vectores de relación que conectan cada VeTU y/o SEp. La magnitud de cada vector tiene la siguiente representación: Los vectores continuos y rojos denotan influencia muy fuerte, los vectores continuos y azules denotan influencia relativamente fuertes o moderada, los vectores continuos y negros denotan influencia débil y los vectores discontinuos denotan influencia muy débil. La Figura 13 ejemplifica las magnitudes de los vectores.

Figura 13 Esquema de los vectores de relación de influencia entre las VeTU y los SEp



La convergencia de los vectores determinó la motricidad y dependencia de cada relación. Es decir, Si la $VeTU_1$ o SEp_1 influye a la $VeTU_2$ o SEp_2 y, así mismo, la $VeTU_2$ o SEp_2 influye a la $VeTU_3$ o SEp_3 . Entonces, existe una relación indirecta entre $VeTU_1$ o SEp_1 y $VeTU_3$ o SEp_3 . Este proceso permitió identificar las tendencias y discrepancias según los comentarios y juicios de cada experto.

3.5.2 Formulación de criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea

Para construir los criterios se identificaron los aspectos claves proporcionados por las evaluaciones previas. La construcción implicó establecer pautas específicas que reflejaran los efectos y las dinámicas del territorio basados en la distribución de las coberturas arbóreas y los bienes y servicios. Bajo este enfoque, primero se abstraigo cada una de las relaciones identificadas por los expertos para analizar la motricidad y dependencia de cada relación. Posteriormente, se evaluó el requerimiento de complementar las variables o servicios identificados en la revisión sistemática. Finalmente, se concatenó lo anterior para formular y definir cada criterio. A partir de los criterios se plantearon categorías claves que pudieran clasificar y evaluar el estado de las áreas con cobertura arbórea para la planificación y gestión urbana.

- **Categorías de clasificación de áreas con cobertura arbórea**

Para proponer las categorías de clasificación se tuvo en cuenta el resultado del árbol de decisión que brindó los porcentajes de ocupación de áreas y los indicadores que

estimaron los SE. También, se tuvo en cuenta el resultado del análisis de clúster para cuantificar las distancias de las variables que influyen en la distribución espacial de la cobertura. A partir de estos dos resultados y con base en los criterios propuestos, se realizó la Tabla 5 que analiza la conectividad y la caracterización de las áreas con cobertura arbórea, para obtener tres categorías de clasificación que contribuyen a priorizar estas áreas. Las categorías complementan los criterios propuestos que aportan al ordenamiento adecuado y el equilibrio entre el aprovechamiento social, económico y de bienestar de los habitantes, conservando la estructura y función físico biótica del área urbana.

Tabla 5. Matriz de categorías de clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea

		Conectividad		
		Alta	Media	Baja
Caracterización	Área tipo 1	Categoría 1	Categoría 1	Categoría 2
	Área tipo 2	Categoría 1	Categoría 2	Categoría 2
	Área tipo 3	Categoría 2	Categoría 2	Categoría 3
	Área tipo 4	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 3

La categoría 1 hace referencia a las áreas que tienen condiciones para la preservación, el ordenamiento debe estar enfocado a permitir bajas intervenciones para mantener la integridad de los bienes y servicios que proporcionan. La categoría 2 hace referencia a las áreas que tienen condiciones para la conservación, el ordenamiento debe prevenir el deterioro y equilibrar el aprovechamiento de los bienes y servicios que proporcionan. La categoría 3 hace referencia a las áreas que tienen condiciones para la recuperación, el ordenamiento debe estimular las funciones del ecosistema para restaurar los bienes y servicios que proporcionan.

3.6 Etapa IV: Caso de estudio corredor Río Cali

En esta etapa se aplicaron los resultados obtenidos anteriormente. Por lo tanto, se seleccionó de la GDB del POT de Cali los polígonos dentro del área de estudio clasificados como parques, plazas, áreas verdes y cobertura arbórea. Posteriormente, se complementaron los polígonos mediante la digitalización y clasificación de las zonas identificadas en la ortofoto. Con el resultado se asociaron las coberturas

arbóreas a las clases de áreas urbanas, para finalmente aplicar los criterios de clasificación y categorizar cada área según la Tabla 5.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

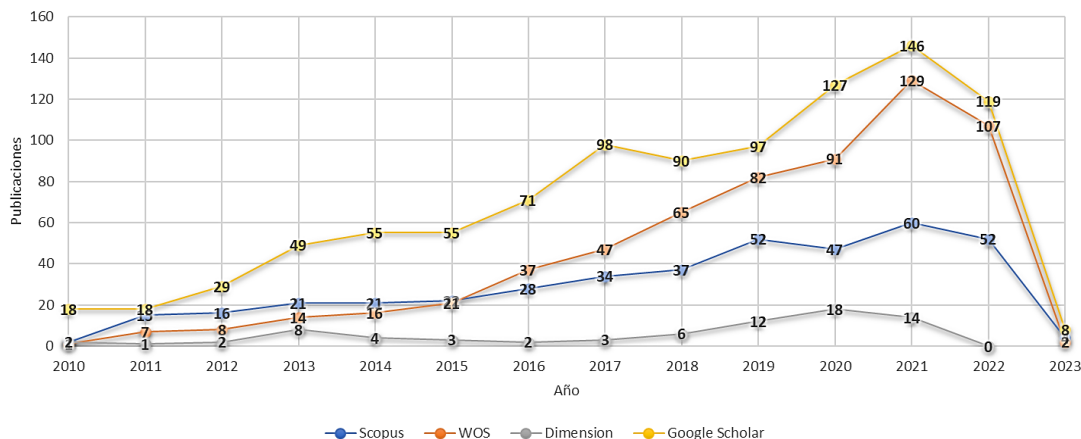
El análisis de las bases y fuentes de datos mostraron que hay una diferencia significativa de recurrencia, actualización y detalle entre los documentos académicos y la literatura gris. Mientras que para las bases de datos académica se logró identificar los autores más relevantes según redes de coautoría y producción, los documentos de la literatura gris tienen una baja periodicidad, razón por la cual, limita el análisis para determinar patrones de relevancia en la identificación de las VTU y, restringe la identificación de los SE generados por la cobertura arbórea.

Los resultados del análisis bibliométrico mostraron que los indicadores por autores, coautores, instituciones y tendencias temporales segmentan con precisión los diferentes enfoques para seleccionar las VTU y los SE, permitiendo comprender la aglomeración de las investigaciones. Por el contrario, los indicadores basados en palabras clave y coocurrencia de palabras presentan limitaciones por cambio y ambigüedad de términos, lo que conlleva a interpretar tendencias que no garantizan relaciones de causalidad. Las palabras clave más comunes pueden dominar el análisis, desplazando conceptos más específicos. Si bien, estos indicadores aportan información sobre la semántica de los documentos, es limitada la discriminación por relevancia.

La Figura 14 muestra que en las cuatro bases de datos consultadas hay un aumento lineal en las publicaciones durante el periodo (2010-2022) hasta el año 2021. Siendo Google Scholar la de mayores registros de publicaciones con 980, seguida por Web of Science con 627, Scopus con 411 y Dimension con 75. Como se mencionó en el apartado de metodología la base de datos de Google Scholar, si bien, es la que mayor registro de publicaciones contiene, también se evidenció que no cuenta con los parámetros de estandarización que permitan el análisis de coautoría ni frecuencias. A partir del 2021 se observa un decrecimiento en las publicaciones por año, esto se explica porque los datos

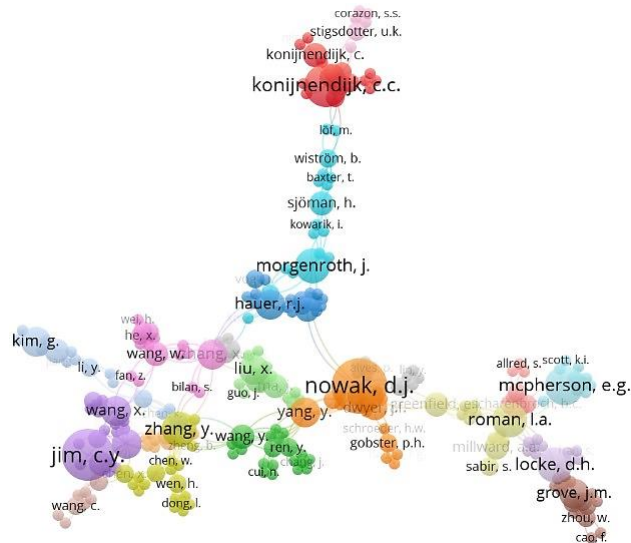
consultados fueron hasta el trimestre del año 2022 (periodo de inicio de la investigación), lo que conllevó a tener parcialmente registros para los años 2022 y 2023.

Figura 14 Frecuencia anual de estudios sobre silvicultura urbana y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023



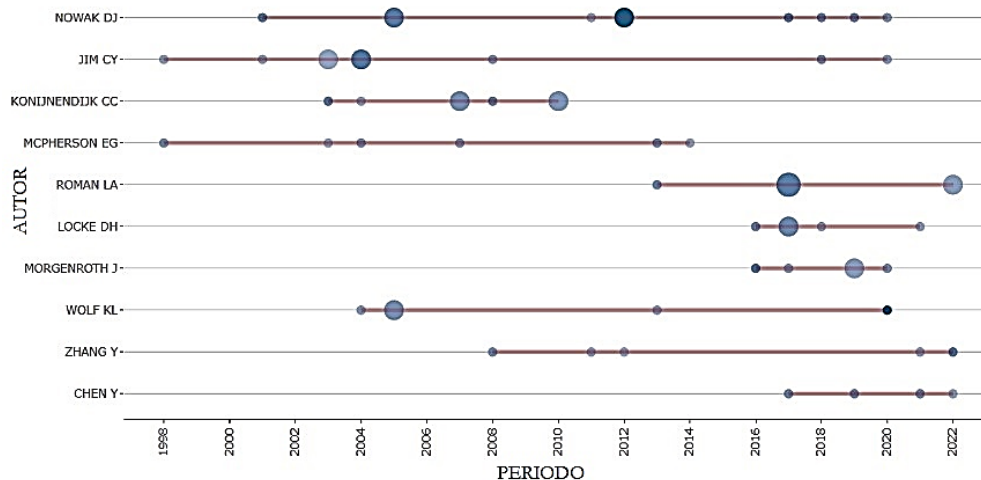
La Figura 15 muestra que para la temática investigada durante el periodo 2010 al 2023 hay 6 grandes redes de conexión lideradas por los autores Jim Cy (morado), Nowak Dj (naranja), Roman La (amarillo) y Morgenroth J (azul), Konijnendijk Cc (rojo), Mcpherson Eg (azul). Este resultado indicó que para abordar los objetivos específicos 1 y 2 relacionados con la identificación de VTU y SE, fue fundamental priorizar los documentos vinculados con las instituciones USDA Forest Service, University of California, University of Toronto, Swedish University of Agricultural Sciences, Chinese Academy of Sciences, dada la vinculación con los autores relevantes.

Figura 15 Autores relevantes por producción académica y redes de coautoría sobre silvicultura y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023



La Figura 16 muestra que si bien las redes de los autores Román y Morgenroth J no son las de mayor incidencia, actualmente son los autores más relevantes por citaciones. Esto indicó que el enfoque actual de las investigaciones está centrado en los factores sociales (participación comunitaria) y ecológicos de los sistemas forestales urbanos; también, se destaca la adopción de nuevas tecnologías de percepción remota para evaluar el crecimiento, función, gestión y servicios ecosistémicos de los árboles urbanos (De Gouw, Morgenroth, and Xu 2020; Roman et al. 2017). Se encontró que los autores Nowak D y Jim C (Escobedo) son los que históricamente han tenido mayor incidencia en la estructura y beneficios de las coberturas arbóreas (Jim 2004; Nowak et al. 2014, 2018). Una vez identificados los autores y enfoques se obtuvo que las fuentes más relevantes en publicaciones académicas son las revistas *Urban Forestry And Urban Greening*, *Landscape And Urban Planning*, *Forests*, *Arboriculture And Urban Forestry* y *Journal Of Forestry*.

Figura 16 Producción anual por autores sobre silvicultura urbana y servicios ecosistémicos para el periodo de 2010 a 2023



Según los análisis de instituciones y tendencias temporales se identifica que el artículo *A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones* de Roy, Sudipto (et al, 2012) tiene el 4,7% de las citas sobre los 30 documentos más relevantes. Este artículo permitió identificar los SE relacionados con la calidad del aire, energía, hábitat, ruido y microclima. Otro documento fue *Promoting and preserving biodiversity in the urban forest* de Alvey, Alexis A. (2006) con el 3,5% de las citas. A pesar que este documento no esté en el periodo de consulta se incluye en la revisión porque aborda las coberturas arbóreas como mecanismo de reverba de biodiversidad en los entornos de las calles, parques y áreas residenciales. La publicación *Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies*, resalta porque utiliza el modelo i-Tree Eco (software desarrollado por USDA que cuantifica en términos biofísicos y monetarios los servicios ecosistémicos) para integrar en el análisis de los SE las variables de densidad de población, equipamiento y transporte público.

Con respecto a la literatura gris se encontró que según los parámetros de:

- Pertinencia (A) para las 28 ciudades el promedio de calificación fue 4,2, obteniendo el 46% una calificación de 5 y el 0% una calificación de 1.

- Fuente (B) el promedio de calificación fue 4,3, obteniendo el 68% una calificación de 5 y el 14% una calificación de 1.
- Cobertura de datos (C) el promedio de calificación fue 4,8, obteniendo el 79% una calificación de 5 y el 0% una calificación de 1.
- Actualidad del instrumento (D) el promedio de calificación fue 3.8, obteniendo el 21% una calificación de 5 y el 4% una calificación de 1.
- Aplicabilidad (E), Muestra que para las 28 ciudades el promedio de calificación fue 3,8, obteniendo el 21% una calificación de 5 y el 7% una calificación de 1.
- Calidad global del recurso (F), al tener en cuenta otros referentes de ciudades de diferentes contextos regionales para dar validez a su instrumento de planificación el promedio de calificación fue 3,9, obteniendo el 14% una calificación de 5 y el 14% una calificación de 1.

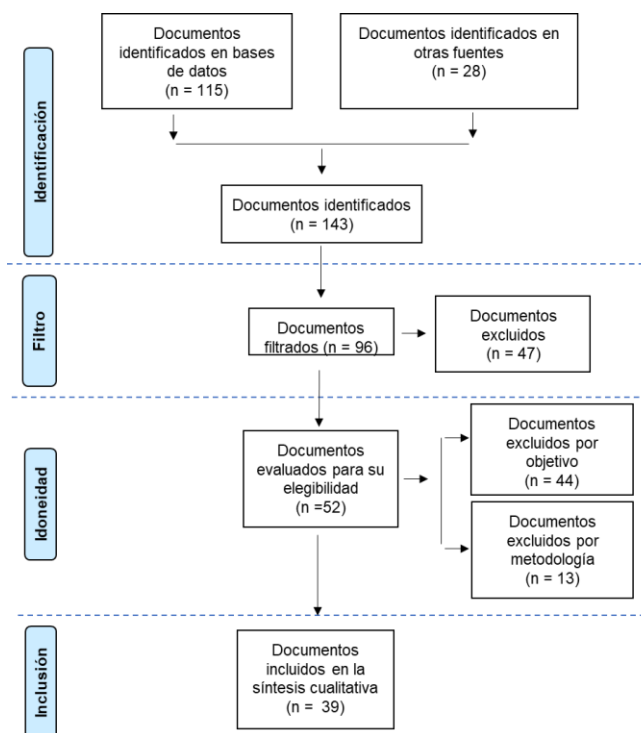
Con base en los resultados se logró identificar que el enfoque principal está centrado en el mejoramiento de la calidad del aire y la biodiversidad, así como a la reducción de la huella de carbono. En este sentido, se destaca el modelo de Vitoria-Gasteiz (España) y Ljubljana (Eslovenia) que han trabajado en la preservación de áreas naturales, basados en el diseño de parques como pequeños jardines urbanos para el uso públicos que formen una red de bosques urbanos y, junto a avenidas, bulevares y plazas, se conecten con el Cinturón.

4.1 Variables estratégicas Territoriales urbanas VTU

4.1.1 Identificación VTU

Una vez seleccionada la colección derivada del análisis bibliométrico, se obtuvieron 115 registros de documentos académicos y 28 registros de literatura gris para un total de 143 registros para la primera etapa de identificación. Posteriormente, en la segunda etapa se excluyeron 47 registros según la pertinencia de títulos y resumen dejando 96 registros filtrados. En la tercera etapa se excluyeron 44 registros por objetivos y 13 por metodología para dejar un total de 52 registros seleccionados por idoneidad. Finalmente, en la última etapa se analizaron 39 registros incluidos en el anexo Lista de verificación PRISMA - VTU. El resultado final de la revisión sistemática se presenta en la Figura 17

Figura 17 Resultado del diagrama de flujo para la selección de los documentos vinculados con la identificación de las VTU - Diagrama PRISMA



Teniendo en cuenta que la investigación es enfocada desde el análisis espacial de las áreas urbanas, las variables identificadas pretenden captar la complejidad de las diversas conexiones que existen entre los recursos naturales y los elementos urbanos construidos. Al comprender estas áreas como un sistema conformado por estructura físico – espacial, las VTU identificadas pretenden garantizar la interrelación de los elementos urbanos y la integralidad que según la literatura están estrechamente relacionadas con la calidad de vida de los ciudadanos (Mora-García 2016; Serag El Din et al. 2013). Con el resultado del análisis bibliométrico y revisión sistemática se identificaron 25 variables presentadas en la Tabla 6.

Tabla 6. Variables Territoriales Urbanas (VTU) Identificadas en la revisión sistemática

Componente	Variable	Unidad / dominio
Ecológico	Cobertura arbórea (inventario)	Individuo / familias
	Fauna (vectores de transporte)	Individuo / especies polinizadoras tales como abejas, mariposas, moscas, polillas, escarabajos y murciélagos
Físico	Temperatura	Celsius (°C)
	Precipitación	Milímetros (mm)
	Humedad	%HR
	Evapotranspiración	Milímetros (mm) / día
	Pendiente	Grados
	Vientos	km/h
	Altitud	msnm
	Radiación solar	kWh/m ²
Urbanístico	Jerarquización vial	Callejón
		Primaria
		Secundaria
		Terciaria
		Peatonal
		Vía Férrea
	Equipamiento	Administrativo
		Deportivo
		Educativo
		Religioso
		Sanitario
	Espacio público	Parque
		Plaza
Zonas Verdes		
Andén		
Pergola		
Boulevard		
	Patrimonio cultural	
	Glorieta	
Canal (drenajes)	Acequia	
	Canal	
	Nacimiento	
	Quebrada	
	Río	
	Zanjón	
Separador	Ancho (Mayor a 1,2 metros)	
	Angosto (Menor a 1,2 metros)	
Naturaleza predio	Privado	
	Público	
Tipo construcción	Edificio	
	Antejardín/Jardín	
	Propiedad Horizontal	
	Vivienda	
Transporte público	Estación	
	Terminal	
Servicios Públicos	Redes de acueducto	
	Redes de alcantarillado	
	Redes eléctricas	

Normativo	Uso del suelo	Agrícola Comercial Industrial Protección Recreativo Residencial
	Áreas Forestales declaradas de protección y/o conservación	Áreas de recreación Distritos de conservación de suelos Distritos de manejo integrado Parques naturales regionales PNN Reservas forestales protectoras Reservas naturales de la sociedad civil
Socio económico	Estratificación	Uno Dos Tres Cuatro Cinco Seis
	Densidad de población Densidad de vivienda	Población / Km ² Vivienda / km ²
Riesgo	Amenaza	Avenidas Torrenciales Incendios Inundaciones Movimientos en masa

Las VTU identificadas que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea fueron agrupadas en los siguientes 6 componentes:

- Ecológico: Agrupa las variables de tipo biológico que se encuentran en el territorio y pueden ser medidas para analizar su comportamiento, evolución y relación con otras variables del sistema urbano.
- Físico: Agrupa las variables que refieren a las características medibles y cuantificables del ambiente e influyen en la disponibilidad y uso de los recursos naturales urbanos
- Urbanístico: Agrupa las variables que refieren a los elementos medibles del entorno construido que determinan la planificación y gestión urbana.
- Normativo: Agrupa las variables relacionadas con los aspectos legales y regulatorios medibles que influyen en la distribución de las áreas urbanas y planificación de políticas públicas
- Socioeconómico: Agrupa las variables según dada las características y dinámicas que ejerce la población sobre las áreas urbanas e impactan en la planificación y gestión territorial.

- Riesgo: Agrupa las variables según las condiciones de las áreas urbanas susceptible de: un sistema, una comunidad o un elemento expuesto (vulnerabilidad) y los eventos o fenómenos naturales que pueden representar afectaciones a determinadas áreas (amenazas).

Teniendo en cuenta que las VTU presentadas en la Tabla 6 tienen una influencia en la distribución de la cobertura arbórea con relación al espacio disponible, se seleccionaron aquellas variables que se enmarcan en el alcance de la investigación y se tienen disponibilidad de información (procesamiento). Las siguientes son las VTU que se evaluaron para seleccionar las VeTU:

- Jerarquización vial (Jv): Esta variable hace referencia al sistema de categorización para la planificación y gestión de infraestructuras de tránsito.
- Equipamientos (Eq): Esta variable hace referencia al sistema de instalaciones, infraestructuras y servicios que proporciona un área urbana para satisfacer las necesidades de la comunidad.
- Espacio Público (Ep): Esta variable hace referencia a los lugares o espacios de dominio, uso y goce público del entorno natural o construido.
- Drenajes (Dj): Hace referencia al sistema de cuerpos de aguas naturales o artificiales (aguas pluviales o escorrentía) protegido para dirigir el flujo de agua de las áreas urbanas evitando afectaciones por fenómenos naturales o producidos.
- Separador (Se): Esta variable hace referencia a los elementos del diseño urbano para dividir o separar el tráfico en direcciones opuestas o para crear un espacio físico entre carriles de circulación en una misma dirección.
- Naturaleza del predio (Np): Esta variable hace referencia a la condición jurídica del tipo de propiedad de los bienes inmuebles del área urbana.
- Transporte público (Tp): Esta variable hace referencia a la infraestructura del sistema de transporte diseñado en las áreas urbanas para la movilidad de los habitantes.
- Servicios públicos (Sp): Esta variable hace referencia al sistema de servicios esenciales proporcionados por las entidades públicas o privadas para satisfacer las necesidades básicas de los habitantes.

- Áreas protegidas (Ap): Esta variable hace referencia al sistema de área destinadas, reguladas y administradas con el objetivo de la conservación.
- Densidad de población (Dp): Esta variable hace referencia al valor que describe el número de personas por determinada área.
- Densidad de vivienda (Dv): Esta variable hace referencia al valor que describe el número de viviendas por determinada área.
- Amenaza (Am): Esta variable hace referencia a las áreas o lugares con fenómenos geofísicos o biológicos.

