



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Patrones de respiración del suelo urbano
en Medellín y su influencia en algunos
servicios ecosistémicos**

**Urban Soil Respiration Patterns in
Medellín and Their Influence on
Ecosystem Services**

Yuli Andrea Gómez González

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Área curricular Ciencias Naturales

Medellín, Colombia

2026

Patrones de respiración del suelo urbano en Medellín y su influencia en algunos servicios ecosistémicos

Yuli Andrea Gómez González

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ciencias – Geomorfología y Suelos

Director:

Ingeniero Ambiental, M.Sc. Ingeniería Urbana, Ph.D. Toxicología Ambiental
Grupo de Investigaciones y Mediciones Ambientales GEMA – Grupo de
Investigación en Biodiversidad, Biotecnología y Bioingeniería GRINBIO
Universidad de Medellín

Jorge Luis Gallego Zapata

Codirector:

Ingeniero Agrónomo, M.Sc. Fitopatología, Ph.D. Ciencia del Suelo
Grupo de Investigación Sistemas Simbióticos
Universidad Nacional de Colombia

Juan Carlos Pérez Naranjo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Medellín, Colombia

2026

Dedicación.

*Por su amor infinito, sabiduría y apoyo incondicional.
Gracias a mi mamá y hermanos por motivarme y darme la fortaleza
para ir tras mis metas y alcanzar mis sueños.*

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Jorge Luis Gallego Zapata al cual admiro no solo como profesional sino también como amigo, gracias por acompañarme en este largo camino sin dejarme desfallecer, por el compromiso y la dedicación. Sin su apoyo este logro no habría sido posible. Así mismo, agradezco al profesor Juan Carlos Pérez Naranjo por su orientación durante mi proceso formativo. A la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y la Universidad de Medellín por brindarme el espacio de laboratorios y las herramientas necesarios para desarrollo este trabajo de investigación.

Gracias a su compromiso con la formación de profesionales ha sido posible no solo la culminación de este trabajo de investigación sino también el desarrollo de mi crecimiento personal y académico.

Extiendo mi agradecimiento a Daniel Mauricio Pineda Tobón y Oscar Iván Sánchez Patiño, por su valiosa colaboración y apoyo al brindarme asesoría, lo cual resultó esencial para la culminación de este proyecto.

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.

Yuli Andrea Gómez González

Nombre del estudiante

Fecha 22/10/2024

Tabla de contenido

	Pág.
1. Estructura de la tesis.....	10
2. Resumen.....	11
3. Introducción.....	15
4. Objetivos.....	17
5. Metodología general.....	17
6. Resultados.....	19
7. Referencias.....	20
8. CAPÍTULO 1.....	22
Tendencias de crecimiento urbano en la ciudad de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos del suelo.....	22
8.1 Resumen.....	22
8.2 Introducción.....	23
8.3 Crecimiento urbano y modelo de ciudad en Medellín.....	25
8.4 Gestión de áreas naturales en el suelo urbano.....	28
8.5 Suelo urbano y servicios ecosistémicos (SE).....	33
8.6 Conclusiones.....	37
8.7 Referencias.....	37
9. CAPÍTULO 2.....	44
Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín.....	44
9.1 Resumen.....	44
9.2 Introducción.....	46
9.3 Materiales y métodos.....	48
9.3.1 Área de estudio y muestreo.....	48
9.3.2 Protocolo de muestreo.....	48
9.3.3 Propiedades físicas del suelo.....	50
9.3.4 Propiedades químicas del suelo.....	50
9.3.5 Caracterización de metales traza en suelo urbano.....	51
9.3.6 Caracterización de servicios ecosistémicos.....	51

9.3.7	Análisis de datos.....	55
9.4	Resultados	56
9.4.1	Propiedades físicas	56
9.4.2	Propiedades químicas	59
9.4.3	Metales traza	65
9.5	Discusión	65
9.6	Conclusiones.....	69
9.7	Referencias.....	69
10.	CAPÍTULO 3.....	76
	Patrones de emisión de gases CO ₂ , CO, NO ₂ y NH ₃ en suelos de áreas verdes de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos	76
10.1	Resumen.....	76
10.2	Introducción.....	77
10.3	Materiales y métodos	79
10.3.1	Protocolo de muestreo.....	79
10.3.2	Propiedades fisicoquímicas	82
10.3.3	Análisis estadístico	82
10.4	Resultados	82
10.5	Discusión	86
10.6	Conclusiones.....	89
10.7	Referencias.....	90

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. 1. Usos del suelo POT 048/2014; Elaboración propia	31
Figura 2. 1. Mapa ciudad de Medellín	49
Figura 2. 2. Estabilidad de agregados por categoría de uso del suelo urbano.....	57
Figura 2. 3. Densidad real y aparente por categoría de uso del suelo urbano	58
Figura 2. 4. Porcentaje de porosidad en cada categoría de uso del suelo urbano.....	59
Figura 2. 5. Porcentaje de capacidad de retención de humedad (CRH) por categoría de uso del suelo urbano.....	59
Figura 2. 6. Análisis de componentes principales (PCA)..	64
Figura 3. 1 Montaje de equipos para la medición de los patrones de gases emitidos por las muestras de suelo urbano.....	81
Figura 3. 2. Patrón de emisión de gas CO ₂ (ppm)	83
Figura 3. 3. Patrón de emisión relativa de gas CO (ADC).....	83
Figura 3. 4. Patrón de emisión relativa de gas NO ₂ (ADC).....	84
Figura 3. 5. Patrón de emisión relativa de gas NH ₃ (ADC).	84
Figura 3. 6. Patrones generales de emisión de gases en cada categoría de suelo urbano..	86

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. 1. Censo de construcciones en Medellín (2009-2020).....	27
Tabla 1. 2. Espacio público por habitante en Medellín (2012-2022)	28
Tabla 1. 3. Espacio público per cápita año 2022 / zona verde (POT 048/2014)	32
Tabla 1. 4. Contexto urbano y Servicios Ecosistémicos	33
Tabla 1. 5. Demanda de servicios ecosistémicos en Medellín.....	35
Tabla 2. 1. Suelo urbano, servicios ecosistémicos, propiedades fisicoquímicas del suelo como indicadores de calidad	52
Tabla 2. 2. Identificación de texturas muestras de suelo urbano	56
Tabla 2. 3. %ISA, %ISE, DMP por categorías de uso del suelo urbano	56
Tabla 2. 4. Relación de MO, C.O y DOC disponible bajo condiciones de pH y conductividad eléctrica.....	60
Tabla 2. 5. Relación de bases totales	61
Tabla 2. 6. ANNOVA no paramétrica categorías de uso del suelo urbano	62
Tabla 2. 7. Espacios dimensionales para analizar la variabilidad total de las variables..	63
Tabla 2. 8. Traza de metales pesados, normatividad canadiense, muestras de suelo urbano.....	65
Tabla 3. 1. Promedio emisión en los patrones de respiración por cada gas	85
Tabla 3. 2. Correlación ajustada.	85

1. Estructura de la tesis

Preliminares:

La sección preliminar aborda de manera general los capítulos de la tesis. Se realiza un resumen, una introducción general y se describen los objetivos de la tesis, la metodología y los resultados que dieron cumplimiento a los objetivos propuestos.

Capítulo 1: Tendencias de crecimiento urbano en la ciudad de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos del suelo.

En el primer capítulo se realiza una revisión bibliográfica que describe de forma general como ha sido el desarrollo del suelo urbano en la ciudad de Medellín, destacando el proceso de urbanización acelerada desde finales del siglo XIX, motivado en gran parte por la migración rural hacia la ciudad. Se abordan los distintos planes de ordenamiento territorial (POT) implementados a lo largo de la historia, los cuales han permitido organizar el uso del suelo de manera más eficiente. Además, se analiza cómo las modificaciones en los usos del suelo han podido impactar la calidad de los servicios ecosistémicos del suelo urbano, tales como la regulación del ciclo del agua y la biodiversidad, entre otros.

Capítulo 2: Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín.

Este capítulo se enfoca en la identificación de algunas propiedades físicas y químicas del suelo urbano en distintas categorías de uso del suelo en Medellín: parque, institucional, vehicular y residencial; dentro de cada categoría, se considera la influencia de tres tipos de cobertura vegetal: césped, arbóreo y mixto. Además, se evalúa la presencia de metales pesados en cada una de las categorías de uso. Finalmente, se analizan estos indicadores de calidad del suelo en relación con los servicios ecosistémicos, tales como la fertilidad, el ciclo del agua, los nutrientes y la mitigación del cambio climático, con el fin de determinar cómo los usos diferenciados del suelo influyen en la prestación de dichos servicios.

Capítulo 3: Patrones de emisión de gases CO₂, CO, NO₂ y NH₃ en suelos de áreas verdes de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos.

En el tercer capítulo se identifican patrones de emisión de gases como el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y amoníaco

(NH₃) en suelos de áreas verdes en la ciudad de Medellín, y como estos se relacionan con los servicios ecosistémicos urbanos. Se analiza cómo las categorías de uso del suelo y sus coberturas vegetales afectan estos procesos, integrando los hallazgos previos sobre propiedades fisicoquímicas y presencia de metales pesados, para proporcionar una visión más completa del comportamiento del suelo en la regulación climática y la captura de carbono.

2. Resumen

La expansión urbana no planificada y el cambio en los usos del suelo son factores limitantes para el desarrollo de ciudades sostenibles y para la calidad de los servicios ecosistémicos. La urbanización del suelo se relaciona con la impermeabilización y compactación del terreno, la reducción de áreas verdes y la disminución de funciones ecosistémicas, generando impactos significativos sobre funciones como la regulación hídrica, la mitigación del cambio climático, la retención de nutrientes y la provisión de hábitats para la biodiversidad.

En Medellín, las dinámicas de expansión urbana transforman las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, comprometiendo su calidad y capacidad para sostener las funciones ambientales. El cambio en los usos del suelo tanto planificado como informal, ha afectado principalmente las laderas y suelos poco aptos para construcción. La reducción de las áreas verdes, el aumento de suelo impermeable y de infraestructura urbana han causado, por ejemplo, inundaciones más frecuentes al presentar menor capacidad de infiltración de agua lluvia en el suelo.

Esta investigación desarrollada en la ciudad de Medellín, Colombia, analiza muestras de 33 sitios urbanos categorizados como suelos en parques, de uso institucional, vehicular o residencial. A su vez cada categoría separa la influencia de coberturas vegetales como césped, compuesta por vegetación rastrera o pasto, mixta compuesta por vegetación ornamental con altura menor a 1,5 m y arbórea donde predominan individuos arbóreos con altura superior a 1,5 m. En las muestras de suelo se determinaron propiedades físicas como la textura, densidad real (DReal), densidad aparente (DApa), estabilidad de los agregados, índice de estabilidad estructural (ISE), índice de estabilidad de los agregados (ISA), diámetro medio ponderado (DMP), materia orgánica (MO),

capacidad de retención de humedad (CRH), punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (C.C) y porosidad (macroporosidad (Pma) y microporosidad (Pmi)). El análisis químico incluyó carbono orgánico (C.O), carbono orgánico disuelto (DOC), pH en H₂O y KCl 1N, nutrientes como calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), fósforo disponible (P), iones nitrito (NO₂⁻), nitrato (NO₃⁻) y fosfatos (PO₄³⁻), metales potencialmente tóxicos como el cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), zinc (Zn) y mercurio (Hg). Los patrones de respiración del suelo urbano presentaron concentración relativa de los gases dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y amoníaco (NH₃).

El procesamiento de los datos obtenidos incluyó un análisis descriptivo; medidas de tendencia central, dispersión, tablas y gráficos. También Se implementó un análisis no paramétrico de ANNOVA, aplicando Kruskal-Wallis y Dunn para identificar específicamente qué grupos son significativamente diferentes entre sí y un análisis de componente principales (PCA) con el fin de identificar patrones o tendencias, donde se identificó la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas respecto a las categorías parque, institucional, vehicular y residencial con cada una de las coberturas césped, mixto y arbóreo y un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) con el que se identificó la similitud y disimilitud en los patrones de respiración del suelo urbano con respecto a cada una de las categorías de uso y las coberturas.

Dentro de los resultados se destaca la categoría de uso institucional para la prestación de servicios ecosistémicos relacionado con la regulación del ciclo hidrológico (capacidad de retención de humedad entre 28-35%), la categoría residencial por presentar mejores condiciones para la captación de carbono y sumidero de CO₂ (Contenido de materia orgánica entre 12-24% y patrón de emisión de CO₂ entre 350-487 ppm). Adicionalmente todas las categorías de uso de suelo urbano presentaron propiedades moderadas para el soporte de vegetación y biodiversidad. Los patrones de respiración del suelo urbano en Medellín resaltan la necesidad de una gestión más sostenible del suelo para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, las cuales son fundamentales en la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación climática, la purificación del aire y la fertilidad del suelo.

Los resultados de esta investigación aportan una base técnica y científica que puede ser utilizada en futuros estudios sobre la calidad del suelo urbano en Medellín y en otros entornos urbanos con dinámicas similares. Asimismo, este trabajo puede servir como

insumo bibliográfico para la formulación de políticas públicas orientadas a la gestión sostenible del suelo urbano y para el diseño de proyectos que contribuyan al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el ODS 11 (ciudades y comunidades sostenibles), el ODS 13 (acción por el clima) y el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres), en el contexto de los centros poblados.

Palabras clave: Desarrollo sostenible; servicios ecosistémicos; usos del suelo, tecnosoles, calidad del suelo, gestión del suelo, planificación urbana, Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS), Gases Efecto Invernadero (GEI), calidad del aire, cobertura vegetal

ABSTRACT

Unplanned urban expansion and changes in land use are limiting factors for the development of sustainable cities and for the quality of ecosystem services. Soil urbanization is associated with land sealing and soil compaction, the reduction of green areas, and the decline of ecosystem functions, generating significant impacts on processes such as water regulation, climate change mitigation, nutrient retention, and the provision of habitats for biodiversity.

In Medellín, urban expansion dynamics transform the physicochemical and biological properties of soils, compromising their quality and their capacity to sustain environmental functions. Changes in land use, both planned and informal, have mainly affected hillsides and soils that are poorly suited for construction. The reduction of green areas, the increase in impervious surfaces, and the expansion of urban infrastructure have led, for example, to more frequent flooding due to the lower capacity of soils to infiltrate rainwater.

This research conducted in Medellín, Colombia, analyzes samples from 33 urban sites categorized as park, institutional, vehicular, and residential soils. Each category also differentiates the influence of vegetation cover types such as grass, composed of creeping vegetation or turfgrass; mixed cover, composed of ornamental vegetation less than 1.5 m in height; and tree cover, where tree individuals taller than 1.5 m predominate. Soil samples were analyzed for physical properties including texture, particle density (PD), bulk density (BD), aggregate stability, structural stability index (SSI), aggregate stability index (ASI), mean weight diameter (MWD), organic matter (OM), water retention capacity (WRC), permanent wilting point (PWP), field capacity (FC), and porosity (macroporosity and

microporosity). Chemical analysis included organic carbon (OC), dissolved organic carbon (DOC), pH in H₂O and KCl 1N, nutrients such as calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), and sodium (Na), available phosphorus (P), nitrite ions (NO₂⁻), nitrate (NO₃⁻), and phosphates (PO₄³⁻), as well as potentially toxic metals such as chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni), lead (Pb), zinc (Zn), and mercury (Hg). Urban soil respiration patterns showed relative concentrations of the gases carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO₂), and ammonia (NH₃).