4.1.2 Evaluación de VTU

▪ **Muestra de cobertura arbórea**

A partir de la Ecuación 2 Muestra población finita, se seleccionaron 3.358 registros del censo arbóreo. La Figura 18 y la Tabla 7 presentan la distribución de la muestra de 887 árboles localizados en 14 barrios. El tramo 1 tiene una extensión de 2.04 km² y un total de 5.241 árboles distribuidos en 48 familias, siendo las más representativas por cantidad de individuos Mimosaceae con 1.128 y Caesalpiniaceae con 1052.

Para el tramo 2 la Figura 19 y la Tabla 8 presentan la distribución de la muestra de 815 árboles localizados en 13 barrios. El tramo tiene una extensión de 1.18 km² y un total de 3.446 árboles distribuidos en 43 familias, siendo las más representativas por cantidad de individuos Palmae con 666 y Caesalpiniaceae con 613.

Para el tramo 3 la Figura 20 y la Tabla 9 presentan la distribución de la muestra de 875 árboles localizados en 15 barrios. El tramo tiene una extensión de 2.83 Km² y un total de 4.862 árboles distribuidos en 52 familias, siendo las más representativas por cantidad de individuos Caesalpiniaceae con 1.084 y Moraceae con 776.

Para el tramo 4 la Figura 21 y la Tabla 10 presentan la distribución de la muestra de 781 árboles localizados en 4 barrios. El tramo tiene una extensión de 1.40 Km² y un total de 2.909 árboles distribuidos en 39 familias, siendo las más representativas por cantidad de individuos Mimosaceae con 954 y Rutaceae con 469.

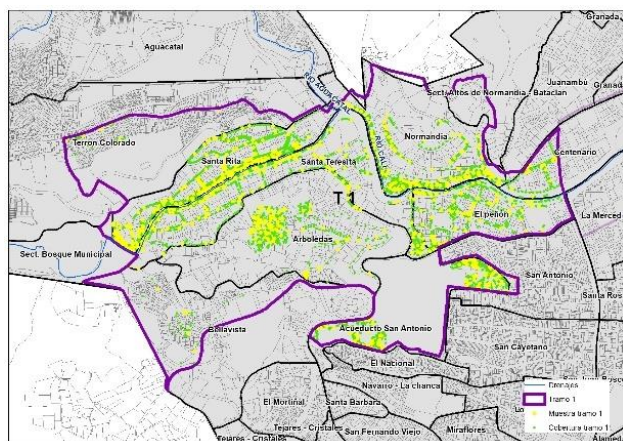


Figura 18 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 1

Tabla 7. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 1

Barrio	Total individuos	Muestra
1	552	93
2	13	2
3	709	120
4	31	5
5	124	21
6	497	84
7	121	20
8	721	122
9	23	4
10	1250	213
11	1153	195
12	37	6
14	10	2
Totales	5241	887

Barrios: 1.Acueducto San Antonio, 2. Aguaratal, 3. Arboleda, 4. Bella Vista, 5. Centenario, 6. El Peñón, 7. Juanambú, 8. Normandía, 9. San Antonio, 10. Santa Rita, 11. Santa Teresita, 12. Terron Colorado y 13. Versalles.

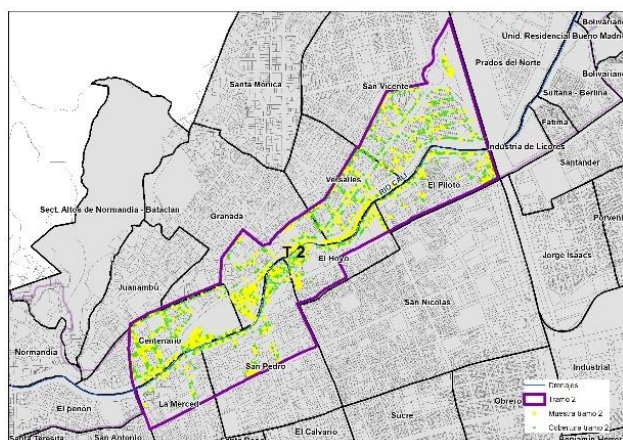


Figura 19 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 2

Tabla 8. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 2

Barrio	Total	Muestra
1	504	118
2	346	82
3	282	67
4	200	47
5	346	82
6	56	13
7	12	3
8	71	17
9	139	33
10	36	9
11	393	93
12	360	85
13	701	166
Totales	3446	815

Barrios: 1. CAM, 2. Centenario, 3. El Hoyo, 4. El Piloto, 5. Granada, 6. Industria de Licores, 7. Juanambú, 8. La Merced, 9. Paseo Bolívar, 10. Prados del Norte, 11. San Pedro, 12. San Vicente y 13. Versalles

Tabla 9. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 3

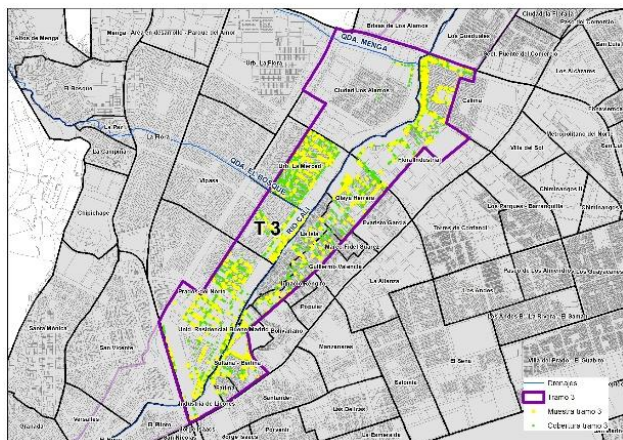


Figura 20 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 3

Barrio	Total individuo	Muestra
1	47	8
2	775	140
3	18	3
4	68	12
5	399	72
6	120	22
7	46	8
8	37	7
9	133	24
10	608	109
11	482	87
12	924	166
13	466	84
14	42	8
15	697	125
Totales	4862	875

Barrios: 1. Bolivariano 2. Calima 3. Ciudad Los Álamos 4 Fátima 5 Flora Industrial 6 Guillermo Valencia 7. Ignacio Rengifo 8 Industria de Licores 9 La isla 10 La Merced 11 Olaya Herrera 12 Prados del Norte 13 Sultana-Berlín 14 Unidad R.B. Madrid 15 Vípasa

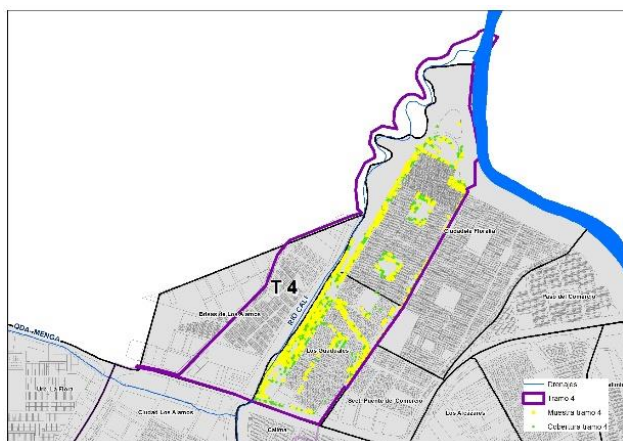


Figura 21 Muestreo estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 4

Tabla 10. Muestro estratificado por barrio de la cobertura arbórea para el tramo 4

Barrio	Total individuo	Muestra
1	7	2
2	1037	278
3	1864	500
4	1	0
Totales	2909	781

Barrios 1. Calima, 2. Ciudadela Floralia, 3. Los Guadales y 4. Paso Del Comercio (El arm)

-
- **VTU por distribución de distancia**

Una vez seleccionada la muestra del censo arbóreo y la digitalización de las VTU se calculó la matriz de distancia dando como resultado la Tabla 11 que muestra que la variable Separador (Sp) tiene la menor desviación en las distancias de la cobertura arbórea con 15,4 metros. Por el contrario, la variable áreas protegidas (Ap) tiene la mayor desviación con 1.135,9 metros. En cuanto a la asimetría, la variable naturaleza del predio tiene la mayor curva positiva y la variable áreas protegidas tiene la mayor curva negativa. La variable transporte público es la única que presenta una concentración normal (Mesocúrtica) de las distancias. El anexo Matriz de distancias VTU Vs CA, ejemplifica los primeros 20 registros del total de 3358 de la muestra.

Tabla 11. Resultado de Medidas de tendencia, dispersión y distribución de las VTU

Estadístico	Jv	Eq	Ep	Dj	Se	Np	Tp	Sp	Ap	Dp	Dv	Am
Total	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0	3358,0
mean	51,9	62,4	86,7	130,3	12,1	200,3	846,0	65,3	1835,6	137,8	34,5	180,3
Error	0,9	0,8	1,6	2,3	0,3	4,4	11,0	1,0	19,6	2,1	0,4	5,6
std	52,3	49,2	95,1	135,7	15,4	253,1	638,3	57,9	1135,9	124,1	25,4	324,2
Curtosis	3,4	0,3	0,5	2,4	3,1	4,3	0,0	0,4	-1,6	0,5	0,3	2,7
Asimetría	1,8	0,9	1,1	1,5	1,8	2,1	1,0	1,0	0,2	1,2	1,0	2,0
mínimo	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0
25%	13,1	23,3	0,0	26,5	1,3	25,3	371,7	17,2	775,4	53,0	17,0	0,0
50%	35,3	52,8	61,1	78,6	5,7	120,3	663,1	46,7	1488,9	109,0	28,0	0,0
75%	69,4	93,0	146,6	200,1	15,8	255,5	1108,9	102,7	3028,5	149,0	40,0	194,9
máximo	278,0	242,1	495,9	725,2	98,4	1452,0	2867,3	265,7	3829,8	474,0	128,0	1367,6

Donde Jv es Jerarquización vial, Eq es Equipamientos, Ep es Espacio Público, Dj es Drenajes, Se es Separador, Np es Naturaleza del predio, Tp es Transporte público, Sp es Servicios públicos, Ap es Áreas protegidas, Dp es Densidad de población, Dv es Densidad de vivienda, Am es riesgo.

La Figura 22 muestra que la única relación directa entre variables es la presentada entre la densidad de población (Dp) y densidad de vivienda (DV). En consecuencia, se excluyó del análisis del dendrograma la variable densidad de población. En menor medida y no significativa para la investigación, hay relación directa entre las variables Transporte público (Tp) y Naturaleza del predio (NP). Por el contrario, existe una correlación indirecta significativa entre las variables Áreas protegidas (Ap) y Transporte Público (Tp). En

consecuencia, las variables seleccionadas no miden la misma característica respecto a la distribución de la cobertura. El resultado de la correlación y la clasificación por grupos en el dendograma (ver Figura 23) logró establecer por similitud espacial la cobertura arbórea en 16 grupos a una distancia o línea de corte a nivel 2.

Figura 22 Resultado de la correlación de las distancias entre las VTU

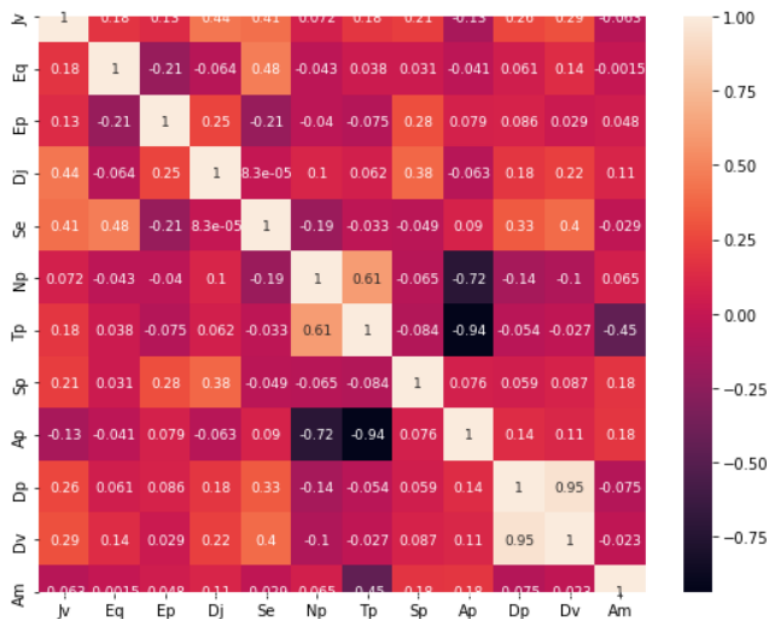
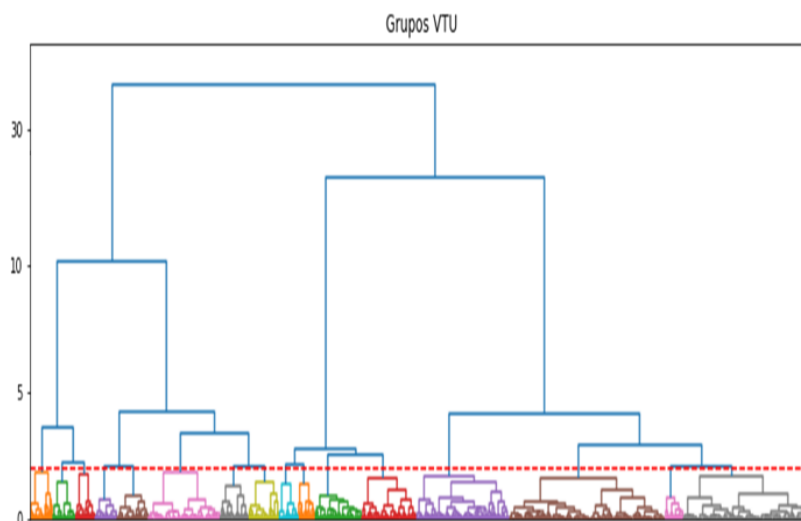
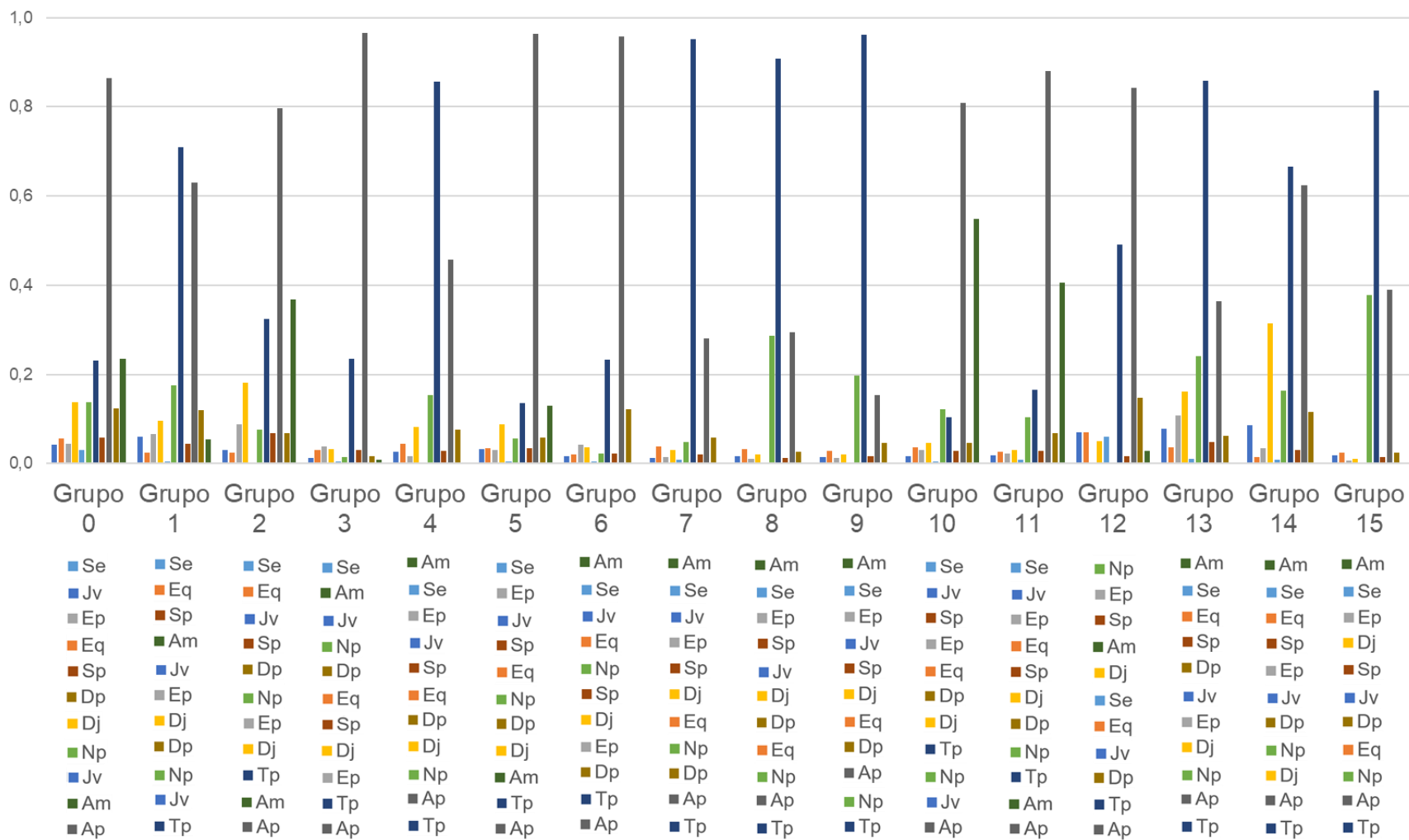


Figura 23 Resultado del dendograma para las distancias de las VTU



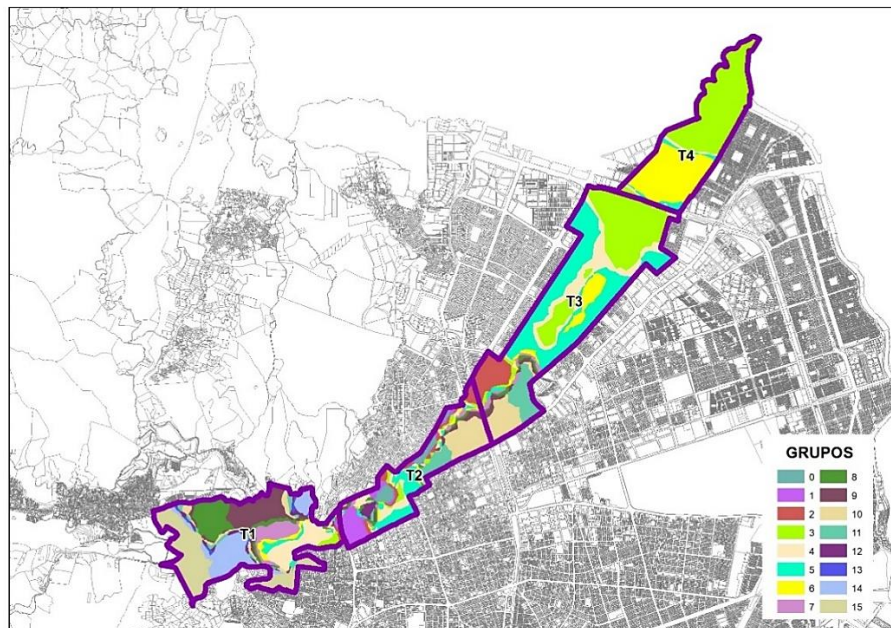
Como resultado del análisis de clúster se identificaron 16 grupos jerárquicos de variables estratégicas territoriales urbanas que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea. La Figura 24 muestra que las variables que más influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea para el grupo 3 son: Servicios públicos, riesgo y jerarquización vial. Para el grupo 6 son: Riesgo, servicios públicos y jerarquización vial. Para el grupo 5 son: servicios públicos, espacio público y jerarquización vial. Las variables que menos influyen en la distribución espacial son: transporte público para 8 de los 16 grupos y áreas protegidas para 8 de los 16 grupos. Los grupos más representativos por aglomeración de datos fueron el grupo 3 con el 20%, grupo 6 con el 17% y grupo 5 con el 12%. Siendo así, la jerarquía de las **VTU** es: Servicios públicos, amenaza, jerarquización vial, naturaleza del predio, densidad poblacional, equipamientos, separador, drenajes, espacio público, transporte y áreas protegidas.

Figura 24 Resultado de la distribución de distancias de VTU por grupos



A partir de los anteriores grupos se generó una superficie digital para representar de manera continua el comportamiento de las variables a lo largo del corredor del río Cali. De los 16 grupos se obtuvieron 222 subgrupos donde cada sub grupo representa un polígono. La Figura 25 muestra que los grupos 3 (verde), 6 (amarillo) y 5 (azul) con grandes áreas se localizan mayoritariamente en los tramos 3 y 4. Por el contrario, el tramo 1 y 2 contienen más grupos pero con menores áreas. Los grupos según la distancia de las variables a la cobertura arbórea, permitió identificar que existe una correspondencia directa entre la infraestructura de servicios públicos e infraestructura. Siendo así, se identificaron como **VeTU** las siguientes variables: Servicios públicos, amenaza, jerarquización vial, espacio público y equipamiento.

Figura 25 Mapa resultado de la distribución de distancias de VeTU por grupos



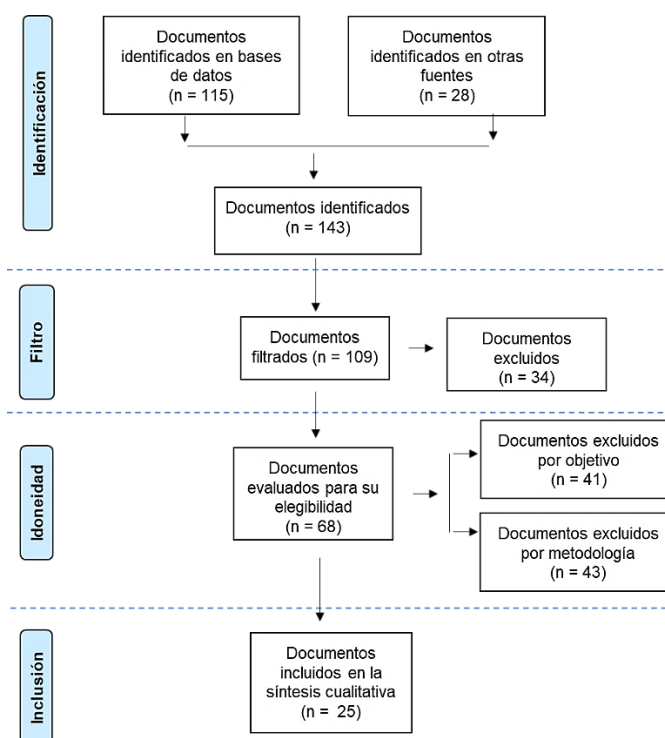
4.2 Servicios ecosistémicos priorizados SE

4.2.1 Identificación de SE

Una vez seleccionada la colección derivada del análisis bibliométrico, se obtuvieron 115 registros de documentos académicos y 28 registros de literatura gris para un total de 143 registros para la primera etapa de identificación. Posteriormente, en la segunda etapa se excluyeron 34 registros según la pertinencia de títulos y resumen dejando 109 registros

filtrados. En la tercera etapa se excluyeron 41 registros por objetivos y 43 por metodología para dejar un total de 68 registros seleccionados por idoneidad. Finalmente, en la última etapa se analizaron 25 registros incluidos en el anexo Lista de verificación PRISMA SE. En la Figura 26 se muestra el resultado de la revisión sistemática.

Figura 26 Resultado del diagrama de flujo para la selección de los documentos vinculados con la identificación de los SE - Diagrama PRISMA para los SE



Con el resultado del análisis bibliométrico y revisión sistemática se obtuvo la Tabla 12 compuesta por 18 SE y 5 indicadores que representan la calidad de los bienes y servicios producidos por las coberturas arbóreas.

Tabla 12. Indicadores y servicios ecosistémicos seleccionados del análisis bibliométrico y la revisión bibliográfica

Funciones ecosistémicas	Servicios Ecosistémicos	Indicadores
Función de Regulación (FR),	Almacenamiento de Carbono	Cubierta de dosel arbóreo (D)
	Regulación del clima / Radiación	Cubierta de dosel arbóreo (D)
		Cubierta vegetal a baja altura (SP)
	Regulación de la calidad del aire/filtración	Cubierta de dosel arbóreo (D)
	Regulación de emisiones	Número de árboles (NI)
		Cubierta de dosel arbóreo (D)
		Número de árboles (NI)
	Retención de nutrientes del suelo/Restauración	Superficie permeable (AP)
	Reducción de la escorrentía/aguas pluviales	Superficie permeable (AP)
	Regulación del ciclo del agua	Número de árboles (NI)
	Cubierta de dosel arbóreo (D)	
	Cubierta vegetal a baja altura (SP)	
	Superficie permeable (AP)	
	Filtro de contaminación y tratamiento de residuos	Superficie permeable (AP)
	Suministro de agua	Número de árboles (NI)
	Prevención de erosión del suelo	Superficie permeable (AP)
		Cubierta vegetal a baja altura (SP)
		Número de árboles (NI)
	Gestión de inundaciones	Superficie permeable (AP)
Función de Hábitat (FH)	Mantenimiento de biodiversidad / Familias	Especies nativas y las exóticas (NEX)
	Especies zoopolinización/Refugio	Número de árboles (NI)
		Número de familias (H)
	Formación del suelo	Especies nativas y las exóticas (NEX)
Función de Producción (FP)	Producción de granos, frutas, nueces y semillas	Acceso y uso de plantas frutales (AF)
	Producción de energía y nutrientes	Explotación comercial del área (EA)
	Producción de Leña	Explotación comercial del área (EA)
	Recursos medicinales	Acceso y uso de especies medicinales (AM)
	Recursos ornamentales / paisaje	Aprovechamiento ornamental del área (EO)

Nota: Adaptado de Gaudereto (2018)

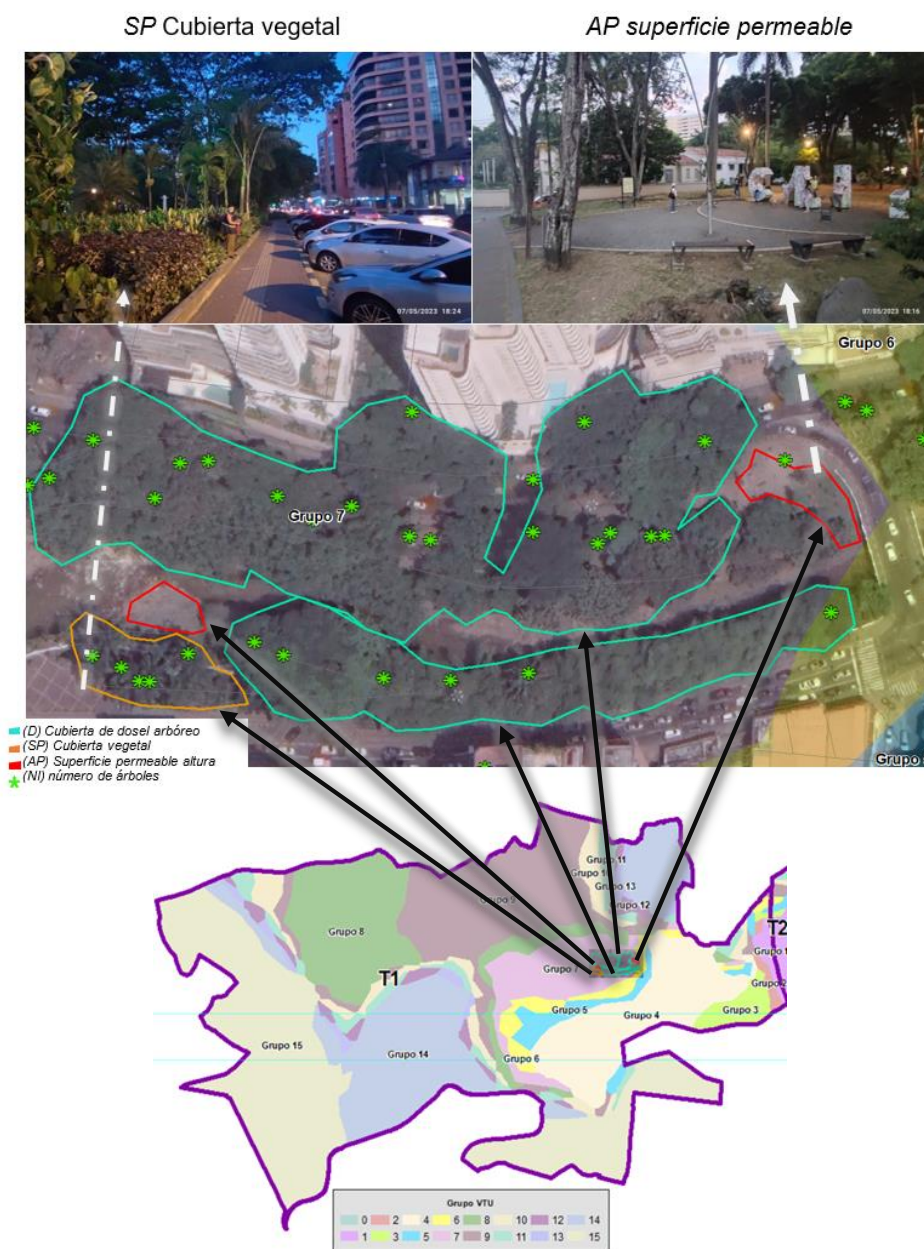
4.2.2 Evaluación de SE

▪ *Indicadores y funciones ecosistémicas*

Para la estimación de los indicadores que conforman las funciones de regulación (FR), hábitat (FH) y producción (FP) se logró espacializar el dosel arbóreo (D), la superficie permeable (AP) y la cubierta vegetal (SP) presentes en cada uno de los grupos de las VTU.

La Figura 27, ejemplifica en el tramo 1 la cubierta vegetal y superficie permeable. A lo largo del corredor se encontraron múltiples zonas con áreas pequeñas de aproximadamente 25 m² que fueron generalizadas hasta la unidad mínima cartografiada para la escala urbana de 1:2.000 que equivale a 64 m².

Figura 27. Ejemplo de la clasificación y digitalización de coberturas para el tramo 1 del corredor del río Cali



En la Figura 28 se observa que para la función de regulación (FR) se obtuvieron valores que van desde 2,3 para el grupo 14 y 9,8 para el grupo 03, con una media aproximada de 6,1 y mediana de 6,0, lo que sugiere que las estimaciones se distribuyen de manera simétrica en torno a la media. Para la función de hábitat (FH) se obtuvieron valores entre 1,3 para el grupo 12 y 9,8 para el grupo 3, con una media aproximada de 4,4 y mediana de 3,5 lo que sugiere que las mediciones están sesgadas hacia valores más bajos. Finalmente, para la función de producción (FP) se obtuvieron valores entre 0 para el grupo 13 y 9,2 para el grupo 3, con una media aproximada de 5,9 y una mediana de 5,8, lo que sugiere que las estimaciones se distribuyen de manera simétrica en torno a la media.

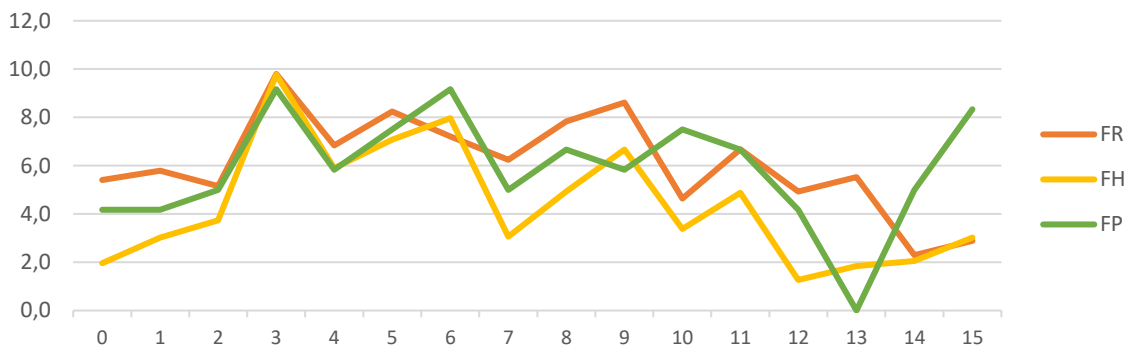


Figura 28 Estimación de funciones ecosistémicas

La función de regulación presenta menor grado de dispersión entre grupos de VeTU con una desviación de 2,0. Por el contrario, la función de hábitat presenta el mayor grado de dispersión entre grupos de VeTU con una desviación de 2,5. Para el grupo 3 obtuvo los valores más altos para las tres funciones ecosistémicas representando una alta capacidad para proporcionar los SE presentado en la Tabla 12. Por el contrario, el grupo 13 presenta mayor variabilidad entre las funciones y en general la menor capacidad.

La Tabla 13 condensa los resultados del Índice de Servicios Ecosistémicos para Áreas Verdes (ISEAV) para los 16 grupos obtenidos de las VTU. El índice tuvo valores altos para los grupos 3, 6, y 5, atribuido a la función de regulación en los índices AP y NI. Por el contrario, los grupos 12, 13 y 14 obtuvieron bajos valores, atribuido a la función hábitat para todos los indicadores. Con base en los resultados la función de regulación obtuvo los mayores valores y explica en gran medida las diferencias del índice entre los grupos.

Tabla 13. Funciones, SE y valor de indicadores generados en los grupo de VTU

Función	SE	Indicador	Grupo VTU															Promedio Indicador		
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15	
Función de regulación	Almacenamiento de Carbono	D	5,8	3,8	3,4	3,8	6,8	5,2	3,7	3,5	4,2	7,1	4,4	6,3	5,5	6,2	3,9	3,2	4,8	
	Regulación del clima / Radiación		4,6	9,8	8,5	7,6	8,0	5,8	6,3	8,9	8,8	8,3	3,9	5,3	3,2	6,2	0,8	0,6		
	Regulación de la calidad del aire/filtración		2,9	1,1	0,9	6,0	1,3	5,3	1,4	3,5	5,9	6,0	1,9	3,1	4,1	0,0	0,2	0,5		
	Regulación de emisiones		1,8	1,6	1,7	10,0	3,1	6,7	8,7	1,6	3,0	2,7	2,8	4,0	1,0	3,0	1,5	3,8		
	Regulación del ciclo del agua	AP	4,6	9,8	8,5	7,6	8,0	5,8	6,3	8,9	8,8	8,3	3,9	5,3	3,2	6,2	0,8	0,6		
	Prevención de erosión del suelo		2,9	1,1	0,9	6,0	1,3	5,3	1,4	3,5	5,9	6,0	1,9	3,1	4,1	0,0	0,2	0,5		
	Gestión de inundaciones	SP	2,9	1,1	0,9	6,0	1,3	5,3	1,4	3,5	5,9	6,0	1,9	3,1	4,1	0,0	0,2	0,5		
	Regulación del clima / Radiación		1,8	1,6	1,7	10,0	3,1	6,7	8,7	1,6	3,0	2,7	2,8	4,0	1,0	3,0	1,5	3,8		
	Regulación de la calidad del aire/filtración	NI	1,8	1,6	1,7	10,0	3,1	6,7	8,7	1,6	3,0	2,7	2,8	4,0	1,0	3,0	1,5	3,8		
	Reducción de la escorrentía/aguas pluviales		5,4	5,8	5,2	9,8	6,8	8,2	7,2	6,2	7,8	8,6	4,6	6,7	4,9	5,5	2,3	2,9		
Prevención de erosión del suelo	FR	5,4	5,8	5,2	9,8	6,8	8,2	7,2	6,2	7,8	8,6	4,6	6,7	4,9	5,5	2,3	2,9			
Suministro de agua	H	2,8	3,0	3,3	10,0	6,7	6,8	6,4	2,8	4,4	5,3	3,3	5,8	1,5	1,0	2,3	4,1			
Especies zoopolinización/Refugio		2,8	3,0	3,3	10,0	6,7	6,8	6,4	2,8	4,4	5,3	3,3	5,8	1,5	1,0	2,3	4,1			
SUB TOTAL	FR	5,4	5,8	5,2	9,8	6,8	8,2	7,2	6,2	7,8	8,6	4,6	6,7	4,9	5,5	2,3	2,9	6,1		
La función de hábitat	Especies zoopolinización/Refugio	H	2,8	3,0	3,3	10,0	6,7	6,8	6,4	2,8	4,4	5,3	3,3	5,8	1,5	1,0	2,3	4,1	3,7	
	Mantenimiento de biodiversidad / Familias	NEX	0,7	3,6	5,1	6,4	6,1	5,6	6,4	3,9	5,9	10,0	3,0	3,4	0,9	1,0	1,8	0,3	4,0	
	Formación del suelo	FH	2,0	3,0	3,7	9,8	5,9	7,1	8,0	3,1	4,9	6,7	3,4	4,9	1,3	1,8	2,1	3,0	4,4	
Función de Producción	Producción de granos, frutas, nueces y semillas	AF	1,0	1,0	1,0	3,0	2,0	2,0	3,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	1,0	0,0	2,0	2,0	1,9	
	Producción de Leña	EA	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	2,0		
	Producción de energía y nutrientes / agua		1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,2	
	Recursos medicinales	AM	1,0	1,0	2,0	3,0	2,0	2,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	0,0	1,0	3,0	1,8
	Recursos ornamentales / paisaje	EO	2,0	2,0	2,0	3,0	2,0	3,0	3,0	2,0	3,0	2,0	3,0	2,0	2,0	0,0	2,0	3,0	2,3	
	SUB TOTAL	FP	4,2	4,2	5,0	9,2	5,8	7,5	9,2	5,0	6,7	5,8	7,5	6,7	4,2	0,0	5,0	8,3	5,9	
TOTAL	ISEAV	3,8	4,3	4,6	9,6	6,2	7,6	8,1	4,8	6,5	7,0	5,2	6,1	3,5	2,5	3,1	4,8			

(F_H) Función de hábitat
(F_R) Función de regulación
(F_P) Función de producción
(H) Número de familias observados
(NEX) Proporción nativa / exótica

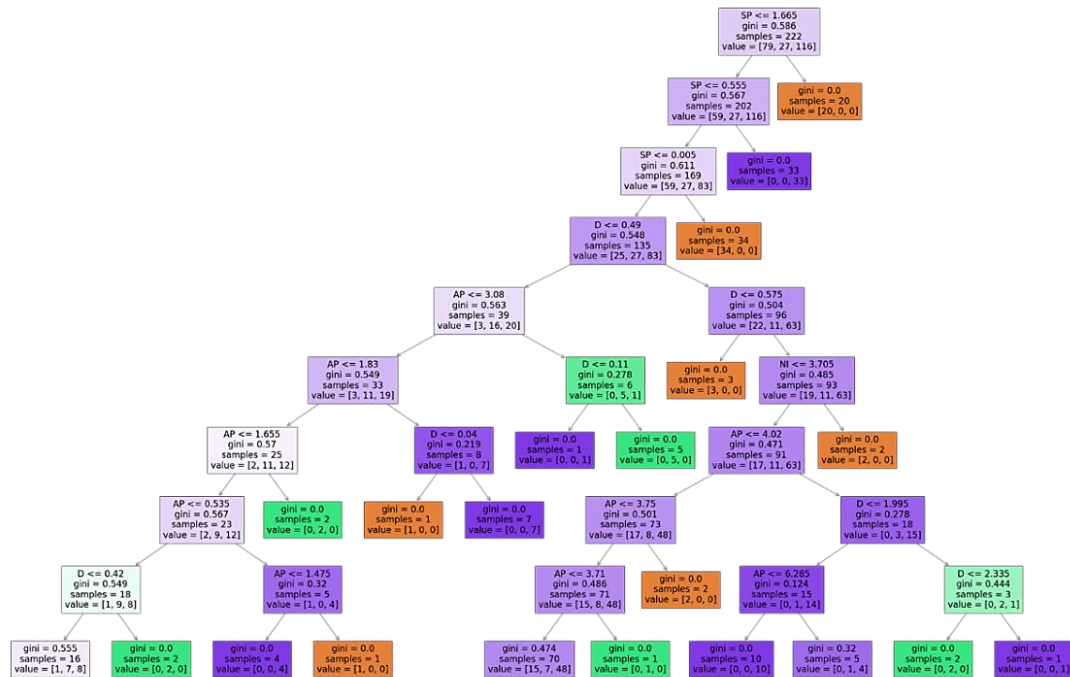
(D) Porcentaje de área Cubierta de dosel arbóreo (m2)
(AP) Porcentaje de área total permeable (Zona blanda) (m2)
(SP) Porcentaje de cubierta vegetal a baja altura (m2)
(NI) Número de árboles

(AF) Acceso y uso de plantas frutales
(EA) Explotación comercial del área
(AM) Acceso y uso de especies medicinales
(EO) aprovechamiento ornamental

▪ **SEp asociados a las áreas urbanas con cobertura arbórea**

La identificación inicial de los 16 grupos de VTU (4.2.2) permitió categorizar áreas según la influencia de cada VTU con respecto al distribución de la cobertura arbórea. Posteriormente, por medio de la cuantificación del ISEAV se priorizó los 10 indicadores para cada grupo de VTU. La Figura 29 presenta que el indicador SP es el de mayor relevancia para la clasificación de los grupos según las condiciones de los 3 primeros nodos. El nodo inicial contiene los 222 registros de subgrupos y según la condición de $SP \leq 1.665$ (áreas igual o menor de 16,6% con cubierta con cubierta vegetal a baja altura) 22 subgrupos tienen un alto ISEAV. La tonalidad de color naranja representa alto ISEAV, las tonalidades de color morado representan medio ISEAV y las tonalidades de color verde representa bajo ISEAV.

Figura 29 Resultado del árbol de decisión para los grupos de VTU y SE



El 4 nodo del árbol de decisión determinó que el indicador relevante es D (Cubierta de dosel arbóreo) y establece la condición $D \leq 0,49$ para 135 subgrupos. De esta condición se derivan las condiciones $AP \leq 3,08$ y $D \leq 0,575$ para 39 y 96 subgrupos respectivamente. Al identificar la relevancia de los indicadores y grupos para estimar la capacidad de las áreas para proporcionar SE, es vital cuantificar la impureza de la

clasificación. Siendo así, se determinó la profundidad del árbol a un nivel de 9, obteniendo como resultado 2 ramas en el último nivel con valor de Gini menores a 0,5.

La función de regulación es la que más aporta en condicionantes de indicadores para la clasificación de subgrupos (polígonos), estableciendo 18 subgrupos para el indicador AP, 12 subgrupos para el indicador D, 6 subgrupos para el indicador SP y 2 subgrupos para el indicador NI. De los 222 subgrupos 79 se clasificaron en ISEAV alto que comprende los valores entre 7 a 10, 116 subgrupos se clasificaron medio que comprende los valores de ISEAV entre 4 a 6, y 27 subgrupos se clasificaron bajo que comprende los valores de ISEAV entre 0 a 3. Los anteriores resultados indican que los SEp según la VTU son regulación del clima / Radiación, Regulación del ciclo del agua, Prevención de erosión del suelo, Almacenamiento de Carbono, Regulación de la calidad del aire/filtración y Regulación de emisiones.

4.3 Criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea

4.3.1 Relación de las VeTU y los SEp

El grupo de expertos que participó en la evaluación estuvo conformado por 3 funcionarios institucionales y 3 profesores universitarios. El grupo ofreció diversas perspectivas sobre la cobertura arbórea en entornos urbanos en función de sus saberes y experiencias profesionales. Cada experto calificó las 3 matrices de análisis de relación, obteniendo 76 registros de calificaciones que fueron confrontados para determinar la consistencia y fiabilidad de la evaluación.

Para la matriz de análisis de relación VeTU se obtuvo un coeficiente de Alfa de Cronbach de 0.909 para 20 VeTU lo que indica alta consistencia interna, es decir, las evaluaciones de los expertos están estrechamente relacionados para cada par de VeTU. La Tabla 14 muestra que las variables Servicio Públicos vs Jerarquización vial (0,954) y Jerarquización vial vs Amenaza (0,904) tienen altos coeficientes de homogeneidad lo que sugiere que ambas variables miden la misma relación, como se resalta en la tabla. Además, se presentan bajos coeficientes de homogeneidad para las variables

Equipamiento vs Espacio Público (-0,314) y Jerarquización vial vs Equipamiento (-0,14), esto sugiere que las variables pueden medir aspectos diferentes o incluso opuestos con relación a la pregunta de evaluación. Es decir, el grado de influencia evaluado por los expertos para estas parejas no mostró consistencia interna.

Tabla 14. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación VeTU

$VeTU_i \backslash VeTU_j$	Servicio Públicos	Amenaza	Jerarquización vial	Espacio Publico	Equipamiento
Servicio Públicos		0,827	0,954	0,856	0,042
Amenaza	0,226		0,676	0,548	0,285
Jerarquización vial	0,909	0,904		0,173	-0,14
Espacio Publico	0,581	0,815	0,674		0,252
Equipamiento	0,674	0,856	0,463	-0,314	

Para la matriz de análisis de relación SEp se obtuvo un coeficiente de Alfa de Cronbach de 0.932 para 26 SEp lo que indica alta consistencia internas para cada par de SEp. La Tabla 15 muestra que los servicios de Regulación del clima / Radiación vs Prevención de erosión del suelo (0.996) tienen altos coeficientes de homogeneidad lo que sugiere que ambos servicios miden la misma relación. También, presenta bajos coeficientes de homogeneidad para los servicios Prevención de erosión del suelo vs Regulación de emisiones (-0.454).