The processing of the obtained data included descriptive analysis, measures of central tendency and dispersion, as well as tables and graphs. A non-parametric ANOVA analysis was also implemented using the Kruskal–Wallis and Dunn tests to identify which groups were significantly different from each other. In addition, a principal component analysis (PCA) was conducted to identify patterns or trends, allowing the variability of physicochemical properties to be identified across the categories park, institutional, vehicular, and residential with each vegetation cover type (grass, mixed, and tree). A non-metric multidimensional scaling analysis (NMDS) was also performed to determine similarity and dissimilarity in urban soil respiration patterns with respect to each land-use category and vegetation cover.

Among the results, the institutional land-use category stands out for the provision of ecosystem services related to hydrological cycle regulation (water retention capacity between 28–35%), while the residential category shows better conditions for carbon capture and CO₂ sequestration (organic matter content between 12–24% and CO₂ emission patterns between 350–487 ppm). Additionally, all urban land-use categories showed moderate properties for supporting vegetation and biodiversity. Urban soil respiration patterns in Medellín highlight the need for more sustainable soil management to improve physicochemical and biological properties, which are fundamental for the provision of ecosystem services such as climate regulation, air purification, and soil fertility.

The results of this research provide a technical and scientific basis that can be used in future studies on urban soil quality in Medellín and in other urban environments with similar dynamics. Likewise, this work can serve as a bibliographic input for the formulation of public policies aimed at sustainable urban soil management and for the design of projects that contribute to achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 11 (Sustainable Cities and Communities), SDG 13 (Climate Action), and SDG 15 (Life on Land), within the context of urban settlements.

Keywords: Sustainable development; ecosystem services; land use; Technosols; soil quality; soil management; urban planning; non-metric multidimensional scaling (NMDS); greenhouse gases (GHG); air quality; vegetation cover.

3. Introducción

Las funciones ecológicas del suelo urbano son un elemento esencial para abordar los desafíos medioambientales de las ciudades contemporáneas. Propiedades fisicoquímicas del suelo como el pH, la textura, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico son alteradas debido a procesos de urbanización o cambio en los usos del suelo (Chaurasia, M. et al., 2024). Así mismo, estas propiedades son determinantes para su funcionalidad de servicios ecosistémicos como la regulación de gases y otros contaminantes en la atmósfera.

A lo largo del siglo XX, Medellín ha sido escenario de procesos de transformación del suelo que responden a la necesidad de espacio para la expansión urbana. Estos procesos han dado lugar a la pérdida de suelo con cobertura vegetal y la aparición de superficies pavimentadas, reduciendo drásticamente la capacidad del suelo para actuar como sumidero de carbono y amortiguador de gases contaminantes. Esta tendencia afecta los servicios de regulación climática, donde el suelo urbano desempeña un papel clave en la absorción de dióxido de carbono (CO₂) y en la reducción de otros gases como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el amoníaco (NH₃). En áreas con suelos sellados, la capacidad de infiltración de agua disminuye considerablemente, generando condiciones que promueven las inundaciones y reducen la capacidad del suelo para liberar gradualmente el agua retenida, lo que afecta directamente la recarga de acuíferos y la regulación hídrica (Yang & Zhang, 2015).

Por otra parte, problemas como las islas de calor urbana son una manifestación directa de la pérdida de cobertura vegetal y de la modificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo en áreas urbanas. Este fenómeno implica una acumulación de calor en la superficie urbana debido a la absorción de radiación solar por pavimentos y estructuras que, al no poder disiparse de manera eficiente, incrementa las temperaturas locales. Los suelos urbanos, al perder su capacidad de regulación térmica debido al sellamiento y a la disminución de áreas verdes, contribuyen a que los efectos de la isla de

calor se intensifiquen. Además, la disminución de sumideros de carbono compromete la captura de CO₂ en el ambiente, lo que a su vez promueve la concentración de este y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, afectando la salud pública y la calidad de vida urbana (Ahn et al., 2024).

Desde el punto de vista del ordenamiento territorial, la relación entre las propiedades fisicoquímicas de los suelos urbanos y los servicios ecosistémicos subraya la importancia de una planificación urbana que considere los recursos naturales y sus limitaciones. La gestión adecuada del suelo es fundamental para evitar la pérdida de sus funciones ecosistémicas y para mitigar los impactos de las actividades urbanas en la calidad del aire y el microclima urbano. En ciudades como Medellín, la limitación espacial para la expansión hace aún más apremiante la necesidad de estrategias de manejo sostenible del suelo que incluyan la rehabilitación de áreas verdes, la reducción del sellamiento del suelo y la creación de espacios verdes capaces de actuar como sumideros de carbono y reguladores de temperatura. En Medellín, la compactación y el sellamiento de suelos son prácticas comunes en zonas de expansión y de desarrollo informal, donde las actividades constructivas muchas veces no contemplan los efectos negativos que estas acciones tienen en los servicios ecosistémicos (Martínez et al., 2020).

La evaluación de los suelos urbanos de Medellín permite no solo entender los efectos directos de la urbanización sobre sus propiedades fisicoquímicas, sino también explorar alternativas para restaurar las funciones ecosistémicas del suelo a través de prácticas sostenibles. Estrategias como la incorporación de vegetación nativa en espacios abiertos, el uso de materiales permeables en pavimentos y la implementación de técnicas de agricultura urbana pueden ayudar a restablecer parcialmente las funciones del suelo urbano, mejorando su capacidad para filtrar y retener agua, reducir la temperatura y capturar CO₂ y otros gases contaminantes. Lo cual puede contribuir al diseño de políticas socioambientales y administrativas orientadas a la organización territorial sostenible según los objetivos de desarrollo sostenible; directamente alineadas con los ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al promover espacios urbanos más saludables y resilientes; el ODS 13 (Acción por el clima), al fortalecer estrategias de captura de carbono y adaptación al cambio climático; y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al reconocer la importancia del suelo urbano como reservorio de biodiversidad y función ecosistémica. Dicho lo anterior, y teniendo en cuenta que a nivel local no se cuenta con información que relacione los servicios ecosistémicos del suelo urbano con patrones de emisión de gases

de CO₂, CO, NO₂ y NH₃, surge la necesidad de caracterizar suelos urbanos por sus condiciones fisicoquímicas y biológicas, para la identificación de su influencia potencial en la prestación de algunos servicios ecosistémicos como la regulación del ciclo hidrológico, captura de carbono y sumidero de CO₂, soporte de vegetación y biodiversidad en la ciudad de Medellín, utilizando sensores semiconductores para la detección de gases de CO₂, CO, NO₂ y NH₃, identificando así patrones diferenciados de emisión de gases según las condiciones del entorno. En este contexto, la presente investigación busca responder si las condiciones fisicoquímicas y biológicas de los suelos urbanos pueden tener influencia sobre la prestación de algunos servicios ecosistémicos en la ciudad de Medellín.

4. Objetivos

Objetivo General

Caracterizar suelos urbanos por sus condiciones fisicoquímicas y biológicas, para la identificación de su influencia potencial en la prestación de algunos servicios ecosistémicos en la ciudad de Medellín.

Objetivos Específicos

I. Medir los patrones de emisión de los gases CO₂, CO, NO₂ y NH₃ por suelos en áreas verdes urbanas de la ciudad de Medellín y su contribución relativa al mantenimiento de servicios ecosistémicos asociados a esos gases.

II. Identificar otras propiedades fisicoquímicas del suelo asociadas a la prestación de servicios ecosistémicos de acuerdo con la categorización actual de uso del suelo en la ciudad de Medellín.

5. Metodología general

Esta investigación se dividió en cuatro etapas principales: (1) una revisión de la literatura en fuentes oficiales y bases de datos científicas; (2) la toma de muestras de suelo en diferentes puntos de la ciudad; (3) el análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo

y de los patrones de respiración; y (4) el procesamiento de los datos mediante análisis estadísticos adecuados para evaluar los resultados obtenidos.

La revisión bibliográfica se llevó a cabo en fuentes oficiales tanto locales, como nacionales y artículos científicos relacionados con el crecimiento poblacional, expansión urbana, historia de Medellín. Así mismo, la búsqueda de los servicios ecosistémicos (SE) urbanos se realizó filtrando material bibliográfico con palabras clave como "ecosystem services in urban land", "urban soil", "urban area", "urban parklands" y "urban ecosystem services" en la base de datos ScienceDirect y, a nivel local, en medios oficiales de la ciudad de Medellín.

Para la toma de muestras de suelo urbano se tuvieron en cuenta 4 categorías de uso del suelo: a) parque; b) institucional; c) vehicular; d) residencial y 3 tipos de cobertura: a) césped, se refiere a cobertura de pasto o hierba; b) mixto, se refiere a la vegetación arbustiva u ornamental; c) arborizado, que se refiere a la presencia de individuos arbóreos con altura superior a 1.5 m.

La caracterización fisicoquímica incluyó el análisis de textura (método de Bouyoucos), densidad aparente (método de terrón parafinado), densidad real (método del picnómetro), porosidad total (relación entre las densidades aparente y la densidad real), estabilidad de los agregados (juego de tamices en seco), adicionalmente se calculó el índice de estabilidad de los agregados (ISA), índice de estabilidad estructural (ISE) y el diámetro medio ponderado (DMP), el contenido materia orgánica (método de calcinación a 550°C), la capacidad retención de humedad se determinó con las ollas de Richards a presiones 0,3; 0,5; 1; 3; 5; 10; 15 bar, se identificó la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Se incluyeron análisis de carbono orgánico del suelo (método Walkley-Black), carbono orgánico disuelto (DOC) presente en el suelo siguiendo el método estándar 5310B (en extracto suelo-agua), pH y conductividad (extracto de pasta saturada 1:2), bases totales calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na) (en extracto de acetato de amonio, determinación por espectroscopia de absorción atómica llama directa), fósforo (P) disponible (en extracto de bicarbonato sódico bajo método de ácido ascórbico por espectrofotómetro a 880nm). Los metales traza identificados fueron: cromo (Cr), cobre (Cu), cadmio (Cd), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn) (digestión acida por microondas en ácido nítrico, determinación por espectroscopia de absorción atómica llama). La cuantificación de mercurio (Hg) se realizó mediante analizador de mercurio directo RA-915LAB.

Los patrones de emisión de gases de CO, NO₂ y NH₃ se determinaron mediante el uso de la nariz electrónica basada en sensores semiconductores (Pineda & Pérez, 2017) y para la determinación de CO₂ se utilizó un sensor Infrarrojo no dispersivo, identificando así patrones diferenciados de emisión de gases según las condiciones del entorno.

El procesamiento general de los datos se realizó por análisis descriptivo mediante tablas y gráficos. Para las propiedades fisicoquímicas se implementó el análisis no paramétrico de ANNOVA, aplicando Kruskal-Wallis y Dunn lo cual permitió comparar qué grupos son significativamente diferentes entre sí y una prueba de análisis de componente principales (PCA) para la identificación de patrones y tendencias, para la identificación de la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas respecto a las categorías uso del suelo urbano y las coberturas. Para el procesamiento de datos obtenidos en la identificación de patrones de emisión de gases se realizó un plano de escalado multidimensional no métrico (EMD-NM) calculado a base en distancias euclidianas.

6. Resultados

La ciudad de Medellín ha logrado avances significativos en el ordenamiento del territorio desde la década de 1990. Sin embargo, el crecimiento urbano en la ciudad, impulsado por el aumento poblacional y la expansión de la infraestructura, ha influido en la prestación de los servicios ecosistémicos, como la regulación de temperatura local y la capacidad de infiltración de agua; lo que ha causado eventos de picos de temperatura e inundaciones frecuentes debido al sellamiento o impermeabilización del suelo.

Los resultados de esta investigación señalan a los suelos pertenecientes a las categorías de parque e institucional como los usos que presentaron mejores condiciones para la prestación del servicio ecosistémico de regulación del ciclo hídrico, caracterizándose por una menor densidad aparente y por una mayor porosidad y capacidad de retención de humedad. Razón por la cual se evidencio mayores patrones de emisión de NO₂. Para los servicios ecosistémicos relacionados con la regulación climática y la captura de carbono, la categoría residencial destacó como la más efectiva debido a sus altos niveles de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO) y carbono orgánico disuelto. Lo cual promueve no solo la captación de carbono, sino que también promueve

la actividad biológica y mejora la estabilidad de los agregados del suelo. En la categoría residencial se obtuvo el patrón de emisión más bajo de CO₂.

Finalmente, para los servicios ecosistémicos relacionados con el soporte de biodiversidad y el ciclo de nutrientes, todas las categorías de uso del suelo —parque, institucional, residencial y vehicular— presentan condiciones moderadas que las hacen aptas para sostener la biodiversidad y favorecer el crecimiento vegetal, esto permite que cada tipo de uso pueda contribuir, en mayor o menor medida, al mantenimiento de comunidades biológicas y al funcionamiento del entorno.

Teniendo en cuenta la falta de estudios sobre el tema tanto a nivel internacional como nacional, se resalta la limitación para realizar comparaciones e interpretar los resultados con hallazgos previos. Por lo tanto, se sugiere la necesidad de desarrollar estudios posteriores más detallados donde se involucren las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano con los patrones de emisión de gases emitidos por la actividad biológica.

7. Referencias

Ahn, Y. J., Koriyev, M., & Juraev, Z. (2024). Urban Soil Dynamics: The Relationship Between Soil Health and Urbanization. *Journal of Asian Geography*, 3(2), 62–69. <https://doi.org/10.36777/jag2024.3.2.6>

Chaurasia, M., Patel, K., Bhadouria, R., & Rao, K. S. (2023). Spatial variability in soil physicochemical parameters across land use classes in the peri-urban landscape. *Environment, Development and Sustainability*, 26(10), 24791–24815. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03653-8>

Martínez, H. H. D., Congote, Z. C. A., & Carmona, G. C. P. (2020). Política de control urbanístico: el Cinturón Verde Metropolitano en el ámbito del Jardín Circunvalar de Medellín y sus percepciones. Universidad Autónoma Latinoamericana (UNAUCLA). <http://repositorio.unaula.edu.co:8080/server/api/core/bitstreams/5a8ced78-ad0a-4e5c-91b4-de7cd3537f44/content>

Yang, J.-L., & Zhang, G.-L. (2015). Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(sup1), 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>

8.CAPÍTULO 1

Tendencias de crecimiento urbano en la ciudad de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos del suelo

8.1 Resumen

Las ciudades son entornos dinámicos con diversas fuentes de contaminación y transformación en los usos del suelo lo que alteran fuertemente su condición natural. Los cambios en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo disminuyen a su vez la calidad y la capacidad de prestación de servicios ecosistémicos. Para el caso de la ciudad de Medellín, el rápido crecimiento urbano experimentado desde inicios del siglo XXI deja en evidencia no solo la falta de planificación territorial, sino también la disminución del recurso suelo en estado natural y, por ende, un déficit ecológico. En este artículo se aborda la problemática del cambio de uso del suelo urbano y su impacto en la capacidad del suelo para proporcionar servicios ecosistémicos en la ciudad de Medellín. La revisión de artículos científicos y noticias de relevancia se realiza desde páginas oficiales. Se concluye entonces que el crecimiento acelerado de la urbanización y el aumento de la población se destacan como factores clave que han llevado a la pérdida de capacidad del suelo para sostener servicios ecosistémicos. Medellín ha avanzado en la planificación territorial, pero la expansión urbana, tanto planificada como informal, afecta principalmente a laderas y suelos poco aptos. El crecimiento poblacional incrementa la infraestructura, lo que conlleva a la impermeabilización del suelo y reducción de zonas verdes. Es esencial evaluar las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo urbano para desarrollar estrategias interdisciplinarias que equilibren el crecimiento poblacional, la seguridad del suelo y la preservación de los servicios ecosistémicos en áreas urbanizadas.

Palabras clave

Desarrollo sostenible; planeación urbana; servicios ecosistémicos; usos del suelo, tecnosoles.

Abstract

Cities are dynamic environments with diverse sources of pollution and transformations in land use that significantly alter their natural condition. Changes in the soil's physicochemical and biological properties, in turn, reduce its quality and capacity to provide ecosystem services. In the case of Medellín, the rapid urban growth experienced since the early 21st century highlights not only a lack of land-use planning but also a reduction of natural soil resources, leading to an ecological deficit. This article addresses the issue of urban land-use change and its impact on soil capacity to deliver ecosystem services in Medellín. A review of scientific articles and relevant news from official sources was conducted. It is concluded that accelerated urbanization and population growth are key factors leading to the decline in the soil's ability to support ecosystem services. Although Medellín has made progress in land-use planning, urban expansion—both planned and informal—mainly impacts slopes and soils with limited suitability. Population growth increases infrastructure, leading to soil sealing and a reduction in green areas. Assessing the physicochemical and biological conditions of urban soil is essential for developing interdisciplinary strategies to balance population growth, soil security, and the preservation of ecosystem services in urbanized areas.

Keywords

Sustainable development; urban planning; ecosystem services; land use; technosols.

8.2 Introducción

Las dinámicas de urbanización provocan degradación del suelo (Salvati et al., 2012) y cambios significativos en la calidad de los servicios ecosistémicos (Imbrenda et al., 2021). El crecimiento poblacional y las demandas sobre el suelo alteran significativamente sus condiciones, al compararlas con sus propiedades naturales (Das & Das, 2019). Los procesos de compactación, sellamiento, impermeabilización, contaminación y transformación constante del suelo urbano; alteran sus propiedades fisicoquímicas y biológicas y, por ende, la calidad de los servicios ecosistémicos que presta (Ferreira et al., 2019). El suelo de uso urbano ha tomado gran relevancia en el desarrollo de las sociedades, debido a que se pueden establecer a la vez viviendas duraderas, motores económicos y entornos aptos para ejecutar actividades que no requieren de largos desplazamientos; lo que genera condiciones de mayor confort y complacencia de las necesidades básicas (Duranton & Puga, 2015, Colsaet et al., 2018).

Con el inicio de la edad contemporánea y como resultado indirecto de la revolución industrial, se intensificó la urbanización de los territorios y los asentamientos urbanos en el mundo (Cuadrado, 2016). La población urbana del mundo pasó de ser del 13% de 1,6 mil millones de habitantes en el año 1900, a proyectarse entre el 70% y 80% de los 9 mil millones de habitantes estimados para el año 2050 (Godfray et al., 2010, Delgado & Gómez, 2022). Para ese año en Colombia se estima que más del 80% de sus 60 a 65 millones de habitantes ocupará suelo urbano (DNP, 2017). Aunque en Colombia la migración rural hacia los centros poblados fue más intensa durante el último siglo, el abandono de tierras de cultivo se hizo evidente desde el siglo XIX por las condiciones de desigualdad sociocultural y de inseguridad fomentadas por los grupos armados (Melo, 2021), lo que comenzó a su vez con la expansión del territorio ya urbanizado en las principales ciudades del país como Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cali, Cartagena y Medellín (Rother, 1968, Rueda, 2022).

Medellín es considerada la segunda ciudad más poblada y desarrollada de Colombia, es la capital del departamento de Antioquia y se ubica en la cordillera central de los Andes a 1.479 msnm; con una temperatura promedio de 24°C y una cuenca hidrográfica llamada río Aburrá Medellín que la atraviesa de sur a norte. Cuenta con una extensión de 11.160,98 ha de suelo urbano, 26.304,11 ha de suelo rural y 175,35 ha de suelo para expansión urbana y se encuentra subdividida política y administrativamente en 16 comunas que contienen 249 barrios urbanos constituidos oficialmente (Alcaldía de Medellín, 2014, (LaHaus, 2022). En el año 2020 la ciudad contó con una población aproximada de 2,57 millones y se estima alcanzará 3,06 millones en 2035 (DANE, 2018).

El incremento poblacional está directamente relacionado con la demanda de bienes y servicios, lo que eleva el consumo de recursos naturales y conlleva a impactos significativos en la calidad del agua, el aire y el suelo (Vasenev V et al., 2017). No obstante, la satisfacción de las necesidades de una población en expansión es un desafío importante para el ordenamiento territorial (OT). En Medellín la geografía particular tipo valle limita las posibilidades de expansión urbana, lo que ha llevado a que los nuevos asentamientos se desplacen hacia áreas menos adecuadas, como laderas, periferias, áreas protegidas e incluso municipios vecinos, lo que genera presiones adicionales sobre los recursos naturales y la planificación regional urbana (Marín & Serna, 2020). La falta de suelo para urbanizar ha aumentado el valor económico de cada metro cuadrado de suelo y por ende el valor de la vivienda. La idea de crecimiento urbano hacia arriba como una forma de

mitigar la falta de espacio se ha vuelto la estrategia más implementada. La construcción de edificios con alta densidad de viviendas disminuyó aproximadamente un 21.3 % dentro de la ciudad entre los años 2019 y 2020. No obstante, aumentaron las porciones de suelo sellado debido a construcciones en proceso y a la implementación de vías de acceso (Cárdenas & Escobar, 2020). Como consecuencia, desde de los planes de ordenamiento territorial (POT) se advierte la exigencia de garantizar dentro de las obras civiles un mínimo de 10% de zona verde, la cual puede ser de conservación natural o construida (Alcaldía de Medellín, 2014). En este contexto, el objetivo de este artículo es revisar la información existente, que permita analizar posibles vínculos entre el patrón histórico de crecimiento urbano y los diferentes usos del suelo, y su impacto potencial en la prestación actual de servicios ecosistémicos en la ciudad de Medellín.

8.3 Crecimiento urbano y modelo de ciudad en Medellín

Medellín se ubica en la cordillera central de los Andes a 1.479 msnm; su temperatura promedio es de 24°C y es atravesada de sur a norte por el río Aburrá Medellín (Alcaldía de Medellín, 2014). Por la ubicación en un valle las condiciones geográficas limitan la expansión urbana horizontal de la ciudad, lo que ha impulsado un crecimiento vertical de las construcciones (Gobernación de Antioquia, 2020). Aunque Medellín tuvo sus inicios durante el siglo XVII, fue solo hasta finales del siglo XIX cuando inicia su proceso de urbanización de forma acelerada, debido principalmente a la deserción rural. Ese crecimiento económico, comercial e industrial, junto con la movilización social, sientan las bases de la ciudad como se conoce hoy en día (González, 2007).

Para el año 1905 Medellín tenía una población aproximada de 60 mil habitantes (Giraldo, 2013), que se expandió progresivamente desde el centro de la ciudad hacia las periferias para constituir lo que hoy se conoce como avenida de la playa, el barrio prado, la Floresta, la América y Calasanz (Alcaldía de Medellín, 2025). A partir del año 1911 los entes territoriales se vieron obligados a ampliar la prestación de servicios públicos domiciliarios hacia los nuevos asentamientos urbanos ya consolidados como barrios (Valencia, 2010). En respuesta a esta tendencia de crecimiento de la ciudad, en el año 1913 se formula el primer plan de ordenamiento territorial (POT), llamado “Plano de Medellín Futuro”, con el fin de planificar los usos del suelo según las necesidades de la población (González, 2007). A partir del año 1930 la ciudad ya había duplicado la población inicial del siglo XX y contaba con una población de 120.044 habitantes aproximadamente,

por lo que entre los años 1930 y 1940 logró el reconocimiento del sector industrial y comercial a nivel nacional, lo que a su vez significó cambios arbitrarios en los usos del suelo (Ramírez, 2011). Desde 1945, por el fortalecimiento del conflicto armado se incrementó la población migratoria en busca de mejores condiciones de vida (empleo y seguridad), y a partir del año 1950 aproximadamente comenzó a aumentar el número de asentamientos informales principalmente hacia las periferias (Duchesne, 2016). Desde el fortalecimiento del conflicto armado, Medellín atravesó una crisis sociopolítica y económica principalmente porque no contaba con la capacidad estructural para abastecer las necesidades básicas de una población cada vez más densa (Pastor, 2017).

En el año 1964 se registró una población de 772.887, para el año 1970 ya sobrepasaba el millón y para el año 1997 eran más de 2 millones de habitantes; de los cuales, gran parte se establecieron en suelos no consolidados como suelo urbano de expansión. Para enfrentar los problemas de desarrollo que presentaba la ciudad, en el año 1988 se realiza la primera elección de alcalde por votación y se implementa la creación de programas de gestión y usos del suelo; como el Plan Estratégico para Medellín y el Área Metropolitana y el Sistema de Planeación municipal (POT ley 388/97) (Múnera, 2023), el cual dio paso a proyectos estratégicos de planeación urbana en temas de urbanización, paisajismo, conservación, entre otros temas de gestión urbana. Para inicios del siglo XXI las grandes industrias comienzan la migración desde centro de la ciudad hacia las zonas limítrofes. La planificación de ciudad comienza a implementar las estrategias de ordenamiento territorial y usos del suelo de manera sociopolítica y administrativa. Se divide el suelo urbano como suelo de conservación, consolidación, mejora y desarrollo para gestionar más eficientemente sus usos y ocupaciones (Alcaldía de Medellín, 2014).

Teniendo en cuenta el crecimiento urbano de la ciudad, Medellín planteo mejorar la movilidad dentro de la zona urbana y la conexión con los municipios vecinos. Para el año 1995 se abre comercialmente la primera línea (A-B) del sistema METRO de la ciudad; para el año 2010 Medellín inaugura la línea turística del metro cable parque Arví. Y, desde entonces y hasta la fecha, continuo su crecimiento con nuevas líneas de trenes, tranvías, cables y alimentadores (Alcaldía de Medellín, 2025). Esas iniciativas estimularon un cambio socioambiental y cultural por la implementación de zonas verdes y de esparcimiento. En 2014, Medellín implementó la última actualización del POT de la ciudad. Si bien esta actualización permitió ser más eficiente para estructurar su territorio, persisten deficiencias en el desarrollo y administración de los suelos urbanos. Estos problemas se

asocian principalmente a la continua migración de población tanto interna como externa (Echeverri & Orsini, 2011), lo cual dificulta la reducción de asentamientos urbanos informales en suelos de expansión y áreas de conservación.

El cambio en los usos del suelo debido a la dinámica de ciudad incrementa la demanda de áreas urbanas, lo que genera la necesidad de mayor espacio para la expansión industrial y comercial, así como para la infraestructura de servicios y recreación. De manera similar, aunque en menor proporción, se establece un aumento en la implementación de más áreas verdes ya sean naturales o construidas. Estas transformaciones en conjunto alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, impactando directamente su capacidad para soportar los servicios ecosistémicos urbanos (Vasenev & Kuzyakov, 2018, Hyun et al., 2022). Un ejemplo de estos efectos es el aumento de temperatura en Medellín, donde el promedio ha pasado de 24°C a alcanzar picos de 33.7°C en enero de 2024. Además, el sellamiento o impermeabilización del suelo ha contribuido a un aumento en la frecuencia de inundaciones y al deterioro de la calidad del aire (Zuleta, 2024).

Para minimizar el crecimiento perimetral de la ciudad, una de las estrategias implementadas dentro del modelo de crecimiento urbano durante los últimos años es el crecimiento en vertical (edificaciones) y el acceso a subsidios de vivienda sobre los mismos. Según los reportes de censo oficial del DANE (ver tabla 1.1) sobre construcción de edificaciones, aunque las obras en proceso disminuyeron un 21.3 % entre 2019 y 2020; el área intervenida total sigue teniendo un aumento significativo en la construcción con los años. Esto supone que debería ir en aumento la cuantificación de zonas verdes aledañas a estas obras (según lo estipulado en el actual acuerdo 048 de 2014). Contrario a esto, para el año 2022 la ciudad de Medellín contaba con 4 m² de espacio público verde por habitante y acorde con los estándares nacionales se debería contar con 7 m² por habitante en áreas urbanas y cabeceras municipales los cuales están conformados por parques, zonas verdes recreacionales, parques cívicos, plazas y miradores panorámicos, destinado al disfrute colectivo de la población (ver tabla 1.2) (Alcaldía de Medellín, 2021).

Tabla 1. 1. Censo de construcciones en Medellín (2009-2020)

Año	Obras culminadas	Obras proceso	Obras paralizadas	Total
2009	1.715	8.542	1.193	11.450
2010	1.559	7.386	1.159	10.104
2011	1.489	8.111	1.211	10.811

2012	1.469	11.381	1.530	14.380
2013	2.053	13.167	1.633	16.853
2014	2.282	13.524	2.217	18.023
2015	1.865	13.982	2.592	18.439
2016	1.969	16.723	2.502	21.194
2017	1.701	18.754	2.807	23.262
2018	2.783	18.724	3.181	24.688
2019	2.113	16.756	3.262	22.131
2020	1.244	13.194	5.897	20.335

Fuente: (DANE, 2020, DANE, 2021).

Tabla 1. 2. *Espacio público por habitante en Medellín (2012-2022)*

Año	Población	Espacio público / habitante (m²)
2012	2.447.000	3,5
2013	2.477.000	3,5
2014	2.509.000	3,7
2015	2.542.000	3,7
2016	2.576.000	3,6
2017	2.610.000	3,7
2018	2.645.000	3,7
2019	2.680.000	3,8
2020	2.715.000	3,9
2021	2.750.000	4,0
2022	2.785.000	4,0

Fuente: (DANE, 2018).

La planificación del suelo urbano pretende integrar el desarrollo urbano con proyectos a gran escala como parques lineales y la integración al cinturón verde del área metropolitana con los planes parciales diseñados para la gestión de territorios sectorizados dentro de la ciudad (García et al., 2018).

8.4 Gestión de áreas naturales en el suelo urbano

El desarrollo urbano y la gestión del suelo en Medellín rigen principalmente bajo el marco legal de la ley 388 del año 1997, que estableció que cada municipio era responsable

del ordenamiento territorial bajo su jurisdicción y se debía contemplar los usos del suelo, la expansión urbana y la protección del medio ambiente. El primer POT de Medellín fue formulado bajo el acuerdo 62 del año 1999 el cual se estructuró bajo los parámetros de la ley 388 /97 y donde se estableció la primera clasificación del uso del suelo y su modelo de expansión urbana. La primera actualización del POT se realizó bajo el acuerdo 46 de 2006 incorporando mayores medidas de protección ambiental y renovación urbana, adaptando la planificación de ciudad a los nuevos desafíos del desarrollo urbano y sostenibilidad. La segunda y más reciente actualización, vigente desde su aprobación bajo el acuerdo 48 de 2014, introdujo un enfoque más integrado con la sostenibilidad, la resiliencia al cambio climático y la movilidad. Además, fomenta la densificación urbana, el acceso equitativo a los servicios y la ampliación de espacios públicos (Alcaldía de Medellín, 2024). Estos documentos regulan diversos aspectos fundamentales para el desarrollo urbano, como la planificación urbana, la zonificación del territorio, los usos del suelo, las normas de construcción, la protección ambiental y los procesos de licenciamiento. Por ejemplo, el Decreto municipal 1212 de 2000 establece normativas para la construcción de edificaciones, incluyendo alturas máximas y densidades, mientras que el Decreto 602 de 2002 contempla medidas para la protección de áreas ambientales y la conservación de recursos naturales. Asimismo, el Decreto 1649 de 2003 establece procesos y requisitos para la obtención de permisos de construcción y licencias urbanísticas y el Decreto 608 de 2003 regula los usos del suelo permitidos en diferentes zonas de la ciudad.