Tabla 15. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación SEp

$SEp_j \backslash SEp_i$	Regulación del clima / Radiación	Regulación del ciclo del agua	Prevención de erosión del suelo	Almacenamiento de Carbono	Regulación de la calidad del aire/filtración	Regulación de emisiones
Regulación del clima / Radiación			0,996	0,962	0,996	0,928
Regulación del ciclo del agua	0,404		0,404	0,805		0,189
Prevención de erosión del suelo	0,996	0,805		0,805	0,996	-0,454
Almacenamiento de Carbono	0,784	0,893	0,901		0,404	
Regulación de la calidad del aire/filtración	0,901	0,546	0,805	0,027		
Regulación de emisiones	0,796	0,027	0,524	0,962	0,404	

Para la matriz de análisis de relación VeTU y SEp se obtuvo un coeficiente de Alfa de Cronbach de 0.97 para 30 entradas de VeTU y SEp. Este valor de coeficiente sugiere que las calificaciones de los expertos pudieron caer en redundancia. Para el objetivo de la evaluación este valor se consideró confiable porque valida la convergencia de las respuestas. La Tabla 16 muestra altos coeficientes de homogeneidad en línea con el valor de Alfa de Cronbach. Se destaca que las variables Jerarquización vial y Espacio público son las que presentan los mayores coeficientes de homogeneidad para cada SEp

Tabla 16. Correlación total de elementos para la matriz de análisis de relación VeTU y SEp

$SEp_j \backslash VeTU_i$	Regulación del clima / Radiación	Regulación del ciclo del agua	Prevención de erosión del suelo	Almacenamiento de Carbono	Regulación de la calidad del aire/filtración	Regulación de emisiones
Servicio Públicos	0,72	0,907	0,74	0,972	0,486	0,819
Amenaza	0,778	0,835	0,787	0,616	0,163	0,593
Jerarquización vial	0,948	0,571	0,948	0,593	0,998	0,998
Espacio Publico	0,976	0,976	0,715	0,74	0,976	0,976
Equipamiento	0,796	0,846	0,879	0,599	0,703	0,872

▪ **Vectores de relación**

Las 18 matrices evaluadas por los expertos y validadas por fiabilidad de las calificaciones dieron como resultado la Tabla 17 presenta la matriz de influencia positiva. La tabla permitió identificar el grado de intensidad de relaciones donde 0 representa nula influencia, 1 influencia débil, 2 influencia mediana, 3 influencia fuerte y 4 influencia potencial. También, se logró identificar mediante el cruce entre las VeTU y los SEp la motricidad y dependencia para establecer vectores de magnitudes.

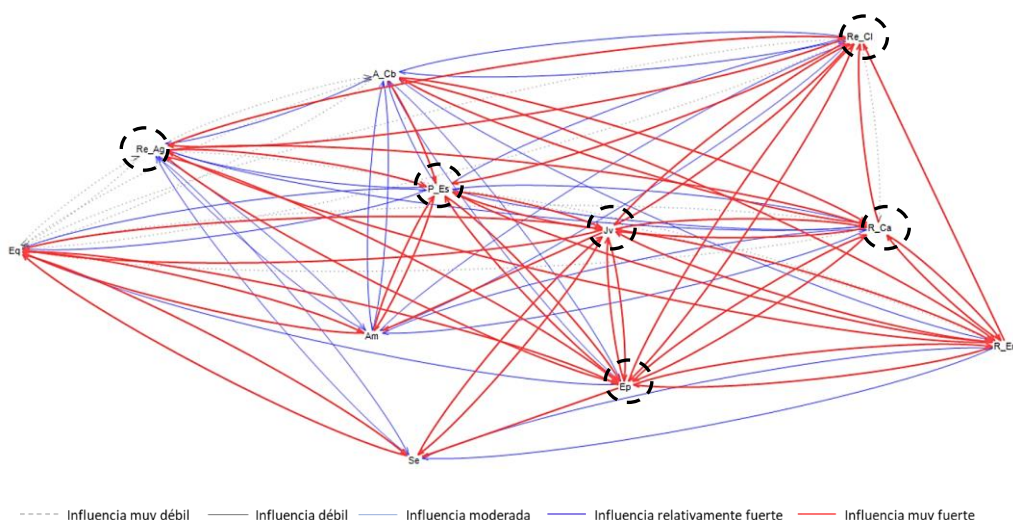
Tabla 17. Resultado de la Matriz de análisis de relación VeTU y SEp

<i>VeTU_i</i>	<i>SEp_j</i>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Servicios Públicos		0	3	4	3	0	2	4	4	0	2
2. Amenaza	0		0	0	3	2	2	3	2	2	4
3. Jerarquización vial	3	3		3	3	3	0	3	0	3	3
4. Espacio Público	3	0	3		2	3	3	3	2	3	3
5. Equipamiento	3	3	3	3		1	1	2	1	1	4
6. Regulación del clima / Radiación	0	2	3	3	1		3	3	2	1	0
7. Regulación del ciclo del agua	2	2	0	3	1	3		3	1	3	1
8. Prevención de erosión del suelo	4	3	3	3	2	2	2		2	2	1
9. Almacenamiento de Carbono	4	2	0	2	1	2	2	3		3	3
10. Regulación de la calidad del aire/filtración	0	2	3	3	1	3	2	2	3		3
11. Regulación de emisiones	2	4	3	3	4	3	3	3	2	3	

La Figura 30 muestra que la VeTU Jerarquización vial (Jv), Espacio Público (Ep) y, los SEp de Regulación de la calidad del aire/filtración (R_Ca), Regulación del ciclo del agua (Re_Ag), Regulación del clima / Radiación (Re_Cl) y Prevención de erosión del suelo (P_Es) generan y reciben influencias directas fuertes en los vectores de relaciones. Mientras que las VeTU de Equipamiento (Eq) y el SEp de Almacenamiento de Carbono (A_Cb) generan influencia directa fuerte en los demás vectores de relación. Las VeTU de Servicio Públicos (Se) y Amenazas (Am) generan y reciben influencia directa débil en los vectores de relaciones. Mediante el gráfico se identificó que la Regulación de la calidad del aire es el servicio que tiene mayor dependencia dentro del análisis de relación. También,

es el servicio que tiene las relaciones de mayor influencia para la alteración de los demás SEp.

Figura 30 Vectores de relaciones de influencia directa entre las VeTU y los SEp



4.3.2 Formulación de criterios de clasificación

Con el resultado del análisis de relación (4.3) que tuvo como bases las variables estratégicas (4.1) y los servicios priorizados (4.2), se determinó que la metodología desarrollada estableció las bases para dar respuesta a la pregunta de investigación y, por lo tanto, no se requiere adicionar variables o servicios para formular los criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea. Es importante señalar que la revisión sistemática permitió conocer, desde lo ecológico, físico, urbanístico, normativo, socioeconómico y riesgo, las variables que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea para diferentes contextos. Por otro lado, los servicios ecosistémicos se abordaron desde el grupo de funciones y no de manera individual, lo que permitió realizar el análisis holístico.

De la evaluación de la matriz de análisis de relación se identificó que es fundamental el contexto y la unidad/dominio de cada VeTU. Esto quiere decir que, los criterios propuestos consideran el “*lugar*” para clasificar las áreas urbanas de cobertura dadas la influencia de las VeTU. Así mismo, consideran los “*valores*” que puede tomar cada variable

para alterar su influencia sobre el área con cobertura. En el ítem 4.1 se presentaron por componentes las VTU identificada de la revisión sistemática de la literatura académica y literatura gris. Luego, con el resultado de las evaluaciones por distribución de distancia del ítem 4.1.2 y la evaluación de expertos del ítem 3.5.1, se obtuvo que las variables Jerarquización vial (Jv) y Espacio Público (Ep) son la base para localizar las áreas urbanas con cobertura arbórea.

Dominios de Jerarquización vial, como calles peatonales, vías secundarias, vías férreas, etc., proveen alternativas estratégicas para impactar positivamente los SE mediante la localización de áreas con cobertura arbórea. Las vías consideradas como una variable de integración o conexión aportan no solo al paisaje urbano, sino que también influyen en aumentar SE relacionado con la calidad del aire, regulación de temperatura, movilidad activa e interacción social. A diferencia de la jerarquización vial, la variable espacios públicos con dominio de parques, plazas, zonas verdes y boulevard, etc., no se considera como una variable de integración, por el contrario, se puede considerar como áreas para la consolidación de la cobertura arbórea. Esta variable brinda espacios idóneos para influir en SE relacionados con la recreación, el esparcimiento, conservación de la biodiversidad y valor estético.

Para proponer los criterios de clasificación también se tuvieron en cuenta aspectos como la necesidad de distribución equitativa de las áreas, diversidad de especies nativas y exóticas, gestión del recurso hídrico y valoración socioeconómica del entorno urbano. En este sentido, los SE base de los criterios son aquellos que brindan beneficios, contribuyen al bienestar y funcionamiento de los sistemas urbanos. Los servicios de regulación del clima (Re_Cl), regulación de la calidad del aire (R_Ca), regulación del ciclo del agua (Re_Ag) y Prevención de erosión del suelo (P_Es) son los esenciales para el diseño y planificación de las áreas urbanas para garantizar la calidad de vida sostenible y un entorno urbano saludable.

- ***Criterios de clasificación***

Los criterios de clasificación se formularon para brindar una herramienta que contribuya al óptimo uso y ordenamiento del recurso forestal y así, alcanzar el objetivo de desarrollo sostenible 11 y 15 en el marco de la sostenibilidad, acceso a áreas naturales y

protección de la biodiversidad. Dada la necesidad de implementar un enfoque integral que permita conservar y aumentar los beneficios de las áreas urbanas con cobertura arbórea, esta investigación propone los siguientes criterios que desde un proceso de planificación permita clasificar y priorización las áreas arbóreas en función de los servicios ecosistémicos que ofrecen.

1. **Número de VeTU relacionadas con el área de cobertura arbórea:** Este criterio hace referencia a la cantidad de variables (elementos naturales o artificiales) que son consideradas como estratégicas porque cumplen la premisa de influir o alterar la distribución de la cobertura arbórea. Permite caracterizar la complejidad del territorio identificando los trazos urbanos y sus conexiones.
2. **Número de SEp relacionados con el área de cobertura arbórea:** Este criterio hace referencia a cantidad de SE proporcionados por la cobertura arbórea en un área específica. Permite jerarquizar las áreas urbanas a partir de la estimación de indicadores que infieren los procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen a la conservación de los espacios naturales.
3. **Distancia de la VeTU a la cobertura arbórea:** Este criterio hace referencia a la ubicación geográfica de las variables (elementos naturales o artificiales) que son consideradas como estratégicas porque cumplen la premisa de influir en la distribución de la cobertura arbórea. La distancia entre los elementos urbanos puede indicar la disponibilidad y distribución de los beneficios ambientales. También, a partir de la distancia se puede determinar la accesibilidad a conglomerados de cobertura arbórea y se pueden identificar las áreas que requieran intervención para conservación o recuperación.
4. **Extensión del área con cobertura arbórea:** Este criterio hace referencia a la porción de terreno urbano con cobertura natural que permite cuantificar los bienes y servicios producidos con relación a la totalidad del territorio intervenido. Las proporciones entre lo natural y lo intervenido, se puede clasificar las áreas según

el aporte para mejorar la calidad del aire, la regulación del clima, la conservación del agua, la promoción de la biodiversidad y el bienestar.

5. **Conectividad de áreas con cobertura arborea:** Este criterio hace referencia a la capacidad que pueden tener las conexiones entre las áreas arbóreas con otros espacios naturales o semi naturales urbanos para actuar como corredores ecológicos. Estos espacios pueden facilitar el intercambio de la biodiversidad urbana y estimular el funcionamiento de los ecosistemas urbanos.

- **Categorías de clasificación de áreas con cobertura arborea**

Con base en los criterios de clasificación se formularon las siguientes tres categorías enfocadas a priorizar las áreas con cobertura arborea a partir del tipo de área y conectividad, para enfocar la planificación y gestión desde la preservación, conservación y restauración, logrando la sostenibilidad de los espacios urbanos:

- **Categoría 1:** Son aquellas áreas con alta o media conectividad con cobertura vegetal de baja altura que tengan una extensión mayor o igual al 16% sobre el área total, o 50% del área con cobertura de dosel arbóreo o 37% del área con superficie permeable. Adicionalmente, las áreas deben estar a una distancia igual o menor de 75 metros del espacio público, o a una distancia igual o menor de 47 metros a una vía.
- **Categoría 2:** Son aquellas áreas con cobertura vegetal de baja altura que tengan una extensión mayor o igual al 5% sobre el área total, o 11% del área con cobertura de dosel arbóreo o 37% del área con superficie permeable. Adicionalmente, las áreas deben estar a una distancia igual o menor de 71 metros del espacio público, o a una distancia igual o menor de 64 metros a una vía.
- **Categoría 3:** Son aquellas áreas con dosel arbóreo en extensión mayor o igual al 11% sobre el área total o 14% del área con superficie permeable. Adicionalmente, las áreas deben estar a una distancia igual o menor de 47 metros de vías, o a 64 metros de algún servicio público/equipamiento.

4.4 Aplicación de criterios al corredor del Río Cali

Para el corredor del río Cali se obtuvieron 530 áreas con cobertura arbórea, de las cuales el 26% se localizan en el tramo 1, el 23% en el tramo 2, el 42% en el tramo 3 y el 9% en el tramo 4. La Tabla 18 ejemplifica los valores estimados para cada criterio aplicado al total de las áreas arbóreas, siendo el área con identificador 100 un área con cobertura arbórea con 1 VeTU, 4 SEp, a 102,2 metros de distancia de la VeTU, con una extensión de 12.673,66 metros cuadrados, con alta conectividad a espacios naturales y ubicada en el barrio urbanización la Merced en el tramo 3. La Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34 y Figura 35 presentan los mapas resultantes de la clasificación por criterios.

Tabla 18 Resultado de estimación de criterios de clasificación de las áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali

Tramo	Número de áreas con cobertura arbórea	ID áreas urbanas con cobertura arbórea	Criterios				
			1	2	3	4	5
1	136	508	3	4	22,8	45.188,06	Alta
		454	1	3	46,2	271,75	Media
		511	1	3	95,1	2.048,02	Media
		445	1	3	36,9	11.077,85	Media
2	120	286	0	3	241,5	318,99	Media
		308	3	3	156,1	9.301,71	Media
		100	1	4	102,2	12.673,66	Alta
3	225	122	0	3	122,7	318,99	Media
		210	1	3	110,6	1.605,53	Media
		19	2	3	42,7	4.356,59	Media
4	49	35	2	3	25,3	505,49	Media
		42	4	3	3,4	5.882,76	Media

Las figuras 33, 34, 35 y 36 presentan la distribución espacial de los criterios para cada una de las 530 áreas con cobertura arbórea.

Figura 31 Mapa de Criterio 1: Número de VeTU relacionadas con el área de cobertura arbórea

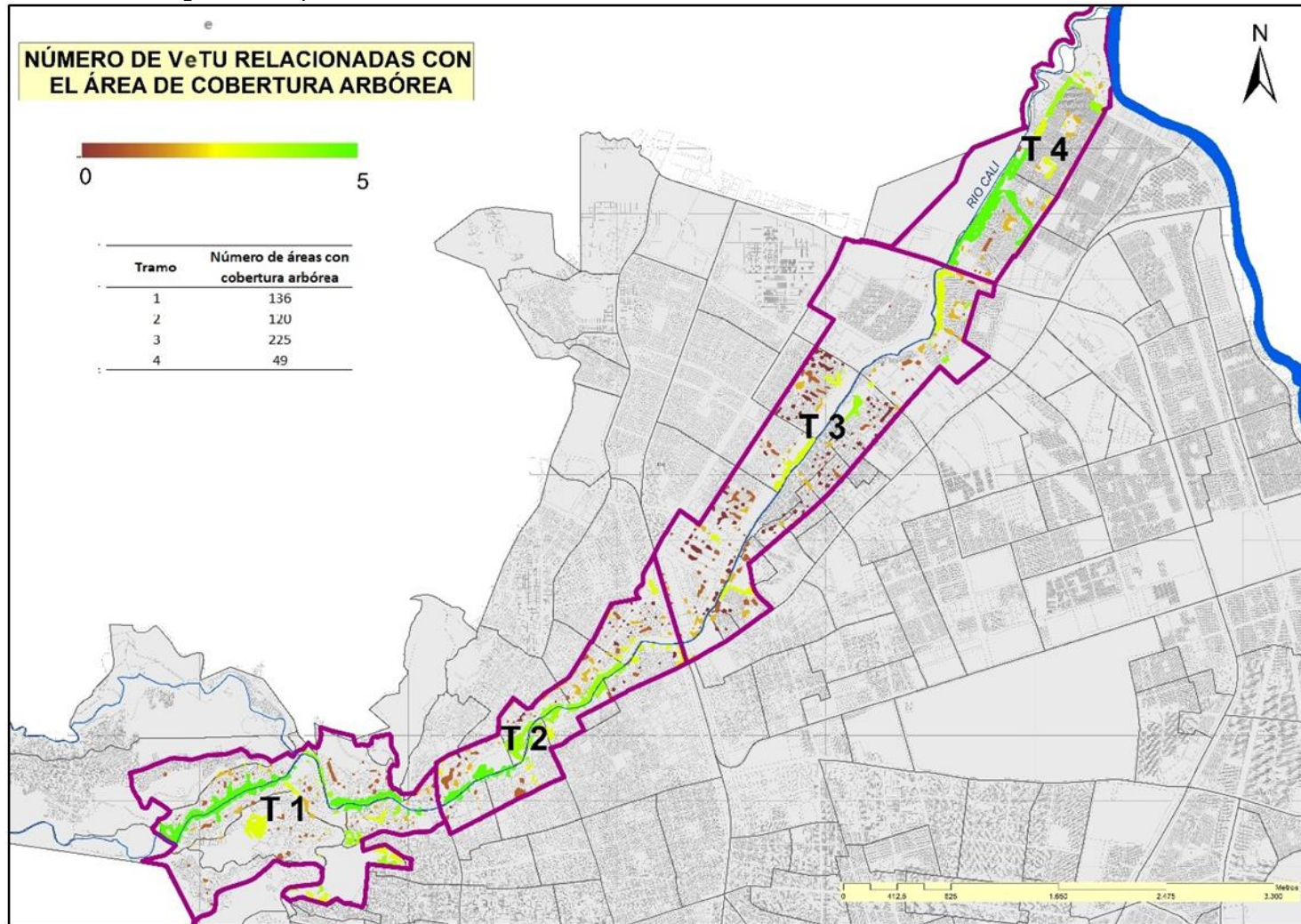


Figura 32 Mapa de Criterio 2: Número de SEp relacionados con el área de cobertura arbórea