El Decreto municipal 608 de 2003 de Medellín es fundamental en la regulación de los usos del suelo en la ciudad. Este documento establece criterios sobre qué actividades son permitidas en las diferentes zonas de la ciudad, contribuyendo así a una planificación urbana más ordenada y eficiente. Primero, el Decreto 608 define las categorías de zonificación, como áreas residenciales, comerciales, industriales, recreativas, de servicios y especiales (categorías que actualizan en el acuerdo 46/2006 —residencial, comercial, industrial, de servicios, social obligado— y luego en el acuerdo 048/2014 —Espacio público existente, espacio público proyectado, dotacional, áreas de baja mixtura, áreas y corredores de media mixtura y áreas y corredores de alta mixtura por comunas—ver figura 1.1). Cada una de estas categorías tiene características y requisitos particulares que determinan qué tipo de actividades pueden desarrollarse en ellas. Por ejemplo, en las zonas residenciales se prioriza la construcción de viviendas y espacios para la convivencia familiar, mientras que en las zonas comerciales se permiten establecimientos comerciales, oficinas y servicios destinados al comercio. Además de la zonificación, también se

establecen restricciones y condiciones para ciertas actividades, especialmente aquellas que puedan tener un impacto negativo en el entorno urbano o en la calidad de vida de los ciudadanos. Por ejemplo, se regulan las actividades industriales para evitar contaminación ambiental o ruido excesivo en áreas residenciales cercanas. Otro aspecto importante que se aborda es la preservación de áreas ambientales y de interés público para la protección de áreas verdes, cuerpos de agua, parques naturales y otros espacios de valor ecológico o recreativo.

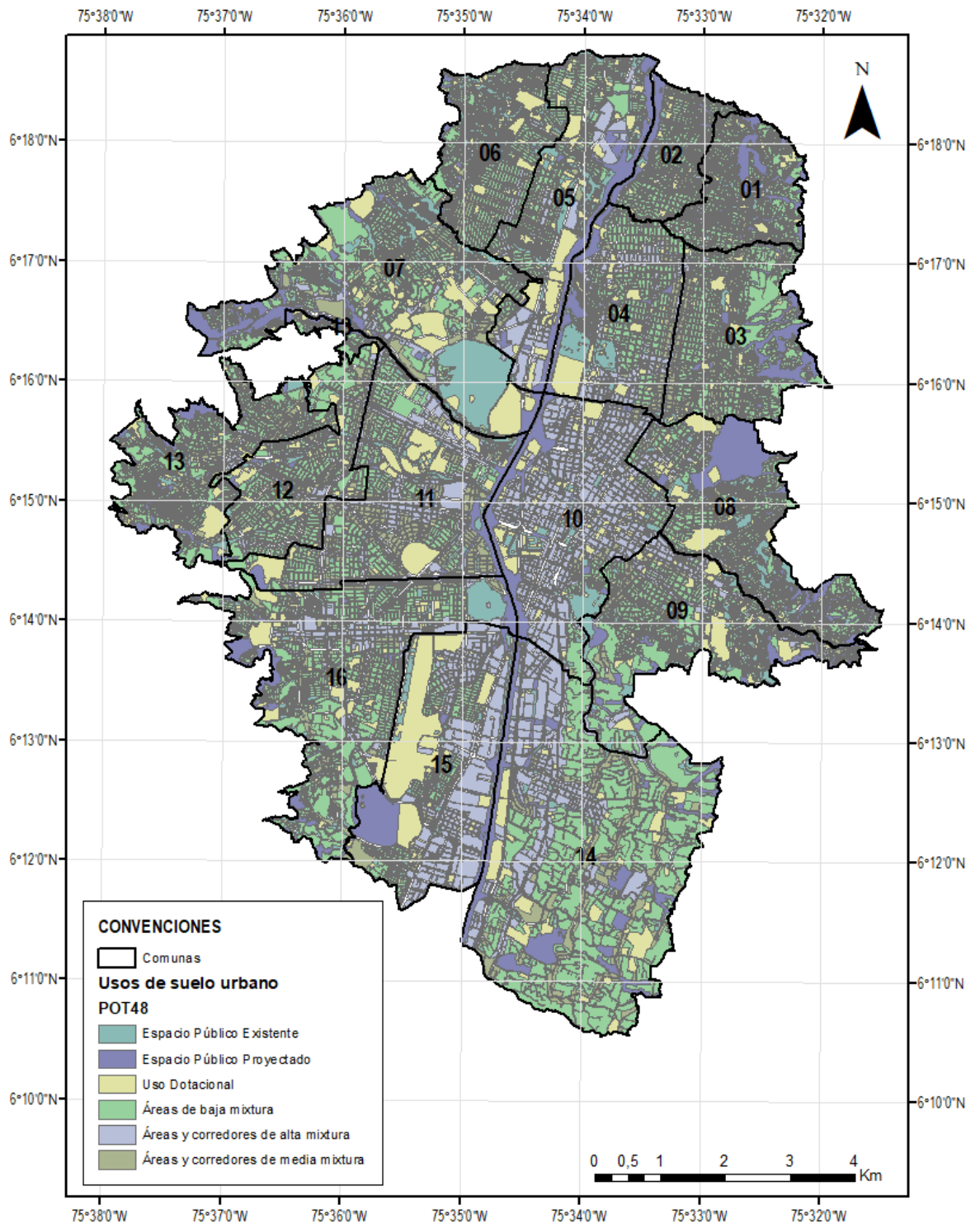


Figura 1. 1. Usos del suelo POT 048/2014; Elaboración propia

Los acuerdos de ordenamiento territorial enfatizan la necesidad de crear espacios públicos para el esparcimiento y el encuentro ciudadano. Estos espacios abarcan una amplia gama que va desde parques y plazas hasta zonas verdes y miradores urbanos

tanto en sectores estratégicos del centro poblado, como en los estructurantes ecológicos de la ciudad (ver tabla 1.3) y su origen puede ser natural o artificial. Las zonas verdes naturales deben conservar su carácter original, destinándose especialmente a la protección y recuperación de los valores paisajísticos. En este contexto, se permite el desarrollo de actividades recreativas informales, no programadas y de baja ocupación, otorgándoles un espacio ornamental y adecuado a sus dimensiones. Adicionalmente, todo proyecto urbanístico y de construcción debe reservar al menos un 10% de su área neta como zona verde privada de uso común, contribuyendo a la crear entornos más saludables y agradables para los habitantes. Asimismo, se enfatiza la importancia de las medidas de protección ambiental en las vías vehiculares, independientemente de su jerarquía dentro de la red vial urbana. Entre estas medidas se incluye la creación de áreas de protección frontal, como zonas verdes, andenes o antejardines, cuyo propósito es mitigar los efectos negativos de la emisión de gases contaminantes y del ruido generado por la circulación vehicular y otras actividades humanas asociadas.

Tabla 1. 3. Espacio público per cápita año 2022 / zona verde (POT 048/2014)

Componente	Descripción	Área (miles m ²)
Parque	Espacio que se conforma de manera pasiva con elementos propios de la naturaleza donde se pretende mantener la biodiversidad, conservación y restauración del ecosistema. Recreación pasiva.	6,4
Zona verde recreacional	Espacios públicos mixtos donde predomina la vegetación (árboles, arbustos). Cuenta con una mínima proporción de pisos duros y amoblamiento urbano necesarios para la recreación pasiva/contemplativa.	5,9
Plaza	Espacio público donde predominan edificios en torno a un espacio libre. Presenta características singulares de localización, o estructura social	0,26
Parque cívico	Integración de la arquitectura y zonas duras con un entorno natral útil para encuentros colectivos y encuentros culturales.	0,12
Mirador panorámico	Espacio público que debido a su localización ofrece experiencias visuales sobre el territorio.	0,02
total, espacio público efectivo		12,7
cantidad aproximada de espacio público por habitante		3,9 m ² / habitante

En una visión más amplia, estos acuerdos y decretos reflejan la necesidad de una gestión integral del suelo y el desarrollo urbano, considerando aspectos cruciales como la sostenibilidad ambiental, la planificación estratégica y la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Es fundamental no solo establecer estas disposiciones, sino también asegurar su implementación y seguimiento para garantizar un crecimiento urbano ordenado, equilibrado y sostenible en la ciudad de Medellín.

8.5 Suelo urbano y servicios ecosistémicos (SE)

El suelo es un sistema dinámico y los cambios dentro de su estructura son adaptativos y resilientes dependiendo de su entorno natural. El entorno urbano presenta cambios constantes, ya sea por modificación en los usos del suelo, construcción de infraestructura nueva o impermeabilización del suelo. Cada una de estas alteraciones afecta directamente la calidad del suelo urbano y, por ende, una alteración en la prestación de servicios ecosistémicos de provisionamiento, regulación y culturales (ver tabla 1.4) (McBratney et al., 2014, Drobnik et al., 2018).

Tabla 1. 4. Contexto urbano y Servicios Ecosistémicos

Servicios ecosistémicos del suelo urbano	Tipo de servicio	Papel del suelo urbano
Provisión	Producción de alimentos	Brindar propiedades para la agricultura urbana como estrategia sostenible (carne, verduras, setos, cereal)
	Soporte (actividad humana, infraestructura, hábitat de fauna)	Bases para vivienda duradera, edificaciones, equipamientos, carreteras, servicios públicos, biodiversidad
	Fibra y materias primas	Madera, textiles, papel, compost
	Energía	Combustible, solar, viento, biomasa, geotérmica

Servicios ecosistémicos del suelo urbano	Tipo de servicio	Papel del suelo urbano
	Recursos ornamentales	Césped, arbustos, árboles, flores
	transporte de fluidos	Agua potable, agua residual, energía, telecomunicaciones
	Productos bioquímicos y recursos medicinales	Bioquímica, plantas medicinales
Regulación	Calidad y purificación del agua	Secuestro de contaminantes, Degradación de contaminantes
	Calidad del aire	Mitigación de CO ₂ , O ₃ , partículas finas suspendidas, lluvias acidas
	Clima	Local, global, interior
	Residuos / contaminantes / desechos	Almacenamiento, reciclaje
	Ruido	Atenuación del ruido
	Desastres Naturales	Inundaciones, temblores, erosión, deslizamientos, regulación de enfermedades y plagas
Culturales	Patrimonio	Historia, arqueología
	Ocio	Recreación, paisaje, turismo, inspiración espiritual y religiosa

Fuente: (Anne et al., 2018).

La expansión urbana en Medellín conlleva desafíos significativos que se equiparan al aumento demográfico. El suelo urbano ha perdido gran parte de su capacidad para proporcionar estos servicios ecosistémicos de manera efectiva (ver tabla 1.5). La expansión de la infraestructura, la impermeabilización del suelo con pavimento y edificaciones, la contaminación del suelo por desechos y químicos, y la pérdida de áreas verdes y vegetación natural son algunos de los factores que han contribuido a esta pérdida

de capacidad del suelo. Esto se manifiesta en problemas como el efecto isla de calor, la infiltración de aguas con riesgos de inundaciones, deslizamientos de taludes, deterioro de la calidad del aire y pérdida de biodiversidad tanto en la fauna como en la flora (O’Riordan et al., 2021, AMVA, 2019).

Tabla 1. 5. Demanda de servicios ecosistémicos en Medellín

Servicio ecosistémico	Descripción	Contexto urbano en Medellín
Soporte, Aprovisionamiento	Provisión de hábitat para especies	El aumento poblacional constante limita el recurso para brindar soporte y aprovisionamiento; La población pasara de 2.148.110 en 2018 a 2.456.244 en 2030 (DANE, 2018) implica mayor demanda de alimentos y demás variedades de materiales. También acelera el crecimiento urbanístico de la ciudad y promueve el ahuyentamiento de fauna.
	Infraestructura (edificaciones, vías, vivienda, equipamiento)	
	Alimentación	
	Materias primas, fibras	
Regulación	Medicina natural, bioquímicos	El incremento en la actividad industrial y comercial como mayor aportante de emisión de gases de efecto invernadero desde fuentes fijas y móviles, repercute en la disminución en la calidad del aire (SIATA, 2005).
	Mantenimiento de la calidad del aire	
	Regulación del clima	
	Control de la erosión	
	Infiltración de agua	El incremento de suelos sellados e impermeabilizados, resultado de diversas

Servicio ecosistémico	Descripción	Contexto urbano en Medellín
Culturales	Beneficios intangibles obtenidos de los ecosistemas como, por ejemplo; con aspectos espirituales, artísticos, intelectuales, de ocio, cognitivos, estéticos.	<p>estrategias urbanísticas, ha reducido significativamente la capacidad de infiltración del suelo. Esta disminución en la permeabilidad ha generado inundaciones más intensas y frecuentes en áreas urbanas.</p> <p>Déficit en el contexto socioambiental; Medellín cuenta con 3.9m² de espacio público efectivo por habitante, cuando su meta establecida a la fecha indica ser de mínimo 7m² de espacio público efectivo por habitante (Alcaldía de Medellín, 2021).</p>

Los tecnosoles se presentan como una opción para contrarrestar los impactos derivados de la expansión urbana y la construcción de infraestructura. El termino se refiere a suelos generados artificialmente. Las propiedades físicas, químicas y biológicas de estos tecnosoles varían según la actividad que los haya originado, como construcción, minería, industria o paisajismo, ya que se forman a partir de materiales de desecho o sometidos a alteraciones por la actividad humana. Estos se presentan como una alternativa hacia la recuperación del suelo que ha sido alterado con alguna actividad humana. No obstante, su implementación continúa siendo objeto de estudio en cuanto a viabilidad ecosistémica y salubre (Fabbri et al., 2021, Bakhmatova et al., 2022, Rodríguez et al., 2021). En el caso específico de Medellín, todos los materiales pétreos que se requieren para la ejecución de una obra de construcción se adquieren directamente de una cantera previamente autorizada por la autoridad ambiental competente. Los materiales resultantes de las excavaciones se reutilizan para rellenar terrenos destinados a ser zonas verdes, siempre y cuando cumplan con los estándares mínimos de calidad y no presenten contaminantes químicos. En último caso, si no son aptos para ninguna de estas opciones, se disponen en botaderos autorizados por la autoridad ambiental competente como medida final de disposición. Este proceso de manejo ambiental se realiza según normatividad de gestión y conservación del medio ambiente y recursos naturales contenida en la ley 99 de 1993, decreto ley 2811/74 y la Ley 685 de 2001 del código de minas.

La estabilidad ecológica de una ciudad como Medellín está estrechamente ligada a la capacidad del suelo urbano para proporcionar servicios ecosistémicos clave. La pérdida de esta capacidad debido a la urbanización descontrolada y la degradación del suelo representa un desafío importante para la sostenibilidad y el bienestar de la ciudad y sus habitantes. Para asegurar la capacidad de mantenimiento de servicios ecosistémicos podrían diseñarse tecnosoles, a partir del conocimiento preciso de las características actuales de los suelos en la ciudad y su relación con servicios ecosistémicos

8.6 Conclusiones

La ciudad de Medellín ha logrado avances significativos en el ordenamiento territorial desde la década de 1990. Sin embargo, el crecimiento urbano rápido y el aumento poblacional alteran los servicios ecosistémicos al ejercer una mayor presión sobre los recursos naturales, lo que genera una alteración ecológica y una necesidad de expansión hacia áreas externas. Esto ha incrementado la proliferación de superficies impermeables y reducido el suelo en estado natural, resultando en un déficit ecológico. Para mitigar estos efectos, es crucial implementar prácticas de planificación urbana sostenible que integren infraestructura verde y restauración de ecosistemas, promoviendo un desarrollo urbano que mantenga la provisión de servicios ecosistémicos y mejore la calidad de vida de los habitantes.

8.7 Referencias

Alcaldía de Medellín. (2014, December 17). Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín (048-2014). Gaceta Oficial 4267. https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportaldelCiudadano_2/PlandeDesarrollo_0_17/ProgramasyProyectos/Shared%20Content/Documentos/2014/POT/ACUERDO%20POT-19-12-2014.pdf

Alcaldía de Medellín. (2021). Espacio público de esparcimiento y encuentro. Departamento Administrativo de Planeación. DAP-Subdirección de Prospectiva, Información y Evaluación Estratégica. <https://storymaps.arcgis.com/stories/b53e7c4382ff4020b9d18476030cf5cd>

Alcaldía de Medellín. (2024, April 10). Expediente Distrital | Normatividad histórica del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín.

<https://www.medellin.gov.co/es/transparencia/plan-de-ordenamiento-territorial-de-medellin/normatividad-historica-del-plan-de-ordenamiento-territorial-de-medellin/>

Alcaldía de Medellín. (2025, April 13). Historia y símbolos de Medellín. <https://www.medellin.gov.co/es/historia-y-simbolos-de-medellin/>

AMVA. (2019). ¿Cuáles son los servicios ecosistémicos? Valores Naturales, Sociales y Culturales Que Proveen Calidad de Vida En El Territorio Metropolitano. <https://www.metropol.gov.co/planeacion/areas-protegidas/Paginas/contexto/servicios-ecosistemicos.aspx>

Anne, B., Geoffroy, S., Cherel, J., Warot, G., Marie, S., Noël, C. J., Louis, M. J., & Christophe, S. (2018). Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils. *Landscape and Urban Planning*, 176, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2018.03.019>

Bakhmatova, K. A., Matynyan, N. N., & Sheshukova, A. A. (2022). Anthropogenic Soils of Urban Parks: A Review. *Eurasian Soil Science*, 55(1), 64–80. <https://doi.org/10.1134/S1064229322010021>

Cardenas, M., & Escobar, J. (2020). Configuración de una región metropolitana a partir de las dinámicas de crecimiento urbano de Medellín. In *Perspectivas interdisciplinarias de investigación en la planeación y desarrollo social* (pp. 413–444). https://www.researchgate.net/publication/349641981_CONFIGURACION_DE_UNA_REGION_METROPOLITANA_A_PARTIR_DE_LAS_DINAMICAS_DE_CRECIMIENTO_URBANO_DE_MEDELLIN

Colsaet, A., Laurans, Y., & Levrel, H. (2018). What drives land take and urban land expansion? A systematic review. *Land Use Policy*, 79, 339–349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.017>

Cuadrado, C. S. (2016). La metropolización del territorio en el cambio de siglo: dispersión metropolitana, urbanización del medio rural y transformación de los espacios turísticos en la Europa mediterránea. *Biblio3W Revista bibliográfica de geografía y ciencias sociales*, 21. <https://revistes.ub.edu/index.php/b3w/article/view/26328/27789>

DANE. (2018). Demografía y Población. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>

DANE. (2020). Estadísticas por tema: CONSTRUCCIÓN. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion>

DANE. (2021, December 16). Censo de edificaciones (CEED). DANE. <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/censo-de-edificaciones>

Das, M., & Das, A. (2019). Dynamics of Urbanization and its impact on Urban Ecosystem Services (UESs): A study of a medium size town of West Bengal, Eastern India. *Journal of Urban Management*, 8(3), 420–434. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2019.03.002>

Delgado, V. C., & Gómez, M. M. L. (2022). The Interaction between Urban and Rural Areas: An Updated Paradigmatic, Methodological and Bibliographic Review. *Land*, 11(8), 1298. <https://doi.org/10.3390/land11081298>

DNP. (2017). KIT de Ordenamiento Territorial. [https://portalterritorial.dnp.gov.co/KitOT/Content/uploads/Cartilla%20Expansion.pdf#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20que%20habita%20en%20centros%20urbanos,total%20actual%20del%20pa%C3%ADs%20hoy%20\(45%20millones\).](https://portalterritorial.dnp.gov.co/KitOT/Content/uploads/Cartilla%20Expansion.pdf#:~:text=La%20poblaci%C3%B3n%20que%20habita%20en%20centros%20urbanos,total%20actual%20del%20pa%C3%ADs%20hoy%20(45%20millones).)

Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt, R. A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94, 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>

Duchesne, A. (2016). Colombia - Medellín: la modernización de una metrópoli andina. CNES. <https://cnes.fr/geoimage/colombia-medellin-modernizacion-de-una-metropoli->

[andina#:~:text=Los%20asentamientos%20informales%2C%20llamados%20%E2%80%9Cinvasiones,Se%20llama%20%E2%80%9Curbanizaci%C3%B3n%20pirata%E2%80%9D](https://cnes.fr/geoimage/colombia-medellin-modernizacion-de-una-metropoli-andina#:~:text=Los%20asentamientos%20informales%2C%20llamados%20%E2%80%9Cinvasiones,Se%20llama%20%E2%80%9Curbanizaci%C3%B3n%20pirata%E2%80%9D)

Duranton, G., & Puga, D. (2015). Urban Land Use. In G. Duranton, J. V. Henderson, & W. C. Strange (Eds.), *Handbook of Regional and Urban Economics* (Vol. 5, pp. 467–560). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59517-1.00008-8>

Echeverri, A., & Orsini, F. M. (2011). Informalidad y urbanismo social en Medellín. *Medellín Medio Ambiente Urbanismo Y Sociedad*, 12(DL: B.25102-2006), 11–24. <http://hdl.handle.net/2099/11900>

Fabbri, D., Pizzol, R., Calza, P., Malandrino, M., Gaggero, E., Padoan, E., & Ajmone, M. F. (2021). Constructed Technosols: A Strategy toward a Circular Economy. *Applied Sciences*, 11(8), 3432. <https://doi.org/10.3390/app11083432>

Ferreira, C. S. S., Kalantari, Z., Salvati, L., Canfora, L., Zambon, I., & Walsh, R. P. D. (2019). Chapter Six - Urban Areas. In P. Pereira (Ed.), *Soil Degradation, Restoration and Management in a Global Change Context* (Vol. 4, pp. 207–249). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.004>

García, F. S., Smith, H., & Calderon, E. (2018). Contemporary tendencies in Colombian urban planning: the case of the 'Planes Parciales' in Medellín. *International Planning Studies*, 23(4), 355–375. <https://doi.org/10.1080/13563475.2018.1500276>

Giraldo, C. A. F. (2013, December). Medellín emprendió desde la primera década del siglo XX. *Revista Universidad EAFIT* 162, 48, 30–33. <https://repository.eafit.edu.co/items/71425129-3477-4a26-963c-0b5aa1ce3612>

Gobernación de Antioquia. (2020). Valle de Aburrá. Gobernación de Antioquia. <https://antioquia.gov.co/index.php/valle-de-aburra>

Godfray, C., Beddington, J., Crute, I., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* (New York, N.Y.), 327, 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

González, E. L. F. (2007). Medellín, los orígenes y la transición a la modernidad: crecimiento y modelos urbanos 1775-1932. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70070>

Hyun, J., Kim, Y. J., Kim, A., Plante, A. F., & Yoo, G. (2022). Ecosystem services-based soil quality index tailored to the metropolitan environment for soil assessment and management. *Science of The Total Environment*, 820. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153301>

Imbrenda, V., Quaranta, G., Salvia, R., Egidi, G., Salvati, L., Prokopovà, M., Coluzzi, R., & Lanfredi, M. (2021). Land degradation and metropolitan expansion in a peri-urban environment. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 12(1), 1797–1818. <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1951363>

LaHaus. (2022, October 28). Así es Medellín, la Ciudad de la Eterna Primavera. <https://www.lahaus.com/blog/zonas/zonas-turisticas-como-es-vivir-medellin>

Marín, V. D. F., & Serna, V. J. D. (2020). Frontera dinámica: contraste urbano rural en el Borde oriental de Medellín Colombia. *El Ágora USB*, 20(2), 219–234. <https://doi.org/10.21500/16578031.4521>

McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>

Melo González, J. O. (2021). Ciudad y campo en Colombia hasta comienzos del siglo XX. De la utopía urbana a la ruralización, y a la urbanización acelerada (Santiago, Comisión Económica Para América Latina y El Caribe (CEPAL), 2021.). <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/efa43b51-0c52-4fc2-b574-d07dfc12c97a/content>

Múnera, L. L. F. (2023). Historia de Medellín con cuentagotas. In *Academia Antioqueña de Historia (1st ed.)*. Academia Antioqueña de Historia. <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://academiaantioquenadehistoria.org/wp-content/uploads/2023/09/Historia-de-Medellin-con-cuentagotas.pdf>

O’Riordan, R., Davies, J., Stevens, C., Quinton, J. N., & Boyko, C. (2021). The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, 395, 115076. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115076>

Pastor, B. M. (2017). El papel del urbanismo en la transformación de la sociedad: El caso de Medellín [Grado de Fundamentos de la Arquitectura. Curso 2016-2017, Universidad Politécnica de Valencia y Escuela Técnica Superior de Arquitectura]. <https://riunet.upv.es/entities/publication/66b4d6c5-1f3a-4f58-a8bb-2eba74dce4c7>

Ramírez, P. S. P. (2011). Cuando Antioquia se volvió Medellín, 1905-1950. Los perfiles de la inmigración pueblerina hacia Medellín [Artículo de investigación, Universidad de Antioquia]. <http://www.scielo.org.co/pdf/achsc/v38n2/v38n2a09.pdf>

Restrepo, de la P. J. (2023, January 20). Valle de Aburrá: una de las zonas más afectadas y propensas a deslizamientos en Colombia. *Academia Ciencia Sociedad; Universidad de Antioquia*. https://udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia!/ut/p/z0/fYwxD4lwFIT_igsjaQVEHYmDiXFwMAa6mCd90adtH5RCjL9e1MG4uFzu

Lt-

dUKIUysFAZwjEDsyYK5UfF8tVMi0yuZV5lssi32WzebJO9wcpNkL9B8YHuratKoSq2QW8
B1E27AOYXiNEErrfdGGLH__SieNANUEXyffakeYX9a0b9MSaagZjwUJAH0mNnaEHWEI
XulsHMAZjjTGceu8hbsDOK1Q0N1U9ARWcqt0!/

Rodríguez, E. T., Navarro, P. J., Gómez, L. I., Jordán, V. M. M., Bech, B. J., & Zorpas, A. A. (2021). Urban areas, human health and technosols for the green deal. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(12), 5065–5086. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00953-8>

Rother, H. (1968). El proceso de urbanización en Colombia. *Revista de La Universidad Nacional (1944 - 1992)*, 0(1), 191–223. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revistaun/article/view/11673>

Rueda, P. J. Q. (2022). El campo y la ciudad: Colombia, de país rural a país urbano. In *Banrepcultural*. <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-119/el-campo-y-la-ciudad-colombia-de-pais-rural-pais-urbano>

Salvati, L., Gemmiti, R., & Perini, L. (2012). Land degradation in Mediterranean urban areas: an unexplored link with planning? *Area*, 44(3), 317–325. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2012.01083.x>

SIATA. (2005). SIATA. Área Metropolitana Del Valle de Áburra; Alcaldía de Medellín; ISAGEN; Empresas Públicas de Medellín (EPM). https://siata.gov.co/siata_nuevo/

Valencia, A. G. D. (2010). Cinco hitos institucionales que han configurado la historia de los servicios públicos domiciliarios en Medellín, 1890-2010. 67 N°150, 135–156. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6766539>

Vasenev, V., & Kuzyakov, Y. (2018). Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1607–1622. <https://doi.org/10.1002/ldr.2944>

Vasenev V, Smagin, A., Ananyeva, N., Ivashchenko, K., Gavrilenko, E., Prokofeva, T., Patlseva, A., Stoorvogel, J., Gosse, D., & Valentini, R. (2017). Urban Soil's Functions: Monitoring, Assessment, and Management. In A. Rakshit, P. C. Abhilash, H. B. Singh, & S. Ghosh (Eds.), *Adaptive Soil Management: From Theory to Practices* (pp. 359–409). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3638-5_18

Zuleta, V. J. F. (2024, February 21). La “eterna primavera” quedó en el pasado: Medellín tendría en el futuro altas temperaturas al menos 150 días cada año. ElColombiano. <https://www.elcolombiano.com/medellin/altas-temperaturas-en-medellin-seran-la-constante-en-los-proximos-anos-por-cambio-climatico-JP23797952>

9. CAPÍTULO 2

Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín

9.1 Resumen

Los servicios ecosistémicos del suelo urbano como la fertilidad, el ciclo del agua y los nutrientes, la biodiversidad y la mitigación del cambio climático dependen del equilibrio de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo. Sin embargo, estas propiedades se ven notablemente afectadas por la gestión de los usos del suelo y la expansión urbana. Condiciones como el sellamiento del suelo, compactación, contaminación y la pérdida de materia orgánica repercuten negativamente en las funciones naturales y capacidad de regulación ambiental del suelo. El objetivo de esta investigación fue analizar las propiedades físicas y químicas del suelo urbano y su relación con algunos de los servicios ecosistémicos. El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Medellín, Antioquia (Colombia), donde se analizaron muestras de suelo urbano de 33 sitios clasificados por su uso en 4 categorías: institucional, parque, residencial y vehicular; y tres tipos de cobertura: césped, mixto y arbóreo. La caracterización de las muestras incluyó su textura, densidad real (DReal), densidad aparente (DApa), estabilidad de los agregados, índice de estabilidad estructural (ISE), índice de estabilidad de los agregados (ISA), diámetro medio ponderado (DMP), materia orgánica (MO), capacidad de retención de humedad (CRH), punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (C.C), porosidad total, macroporosidad (Pma) y microporosidad (Pmi), carbono orgánico (C.O), carbono orgánico disuelto (DOC), pH en agua y en KCl 1N, bases totales calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na), fósforo (P) y metales traza cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), zinc (Zn) y mercurio (Hg). Los servicios ecosistémicos del suelo urbano como parámetros del ciclo del agua y los nutrientes, la biodiversidad y la mitigación del cambio climático, se relacionaron según la calidad de las propiedades fisicoquímicas identificadas. Los resultados de la investigación muestran que la textura del suelo en todas las categorías analizadas es franca. Las categorías de parque e institucional presentan condiciones favorables para la regulación del ciclo hídrico, con valores adecuados de DReal, DApa, Pt y una mayor CRH. En cuanto a la regulación climática y captura de carbono, la categoría

residencial destaca como la más efectiva debido a sus altos niveles de MO, C.O. y DOC. Todas las categorías presentan un pH neutro a ligeramente ácido y condiciones entre buenas y regulares para el soporte de biodiversidad y el ciclo de nutrientes. La acumulación de metales pesados como Ni y cromo Cr en parques podría estar relacionada con fuentes cercanas, deposiciones atmosféricas o actividades antropogénicas. En las áreas vehiculares, los suelos muestran altos niveles de Pb y Cu, típicos de la contaminación generada por el tráfico y el desgaste de piezas automotrices en las vías. Aunque la categoría residencial presenta una mayor cantidad de MO y CRH, también muestra niveles elevados de metales pesados, como Zn y Cr, lo cual sugiere una posible contaminación relacionada con productos domésticos, actividades de construcción y deposición atmosférica. En conclusión, los resultados obtenidos confirman el papel esencial de las propiedades físicas y químicas del suelo en la provisión de servicios ecosistémicos en entornos urbanos.