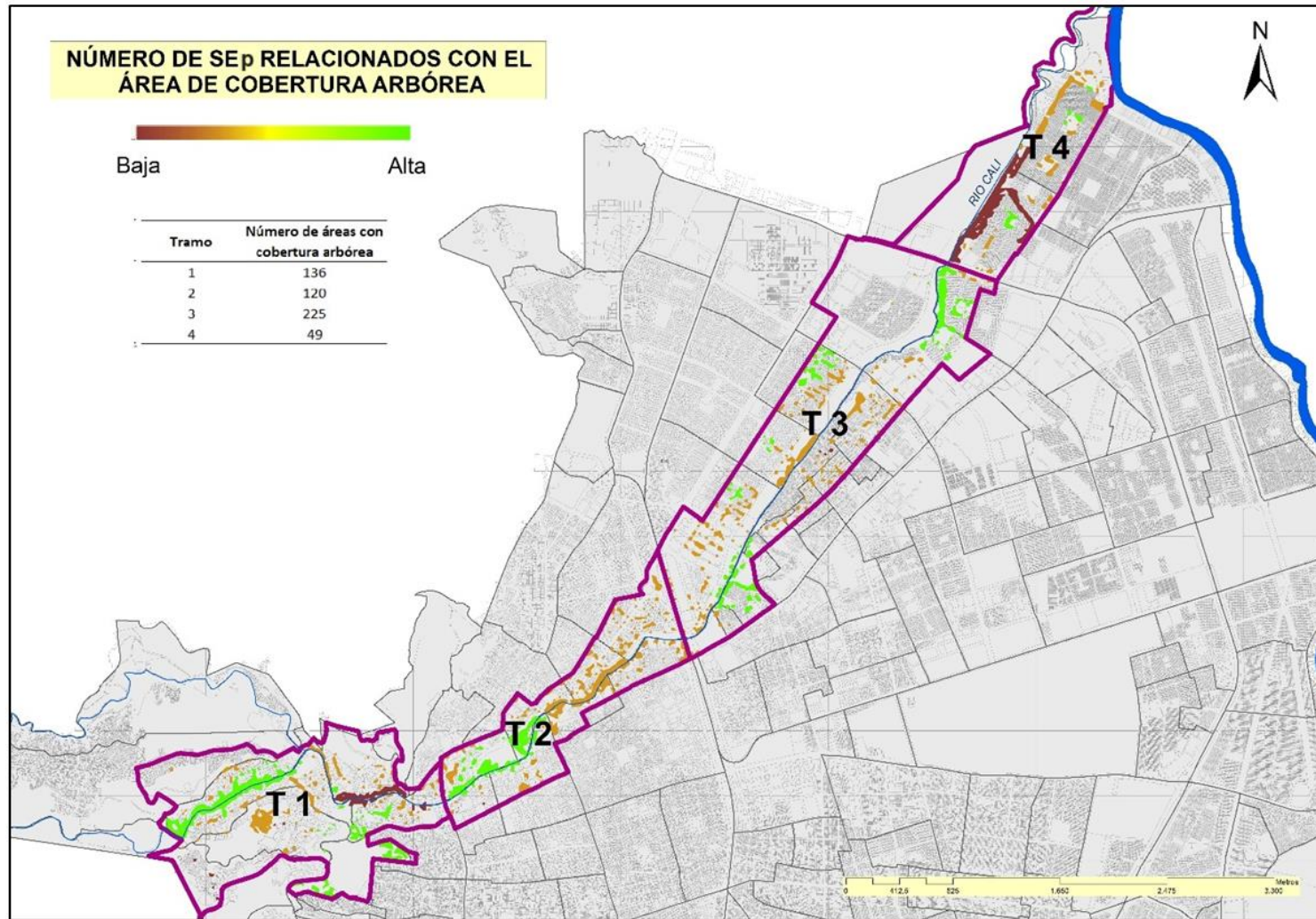


Figura 33 Mapa de Criterio 3: Distancia de la VeTU a la cobertura arbórea

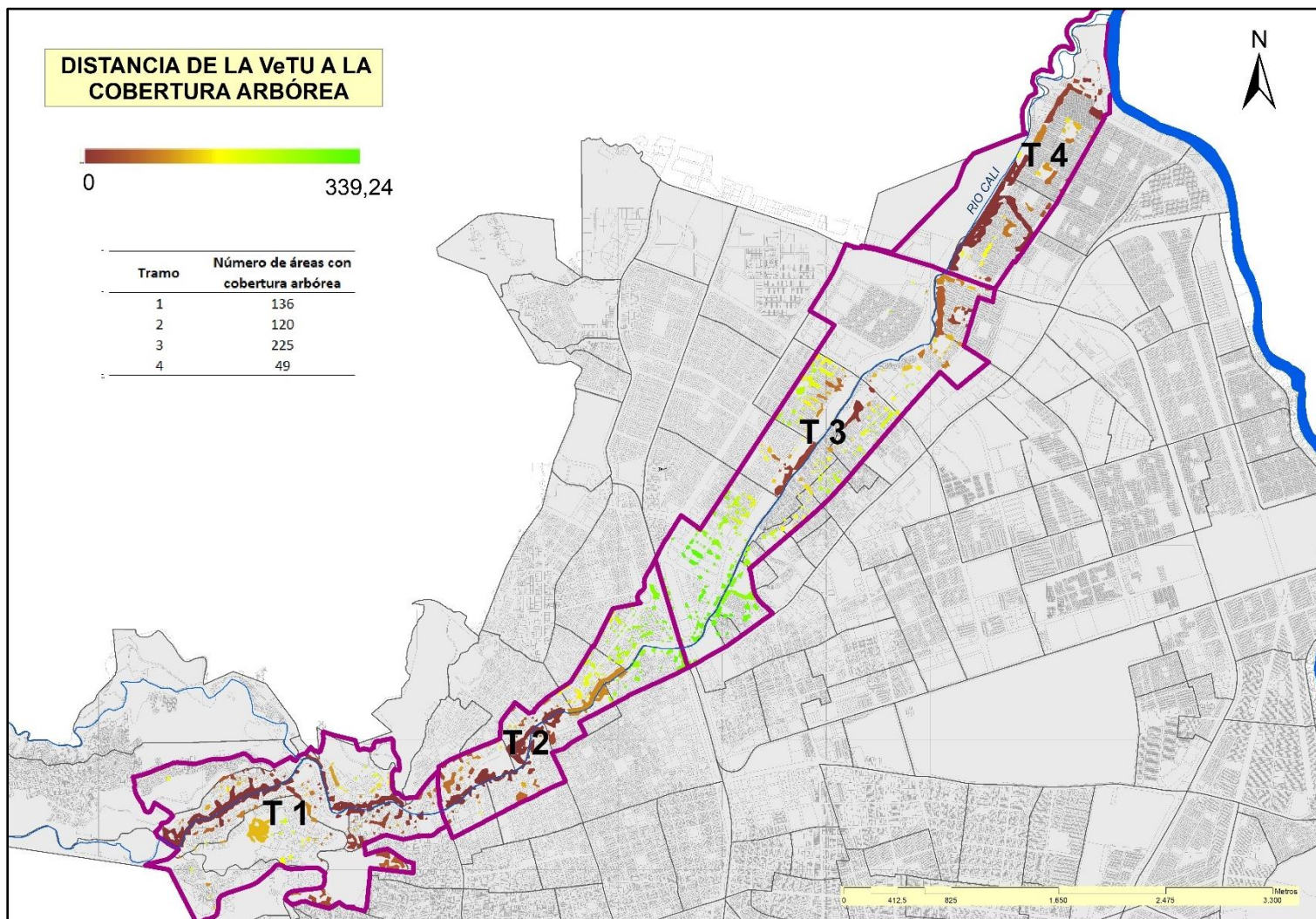


Figura 34 Mapa de Criterio 4: extensión del área con cobertura arbórea

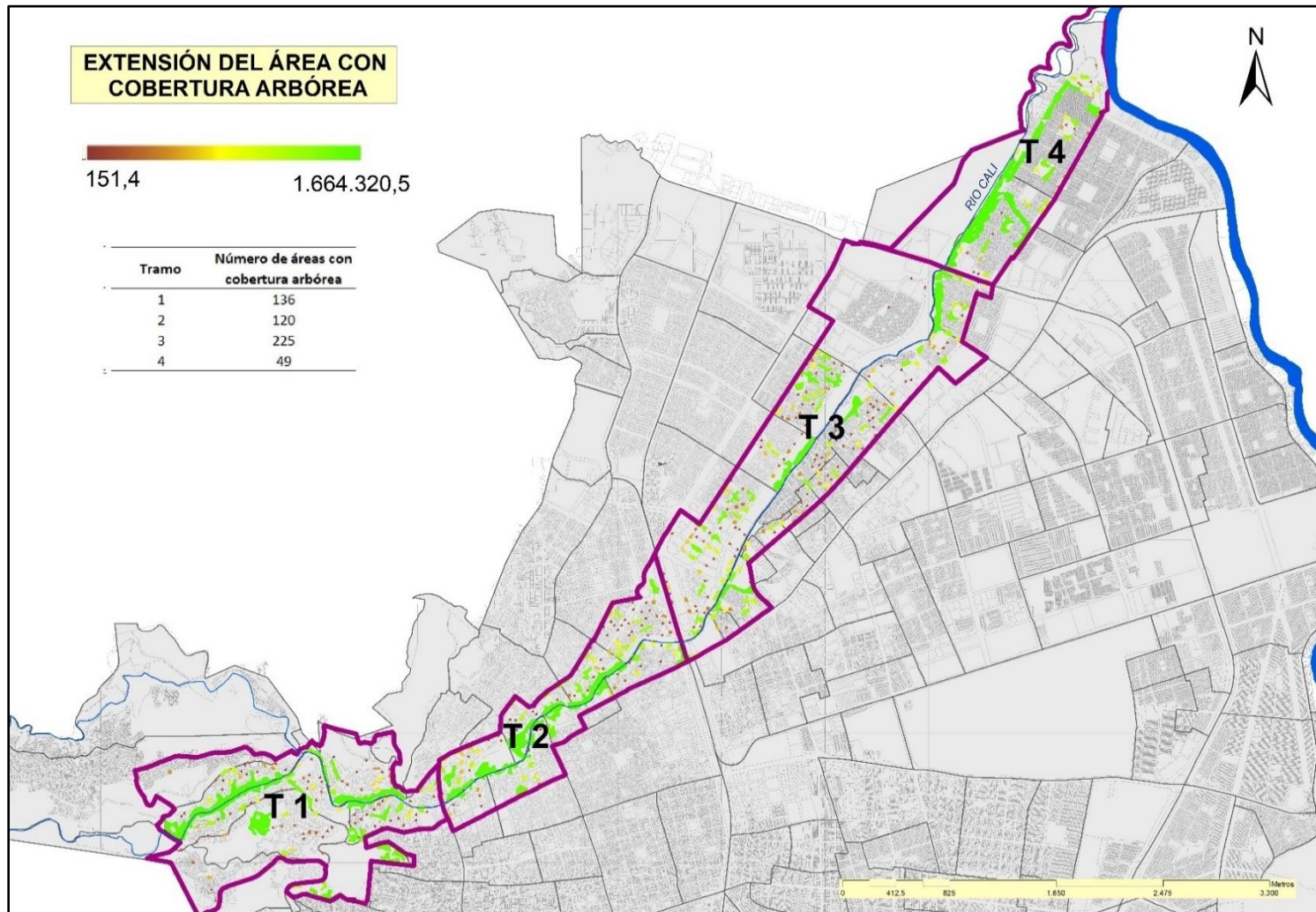
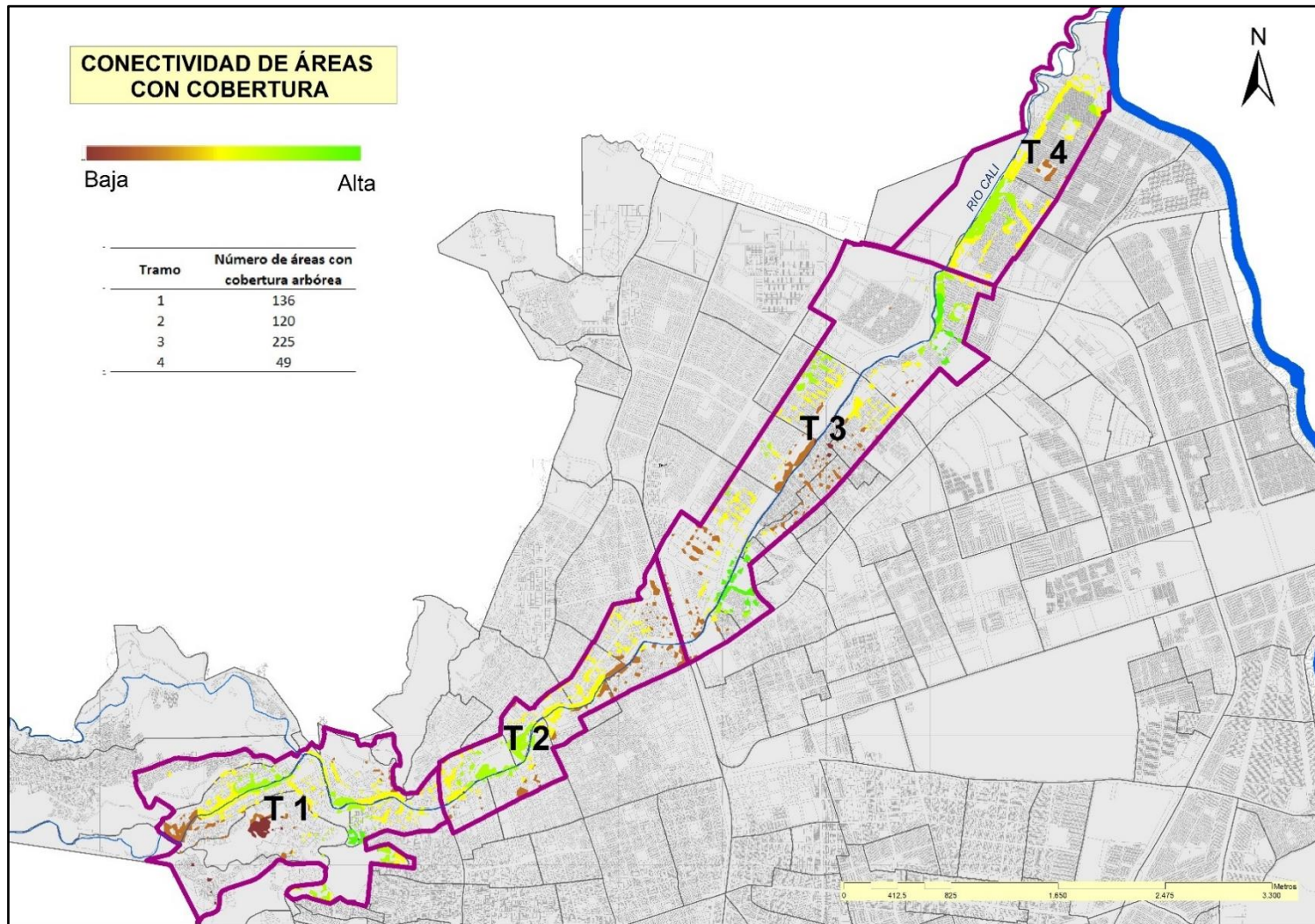


Figura 35 Mapa de Criterio 5: Conectividad de áreas con cobertura



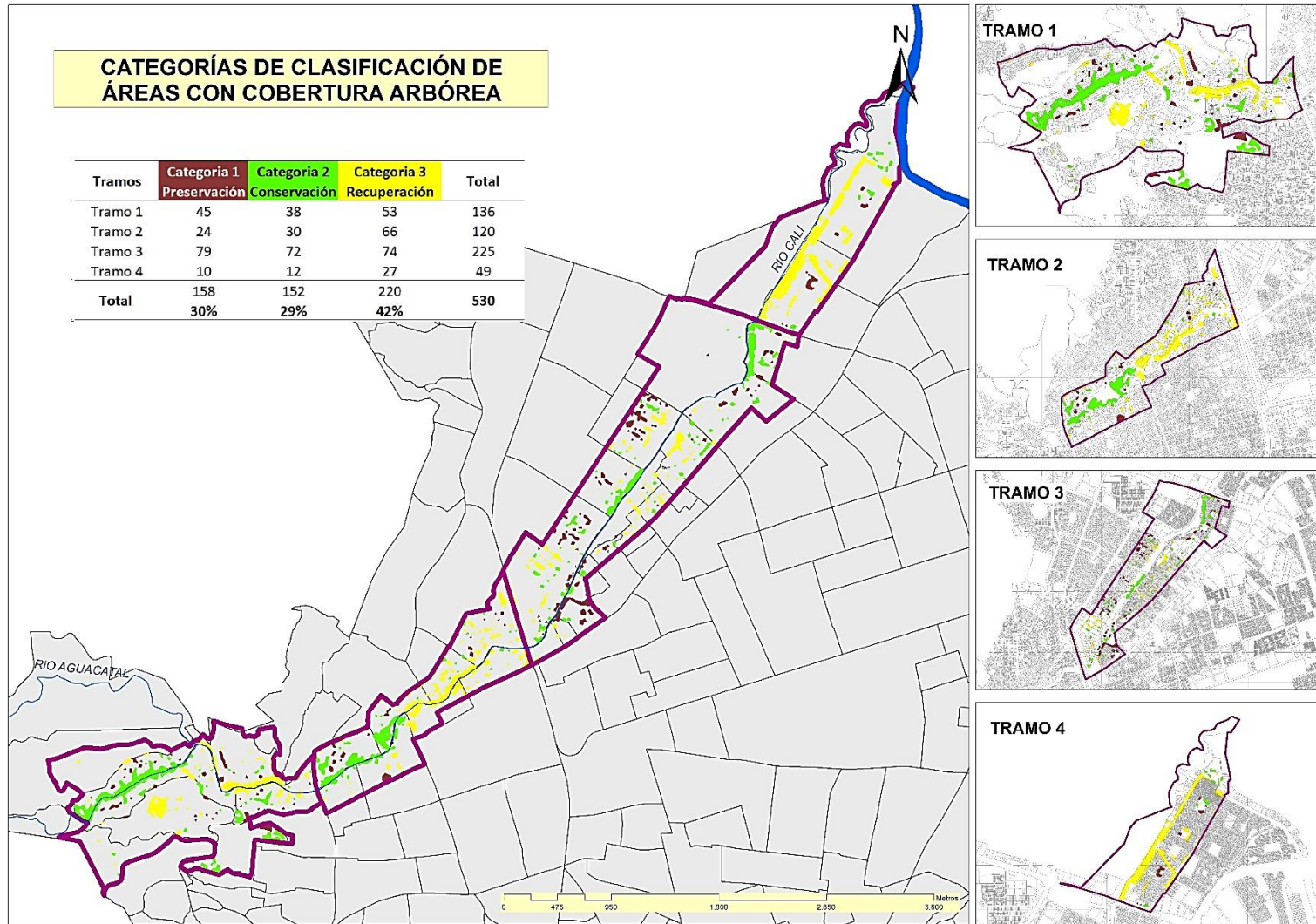
La Tabla 19 y Figura 36 presenta el total de áreas con cobertura clasificadas según cada categoría, obteniendo que el 30% corresponde a áreas de categoría 1 para la preservación, el 29% a áreas de categoría 2 para la conservación y el 42% para áreas de categoría 3 para la recuperación. Este resultado indica que en el tramo 3 es el lugar donde hay mayor cantidad de áreas con cobertura que pueden proporcionar mayores SEp. Por el contrario, el tramo 4 a pesar que tiene menor cantidad de áreas con cobertura, tiene mayor extensión que puede ser recuperada para incentivar los SEp.

Tabla 19. Resultado de categorías de clasificación de las áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali

	Categoría 1		Categoría 2		Categoría 3		Total
	Áreas con cobertura	Área (m2)	Áreas con cobertura	Área (m2)	Áreas con cobertura	Área (m2)	
Tramo 1	45	115.457,99	38	2.726.179,98	53	1.401.064,08	136
Tramo 2	24	41.977,83	30	1.471.267,50	66	1.872.501,11	120
Tramo 3	79	188.432,73	72	625.151,46	74	293.573,87	225
Tramo 4	10	25.141,71	12	36.021,04	27	1.981.985,54	49
Total	158	371.010,27	152	4.858.619,98	220	5.549.124,60	530

La Figura 36 presenta el mapa de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali. Con base en este resultado se evidenció que no existe continuidad espacial de las coberturas arbóreas y, además, las áreas de categoría 1 son las de mayor dispersión y menor área.

Figura 36 Mapa de categorías de clasificación de áreas con cobertura arbórea en el corredor del río Cali



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1.1 Conclusiones

En la investigación se identificaron y evaluaron 11 VTU que influyen en la distribución espacial de la cobertura arbórea, priorizando las variables servicios públicos, jerarquización vial, espacio público y equipamiento, que mostraron estar vinculadas a la consolidación de las áreas según el agrupamiento en función de la distancia. Por el contrario, variables disímiles en el entorno urbano como el transporte público y las áreas protegidas no mostraron tener influencia en la localización de las coberturas. En consecuencia, los barrios Calima, Ciudad los Álamos, Olaya Herrera y Vipasa (tramo 3), con sus condiciones actuales de distribución de las VTU, podrían densificar o aumentar la cobertura arbórea en línea con los planes de forestación que determine la autoridad ambiental.

Por medio de los 18 SE identificados y evaluados se encontró que la distribución espacial de la cobertura arbórea influye directamente en la provisión de los servicios ecosistémicos, porque a partir de cuantificar el porcentaje del área total con cubierta vegetal a baja altura (indicador SP del ISEAV), fue posible analizar la relación entre las VeTU según la presencia de árboles y los servicios de regulación del clima, regulación del ciclo del agua y prevención de la erosión. De ahí que, los sectores con inclinación del terreno como los presentes en los barrios Santa Rita, Santa Teresita (grupo 8 y 9) en el tramo 1 tomen relevancia para la implementación de acciones efectivas para conservar y maximizar los beneficios de los ecosistemas arbóreos

Las relaciones de las 5 VeTU y los 6 SEp permitieron proponer criterios de clasificación de las áreas urbanas con cobertura arbórea, discriminando los grados de influencia que ejercen las variables en la localización de áreas urbanas con cobertura. Acorde con lo obtenido de la evaluación de experto, es fundamental que las variables y servicios tengan como precedente el contexto del área de análisis, ya que las relaciones pueden variar

significativamente y es necesario adoptar perspectiva contextualizada que tomen en cuenta las particularidades y características para garantizar la sostenibilidad y resiliencia.

En la investigación se propusieron 5 criterios para clasificar áreas urbanas con cobertura arbórea a partir de servicios ecosistémicos. El primer y tercer criterio abordaron las características de las áreas urbanas por medio de variables estratégicas territoriales, el segundo y cuarto criterio abordaron los servicios ecosistémicos a través de la distribución de la cobertura arbórea y, el quinto criterio abordó las conexiones espaciales y temporales presentes en las áreas urbanas para influir en los servicios ecosistémicos. Con los criterios se logra dar una respuesta a la pregunta de investigación encaminada hacia la planificación y adecuada gestión del recurso forestal, generando alternativas alcanzar los Objetivos de desarrollo sostenible 11 y 15, en lo referente a sostenibilidad urbana y la protección de la biodiversidad.

En línea con los enfoques de la planificación espacial integrada y la planificación adaptativa, la investigación formuló 3 categorías de clasificación para priorizar las áreas con cobertura arbórea, aglutinando cada uno de los elementos necesarios para proporcionar los servicios ecosistémicos. Al emplear los criterios de clasificación de forma categorizada en las áreas urbanas, las autoridades locales podrán tomar decisiones estratégicas para optimizar el uso del espacio urbano y maximizar los beneficios ambientales, lo conduce a una planificación eficiente y sostenible que promueva el equilibrio entre las áreas intervenidas y las naturales.

Con los 5 criterios de clasificación de áreas urbanas con cobertura arbórea se logró obtener una visión detallada de su distribución y contribución a los SEp. Los resultados revelaron que para los procesos de planificación de la ciudad de Cali es fundamental implementar acciones de restauración en los barrios El Piloto, El Hoyo (tramo 2), Los Guadales y Ciudadela Floralia (tramo 4), lo que conduciría a generar un impacto positivo en la calidad ambiental y aumentaría el bienestar de la población vulnerable.

El corredor del río Cali es un espacio urbano donde las áreas con cobertura arbórea están intercaladas con infraestructuras y actividades humanas, por lo que fue imperante identificar, evaluar, cuantificar y mapear las variables territoriales que afectan a la generación de los servicios ecosistémicos. La aplicación de los criterios y categorías determinó que para el corredor las áreas de menor extensión y distribuidas espacialmente en la periferia del río Cali son las que tienen mayor relevancia para la preservación. Asimismo, las áreas aledañas al río Cali, particularmente en los Centenario y Granada (tramo 2), son deberían destinar para la conservación teniendo en cuenta los espacios intervenidos.

La identificación por categorías permite a los entes municipales focalizar los esfuerzos y gestión para maximizar los beneficios en los barrios y promover un entorno urbano más sostenible y resiliente. Además, se pueden integrar en los instrumentos de planificación como una herramienta para el ordenamiento urbano que facilite la toma de decisiones con base en datos e información concreta.

5.1.2 Recomendaciones

La investigación permitió evaluar diferentes componentes como el urbanístico, normativo, socioeconómico y riesgo. Para futuros trabajos se considera importante integrar variables físicas del territorio y aspectos bióticos de la cobertura. Estas variables permitirían abordar criterios relacionados con la salud y estado de la cobertura, diversidad de especies, entre otros.

En futuras investigaciones se puede integrar servicios ecosistémicos culturales como los valores estéticos y paisajísticos derivados del arbolado de las calles o bulevares que mejoren la estética y la calidad visual del entorno urbano construido. Por ejemplo, el municipio de Cali está desarrollando el proyecto del Bulevar del oriente que integra el Río Cali con un espacio para la recreación. Estos servicios pueden formular criterios desde el valor patrimonial, estético y participación ciudadana, lo que ayuda a una planificación inclusiva y sostenible que promueva el sentido de pertenencia y responsabilidad hacia la conservación y protección de las áreas con cobertura arbórea.