Palabras clave

calidad del suelo, gestión del suelo, planificación urbana, usos del suelo

Abstract

Ecosystem services of urban soil, such as fertility, water and nutrient cycling, biodiversity, and climate change mitigation, depend on the balance of soil's physicochemical and biological properties. However, these properties are significantly impacted by land use management and urban expansion. Conditions such as soil sealing, compaction, contamination, and the loss of organic matter negatively affect soil's natural functions and environmental regulatory capacity. The objective of this research was to analyze the physical and chemical properties of urban soil and their relationship with certain ecosystem services. The study was conducted in Medellín, Antioquia (Colombia), where urban soil samples were collected from 33 sites categorized by land use into four types: institutional, park, residential, and vehicular, and three types of cover: grass, mixed, and tree. The characterization of the samples included texture, real density (RD), bulk density (BD), aggregate stability, structural stability index (SSI), aggregate stability index (ASI), mean weighted diameter (MWD), organic matter (OM), moisture retention capacity (MRC), permanent wilting point (PWP), field capacity (FC), total porosity, macroporosity (MacP),

microporosity (MicP), organic carbon (OC), dissolved organic carbon (DOC), pH in water and in 1N KCl, total base cations calcium (Ca), magnesium (Mg), potassium (K), and sodium (Na), phosphorus (P), and trace metals chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni), lead (Pb), zinc (Zn), and mercury (Hg). Urban soil ecosystem services, such as water and nutrient cycling parameters, biodiversity, and climate change mitigation, were related according to the quality of the identified physicochemical properties. The research findings show that soil texture in all analyzed categories is loamy. Park and institutional categories present favorable conditions for water cycle regulation, with suitable values of RD, BD, TP, and higher MRC. Regarding climate regulation and carbon capture, the residential category is the most effective due to its high levels of OM, OC, and DOC. All categories have a neutral to slightly acidic pH and conditions ranging from fair to good for biodiversity support and nutrient cycling. The accumulation of heavy metals, such as Ni and Cr, in parks could be linked to nearby sources, atmospheric deposition, or anthropogenic activities. In vehicular areas, soils show high levels of Pb and Cu, typically associated with pollution from traffic and wear of automotive parts on roads. Although the residential category has a higher amount of OM and MRC, it also shows elevated levels of heavy metals like Zn and Cr, suggesting possible contamination from household products, construction activities, and atmospheric deposition. In conclusion, the results confirm the essential role of soil's physical and chemical properties in the provision of ecosystem services in urban environments.

Keywords

Soil quality, soil management, urban planning, land use

9.2 Introducción

Los suelos urbanos, esenciales y a menudo ignorados, son la base de los ecosistemas y, como proveedores de servicios ecosistémicos, enfrentan desafíos constantes debido a la transformación antrópica. La creciente poblacional y la expansión urbana son de los factores más influyentes respecto a la calidad de las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo (McBratney et al., 2014, Bünemann et al., 2018).

El deterioro en la estructura física del suelo por la actividad humana decrece la calidad de los servicios prestados por el recurso natural. La prestación de servicios ecosistémicos, como la regulación del ciclo del agua, la fertilidad, la captura de carbono y el soporte de biodiversidad dependen de las propiedades fisicoquímicas del suelo

(Haghighi et al., 2010). Ejemplo de esto sería el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la materia orgánica (MO) y la conductividad eléctrica (CE) que son importantes para mantener funciones que favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales (Ca, Mg, K, Na) para la vegetación y su entorno, lo que a su vez mejora la capacidad del suelo para sustentar áreas verdes urbanas y favorecer la actividad microbiana. Adicionalmente, un alto contenido de MO contribuye a mejorar la estructura del suelo, aumenta su capacidad de retención de agua y fomenta la captura de carbono, un proceso clave en la mitigación del cambio climático (Drobnik et al., 2018). Por otra parte, la estructura del suelo también puede verse afectada por el cambio en los usos del suelo. Por ejemplo; al aumentar la compactación del suelo, se disminuye la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua, lo que aumenta la probabilidad de inundaciones, mayor escorrentía contaminante, aumento de las islas de calor urbano y menor relación agua-suelo-plantas (Molina et al., 2022). Durante la última década, la ciudad de Medellín se ha enfrentado al efecto de las fuertes lluvias y el intenso calor; Las inundaciones recurrentes y el aumento en la sensación térmica se han comenzado a normalizar entre la sociedad (Restrepo, 2023, Zuleta, 2024). Por lo tanto, el manejo y la gestión de los suelos en condiciones urbanizadas destacan la poca planificación del territorio, un recurso cada vez más explotado con el fin de suplir las necesidades incesantes de una población cada vez mayor. Además, se destaca la importancia de implementar estrategias sostenibles en la gestión urbana y aumentar la cantidad de zonas verdes en la ciudad (Bonilla et al., 2022).

Estudios como el realizado por Nele Delbecque destacan cómo los procesos de urbanización transforman el suelo, modificando significativamente sus propiedades físicas y químicas, lo que contribuye significativamente a la disminución de los servicios ecosistémicos que el suelo urbano provee. Estos cambios reducen la capacidad del suelo para regular el ciclo del agua, almacenar carbono y mantener la biodiversidad (Delbecque et al., 2022). El objetivo de la investigación fue identificar algunas propiedades fisicoquímicas del suelo y su relación con los servicios ecosistémicos que pueden verse disminuidos según los usos del suelo urbano.

9.3 Materiales y métodos

9.3.1 Área de estudio y muestreo

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Medellín (ver figura 2.1). La descripción del área de estudio se presenta en el capítulo 1 “Tendencias de crecimiento urbano en la ciudad de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos del suelo”.

9.3.2 Protocolo de muestreo

Las categorías de muestreo para la investigación fueron: a) parque, que corresponde a áreas verdes de espacio público para esparcimiento pasivo y cultural caracterizada por tener diversidad de coberturas como pasto, especies ornamentales e individuos arbóreos; b) institucional, que corresponde a áreas verdes de campus universitario, también presenta variedad de coberturas como pasto, especies ornamentales e individuos arbóreos aunque con menos diversidad; c) vehicular que corresponde a zonas verdes ubicadas dentro de los separadores viales, se caracteriza principalmente por coberturas como pasto, especies ornamentales e individuos arbóreos con limitación de crecimiento de raíces o altura; d) residencial, corresponde a zonas verdes de jardín y antejardín conformadas principalmente por coberturas como pasto, especies ornamentales e individuos arbóreos aislados. La anterior categorización se realizó teniendo en cuenta la descripción de zonas verdes según el POT 2014. Para cada una de las categorías de uso del suelo urbano se tuvieron en cuenta las siguientes coberturas diferenciales: a) césped, pasto o hierba; b) mixto, se refiere a la vegetación arbustiva u ornamental; c) arborizada, individuos arbóreos con altura superior a 1.5m.

Todas las muestras se tomaron a una profundidad de 15 cm como se recomienda para evaluar las condiciones edáficas más activas en procesos biogeoquímicos y raíces superficiales, ayudado por barreno de acero (ICONTEC, 1997a). Para las categorías de parque e institucional, se aplicó un diseño de muestreo en zigzag con 4 submuestras por cobertura, lo cual es una estrategia ampliamente usada para capturar la heterogeneidad espacial en áreas verdes urbanas sin un patrón regular definido. En la categoría vehicular, se aplicó un muestreo sistemático lineal, tomando muestras en ambos costados de la vía cada 100 metros hasta completar 4. Para la categoría residencial, se seleccionaron 3 zonas con dinámicas similares, tomando 4 muestras en zigzag por cada cobertura, con el fin de representar la variabilidad local sin sesgos por distribución aparente uso (ICONTEC, 1994). Se realizó secado al aire de cada una de las muestras por una 1 semana y

posteriormente se tamizó por malla 2mm N.º 10 con el fin de homogenizar las granulometrías y limpiarlas de impurezas (ICONTEC, 1997b).

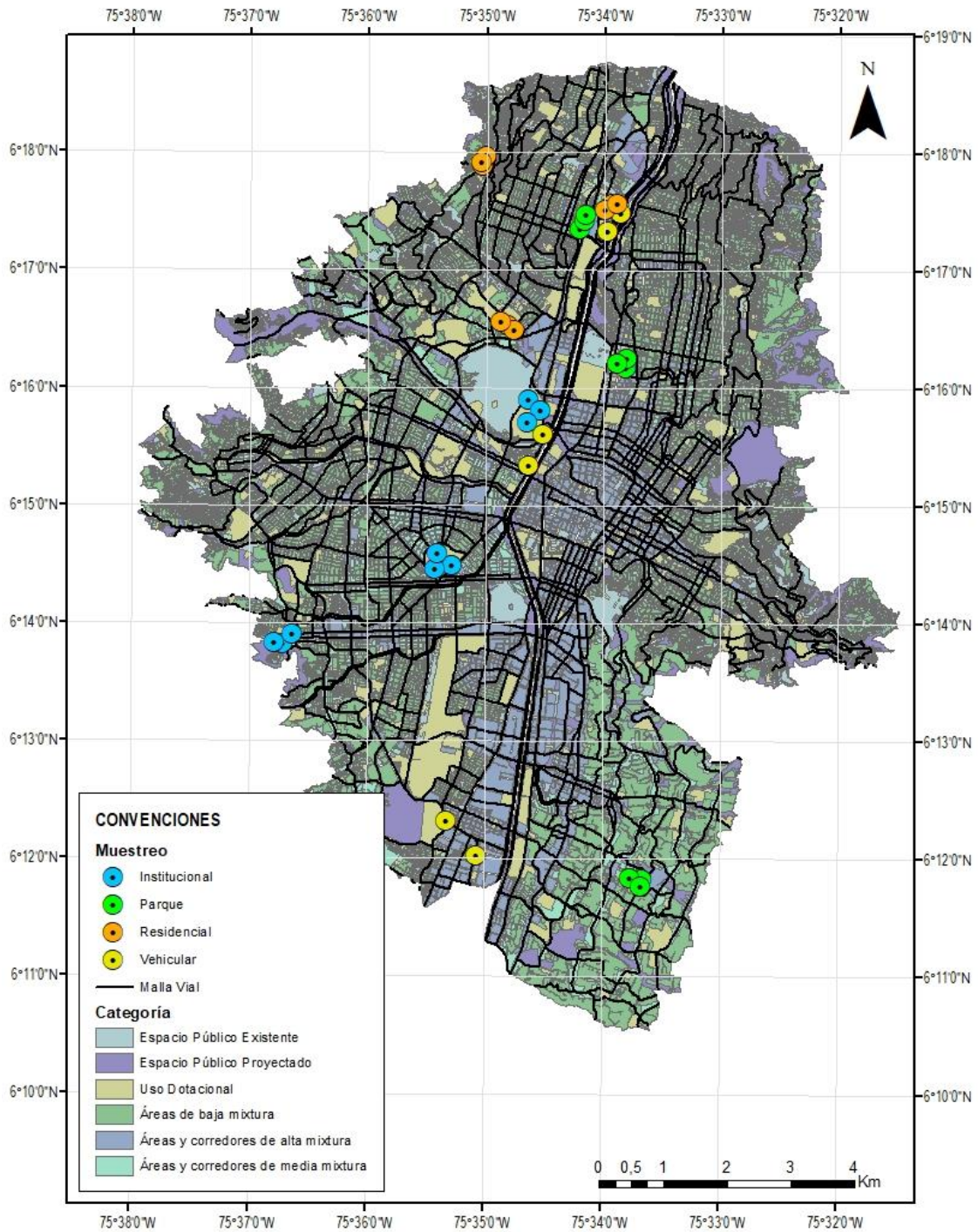


Figura 2. 1. Mapa ciudad de Medellín, ubicación de zonas de muestreo (33) utilizados para esta investigación. Usos del suelo asignados según el POT 048 de 2014. Elaboración propia

9.3.3 Propiedades físicas del suelo

La metodología empleada para la caracterización física del suelo urbano incluyó la evaluación de propiedades clave indicadoras de su calidad. La textura del suelo se determinó con el método de Bouyoucos utilizando hexametáfosfato sódico como dispersante, midiendo así la sedimentación de partículas en agua con un hidrómetro (Karkanis et al., 1991). La densidad aparente (DApa) se determinó mediante el método de terrón parafinado, técnica que conserva la estructura natural del suelo seco por unidad de volumen total, incluyendo el volumen de los poros (Cedeño Coll et al., 2024). Para la densidad real (DReal) se aplicó el método del picnómetro, el cual mide la densidad de las partículas sólidas excluyendo la porosidad, mediante el principio de desplazamiento de agua (Blake, 2015). La porosidad total (Pt) del suelo se determinó a partir la relación entre las densidades aparente y la densidad real ($1 - (DApa/DReal)$) (Kiefer et al., 2012). La estabilidad de los agregados del suelo se midió en seco mediante un juego de tamices standard N°100 (0,15mm), 40 (0,425mm), 18 (1mm), 10 (2mm), 5 (4mm) y 1,40 (6,3mm) donde se evaluó el porcentaje de suelo que pasó por cada tamiz. Adicionalmente se calculó el índice de estabilidad de los agregados (ISA), índice de estabilidad estructural (ISE) y el diámetro medio ponderado (DMP) (Amézketa, 1999). La materia orgánica total se evaluó por método de calcinación a una temperatura de 550°C durante 2 horas y 30 minutos en mufla (1Dies® Diseños Electrónicos Especiales) (Heiri et al., 2001). La capacidad retención de humedad se determinó con ollas de Richards, donde se midió la humedad gravimétrica y volumétrica en las presiones 0,3; 0,5; 1; 3; 5; 10; 15 bar cada presión por un lapso de 72 horas. Adicionalmente se identificó la capacidad de campo (C.C) % a 0,3 bar y el punto de marchitez permanente (PMP) % a 15 bar (Kukal et al., 2012).

9.3.4 Propiedades químicas del suelo

El análisis de las propiedades químicas del suelo urbano se realizó mediante métodos estándar. El carbono orgánico del suelo se estimó mediante el método de oxidación húmeda Walkley-Black, en extracto de dicromático de potasio ($K_2Cr_2O_7$), titulado con sulfato ferroso amoniacal ($(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$) (De Vos et al., 2007). El carbono orgánico disuelto (DOC), se analizó mediante el método estándar 5310B (en extracto suelo-agua) por combustión a alta temperatura para posteriormente hacer la medición directa en equipo analizador de carbono orgánico total disuelto TOC-L SHIMADZU (APHA et al., 2014). El pH en agua destilada o KCl 1N se realizó con pH-metro Professional GroLine Portable Soil pH Meter - HI98168, y la conductividad eléctrica con conductímetro Hach 51800-10

sensION 5 Waterproof Conductivity Meter, para las mediciones se utilizó una relación 1:2 p/v, para obtener una suspensión homogénea se utilizó Vortex Mezclador con movimiento orbital de agitación durante 1 hora (Kome et al., 2018). La espectroscopia de absorción atómica por llama directa se utilizó para cuantificar Ca, K, Mg y Na, extraídos con acetato de amonio a pH 7,0 siguiendo el método estándar 3111B. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICefe) se calculó como la suma de cationes intercambiables (Gallego & Olivero, 2021). El fósforo (P) disponible del suelo se analizó siguiendo el método estándar de ácido ascórbico 4500-P-E. en extracto de bicarbonato sódico 0,5 M (pH=8,5) en espectrofotómetro UV visible 4 nm UVILINE 9600 a 880nm (Garrido, 2023). La disponibilidad de nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-) y fosfatos (PO_4^{3-}) se determinó siguiendo el método estándar 4110B por cromatografía iónica.

9.3.5 Caracterización de metales traza en suelo urbano

La cuantificación de metales traza se realizó utilizando un sistema de digestión por microondas de alto rendimiento (ETHOS UP Milestone Srl, Sorisole, Italia) con ácido nítrico siguiendo el método estándar 3030K. Posteriormente, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn se analizaron por espectroscopia de absorción atómica por llama directa. El Hg total se cuantificó siguiendo el método US EPA 7473 (US EPA, 1998) utilizando un analizador de mercurio directo RA-915LAB (Lumex, St. Peterburgo, Rusia, Gallego et al., 2024). Para la cuantificación de mercurio (Hg). Se utilizó un analizador de mercurio directo RA-915LAB, con muestra seca y tamizada por malla N°100 (0,15mm) (Montoya et al., 2019).

9.3.6 Caracterización de servicios ecosistémicos

Entendiendo los servicios ecosistémicos (SE) como las contribuciones que la naturaleza brinda a su entorno, se identificaron aquellos relacionados con los indicadores físicos y químicos que evalúan la calidad del suelo (Drobnik et al., 2018) (ver tabla 2.1). La búsqueda se realizó filtrando material bibliográfico con palabras clave como "ecosystem services in urban land", "urban soil", "urban area", "urban parklands" y "urban ecosystem services" en la base de datos ScienceDirect de acuerdo con la estrategia presentada antes (O'Riordan et al., 2021), y a nivel local, en medios oficiales de la ciudad de Medellín.

Tabla 2. 1. Suelo urbano, servicios ecosistémicos, propiedades fisicoquímicas del suelo como indicadores de calidad

SE	Tipo de servicio	Función del suelo urbano	Propiedades fisicoquímicas
Provisión	Producción de alimentos	Servir de medio para la producción local de alimentos como vegetales, frutas, cereales, setos y, en algunos casos, la cría de animales. Contribuyendo a la seguridad alimentaria en áreas urbanas, la reducción de la huella de carbono y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles dentro de las ciudades (Godfray et al., 2010).	Densidad MO CRH CO, pH, bases intercambiables
	Soporte	Brindar soporte para diversas actividades humanas y proporcionar una base estable para la infraestructura y viviendas duraderas, carreteras y servicios públicos. Además, ofrece un hábitat vital para la fauna urbana, apoyando la biodiversidad incluso en entornos construidos (Ungaro et al., 2022).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad
	Fibra y materias primas	Al proporcionar las condiciones adecuadas para el crecimiento de árboles, plantas y otros organismos, el suelo facilita la generación sostenible de recursos utilizados en la construcción, la industria textil y la producción de abonos orgánicos. Esta función es clave para el mantenimiento de cadenas de suministro locales y sostenibles (Pereira et al., 2018).	MO Densidad CRH CO, pH, bases intercambiables
	Recursos ornamentales	Brindar condiciones óptimas para el crecimiento de plantas, arbustos e individuos arbóreos, contribuyendo a la creación de espacios verdes en áreas	Textura MO Estabilidad de los agregados

SE	Tipo de servicio	Función del suelo urbano	Propiedades fisicoquímicas
		urbanas y rurales. Estos recursos no solo embellecen el entorno, sino que también mejoran la calidad del aire, fomentan la biodiversidad y promueven el bienestar humano (Anne et al., 2018).	Densidad CRH CO, pH, bases intercambiables Textura
	Productos bioquímicos y recursos medicinales	El suelo proporciona condiciones óptimas para el crecimiento de plantas medicinales y otros organismos que producen compuestos bioactivos con aplicaciones en la medicina y la industria farmacéutica (Maroyi, 2022).	Estabilidad de los agregados Densidad CRH MO CO, pH, bases intercambiables
	Calidad y purificación del agua	Al actuar como filtro natural, el suelo retiene y neutraliza sustancias nocivas, mejorando la calidad del agua que se infiltra hacia los acuíferos (Keesstra et al., 2012).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad pH
Regulación	Calidad del aire	A través de la vegetación que sostiene, el suelo captura y almacena C, a su vez, los microorganismos del suelo ayudan a descomponer contaminantes atmosféricos. Este proceso natural contribuye a reducir la concentración de gases y partículas nocivas en el aire (Powlson et al., 2011).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad CRH
	Clima	El suelo ayuda a moderar la temperatura y la humedad en su entorno, especialmente en áreas verdes urbanas, lo que reduce el efecto de "isla de calor".	Textura Estabilidad de los agregados Densidad

SE	Tipo de servicio	Función del suelo urbano	Propiedades fisicoquímicas
		A nivel global, el suelo actúa como un almacén de carbono, contribuyendo a la mitigación del cambio climático al reducir la cantidad de CO ₂ en la atmósfera. A nivel local, el suelo soporta la vegetación que regula la temperatura y la calidad del aire, mejorando el confort climático dentro de los edificios (Telo, 2023).	CRH
	Residuos / contaminantes / desechos	A través de procesos biológicos y químicos, el suelo descompone y transforma desechos orgánicos y algunos contaminantes, reduciendo su impacto ambiental. Además, retiene y aísla sustancias peligrosas, previniendo que lleguen a los cuerpos de agua o afecten la calidad del aire (Yang & Zhang, 2015).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad pH
	Ruido	Al proporcionar una superficie capaz de absorber y dispersar ondas sonoras. Las zonas verdes, parques y áreas con vegetación sostenida por el suelo ayudan a reducir la contaminación acústica en áreas urbanas (Rey et al., 2023).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad
	Desastres Naturales	Al regular la infiltración de agua, el suelo reduce la escorrentía y minimiza el riesgo de inundaciones. Además, su estabilidad y estructura ayudan a prevenir deslizamientos y su capacidad de amortiguación puede mitigar los impactos de temblores (O'Riordan et al., 2021).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad CH
Culturales	Patrimonio	La capacidad que tiene el suelo para proteger y conservar elementos bajo su superficie lo convierte en un componente	Textura Estabilidad de los agregados

SE	Tipo de servicio	Función del suelo urbano	Propiedades fisicoquímicas
		clave en la arqueología y la comprensión de nuestra historia (AMVA, 2019).	Densidad
	Ocio	Al proporcionar espacios verdes que facilitan el esparcimiento, la contemplación del paisaje y el turismo. El suelo, tienen un alto valor para la inspiración espiritual y religiosa, brindando lugares de conexión con la naturaleza y la reflexión (Alcaldía de Medellín, 2021).	Textura Estabilidad de los agregados Densidad

9.3.7 Análisis de datos

El procesamiento de los datos obtenidos incluyó un análisis descriptivo; medidas de tendencia central, dispersión, tablas y gráficos. Posteriormente para comparar los resultados entre zonas y coberturas se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas para la aplicación del análisis ANOVA. En el caso de no cumplir los supuestos, se implementó el análisis no paramétrico, basándose en el estadístico de Kruskal-Wallis, y el uso de la prueba de Dunn para la comparación de categorías de uso y coberturas con las diferentes propiedades fisicoquímicas y metales traza. Esta aproximación es adecuada, ya que los métodos no paramétricos no requieren que los datos sigan distribuciones específicas, lo que los hace apropiados cuando los datos no cumplen con los supuestos clásicos de normalidad o varianzas homogéneas (MacFarland & Yates, 2016).

Por otro lado, el análisis de componentes principales (PCA) se utilizó para identificar patrones o tendencias en la variabilidad de las propiedades fisicoquímicas con respecto a las categorías de uso (parque, institucional, vehicular y residencial) y las coberturas (césped, mixto y arbóreo). El PCA es especialmente útil en estudios ambientales, ya que permite reducir la dimensionalidad de los datos y resaltar las relaciones subyacentes entre variables complejas, identificando factores que explican la mayor parte de la variabilidad en el sistema estudiado (Castro et al., 2017). En este caso, el PCA facilita la interpretación de la influencia de las coberturas y usos del suelo en las propiedades fisicoquímicas del entorno, permitiendo un análisis más eficiente y

comprensible de los datos ambientales sin depender de estrictos supuestos distribucionales.

9.4 Resultados

9.4.1 Propiedades físicas

La textura franca predominó en todas las muestras, lo que sugiere una distribución adecuada de partículas de arena, limo y arcillas (ver tabla 2.2).

Tabla 2. 2. Identificación de texturas muestras de suelo urbano

Textura	Cantidad muestras / Categoría				%
	Parque	Institucional	Vehicular	Residencial	
Arcillo arenoso	11%			11%	6,1
Arcilloso	11%				3,0
Franco	33%	22%	33%	44%	33,3
Franco arcillo arenoso	11%	33%	17%	11%	18,2
Franco arenoso	11%	22%	33%	33%	24,2
Franco arcilloso	22%	22%	17%		15,2

Al tener mayor representación de textura franca, la categoría institucional y vehicular cuentan con un índice de estabilidad de agregados (ISA) mayor, los porcentajes oscilaron entre 77,3-87,5%, los valores del índice de estabilidad estructural (ISE) oscilaron entre 12,5-22,7 % y el diámetro medio ponderado (DMP) osciló entre 1,3-1,6mm, la categoría institucional césped presento el menor diámetro, por el contrario, las categorías parque césped, institucional mixto y residencial césped presentaron el diámetro más grande y la mayor estabilidad de los agregados del suelo (ver figura 2.2) (ver tabla 2.3).

Tabla 2. 3. %ISA, %ISE, DMP por categorías de uso del suelo urbano

Categoría	Cobertura	ISA (%)	ISE (%)	DMP (mm)
	césped	79,7	20,3	1,6
Parque	Estratificada	83,0	17,0	1,5
	Arbórea	84,0	16,0	1,4

Categoría	Cobertura	ISA (%)	ISE (%)	DMP (mm)
	SEM	2	2	0,04
Institucional	césped	80,8	19,2	1,3
	Estratificada	83,0	17,0	1,6
	Arbórea	84,0	16,0	1,4
Vehicular	SEM	2	2	0,01
	Mixto	84,3	15,7	1,5
Residencial	SEM	4	4	0,05
	Mixto	84,0	16,0	1,6
	Estratificada	77,3	22,7	1,4
	césped	87,5	12,5	1,4
	SEM	2,9	2,9	0,07

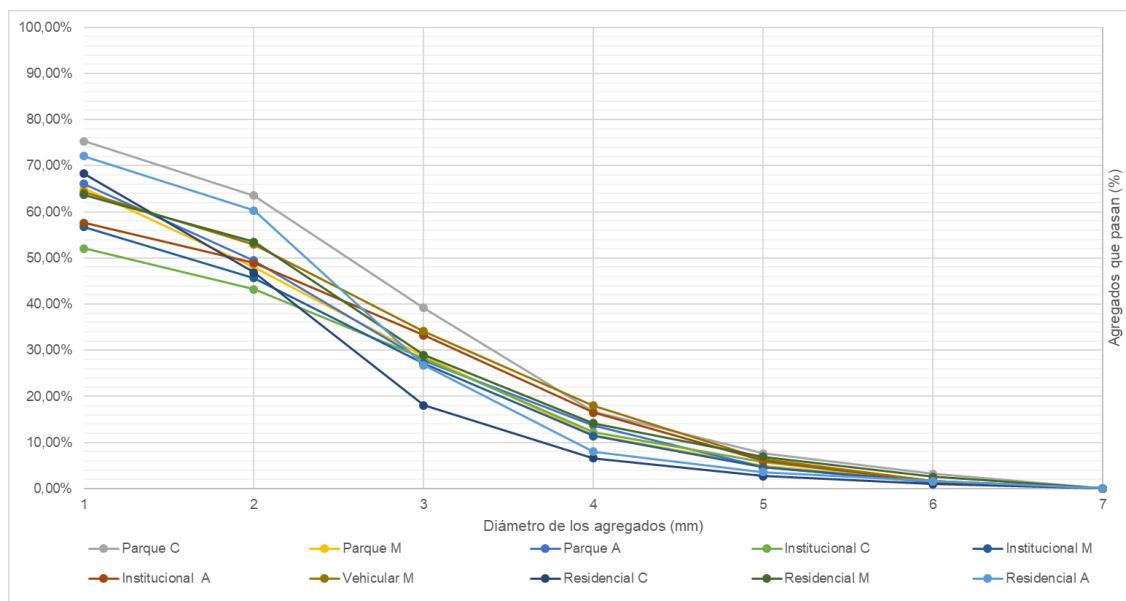


Figura 2. 2. Estabilidad de agregados por categoría de uso del suelo urbano (el error estándar de la media (SEM) osciló entre 3-8 %)

Por otra parte, la densidad aparente osciló entre 1,32 g/cm³ para la categoría parque mixto y 1,49 g/cm³ para la categoría residencial arbórea, la densidad real osciló entre 2,34 g/cm³ para la categoría residencial mixto y 2,80 g/cm³ para la categoría parque mixto (ver figura 2.3), la porosidad total (Pt) osciló entre 37-53 %, el porcentaje más bajo

lo obtuvo la categoría residencial mixto y el porcentaje más alto lo obtuvo. Microporosidad oscilo entre el 28-33% y macroporosidad entre 7-25%, las categorías con los valores más bajos fueron parque mixto, vehicular mixto y residencial mixto y las categorías con los valores más altos fueron residencial mixto y parque mixto respectivamente (ver figura 2.4). La capacidad de retención de humedad (CRH) oscilo entre el 28 y 35%, las categorías parque y vehicular mixto presentaron el porcentaje más bajo y la categoría institucional césped presentó el porcentaje más alto, para los porcentajes de capacidad de campo (C.C) y punto de marchitez permanente (PMP) las categorías vehicular mixto y residencial mixto presentaron los valores más bajos y altos respectivamente, los cuales oscilaron entre el 47-64% y 19-33% (ver figura 2.5).

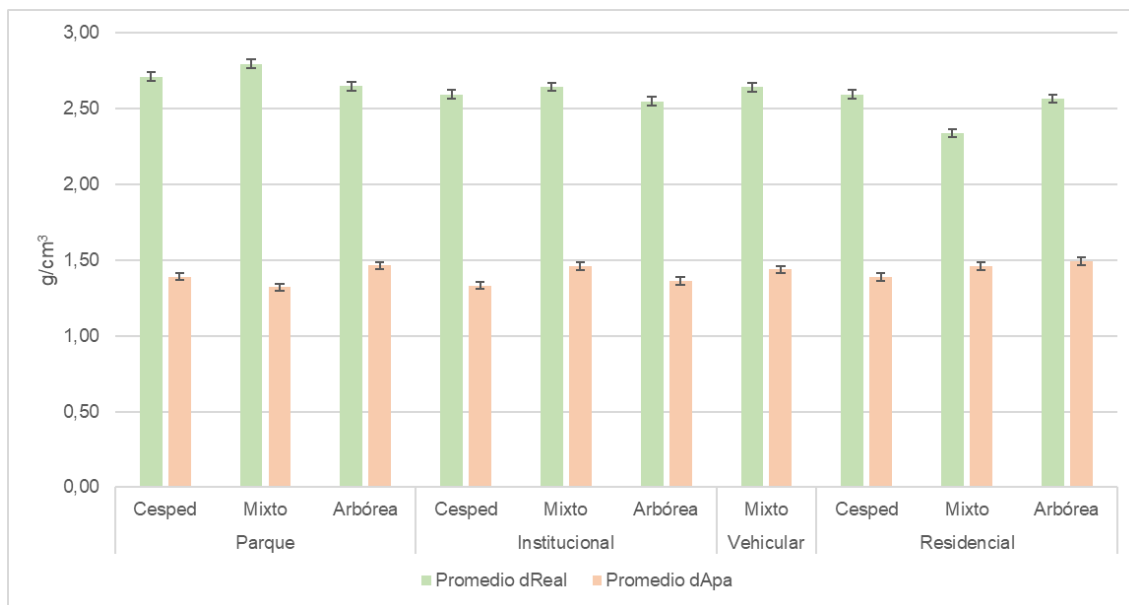


Figura 2. 3. Densidad real y aparente por categoría de uso del suelo urbano (promedio de 3 réplicas por categoría y uso del suelo, el error estándar de la media (SEM) osciló entre 0,03-0,06 g/cm³ para la densidad real y para la densidad aparente osciló entre 0,01-0,05 g/cm³)