Se recomienda explorar métodos que tengan baja susceptibilidad y sensibilidad a los cambios de los datos de entrada o muestra concreta. Por ejemplo, para la investigación se utilizaron los métodos de agrupación por clúster y árbol de decisión que hace parte de las técnicas de aprendizaje automático (machine learning); no obstante, se recomienda integrar métodos como PCA para las variables físicas y redes neuronales para analizar los datos multivariantes no lineales

Durante la investigación se encontraron herramientas que pueden ser incorporadas en futuras investigaciones. Por ejemplo, i-Tree Eco que cuantifica los beneficios ambientales y económicos, o Treepedia que es un sitio web que cuantifica los árboles que se encuentran en las áreas urbanas. Implementar estas herramientas podría contribuir a comprender los fenómenos sociales y naturales asociados a los procesos de arborización, permitiendo tomar decisiones informadas y precisas para la gestión de las áreas urbanas.

6. REFERENCIAS

- (NU), Unidas Naciones. 2019. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019 *Informe de Los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2019*. https://www.un-ilibrary.org/economic-and-social-development/informe-de-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-2017_70388b69-es.
- (ONU), Organización de las Naciones Unidas. 2015. "Proyecto de Documento Final de La Cumbre de Las Naciones Unidas Para La Aprobación de La Agenda Para El Desarrollo Después de 2015." In *Seguimiento de Los Resultados de La Cumbre Del Milenio Proyecto*, New York, 1–41. http://www2.ohchr.org/spanish/bodies/hrcouncil/docs/gaA.RES.60.1_Sp.pdf.
- (UNFPA), Fondo de Población de las Naciones Unidas. 2019. Un asunto redondo *Estado de La Población Mundial 2019 - Un Asunto Pendiente*.
- Abubakar, Ismaila Rimi, and Yusuf Adedoyin Aina. 2019. "The Prospects and Challenges of Developing More Inclusive, Safe, Resilient and Sustainable Cities in Nigeria." *Land Use Policy* 87(December 2018): 104105.
- Agency, European Environment. 2002. "Towards an Urban Atlas: Assessment of Spatial Data on 25 European Cities and Urban Areas." In *Towards an Urban Atlas: Assessment of Spatial Data on 25 European Cities and Urban Areas*, Copenhagen. https://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2002_30/front.pdf/view.
- Alam, Mahbulul, Jérôme Dupras, and Christian Messier. 2016. "A Framework towards a Composite Indicator for Urban Ecosystem Services." *Ecological Indicators* 60: 38–44. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X15002575>.
- Alcaldía Mayor de Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente. 2019. "Plan Distrital de Silvicultura Urbana , Zonas Secretaría Distrital de Planeación." : 1–163.
- Alvey, Alexis A. 2006. "Promoting and Preserving Biodiversity in the Urban Forest." *Urban Forestry & Urban Greening* 5(4): 195–201. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866706000732>.
- Angelstam, Per et al. 2019. "Model Forests in Russia as Landscape Approach: Demonstration Projects or Initiatives for Learning towards Sustainable Forest Management?" *Forest Policy and Economics* 101: 96–110. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389934117303337>.
- Aria, Massimo, and Corrado Cuccurullo. 2017. "Bibliometrix: An R-Tool for Comprehensive Science Mapping Analysis." *Journal of Informetrics* 11(4): 959–75. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- Banerjee, Shiboram, Arnab Banerjee, and Debnath Palit. 2021. "Ecosystem Services and Impact of Industrial Pollution on Urban Health: Evidence from Durgapur, West Bengal, India." *Environmental Monitoring and Assessment* 193(11): 744.

<https://link.springer.com/10.1007/s10661-021-09526-9>.

- Berland, Adam et al. 2017. "The Role of Trees in Urban Stormwater Management." *Landscape and Urban Planning* 162: 167–77.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169204617300464>.
- Blakely, Edward J. 2007. "Urban Planning for Climate Change." *Lincoln Institute of Land Policy* 53(9): 1689–99.
- Bodnaruk, E. W. et al. 2017. "Where to Plant Urban Trees? A Spatially Explicit Methodology to Explore Ecosystem Service Tradeoffs." *Landscape and Urban Planning* 157: 457–67.
- Bolund, Per, and Sven Hunhammar. 1999. "Ecosystem Services in Urban Areas." *Ecological Economics* 29(2): 293–301.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800999000130>.
- Brown, Greg, and Nora Fagerholm. 2015. "Empirical PPGIS/PGIS Mapping of Ecosystem Services: A Review and Evaluation." *Ecosystem Services* 13: 119–33.
- Cali, Concejo de Santiago de. 2013. *ACUERDO No. 0353. Estatuto de Silvicultura Urbana Para El Municipio de Santiago de Cali*.
- Capotorti, Giulia et al. 2019. "Biodiversity and Ecosystem Services in Urban Green Infrastructure Planning: A Case Study from the Metropolitan Area of Rome (Italy)." *Urban Forestry & Urban Greening* 37: 87–96.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S161886671730482X>.
- Carpenter, Stephen R. et al. 2009. "Science for Managing Ecosystem Services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106(5): 1305–12. <https://pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0808772106>.
- Carver, Andrew D., Daniel R. Unger, and Courtney L. Parks. 2004. "Modeling Energy Savings from Urban Shade Trees: An Assessment of the CITYgreen® Energy Conservation Module." *Environmental Management* 34(5): 650–55.
<http://link.springer.com/10.1007/s00267-002-7003-y>.
- CODS., Centro de los Bbjetivos de Desarrollo Sostenible para america latina y el caribe. 2020. "SERVICIOS ECOSISTÉMICOS URBANOS EN LATINOAMÉRICA. OPORTUNIDADES PARA EL DESARROLLO URBANO SOSTENIBLE, LA ACCIÓN CLIMÁTICA Y LA GESTIÓN DE LA BIODIVERSIDAD URBANA." 57(1): 1–17.
- Cooke, Alison. 2001. *A Guide to Finding Quality Information on the Internet: Selection and Evaluation Strategies*. Second edi. ed. Library Association. London.
- Correa, L. et al. 2013. 53 *Journal of Chemical Information and Modeling Manual de Silvicultura Urbana Para Medellín*.
- Costanza, Robert et al. 1998. "The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital." *Ecological Economics* 25(1): 3–15.
- Cronbach, Lee J. 1951. "Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests."

- Psychometrika* 16(3): 297–334. <http://link.springer.com/10.1007/BF02310555>.
- Dobbs, Cynnamon, Francisco J. Escobedo, and Wayne C. Zipperer. 2011. "A Framework for Developing Urban Forest Ecosystem Services and Goods Indicators." *Landscape and Urban Planning* 99(3–4): 196–206.
- Dobbs, Cynnamon, Dave Kendal, and Craig R. Nitschke. 2014. "Multiple Ecosystem Services and Disservices of the Urban Forest Establishing Their Connections with Landscape Structure and Sociodemographics." *Ecological Indicators* 43: 44–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.02.007>.
- Eggers, Jeannette et al. 2019. "Balancing Different Forest Values: Evaluation of Forest Management Scenarios in a Multi-Criteria Decision Analysis Framework." *Forest Policy and Economics* 103: 55–69. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389934116303872>.
- Endreny, T. et al. 2017. "Implementing and Managing Urban Forests: A Much Needed Conservation Strategy to Increase Ecosystem Services and Urban Wellbeing." *Ecological Modelling* 360: 328–35. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380017300960>.
- Escobedo, Francisco J., Timm Kroeger, and John E. Wagner. 2011. "Urban Forests and Pollution Mitigation: Analyzing Ecosystem Services and Disservices." *Environmental Pollution* 159(8–9): 2078–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>.
- Estenssoro, Fernando. 2015. "The Ecodevelopment as Concept Precursor of Sustainable Development and Its Influence in Latin America." *UNIVERSUM* 30. http://www.scielo.cl/pdf/universum/v30n1/art_06.pdf (September 6, 2017).
- Etshekape, P. Gabriel, A. R. Atangana, and Damase P. Khasa. 2018. "Tree Planting in Urban and Peri-Urban of Kinshasa: Survey of Factors Facilitating Agroforestry Adoption." *Urban Forestry and Urban Greening* 30(April 2017): 12–23.
- FAO. 2018. *69 Foro Mundial Sobre Bosques Urbanos*.
- Folke, Carl, Thomas Hahn, Per Olsson, and Jon Norberg. 2005. "ADAPTIVE GOVERNANCE OF SOCIAL-ECOLOGICAL SYSTEMS." *Annual Review of Environment and Resources* 30(1): 441–73. <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511>.
- Forero Sanclemente, Esperanza, and Luis Hernando García Bueno. 2015. "EL PARQUE LINEAL DE PALMIRA, UN ESPACIO DINAMIZADOR DEL DESARROLLO DE LA CIUDAD." *Urbano* 18: 64–73.
- Fu, Yang, and Xiaoling Zhang. 2018. "Two Faces of an Eco-City? Sustainability Transition and Territorial Rescaling of a New Town in Zhuhai." *Land Use Policy* 78(81): 627–36.
- Garza Villegas, Juan Baldemar, and Dante Vladimir Cortez Alejandro. 2017. "El Uso Del Método MICMAC y MACTOR Análisis Prospectivo En Un Área Operativa Para La Búsqueda de La Excelencia Operativa a Través Del Lean Manufacturing." *Revista Innovaciones de Negocios* 8(16).

<https://revistainnovaciones.unal.mx/index.php/revin/article/view/142>.

- Gaudereto, Guilherme Leite et al. 2018. "Evaluation of Ecosystem Services and Management of Urban Green Areas: Promoting Healthy and Sustainable Cities." *Ambiente e Sociedade* 21.
- Giraldo Ospina, Tania, and Luis R. Vásquez-Varela. 2021. "Distribución e Indicadores de Cobertura y Accesibilidad Del Espacio Público En Manizales, Colombia." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 30(1): 158–77.
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/84320>.
- Godet, Michel. 2007. *Manuel de Prospective Stratégique*. Dunod. ed. 3. Paris.
- De Gouw, Sarah, Justin Morgenroth, and Cong Xu. 2020. "An Updated Survey on the Use of Geospatial Technologies in New Zealand's Plantation Forestry Sector." *New Zealand Journal of Forestry Science* 50.
<http://nzjforestryscience.nz/index.php/nzjfs/article/view/118>.
- De Groot, Rudolf S., Matthew A. Wilson, and Roelof M.J. Boumans. 2002. "A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services." *Ecological Economics* 41(3): 393–408.
- Gustavsson, R. 2002. "Afforestation in and near Urban Areas. Dynamic Design Principles and Long-Term Management Aspects. Landscape Laboratories as Reference and Demonstration Areas for Urban and Urban–Rural Afforestation." *Urban Forests and Trees*: 286–315.
- Haase, Dagmar et al. 2014. "A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation." *Ambio* 43(4): 413–33.
- Harzing, Anne Wil, and Satu Alakangas. 2016. "Google Scholar, Scopus and the Web of Science: A Longitudinal and Cross-Disciplinary Comparison." *Scientometrics* 106(2): 787–804.
- Hernández Torres, Santiago. 2016. Cuaderno de Docencia "Planificación Territorial. Una Propuesta Formativa y de Habilidades Para El Tratamiento de La Vulnerabilidad." Universidad de las Palmas de Gran Canarias.
- Hoorweg, Daniel, Lorraine Sugar, and Claudia Lorena Trejos Gómez. 2011. "Cities and Greenhouse Gas Emissions: Moving Forward." *Environment and Urbanization* 23(1): 207–27.
- Irga, P. J., M. D. Burchett, and F. R. Torpy. 2015. "Does Urban Forestry Have a Quantitative Effect on Ambient Air Quality in an Urban Environment?" *Atmospheric Environment* 120: 173–81.
- Jiang, Shasha et al. 2019. "Towards an Integrated Research Approach for Urban Forestry: The Case of China." *Urban Forestry & Urban Greening* (October).
- Jim, C. Y., and Wendy Y. Chen. 2009a. "Ecosystem Services and Valuation of Urban Forests in China." *Cities* 26(4): 187–94.

- Jim, C.Y., and Wendy Y. Chen. 2009b. "Ecosystem Services and Valuation of Urban Forests in China." *Cities* 26(4): 187–94.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0264275109000456>.
- Jim, C.Y. 2004. "Green-Space Preservation and Allocation for Sustainable Greening of Compact Cities." *Cities* 21(4): 311–20.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026427510400054X>.
- Jin, Jing, and Jun Yang. 2020. "Effects of Sampling Approaches on Quantifying Urban Forest Structure." *Landscape and Urban Planning* 195(December 2019).
- Jin, Yong. 2008. "Ecological Civilization: From Conception to Practice in China." *Clean Technologies and Environmental Policy* 10(2): 111–12.
<http://link.springer.com/10.1007/s10098-008-0147-6>.
- Keeler, Bonnie L. et al. 2019. "Social-Ecological and Technological Factors Moderate the Value of Urban Nature." *Nature Sustainability* 2(1): 29–38.
<https://www.nature.com/articles/s41893-018-0202-1>.
- Kitchen, Lawrence. 2013. "Are Trees Always 'Good'? Urban Political Ecology and Environmental Justice in the Valleys of South Wales." *International Journal of Urban and Regional Research* 37(6): 1968–83.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-2427.2012.01138.x>.
- Kong, Xiangqi, Xinna Zhang, Chengyang Xu, and Richard J. Hauer. 2021. "Review on Urban Forests and Trees as Nature-Based Solutions over 5 Years." *Forests* 12(11): 1–18.
- Konijnendijk, Cecil C. 2003. "A Decade of Urban Forestry in Europe." *Forest Policy and Economics* 5(2): 173–86.
- Konijnendijk, Cecil C., Robert M. Ricard, Andy Kenney, and Thomas B. Randrup. 2006. "Defining Urban Forestry - A Comparative Perspective of North America and Europe." *Urban Forestry and Urban Greening* 4(3–4): 93–103.
- Kooiman, Jan. 2003. *Governing as Governance*.
- Krajter Ostoić, Silvija, and Cecil C. Konijnendijk van den Bosch. 2015. "Exploring Global Scientific Discourses on Urban Forestry." *Urban Forestry & Urban Greening* 14(1): 129–38. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866715000023>.
- Kuchelmeister, G. 2019. "Silvicultura Urbana : Árboles Para Las Ciudades." *Unasyuva - Los árboles fuera del bosque* (200): 1–11.
- Lawrence, Anna et al. 2013. "Urban Forest Governance: Towards a Framework for Comparing Approaches." *Urban Forestry and Urban Greening* 12(4): 464–73.
- Leung, Dennis Y. C. et al. 2011. "Effects of Urban Vegetation on Urban Air Quality." *Landscape Research* 36(2): 173–88.
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01426397.2010.547570>.

- Matsler, A Marissa, Sara Meerow, Ian C Mell, and Mitchell A. Pavao-Zuckerman. 2021. "A 'Green' Chameleon: Exploring the Many Disciplinary Definitions, Goals, and Forms of 'Green Infrastructure.'" *Landscape and Urban Planning* 214: 104145. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104145>.
- Medellín, Alcaldía de. 2015. Extrategia Ecoprint S.A.S *MANUAL DE SILVICULTURA URBANA PARA MEDELLÍN. Gestión, Planeación y Manejo de La Infraestructura Verde*.
- Mejía, M. 2016. "Naturaleza Urbana: Plataforma de Experiencias." *Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt*: 208.
- Moher, David, Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, and Douglas G. Altman. 2009. "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement." *Journal of clinical epidemiology* 62(10): 1006–12.
- Monayar, Maria Virginia. 2022. "Las Tomas de Tierra En Córdoba: Formas de Crecimiento y Variables Territoriales Vinculadas." *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana* 14: 1–17. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-33692022000100414&tlng=es.
- Mora-García, R. 2016. "Modelo Explicativo de Las Variables Intervinientes En La Calidad Del Entorno Construido de Las Ciudades." Alicante. <http://hdl.handle.net/10045/65829>.
- Mujica, Camila M., Clara M. Karis, and Rosana F. Ferraro. 2022. "Valoración de Los Servicios Ecosistémicos Urbanos Desde Un Enfoque Interdisciplinario." *Ecología Austral* 32(1): 122–35.
- Nitoslawski, Sophie A., Nadine J. Galle, Cecil Konijnendijk van den Bosc, and James W.N. Steenberg. 2019. "Smarter Ecosystems for Smarter Cities? A Review of Trends, Technologies, and Turning Points for Smart Urban Forestry." *Sustainable Cities and Society* 51(March): 101770.
- Nor, Amal Najihah Muhamad, and Saiful Arif Abdullah. 2019. "Developing Urban Green Space Classification System Using Multi-Criteria: The Case of Kuala Lumpur City, Malaysia." *Journal of Landscape Ecology(Czech Republic)* 12(1): 16–36.
- Nowak, David J. et al. 1996. "Measuring and Analyzing Urban Tree Cover." *Landscape and Urban Planning* 36(1): 49–57.
- . 2018. "Air Pollution Removal by Urban Forests in Canada and Its Effect on Air Quality and Human Health." *Urban Forestry & Urban Greening* 29: 40–48. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866717302182>.
- Nowak, David J., and Eric J. Greenfield. 2020. "The Increase of Impervious Cover and Decrease of Tree Cover within Urban Areas Globally (2012–2017)." *Urban Forestry and Urban Greening* 49(April 2019).
- Nowak, David J., Eric J. Greenfield, Robert E. Hoehn, and Elizabeth Lapoint. 2013. "Carbon Storage and Sequestration by Trees in Urban and Community Areas of the United States." *Environmental Pollution* 178: 229–36.

- <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749113001383>.
- Nowak, David J., Satoshi Hirabayashi, Allison Bodine, and Eric Greenfield. 2014. "Tree and Forest Effects on Air Quality and Human Health in the United States." *Environmental Pollution* 193: 119–29. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749114002395>.
- Nyelele, Charity, and Charles N. Kroll. 2020. "The Equity of Urban Forest Ecosystem Services and Benefits in the Bronx, NY." *Urban Forestry and Urban Greening* 53(May): 126723. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126723>.
- Oliveira, Ana, António Lopes, and Samuel Niza. 2020. "Local Climate Zones Classification Method from Copernicus Land Monitoring Service Datasets: An ArcGIS-Based Toolbox." *MethodsX* 7: 101150. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2215016120303708>.
- Olsson, Per et al. 2006. "Shooting the Rapids: Navigating Transitions to Adaptive Governance of Social-Ecological Systems." *Ecology and Society* 11(1): art18. <http://www.ecologyandsociety.org/vol11/iss1/art18/>.
- Ordóñez Barona, Camilo. 2015. "Adopting Public Values and Climate Change Adaptation Strategies in Urban Forest Management: A Review and Analysis of the Relevant Literature." *Journal of Environmental Management* 164: 215–21.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, La Ciencia Y La Cultura (Unesco). 2007. "Unesco : Ibe Education the Saurus." 6a. Edc. 2a. Revisión. http://www.ibe.unesco.org/fileadmin/user_upload/Publications/IBE_Thesaurus/TH_array_array_Oct07.pdf.
- Otaya Burbano Leodán Andrés Sánchez Zapata, Robinson de Jesús, Verónica Botero Fernández, and León Morales Soto. 2006. "Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Una Gran Herramienta Para La Silvicultura Urbana." 59(1): 3201–16. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34790>.
- Parmehr, Ebadat G., Marco Amati, and Clive S. Fraser. 2016. "MAPPING URBAN TREE CANOPY COVER USING FUSED AIRBORNE LIDAR AND SATELLITE IMAGERY DATA." *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III–7: 181–86. <https://isprs-annals.copernicus.org/articles/III-7/181/2016/>.
- Paudyal, Kiran et al. 2015. "Participatory Assessment and Mapping of Ecosystem Services in a Data-Poor Region: Case Study of Community-Managed Forests in Central Nepal." *Ecosystem Services* 13: 81–92.
- Phillips, Tuana H. et al. 2019. "The Capacity of Urban Forest Patches to Infiltrate Stormwater Is Influenced by Soil Physical Properties and Soil Moisture." *Journal of Environmental Management* 246: 11–18. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479719307558>.
- Reyes, Isabel, and Juan Gutiérrez. 2010. "Los Servicios Ambientales de La Arborescencia Urbana: Retos y Aportes Para La Sustentabilidad de La Ciudad de Toluca." *Quivera*

- 12: 96–102. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40113202009>.
- Rodríguez-Rodríguez, Julio, and Mercedes Reguant-Álvarez. 2020. "Calcular La Fiabilidad de Un Cuestionario o Escala Mediante El SPSS: El Coeficiente Alfa de Cronbach." *REIRE Revista d Innovació i Recerca en Educació* 13(2). <https://revistes.ub.edu/index.php/REIRE/article/view/reire2020.13.230048>.
- Roeland, Samson et al. 2019. "Towards an Integrative Approach to Evaluate the Environmental Ecosystem Services Provided by Urban Forest." *Journal of Forestry Research* 30(6): 1981–96. <http://link.springer.com/10.1007/s11676-019-00916-x>.
- Roman, Lara A. et al. 2017. "Growing Canopy on a College Campus: Understanding Urban Forest Change through Archival Records and Aerial Photography." *Environmental Management* 60(6): 1042–61. <http://link.springer.com/10.1007/s00267-017-0934-0>.
- Rosales, Andrés González, Carlos Israel Vázquez León, and Carlos Francisco Ortiz-Paniagua. 2023. "Gobernanza Forestal En México Desde La Perspectiva Del Análisis Estructural." *Regions and Cohesion* 13(1): 52–73. <http://berghahnjournals.com/view/journals/regions-and-cohesion/13/1/reco130104.xml>.
- Rosas-Lusett, Mireya;, and Miguel. Bartorila. 2017. "Revista Electrónica Nova Scientia Aportaciones de La Forestación a La Sostenibilidad Urbana En Ciudades Tropicales . Humedal Nuevo Amanecer , Ciudad Madero , México Forestation Contributions to Urban Sustainability in Tropical Cities . Nuevo Amanecer Wetl." *Nova Scientia* 9: 529 – 550. <http://www.scielo.org.mx/pdf/ns/v9n19/2007-0705-ns-9-19-00528.pdf>.
- Roy, Sudipto, Jason Byrne, and Catherine Pickering. 2012. "A Systematic Quantitative Review of Urban Tree Benefits, Costs, and Assessment Methods across Cities in Different Climatic Zones." *Urban Forestry and Urban Greening* 11(4): 351–63.
- Ruíz_T., Otero_G., Ramírez_A., and Trespacios_G. 2008. 6 Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt *Biodiversidad y Conectividad Ecológica En La Localidad de Suba*. Bogotá. https://oab.ambientebogota.gov.co/?post_type=dlm_download&p=3623.
- Salbitano, Fabio, Simone Borelli, Michela Conigliaro, and Yujuan Chen. 2017. Fao *Directrices Para La Silvicultura Urbana y Periurbana*. <http://infobosques.com/portal/biblioteca/directrices-para-la-silvicultura-urbana-y-periurbana/>.
- Sarkki, Simo et al. 2015. "Adding 'Iterativity' to the Credibility, Relevance, Legitimacy: A Novel Scheme to Highlight Dynamic Aspects of Science–Policy Interfaces." *Environmental Science & Policy* 54: 505–12. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1462901115000477>.
- Sarmiento, Mariana et al. 2015. *Orientaciones Para El Diseño De Un Plan De Compensaciones Por Pérdida De Biodiversidad - Colombia*.
- Sartori, Richieri Antonio, Gustavo Alves Cunha Martins, André Scarambone Zaú, and

- Lucas Santa Cruz Brasil. 2019. "Urban Afforestation and Favela: A Study in A Community of Rio de Janeiro, Brazil." *Urban Forestry and Urban Greening* 40(April 2018): 84–92.
- Schjetnan, Mario, Jorge Calvillo., and Manuel Peniche. 2008. *Principios de Diseño Urbano/Ambiental*. ed. Limusa. México.
- Serag El Din, Hamam, Ahmed Shalaby, Hend Elsayed Farouh, and Sarah A. Elariane. 2013. "Principles of Urban Quality of Life for a Neighborhood." *HBRC Journal* 9(1): 86–92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrj.2013.02.007>.
- Shen, Guangrong, Zijun Wang, Chunjiang Liu, and Yujie Han. 2020. "Mapping Aboveground Biomass and Carbon in Shanghai's Urban Forest Using Landsat ETM+ and Inventory Data." *Urban Forestry & Urban Greening* 51: 126655. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866719305643>.
- Simao, Maria Carolina M., Jill Matthijs, and Ivette Perfecto. 2018. "Experimental Small-Scale Flower Patches Increase Species Density but Not Abundance of Small Urban Bees." *Journal of Applied Ecology* 55(4): 1759–68.
- Skärbäck, Erik. 2007. "Urban Forests as Compensation Measures for Infrastructure Development." *Urban Forestry & Urban Greening* 6(4): 279–85. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866707000362>.
- Speak, Andrew, Francisco J. Escobedo, Alessio Russo, and Stefan Zerbe. 2018. "An Ecosystem Service-Disservice Ratio: Using Composite Indicators to Assess the Net Benefits of Urban Trees." *Ecological Indicators* 95(March): 544–53. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.048>.
- Szumacher, Iwona, and Ewa Malinowska. 2013. "SERVICIOS ECOSISTÉMICOS URBANOS SEGÚN EL MODELO DE VARSOVIA." *Revista del CESLA* (16): 81–108.
- TEEB. 2010. *Una Guía Rápida: La Economía de Los Ecosistemas y La Biodiversidad Para Diseñadores de Políticas Locales y Regionales*.
- Tian, Tian et al. 2022. "How to Accurately Assess Cultural Ecosystem Services by Spatial Value Transfer? An Answer Based on the Analysis of Urban Park." *SSRN Electronic Journal* 82(February): 127875. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127875>.
- Tovar-Corzo, G. 2013. "An Approximation Urbanistic Silviculture in Colombia [Aproximación a La Silvicultura Urbana En Colombia]." *Bitacora Urbano Territorial* 22(1): 119–36. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84890545275&partnerID=40&md5=8ce5825ba729e546ab655c206dbc1202>.
- Tovar, Germán. 2006. "Manejo Del Arbolado Urbano En Bogotá." *Revista Colombia Forestal* 9(16–17): 187–205.
- Tsoka, Stella, Thomas Leduc, and Auline Rodler. 2021. "Assessing the Effects of Urban Street Trees on Building Cooling Energy Needs: The Role of Foliage Density and Planting Pattern." *Sustainable Cities and Society* 65: 102633. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670720308507>.

- Turner-Skoff, Jessica B., and Nicole Cavender. 2019. "The Benefits of Trees for Livable and Sustainable Communities." *PLANTS, PEOPLE, PLANET* 1(4): 323–35. <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ppp3.39>.
- Urban, Analyzing et al. 2023. "Análisis de La Agroforestería Urbana : Una Revisión Sistemática y Análisis Bibliométrico." 26(2): 77–91.
- Urrútia, Gerard, and Xavier Bonfill. 2010. "PRISMA Declaration: A Proposal to Improve the Publication of Systematic Reviews and Meta-Analyses." *Medicina Clinica* 135(11): 507–11. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025775310001454>.
- Vera, Leandro N. Ramírez, Mirta L. Pértile, Viviana C. 2017. "Disponibilidad de Espacios Verdes En La Ciudad de Resistencia: Estudio Mediante La Aplicación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)."
- Vogt, Jess, Richard J. Hauer, and Burnell C. Fischer. 2015. "The Costs of Maintaining and Not Maintaining the Urban Forest: A Review of the Urban Forestry and Arboriculture Literature." *Arboriculture and Urban Forestry* 41(6): 293–323.
- Ward, Kathleen T., and Gary R. Johnson. 2007. "Geospatial Methods Provide Timely and Comprehensive Urban Forest Information." *Urban Forestry & Urban Greening* 6(1): 15–22. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S161886670600080X>.
- Wiesel, Patrik Gustavo, Elias Dresch, Eduardo Rodrigo Ramos de Santana, and Eduardo Alcayaga Lobo. 2021. "Urban Afforestation and Its Ecosystem Balance Contribution: A Bibliometric Review." *Management of Environmental Quality: An International Journal* 32(3): 453–69. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/MEQ-07-2020-0156/full/html>.
- Wood, Eric M., and Sevan Esaian. 2020. "The Importance of Street Trees to Urban Avifauna." *Ecological Applications* 30(7). <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eap.2149>.
- Yang, Jun, Conghong Huang, Zhiyong Zhang, and Le Wang. 2014. "The Temporal Trend of Urban Green Coverage in Major Chinese Cities between 1990 and 2010." *Urban Forestry and Urban Greening* 13(1): 19–27.
- Yao, Na et al. 2019. "Beijing's 50 Million New Urban Trees: Strategic Governance for Large-Scale Urban Afforestation." *Urban Forestry & Urban Greening* 44(January): 126392.
- Yaoqi Zhang, Anwar Hussain, Jinyang Deng, and Neil Letson. 2007. "Public Attitudes Toward Urban Trees and Supporting Urban Tree Programs." *Environment and Behavior* 39(6): 797–814. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0013916506292326>.
- Yepes-Nuñez, Juan José, Gerard Urrútia, Marta Romero-García, and Sergio Alonso-Fernández. 2021. "The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews." *Revista Espanola de Cardiologia* 74(9): 790–99.
- Ying, Jun, Xiaojing Zhang, Yiqi Zhang, and Svitlana Bilan. 2022. "Green Infrastructure: Systematic Literature Review." *Economic Research-Ekonomiska Istrazivanja* 35(1):

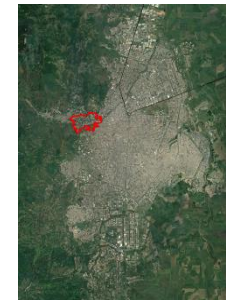
-
- 343–66. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2021.1893202>.
- Zea, Jorge, Rodian Fonseca, and Edgar Balseiro. 2015. 1 *Manual de Silvicultura Urbana Para Barranquilla*. <https://www.researchgate.net/publication/331230765>.
- Zheng, Yu et al. 2019. “Visual Sensitivity versus Ecological Sensitivity: An Application of GIS in Urban Forest Park Planning.” *Urban Forestry & Urban Greening* 41: 139–49. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1618866718307179>.
- Živojinović, Ivana, and Bernhard Wolfslehner. 2015. “Perceptions of Urban Forestry Stakeholders about Climate Change Adaptation - A Q-Method Application in Serbia.” *Urban Forestry and Urban Greening* 14(4): 1079–87.
- Schjetnan, Mario et. al. (1984). *Principios de Diseño Urbano Ambiental*. 12-35. Ed. Concepto. México
- Solecki, W., Marcotullio, P.J., 2013. *Climate change and urban biodiversity vulnerability. Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Springer, Netherlands, pp. 485–504.
- Vargas A., Balmaceda N. (2011) *Forestación urbana mediante compensación ambiental*. Centro de políticas públicas. Pontificia Universidad Católica de Chile. 43

7. Anexo

7.1 Caracterización de tramos del Corredor del Río Cali

Tramo	Descripción	Barrio	Estrato	Comuna	CA	Viviendas
<p>Área comprendida entre por las siguientes colindancias: Norte con la avenida 5 oeste en el barrio Terron Colorado y Normandía. Oriente con la calle y en los barrios Centenario y el peñón. Sur con la calle 10, carrera 14 y avenida circunvalar en los barrios peñón, San Antonio y Bellavista. Occidente con el límite del área urbana, la carrera 1 en los barrios Bellavista, Santa Teresita y Terron Colorado.</p> <p>Esta área se caracteriza por tener una extensión de 2.04 km² con alturas entre 1061 – 1009 msnm, temperatura media de 19°C, viento 3km/h, humedad del 89% y calidad del aire 67. Está conformada por 13 barrios de las comunas 1, 2, 3 y 19. Según el censo arbóreo del 2015 tiene 5.241 árboles.</p>	Acueducto San Antonio	2	3	552	874	
	Aguacatal	1	1	13	7247	
	Arboleda	6	2	709	3842	
	Bella Vista	2	19	31	3281	
	Centenario	5	2	124	5196	
	El Peñón	5	3	497	2250	
	Juanambú	5	2	121	3515	
	Normandía	6	2	721	3779	
	San Antonio	3	3	23	874	
	Santa Rita	6	2	1250	1037	
	Santa Teresita	6	2	1153	4255	
	Terron Colorado	2	1	37	4383	
	Versalles	5	2	10	2414	

1



Tramo	Descripción	Barrio	Estrato	Comuna	CA	Viviendas
<p>Área comprendida entre por las siguientes colindancias: Norte con avenida 6 norte y avenida 4 norte en los barrios Centenario, Versalles y San Vicente. Oriente con la el separador de la calle 25 en el barrio Prados del Norte. Sur con carreras 1, 2 y 5 en los barrios Piloto, El Hoyo, San Pedro y La Merced. Occidente con la calle y en los barrios Centenario y el peñón</p> <p>Esta área se caracteriza por tener una extensión de 1.18 km2 con alturas entre 1009 – 978 msnm, temperatura media de 21°C, viento 3km/h, humedad del 95% y calidad del aire 73. Está conformada por 13 barrios de las comunas 2 y 3. Según el censo arbóreo del 2015 tiene 3.446 árboles.</p>	CAM/Centenario	5	2	504	N/A	
	Centenario	5	2	346	2832	
	El Hoyo	3	3	282	154	
	El Piloto	2	3	200	233	
	Granada	4	2	346	5196	
	Industria De Licores	N/A	2	56	N/A	
	Juanambú	5	2	12	3515	
	La Merced	3	3	71	545	
	Paseo Bolívar/Centenario	5	2	139	N/A	
	Prados Del Norte	5	2	36	6004	
	San Pedro	3	3	393	898	
	San Vicente	4	2	360	2919	
	Versalles	5	2	701	2414	

2



Tramo	Descripción	Barrio	Estrato	Comuna	CA	Viviendas
3	<p>Área comprendida entre por las siguientes colindancias: norte con avenida 3 norte, avenida 2e norte en los barrios Prados del norte, Vipasa, La Merced y Ciudad Los Álamos. Oriente con autopista Simón Bolívar con los barrios Ciudad Los Álamos, Calima, Brisas de Los Álamos y Los Guadales. Sur con carrera 5 norte y carrera 1 en los barrios. Flora Industrial, Olaya Herrera, Guillermo Valencia, Ignacio Rengifo, Bolivariano, Unid. Residencial Bueno Madrid, Sultana – Berlina y Fátima. Occidente con la el separador de la calle 25 en el barrio Prados del Norte</p> <p>Esta área se caracteriza por tener una extensión de 2, 2.83 km² con alturas entre 978 - 958 msnm, temperatura media de 25°C, viento 1km/h, humedad del 97% y calidad del aire 72. Está conformada por 15 barrios de las comunas 2, y 4. Según el censo arbóreo del 2015 tiene 4.862 árboles.</p>	Bolivariano	2	4	47	358
		Calima	3	4	775	941
		Ciudad Los Álamos	4	2	18	4605
		Fátima	2	4	68	152
		Flora Industrial	3	4	399	396
		Guillermo Valencia	3	4	120	574
		Ignacio Rengifo	3	4	46	375
		Industria De Licores	N/A	4	37	N/A
		La Isla	2	4	133	1643
		La Merced	3	3	608	545
		Olaya Herrera	2	4	482	714
		Prados Del Norte	5	2	924	6004
		Sultana-Berlín	2	4	466	255
		Unidad Res. Bueno Madrid	3	4	42	480
		Vipasa	4	2	697	2106



Tramo	Descripción	Barrio	Estrato	Comuna	CA	Viviendas
	Área comprendida entre por las siguientes colindancias: Norte con avenida 2b norte, avenida 2c norte (limite áreas urbanas) en los barrios Brisas de Los Álamos y Ciudadela Floralia. Oriente con el río Cauca en el barrio Ciudadela Floralia. Sur con carrera 4 norte en los barrios Ciudadela Floralia y Los Guaduales. Occidente con autopista Simón Bolívar con los barrios Ciudad Los Álamos, Calima, Brisas de Los Álamos y Los Guaduales	Calima	3	4	7	941
Ciudadela Floralia		2	6	1037	7749	
Los Guaduales		3	6	1864	3121	
Paso Del Comercio (El Carm)		2	6	1	1411	
	Esta área se caracteriza por tener una extensión de 1.40 km ² con alturas entre 958 - 945 msnm, temperatura media de 27°C, viento 1km/h, humedad del 97% y calidad del aire 64. Está conformada por 4 barrios de las comunas 4 y 6. Según el censo arbóreo del 2015 tiene 2.909 árboles.					

4



7.2 Matriz de calificación de la literatura gris

Clase	Ciudad	Descripción	A	B	C	D	E	F
	Bilbao (España)	Por medio de BILBAO Ría 2000 quien en colaboración con las Administraciones Públicas dirigen los procesos de transformación del área metropolitana de Bilbao. El enfoque holístico logra transformaciones económicas, sociales y físicas. El énfasis del proyecto está en la limpieza ambiental, el uso de la cultura, la internacionalización y el diseño, las importantes mejoras en su infraestructura, así como la restauración de sus áreas históricas durante unos 25 años han rejuvenecido con éxito la ciudad	3	1	4	3	3	2
World Prize	City New York (Estados Unidos)	New York se enmarcan en la implementación efectiva de PlaNYC1 2030 un plan holístico e interdisciplinario para una ciudad más grande y más verde que integra áreas como el uso de la tierra, el transporte, el medio ambiente y la salud pública en un solo documento. Pretende reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 30 % por debajo de los niveles de 2005	3	1	4	3	3	2
	Suzhou (China)	La ciudad llevó a cabo una planificación adecuada e hizo esfuerzos deliberados para invertir en infraestructura física para respaldar sus objetivos económicos. ha mejorado continuamente su entorno de vida y ha hecho que su paisaje rico en agua sea más accesible, de acuerdo con el valor chino de que el "agua" forme vínculos con los asentamientos	3	1	4	3	3	2
	Medellín (Colombia)	El proyecto Unidades de Vida Articulada involucra activamente a los ciudadanos en la construcción de espacios deportivos, recreativos y culturales, muchos de los cuales	4	3	4	3	4	4

Clase	Ciudad	Descripción	A	B	C	D	E	F
		están adaptados de los tanques de agua existentes que ocupaban grandes terrenos que antes eran inaccesibles. El Circumvent Garden a lo largo del borde urbano-rural de la ciudad ayudó a controlar la expansión urbana, mitigar los riesgos de deslizamientos de tierra, mejorar los asentamientos, generar nuevos espacios públicos y mejorar la conectividad y la accesibilidad a los trabajos y la educación.						
	Seoul (Korea)	El Plan de Seúl 2030 formuló estrategias de gestión de conflictos y formó un equipo de negociadores para comprometerse con las partes en conflicto en proyectos de desarrollo urbano. La participación ciudadana como la norma de todos los planes, incorporó procesos de puesta en marcha en las operaciones del día a día. Se destacan acciones como la eliminación de una carretera elevada para restaurar el antiguo arroyo en Cheonggyecheon, la peatonalización de Yonsei-ro y la conversión del paso elevado de la estación de Seúl en Seoulo 7017, una pasarela elevada de un kilómetro de vegetación exuberante, la ciudad envía una fuerte señal de que su futuro es uno donde las personas son lo primero.	3	2	4	4	3	2
	Vienna (Austria)	El proyecto de la ciudad se denomina Smart City Wien e iniciada en 2011. Durante esa época la administración ambiental mejoró el flujo y la calidad del agua del Danubio tanto para la ciudad como para la región circundante. También creó una variedad de opciones de vivienda asequible y nuevas comunidades. La movilidad esta basada en el uso e la bicicleta y los peatones se complementa con una extensa red de transporte público que comprende metro, tranvías y autobuses. La iniciativa Grätzloase (Neighborhood Oasis), permitió a los ciudadanos dar forma a los espacios públicos, como transformar los carriles de estacionamiento en parques.	3	3	4	4	3	4
	Barranquilla (Colombia)		5	4	5	4	3	4

Clase	Ciudad	Descripción	A	B	C	D	E	F
Planes Nacionales de silvicultura urbana		Manual Silvicultura Urbana para Barranquilla - Este documento propone el manejo técnico, enfatiza en la selección de las especies y orienta sobre la definición del lugar de siembra. Plantea la incorporación de redes para el flujo de fauna y flora, una relación necesaria con los ecosistemas aledaños y las proyecciones de desarrollo de la ciudad.						
	Bogotá (Colombia)	Plan Distrital de Silvicultura urbana, Zonas Verdes y Jardinería para Bogotá D.C. 2019-2030 - Este documento define la ruta de acción sobre la cual deberá guiarse la gestión con base en un diagnóstico de la cobertura para consolida el arbolado, las zonas verdes y la jardinería como elementos integradores y estructurantes del diseño urbano y ambiental de la ciudad	5	5	5	5	4	5
	Cali (Colombia)	Plan de silvicultura urbana de Santiago de Cali - Este documento presenta las bases conceptuales y metodológicas para mejorar cuantitativa y cualitativamente las Coberturas Vegetales urbanas, partiendo del análisis ecosistémico, en procesos fuertes de complementariedad institucional y participación comunitaria.	5	5	5	4	4	5
	Cartagena (Colombia)	Plan De Silvicultura Urbana Del Distrito De Cartagena De Indias - Este documento busca establecer los lineamientos para la selección técnicas de especies, siembra y manejo para la atenuación térmica por sombra, generación de microclimas, la protección ante eventos climáticos.	5	5	5	4	3	5
	Manizales (Colombia)	Manual De Silvicultura Urbana Para Manizales - Este documento presenta los conocimientos de la arborización como base para ampliar el número, diversidad y frecuencia de estos acompañantes urbanos y como respuesta a esa necesidad de apropiarnos del entorno natural para lograr defenderlo.	5	4	5	4	2	4
	Medellín (Colombia)		5	5	5	4	3	5

Clase	Ciudad	Descripción	A	B	C	D	E	F
		Manual De Silvicultura Urbana Para Medellin Gestión, planeación y manejo de la infraestructura verde - Este documento expone herramientas de planificación para las intervenciones silviculturales, integradas con el reciente Acuerdo 48 de 2014 por medio del cual, se adopta la revisión y ajuste a largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial.						
	Pereira (Colombia)	Manual De Silvicultura Urbana De Pereira - Este documento como instrumento de gestión que permita planificar el cultivo y manejo de árboles en las zonas verdes públicas de la Ciudad y que proporcione herramientas y parámetros de orden técnico que propicien la selección de especies y el manejo e intervención de la flora urbana.	5	4	5	4	2	4

Donde **A** refiere a la Pertinencia: Hace referencia a la evaluación del propósito, objetivo y alcance del instrumento sobre el tema específico de las áreas con cobertura urbanas con arbórea y a la claridad sobre el métodos, datos y contextos que respaldar las conclusiones de las aplicaciones. **B** refiere a la Fuente: Hace referencia a la confiabilidad, rigurosidad y reconocimiento de la entidad que emite el instrumento de planificación. **C** refiere a la Cobertura de datos: Hace referencia a la calidad de los datos explorados, recopilados y analizados considerando las fuentes de información y estudios previos que soporten el enfoque del instrumento de planificación. **D** refiere a la actualidad del instrumento: Hace referencia a la vigencia de toma de datos, aplicación y publicación del instrumento de planificación. **E** refiere a la aplicabilidad: Hace referencia a la capacidad de utilizar y replicar los métodos empleados por el instrumento de planificación. **F** refiere a la calidad global de recurso: Hace referencia a comparación entre diversos contextos regionales para dar validez al instrumento de planificación.

7.3 Lista de verificación PRISMA - VTU

Autor	Documento	Metodología	Variable Territorial Urbana
Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., (...), Nowak, D.J., Terradas, J. (2014)	Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain 10.1007/s13280-014-0507-x	En este documento se aplica el modelo i-Tree Eco para cuantificar en términos biofísicos y monetarios los servicios ecosistémicos de "purificación del aire", "regulación climática global" y el perjuicio del ecosistema "contaminación del aire" asociado con las emisiones biogénicas	Densidad de población Equipamiento Transporte público Uso del suelo Áreas verdes
Hegetschweiler, K.T., de Vries, S., Arnberger, A., (...), Voigt, A., Hunziker, M. (2017)	Linking demand and supply factors in identifying cultural ecosystem services of urban green infrastructures: A review of European studies 10.1016/j.ufug.2016.11.002	Este documento revisa 40 publicaciones que tratan sobre la demanda o los factores sociales, como las necesidades, preferencias y valores de los usuarios, así como la oferta o los factores físicos espacialmente explícitos, como la cantidad de espacios verdes, la (bio)diversidad, la infraestructura recreativa, etc., y la vinculación de la demanda y factores de oferta juntos.	infraestructura verde, inventario forestal, parques urbanos, biodiversidad,
Escobedo, F.J., Clerici, N., Staudhammer, C.L., Corzo, G.T. (2015)	Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services 10.1016/j.ufug.2015.09.011	Este documento Utilizó inventarios públicos de árboles urbanos, indicadores de servicios ecosistémicos (ESS) y datos geoespaciales para analizar estadística y espacialmente los atributos estructurales y de diversidad y la provisión de ESS en los usos del suelo y los	Densidad de población Nivel socioeconómico

		estratos socioeconómicos de Bogotá	
Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente Barranquilla- DAMAB (2015)	Manual Silvicultura Urbana para Barranquilla	Este documento propone el manejo técnico, enfatiza en la selección de las especies y orienta sobre la definición del lugar de siembra. Plantea la incorporación de redes para el flujo de fauna y flora, una relación necesaria con los ecosistemas aledaños y las proyecciones de desarrollo de la ciudad	Tipo de cobertura del suelo morfológicas de la especie Redes eléctricas Sistema vial
Alcaldía Mayor de Bogotá., Secretaria Distrital de Ambiente ., Secretaría Distrital de Planeación., Jardín Botánico José Celestino Mutis (2019)	Plan Distrital de Silvicultura urbana, Zonas Verdes y Jardinería para Bogotá D.C. 2019-2030	Este documento define la ruta de acción sobre la cual deberá guiarse la gestión con base en un diagnóstico de la cobertura para consolida el arbolado, las zonas verdes y la jardinería como elementos integradores y estructurantes del diseño urbano y ambiental de la ciudad	Sistema de circulación (Vías, andenes, separadores, glorietas, Corredor férreo) sistemas lúdicos (parques, zonas blandas, plazoletas) sistema hídrico (Rondas forestales) sistema de protección (Franjas de protección) Usos del suelo Estructura ecológica principal Andenes Parques
DAGMA 2019	Plan de silvicultura urbana de Santiago de Cali	Este documento presenta las bases conceptuales y metodológicas para mejorar cuantitativa y cualitativamente las Coberturas Vegetales urbanas, partiendo del análisis ecosistémico, en procesos fuertes de complementariedad institucional y participación comunitaria.	Separadores viales Rondas de caneles Rondas de ríos Plazoletas Plazas Parques Glorietas Equipamientos deportivos o culturales Corredor férreo

Establecimiento Público Ambiental - EPA (2017)	Plan De Silvicultura Urbana Del Distrito De Cartagena De Indias	Este documento busca establecer los lineamientos para la selección técnicas de especies, siembra y manejo para la atenuación térmica por sombra, generación de microclimas, la protección ante eventos climáticos	<p>Bulevares Andenes (1.2m) Red hídrica Infraestructura servicios públicos</p> <hr/> <p>Tipos de construcciones Variables Biofísicas (Precipitación, humedad, temperatura, etc.) Áreas públicas de alta importancia ecológica Elementos lineales naturales de alta importancia ecológica Espacios públicos de alto tráfico peatonal con presencia de vehículos Espacios públicos con énfasis en circulación de vehículos Áreas destinadas a la recreación pasiva Áreas con condiciones de uso especial Espacio público privado</p>
Alcaldía de Manizales, CORPOCALDAS y Universidad de Caldas. Manizales (2014)	Manual De Silvicultura Urbana Para Manizales	Este documento presenta los conocimientos de la arborización como base para ampliar el número, diversidad y frecuencia de estos acompañantes urbanos y como respuesta a esa necesidad de apropiarnos del entorno natural para lograr defenderlo.	<p>Variables Biofísicas (Precipitación, humedad, temperatura, etc.) Espacios abiertos Redes eléctricas Redes de servicios públicos</p>
Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. Jardín Botánico de Medellín (2015)	Manual De Silvicultura Urbana Para Medellín Gestión, planeación y manejo de la infraestructura verde	Este documento expone herramientas de planificación para las intervenciones silviculturales, integradas con el reciente Acuerdo 48 de 2014 por	<p>Sistema orográfico zonas verdes asociadas al sistema hídrico zonas verdes con interés ambiental y paisajístico</p>

		medio del cual, se adopta la revisión y ajuste a largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial.	Zonas para la prevención de inundaciones, avenidas torrenciales y movimientos en masa zonas priorizadas para captura de carbono y almacenamiento de biomasa Zonas de recarga de acuíferos zonas verdes de espacio público, movilidad y predios privados jardines pérgolas
Alcaldía de Pereira., Universidad Tecnológica de Pereira., Secretaria de Planeación del Municipio de Pereira (2010)	Manual De Silvicultura Urbana De Pereira	Este documento como instrumento de gestión que permita planificar el cultivo y manejo de árboles en las zonas verdes públicas de la Ciudad y que proporcione herramientas y parámetros de orden técnico que propicien la selección de especies y el manejo e intervención de la flora urbana.	Infraestructura Equipamientos Elementos biofísicos

7.4 Lista de verificación PRISMA SE

Autor	Documento	Metodología	Servicios Ecosistémicos
Escobedo, F.J., Kroeger, T., Wagner, J.E. (2011)	Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices 10.1016/j.envpol.2011.0 1.010	Este documento emplea ejemplos de los servicios ecosistémicos de bosques urbanos de calidad del aire y secuestro de dióxido de carbono para ilustrar cuestiones asociadas con la evaluación de su eficacia para mitigar la contaminación urbana	Secuestro de carbono Mejoramiento de la calidad del aire Disminución de la escorrentía de aguas pluviales Producción de granos, frutas, nueces y semillas hábitat y refugios para vida silvestre Calidad de los acuíferos y aguas superficiales Sombra de árboles y reducción de viento infiltración del suelo Control de erosión retención de nutrientes del suelo
Roy, S., Byrne, J., Pickering, C. (2012)	A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. 10.1016/j.ufug.2012.06. 006	Este documento proporciona una revisión cuantitativa de 115 estudios originales de árboles urbanos, examinando: (i) ubicaciones de investigación, (ii) métodos de investigación y (iii) técnicas de evaluación de los servicios y perjuicios de los árboles	Calidad del aire: Producción de oxígeno. filtrado de aire. Eliminación de monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, partículas suspendidas. Reducción de smog, emisiones de dióxido de carbono aguas pluviales: reducción de la tasa de escorrentía de aguas pluviales, reducir el volumen de escorrentía de aguas pluviales, reducción de daños por inundaciones, reducir los problemas de calidad del agua, recarga de agua subterránea energía: reducir el uso anual de energía, reducir el uso de energía en verano, reducción de la energía de refrigeración estacional, reducción de las emisiones de dióxido de carbono de la energía

			<p>hábitat: proporcionar hábitat para la vida silvestre, mejorar la biodiversidad, proporcionar estabilidad a los ecosistemas urbanos,</p> <p>ruido: reducir el ruido, reducir el volumen aparente</p> <p>microclima: dando sombra, reducción de la radiación solar, modificando el microclima, reducción de la humedad relativa, reducción de la temperatura del aire, reducción del efecto isla de calor, reducción del deslumbramiento / reflejo, controlar el viento</p> <p>Purificación de aire</p>
Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., (...), Nowak, D.J., Terradas, J. (2014)	Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain 10.1007/s13280-014-0507-x	Este documento aplica el modelo i-Tree Eco para cuantificar en términos biofísicos y monetarios los servicios ecosistémicos de "purificación del aire", "regulación climática global" y el perjuicio del ecosistema "contaminación del aire" asociado con las emisiones biogénicas	Purificación de aire
McPherson, E.G., Simpson, J.R., Xiao, Q., Wu, C. (2011)	Million trees Los Angeles canopy cover and benefit assessment 10.1016/j.landurbplan.2010.08.011	Este documento utiliza datos de detección remota QuickBird de alta resolución, fotografías aéreas y sistemas de información geográfica para clasificar los tipos de cobertura terrestre, medir la cubierta de dosel de árboles (TCC) e identificar posibles sitios para la plantación de árboles	<p>Ahorros de energía</p> <p>Reducciones de dióxido de carbono atmosférico</p> <p>Beneficios de la calidad del aire</p> <p>Reducciones de escorrentía de aguas pluviales</p> <p>Estética y paisajísticos</p>
Nowak, D.J., Greenfield, E.J. (2012)	Tree and impervious cover change in U.S. cities 10.1016/j.ufug.2011.11.005	Este documento interpreta fotografías aéreas emparejadas para evaluar los cambios recientes en los tipos de cubierta arbórea, impermeable y de otro tipo en 20 ciudades de EE. UU., así como en terrenos urbanos dentro de los Estados Unidos contiguos	No detalla servicios ecosistémicos
Dobbs, C., Kendal, D.,	Multiple ecosystem services and disservices	Este documento establece indicadores de servicios ecosistémicos espacialmente	<p>Mitigación climática</p> <p>Mantenimiento del clima favorable</p>

Nitschke, C.R. (2014)	of the urban forest establishing their connections with landscape structure and sociodemographics 10.1016/j.ecolind.2014.02.007	relevantes y transferibles a otras ciudades para luego cuantificar las relaciones entre la estructura de la vegetación del paisaje y la provisión de servicios y perjuicios	Drenaje Mantenimiento de un bosque urbano saludable Provisión de hábitat Productividad Mantenimiento del patrimonio natural Recreación
Lafortezza, R., Davies, C., Sanesi, G., Konijnendijk, C.C. (2013)	Green infrastructure as a tool to support spatial planning in European urban regions https://doi.org/10.3832/ifor0723-006	Este documento presenta un marco conceptual actualizado para el desarrollo, la gestión y el análisis de las redes para la infraestructura verde (IG) centrándose en los impulsores contemporáneos anidados a nivel territorial y con un papel destacado para las consideraciones temporales	alimentos calidad del aire secuestro de carbono gestión de inundaciones tratamiento de aguas condiciones climáticas locales prevención de la erosión del suelo
Escobedo, F.J., Giannico, V., Jim, C.Y., Sanesi, G., Lafortezza, R. (2019)	Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? 10.1016/j.ufug.2018.02.011	Este documento realiza una revisión de la literatura para comprender mejor el origen, las tendencias y la evolución de una serie de metáforas, que incluyen servicios ecosistémicos (ES), infraestructura verde (GI) y soluciones basadas en la naturaleza (NBS) sus interpretaciones institucionales y contextuales	No detalla servicios ecosistémicos
Hegetschweiler, K.T., de Vries, S., Amberger, A., (...), Voigt, A., Hunziker, M. (2017)	Linking demand and supply factors in identifying cultural ecosystem services of urban green infrastructures: A review of European studies	Este documento revisa 40 publicaciones que tratan sobre la demanda o los factores sociales, como las necesidades, preferencias y valores de los usuarios, así como la oferta o los factores físicos espacialmente explícitos, como la cantidad de espacios verdes, la (bio)diversidad,	servicios culturales, recreativos y estéticos

	10.1016/j.ufug.2016.11.002	la infraestructura recreativa, etc., y la vinculación de la demanda y factores de oferta juntos.	oferta de vida silvestre
Peihao Song, Gunwoo Kim, Audrey Mayer, Ruizhen He, Guohang Tian 2020	Assessing the Ecosystem Services of Various Types of Urban Green Spaces Based on i-Tree Eco	Este documento se utiliza imágenes aéreas de súper alta resolución para adquirir la distribución espacial de los espacios verdes urbanos; se aplicó un método de muestreo aleatorio pre-estratificado modificado para obtener la información de la vegetación de los cuatro tipos de espacios verdes urbanos en Luohe, una ciudad llana común en China; y el modelo i-Tree Eco se utilizó además para evaluar la estructura de la vegetación y varios servicios ecosistémicos	Eliminación de la contaminación del aire Reducción de Escorrentía
Endreny, T., Santagata, R., Perna, A., (...), Rallo, R.F., Ulgiati, S. (2017)	Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing 10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016	Este documento estima la cobertura de árboles existente y potencial, y su contribución a los servicios ecosistémicos en Beijing, Buenos Aires, Cairo, Istanbul, London, Los Angeles, Mexico City, Moscow, Mumbai, Tokyo	Reducciones de la contaminación del aire, Reducción de las aguas pluviales, Reducción de la energía de los edificios Reducción de las emisiones de carbono
Kim, G., Miller, P.A., Nowak, D.J.c (2015)	Assessing urban vacant land ecosystem services: Urban vacant land as green infrastructure in the City of Roanoke, Virginia 10.1016/j.envpol.2016.01.075	Este documento utiliza interpretación de fotografías aéreas con verificación de terreno para identificar y catalogar parcelas de terreno vacantes dentro de los límites de la ciudad y los resultados se mapearon utilizando los modelos i-Tree Canopy e i-Tree Eco para definir las clases de cobertura terrestre y cuantificar la estructura y los servicios del ecosistema.	Eliminación de la contaminación del aire Almacenamiento y secuestro de carbono
Escobedo, F.J., Clerici, N., Staudhammer, C.L., Corzo, G.T. (2015)	Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services	Este documento Utiliza inventarios públicos de árboles urbanos, indicadores de servicios ecosistémicos (ESS) y datos geoespaciales para analizar estadística y espacialmente los atributos estructurales y de diversidad y la	calidad del aire y el almacenamiento de carbono

	10.1016/j.ufug.2015.09.011	provisión de ESS en los usos del suelo y los estratos socioeconómicos de Bogotá	cultural hábitat Mitigación de olores
Alam, M., Dupras, J., Messier, C. (2016)	A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services 10.1016/j.ecolind.2015.05.035	Este documento presenta un indicador para determinar servicios de los ecosistemas mediante la integración de subíndices que representa tipos de uso de la tierra	Hábitat Calidad del aire
Roeland, S., Moretti, M., Amorim, J.H., (...), Sicard, P., Calfapietra, C. (2019)	Towards an integrative approach to evaluate the environmental ecosystem services provided by urban forest 10.1007/s11676-019-00916-x	Este documento propone una clasificación de servicios ecosistémicos ambientales EES de bosques urbanos a partir de indicadores obtenidos del análisis de la literatura y el conocimiento experto recopilado dentro de COST Action FP1204 GreenInUrbs,	mejora de la calidad del aire restauración de suelo y agua mejora del microclima eliminación de CO2 del aire provisión de hábitat para la biodiversidad apoyo a ecosistemas urbanos resilientes provisión de energía y nutrientes
Capotorti, G., Alós Ortí, M.M., Copiz, R., (...), Salvatori, E., Zattero, L. (2019)	Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning: A case study from the metropolitan area of Rome (Italy) 10.1016/j.ufug.2017.12.014	Este documento propone de creación de infraestructura verde (GI) que combine la prestación de servicios de regulación con la restauración y reconexión ecológica de bosques y árboles urbanos en un contexto densamente urbanizado.	Calidad del aire
Kang, J., Hirabayashi, S., Shibata, S. (2022)	Urban Forest Ecosystem Services Vary with Land Use and Species: A Case Study of Kyoto City 10.3390/f13010067	Este documento se aplica una investigación de cuadrantes de muestra basada en el suelo de árboles en una secuencia de tipos de terreno en la ciudad de Kioto	almacenamiento y secuestro de carbono eliminación de contaminantes del aire reducción de la escorrentía

Alpaidze, L., Salukvadze, J. (2023)	Green in the City: Estimating the Ecosystem Services Provided by Urban and Peri-Urban Forests of Tbilisi Municipality, GeorgiaV 10.3390/f14010121	Este documento estima la cubierta verde de Tbilisi e identificar las clases de cubierta superficial, los volúmenes y los valores de los servicios ecosistémicos.	Calidad del aire secuestro de carbono remoción de contaminantes atmosféricos
---	--	---	--

7.5 Matriz de distancias VTU Vs CA

ID_ARBOL	Urbanístico								Normativo	Socio económico		Riesgo
	Jv	Eq	Ep	Dj	Se	Np	Tp	Sp	Ap	Dp	Dv	Am
0202-001-001	98,93	143,87	94,67	115,98	0,86	326,56	161,06	99,36	1849,96	219	60	1367,56
0202-001-002	79,37	160,89	78,17	97,90	3,80	337,21	179,19	117,75	1834,12	0	0	1364,43
0202-001-014	12,30	99,03	183,29	242,18	2,02	247,70	41,30	2,44	1968,78	219	60	1362,22
0202-001-015	88,21	134,63	123,51	173,13	1,64	270,10	105,52	72,33	1909,46	219	60	1337,09
0202-003-005	26,17	120,37	10,44	53,61	1,53	316,94	226,04	117,74	1811,25	219	60	1319,54
0202-003-009	31,88	37,50	65,41	28,47	28,33	240,35	309,01	35,30	1745,25	80	22	1315,19
0202-003-016	21,50	115,61	2,61	49,41	3,74	309,84	230,81	113,38	1810,82	219	60	1312,80
0202-003-022	31,96	47,31	82,29	28,65	29,43	271,26	308,34	36,45	1722,38	80	22	1310,46
0202-004-002	32,82	43,81	87,67	28,53	30,22	278,54	308,29	37,51	1718,69	80	22	1306,93
0202-004-005	38,04	46,11	83,06	27,21	35,34	294,17	305,26	43,08	1715,60	80	22	1304,21
0202-004-011	10,06	104,58	0,00	38,32	4,43	295,64	242,70	102,33	1805,89	219	60	1303,88
0202-004-013	30,98	57,47	77,40	23,12	45,66	325,19	302,07	54,07	1710,16	80	22	1299,66
0202-004-025	13,44	108,17	0,00	41,41	0,56	297,05	239,66	105,88	1811,00	219	60	1299,55
0202-004-026	24,15	118,86	0,00	51,89	4,46	307,02	228,97	116,58	1820,00	219	60	1299,55
0202-004-034	23,57	74,63	71,43	16,93	47,58	352,13	312,50	55,82	1695,71	80	22	1286,27
0202-005-001	22,90	102,23	30,21	125,62	4,85	431,92	276,70	20,10	1690,74	0	0	1282,66
0202-005-005	3,79	32,15	78,54	64,07	1,00	241,62	343,67	0,56	1694,14	80	22	1281,85
0202-005-006	25,97	10,18	101,12	86,30	0,72	204,51	365,91	22,23	1689,52	80	22	1276,83
0202-005-007	3,68	13,09	61,25	58,72	1,00	265,93	338,35	8,58	1688,28	80	22	1276,44

7.6 Evaluación de expertos

7.6.1 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación VeTU

Tabla 20. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación VeTU

$VeTU_i$ vs $VeTU_j$	Media de escala si el elemento se ha suprimido	Varianza de escala si el elemento se ha suprimido	Alfa de Cronbach si el elemento se ha suprimido
Sp.vs.Am	42,20	256,700	,897
Sp.vs.Jv	42,00	258,500	,894
Sp.vs.Ep	40,60	259,300	,896
Sp.vs.Eq	40,80	306,200	,912
Am.vs.Sp	41,60	290,300	,915
Am.vs.Jv	42,00	267,500	,902
Am.vs.Ep	41,60	271,800	,906
Am.vs.Eq	41,40	285,800	,914
Jv.vs.Sp	41,00	260,500	,896
Jv.vs.Am	41,40	250,300	,894
Jv.vs.Ep	40,80	303,700	,911
Jv.vs.Eq	40,40	310,300	,915
Ep.vs.Sp	40,80	283,700	,905
Ep.vs.Am	41,60	257,300	,897
Ep.vs.Jv	41,00	275,500	,902
Ep.vs.Eq	40,60	299,300	,911
Eq.vs.Sp	41,00	275,500	,902
Eq.vs.Am	41,60	259,300	,896
Eq.vs.Jv	41,20	285,200	,907
Eq.vs.Ep	41,00	316,500	,919

7.6.2 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación SEp

Tabla 21. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación SEp

<i>SEp_j Vs SEp_i</i>	Media de escala si el elemento se ha suprimido	Varianza de escala si el elemento se ha suprimido	Alfa de Cronbach si el elemento se ha suprimido
Re_Cl.vs.P_Es	48,33	312,333	,924
Re_Cl.vs.A_Cb	49,00	301,000	,923
Re_Cl.vs.R_Ca	48,33	312,333	,924
Re_Cl.vs.R_Em	49,33	409,333	,954
Re_Ag.vs.Re_Cl	47,33	345,333	,932
Re_Ag.vs.P_Es	47,33	345,333	,932
Re_Ag.vs.R_Ca	48,67	324,333	,927
Re_Ag.vs.R_Em	49,33	341,333	,937
P_Es.vs.Re_Cl	49,33	312,333	,924
P_Es.vs.Re_Ag	47,67	324,333	,927
P_Es.vs.A_Cb	49,67	324,333	,927
P_Es.vs.R_Ca	49,33	312,333	,924
P_Es.vs.R_Em	50,00	364,000	,938
A_Cb.vs.Re_Cl	48,67	296,333	,927
A_Cb.vs.Re_Ag	49,67	321,333	,926
A_Cb.vs.P_Es	49,00	304,000	,924
A_Cb.vs.R_Ca	47,33	345,333	,932
R_Ca.vs.Re_Cl	48,00	304,000	,924
R_Ca.vs.Re_Ag	49,33	342,333	,931
R_Ca.vs.P_Es	49,67	324,333	,927
R_Ca.vs.R_Ca.vs.A_Cb	48,67	352,333	,936
R_Em.vs.Re_Cl	48,67	292,333	,922
R_Em.vs.Re_Ag	48,67	352,333	,936
R_Em.vs.P_Es	49,00	331,000	,930
R_Em.vs.A_Cb	49,00	301,000	,923
R_Em.vs.R_Ca	47,33	345,333	,932

7.6.3 Alfa de Cronbach para matriz de análisis de relación VeTU y SEp

Tabla 22. Estadísticas de fiabilidad detallada de la matriz de análisis de relación VeTU y SEp

$-VeTU_i$ vs SEp_j	Media de escala si el elemento se ha suprimido	Varianza de escala si el elemento se ha suprimido	Alfa de Cronbach si el elemento se ha suprimido
Sp.vs.Re_Cl	59,25	1222,917	,978
Sp.vs.Re_Ag	59,00	1208,667	,977
Sp.vs.P_Es	58,75	1192,917	,978
Sp.vs.A_Cb	58,00	1160,667	,976
Sp.vs.R_Ca	59,25	1227,583	,979
Sp.vs.R_Em	58,25	1178,250	,977
Am.vs.Re_Cl	58,75	1198,917	,977
Am.vs.Re_Ag	58,50	1188,333	,977
Am.vs.P_Es	57,75	1243,583	,978
Am.vs.A_Cb	59,00	1213,333	,978
Am.vs.R_Ca	58,25	1272,917	,980
Am.vs.R_Em	57,25	1264,917	,978
Jv.vs.Re_Cl	58,75	1194,917	,977
Jv.vs.Re_Ag	59,25	1217,583	,979
Jv.vs.P_Es	58,75	1194,917	,977
Jv.vs.A_Cb	60,25	1264,917	,978
Jv.vs.R_Ca	58,50	1184,333	,976
Jv.vs.R_Em	58,50	1184,333	,976
Ep.vs.Re_Cl	58,25	1170,917	,976
Ep.vs.Re_Ag	58,25	1170,917	,976
Ep.vs.P_Es	59,00	1212,667	,978
Ep.vs.A_Cb	58,75	1192,917	,978
Ep.vs.R_Ca	58,25	1170,917	,976
Ep.vs.R_Em	58,25	1170,917	,976
Eq.vs.Re_Cl	59,25	1216,250	,977
Eq.vs.Re_Ag	59,75	1240,250	,978
Eq.vs.P_Es	59,50	1229,667	,977
Eq.vs.A_Cb	59,25	1214,250	,978
Eq.vs.R_Ca	59,00	1203,333	,978
Eq.vs.R_Em	58,25	1171,583	,977