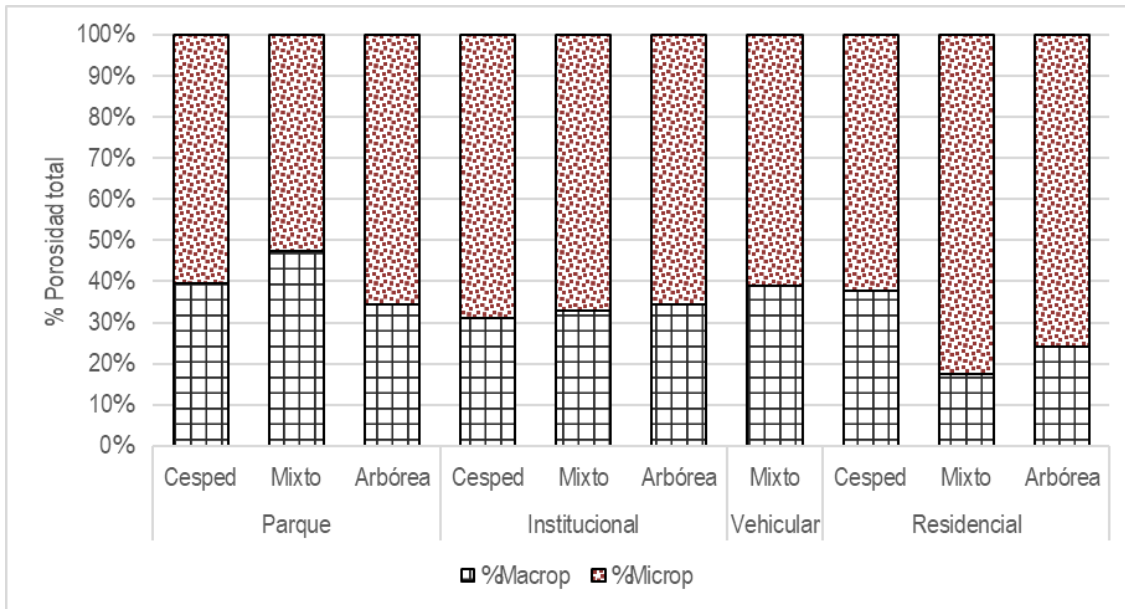


Figura 2. 4. Porcentaje de porosidad en cada categoría de uso del suelo urbano (el error estándar de la media (SEM) osciló entre 1-3 % para microporosidad y para la macroporosidad osciló entre 2-6 %)

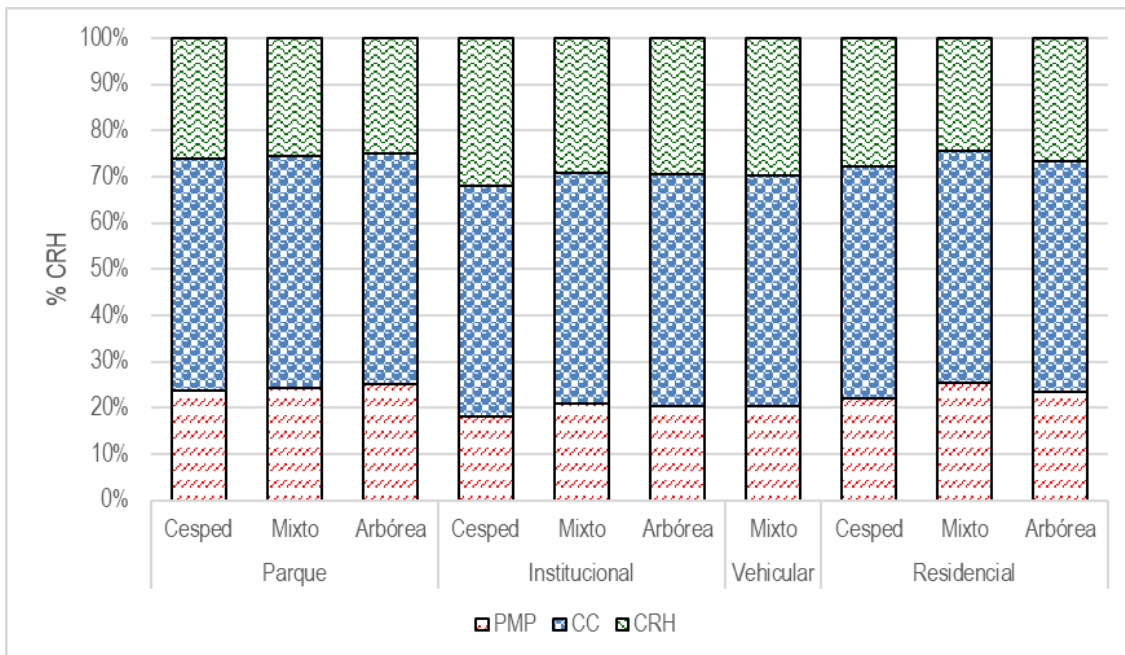


Figura 2. 5. Porcentaje de capacidad de retención de humedad (CRH) por categoría de uso del suelo urbano (promedio de 3 réplicas por categoría y uso del suelo, el error estándar de la media (SEM) osciló entre 1-4 % para PMP (punto de marchitez permanente), entre 2-5 % para CC (capacidad de campo) y entre 1-3 % para CRH (capacidad de retención de humedad)).

9.4.2 Propiedades químicas

Los valores de pH en agua oscilaron entre 5,60-6,45 siendo la categoría institucional césped la más baja y residencial césped la más alta y, en medio KCl (1N) los

valores oscilaron entre 4,83-5,72 siendo el valor más bajo para institucional césped y el más alto para vehicular mixto. Los valores de conductividad eléctrica (CE) oscilaron entre 291,32-1179,25 ($\mu\text{s}/\text{cm}$) siendo el valor más bajo para parque mixto y el más alto para residencial césped. El contenido de MO oscilo entre el 12-24% siendo parque césped la categoría con el valor más bajo y residencial mixto el más alto. El contenido de C.O oscilo entre 3,37 y 5,84% siendo el valor más bajo para la categoría parque mixto y el más residencial césped. Los valores de DOC oscilaron entre 3,62 y 6,21 mg siendo el valor más bajo y alto para las categorías parque césped y arbórea respectivamente (ver tabla 2.4).

Tabla 2. 4. Relación de MO, C.O y DOC disponible bajo condiciones de pH y conductividad eléctrica

Categoría	Cobertura	MO (%)	C.O (%)	DOC (mg/kg)	pH (H₂O)	pH (KCl)	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
	Césped	12,00	3,62	3,62	6,02	5,22	360,13
Parque	Mixto	13,00	3,37	4,48	6,42	5,62	291,32
	Arbórea	13,00	4,70	6,21	6,03	5,33	399,28
	SEM	0,01	0,47	0,67	0,10	0,10	25,77
	Césped	15,00	4,44	5,49	5,60	4,83	313,87
Institucional	Mixto	15,00	4,33	5,66	5,87	5,18	339,57
	Arbórea	14,00	4,71	5,48	5,80	5,02	297,23
	SEM	0,01	0,12	0,35	0,12	0,12	9,34
Vehicular	Mixto	13,00	5,04	5,77	6,30	5,72	374,51
	SEM	0,03	0,19	0,71	0,15	0,15	13,49
Residencial	Césped	17,00	5,84	5,71	6,45	5,62	1179,25
	Mixto	24,00	5,75	4,22	6,28	5,65	1166,00
	Arbórea	19,00	3,89	4,88	6,25	5,60	488,68
	SEM	0,04	0,86	0,84	0,25	0,18	291,94

Los suelos presentan condiciones ligeramente ácidas, lo que explica los niveles moderados de bases totales. El calcio (Ca) osciló entre 0,15-0,23 g/kg siendo el valor más bajo para la categoría institucional mixto y el más alto para la categoría institucional césped. El magnesio (Mg) osciló entre 0,01-0,05 g/kg, siendo el valor más bajo para la

categoría parque mixto y el más alto para la categoría parque arbóreo. El potasio (K) oscilo entre 0,01-0,03 g/kg, siendo el valor más bajo para la categoría residencial arbórea y el más alto para la categoría institucional arbórea. El sodio (Na) oscilo entre 0,12-0,19 g/kg, siendo el valor más bajo para la categoría parque arbórea y el más alto para la categoría parque césped.

La relación de Ca/Mg osciló entre 3,79-8,75 cmol(+)/kg siendo el valor más bajo para la categoría parque y el más alto para la categoría institucional mixto. La relación de Adsorción de Sodio (RAS) oscilo entre 1,73-4,51 cmol(+)/kg siendo el valor más bajo para la categoría residencial mixto y el más alto para la categoría residencial césped. La capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICef) oscilo entre 13,42 y 19,83 cmol(+)/kg siendo el valor más bajo para la categoría residencial mixto y el más alto para la categoría institucional mixto. Por otra parte, los valores P oscilaron entre 2,47 y 10,73 mg/kg siendo la categoría parque mixto la más baja y residencial arbórea la más alta (ver tabla 2.5).

Tabla 2. 5. Relación de bases totales

Categoría	Cobertura	Ca	Mg	K	Na	Rel Ca	RAS	CICef	P
		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	/ Mg cmol(+)/kg	cmol(+) / kg	cmol(+) / kg	mg / kg
Parque	Césped	0,16	0,01	0,02	0,19	4,12	2,50	16,70	5,73
	Mixto	0,17	0,01	0,02	0,13	5,35	2,32	15,78	2,47
	Arbórea	0,18	0,05	0,01	0,12	3,79	2,47	16,39	4,07
	SEM	0,02	0,01	0,00	0,02	0,75	0,14	0,86	,076
Institucional	Césped	0,23	0,02	0,01	0,13	4,11	2,75	14,81	6,67
	Mixto	0,15	0,02	0,01	0,13	8,75	4,02	19,83	9,27
	Arbórea	0,20	0,02	0,03	0,13	5,62	2,59	15,72	7,40
	SEM	0,02	0,00	0,01	0,00	0,96	0,50	1,56	1,28
Vehicular	Mixto	0,17	0,02	0,01	0,18	7,88	2,40	18,31	4,73
	SEM	0,02	0,00	0,00	0,04	0,93	0,04	0,59	1,38
Residencial	Césped	0,17	0,02	0,01	0,13	5,73	4,51	19,01	5,87
	Mixto	0,23	0,03	0,02	0,15	4,06	1,73	13,42	8,60

Categoría	Cobertura	Ca g/kg	Mg g/kg	K g/kg	Na g/kg	Rel Ca / Mg cmol(+)/kg	RAS cmol(+) / kg	ClCef cmol(+) / kg	P mg / kg
	Arbórea	0,20	0,02	0,01	0,13	7,83	2,60	18,90	10,73
	SEM	0,02	0,00	0,00	0,01	0,82	0,84	2,00	1,36

Para la ANNOVA no paramétrica se utilizaron como variables independientes la categoría de uso y la cobertura de suelo urbano y como variables dependientes cada una de las propiedades fisicoquímicas y de metales pesados. Los resultados indican que no existen diferencias significativas (ver tabla 2.6).

Tabla 2. 6. ANNOVA no paramétrica categorías de uso del suelo urbano

Cat / Cob	Ar	A	L	MO	Dr	Da	Pt	Pmi	Pma	CRH	C.C	PMP
P > 0,05	1	0,47	0,95	1	0,96	0,48	0,61	0,59	0,63	0,59	0,85	0,88

Cat / Cob	ISA	ISE	DMP	pH H ₂ O	pH KCl	CE	C.O	DOC	Ca	Mg	K	Na
P > 0,05	0,06	0,06	0,17	0,75	0,38	0,56	0,95	0,31	0,89	0,82	0,056	0,99

Cat / Cob	P	NO ₂	NO ₃	PO ₄	Ni	Pb	Cu	Cr	Zn	Hg
P > 0,05	0,57	0,83	0,86	0,34	0,95	0,59	0,40	0,93	0,29	0,06

Las variables relacionadas fueron: Arcilla (Ar), arena (A), limo (L), materia orgánica (MO), densidad real (Dr), densidad aparente (Da), porosidad total (Pt), microporosidad (Pmi), macroporosidad (Pma), capacidad de retención de humedad (CHR), capacidad de campo (C.C), punto de marchitez permanente (PMP), índice de estabilidad de los agregados (ISA), índice de estabilidad estructural (ISE), diámetro medio ponderado (DMP), pH en agua (pH H₂O), pH en KCl (pH KCl), conductividad eléctrica, carbono orgánico (C.O), carbono orgánico disuelto (DOC), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), fósforo (P), nitritos (NO₂⁻), nitratos (NO₃⁻), fosfatos (PO₄³⁻), níquel (Ni), plomo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), zinc (Zn) y mercurio (Hg).

Por último, se realizó un análisis de componentes principales (PCA) en R, donde se contemplaron 5 posibles espacios dimensionales para analizar la variabilidad total de las variables. Dimensiones (Dim) 1 a 5 explican el 17%, 13,9%, 9,7%, 9,2% y 7% respectivamente de la variabilidad total de las propiedades del suelo urbano (ver tabla 2.7). Para el análisis de las variables se tuvo en cuenta un espacio bidimensional definido por Dim1 y Dim2 que explican un acumulado del 31%, de la variabilidad total (ver figura 2.6). Las distancias indican la dirección y magnitud de la correlación de las variables con los componentes principales, donde las variables más cercanas a 1 indican mayor influencia en la dimensión.

Tabla 2. 7. Espacios dimensionales para analizar la variabilidad total de las variables. Para reducir la dimensionalidad de los datos y explorar las relaciones entre las variables involucradas, se llevó a cabo un análisis de componentes principales. Este análisis permitió identificar patrones en los datos y determinar qué variables contribuyen más a la variabilidad observada, así como la intensidad de sus relaciones. Los valores cercanos a 1 indican una fuerte relación, ya sea positiva o negativa, mientras que aquellos cercanos a 0 sugieren una relación débil. En este contexto, por ejemplo, la materia orgánica (MO) destaca con una carga alta de 0.762, lo que sugiere su importancia en esta dimensión. Por otro lado, la densidad real (Dr) presenta una carga negativa de -0.625, lo que indica que, a medida que aumenta la materia orgánica, el drenaje tiende a disminuir. Además, la variable arena (A) muestra una carga significativa de 0.713, lo que resalta su relevancia en esta dimensión.

Variables	Dim,1 (17%)	Dim,2 (13,9%)	Dim,3 (9,7%)	Dim,4 (9,2%)	Dim,5 (7%)
Ar	0.300	-0.351	-0.433	0.217	0.598
A	-0.126	0.713	0.124	-0.097	-0.016
L	-0.118	-0.458	0.232	-0.065	-0.486
MO	0.762	0.504	-0.017	0.099	0.018
Dr	-0.625	-0.429	-0.134	0.025	0.063
Da	0.225	-0.624	0.498	-0.243	0.061
Pt	-0.593	0.314	-0.541	0.207	-0.024
Pmi	0.668	-0.485	0.123	-0.211	-0.150
Pma	-0.715	0.453	-0.401	0.253	0.064
CRH	0.668	-0.485	0.123	-0.211	-0.150
C.C	0.863	-0.243	0.175	0.238	0.101
PMP	0.711	-0.003	0.144	0.477	0.219
ISA	-0.094	-0.573	-0.151	0.125	-0.305
ISE	0.094	0.573	0.151	-0.125	0.305
DMP	0.002	-0.247	-0.160	-0.082	-0.043
pH H ₂ O	-0.436	-0.237	0.671	-0.043	0.335
pH KCl	-0.420	-0.075	0.729	-0.030	0.397
CE	0.027	0.203	0.418	-0.116	-0.179
C.O	0.387	0.700	0.171	0.201	-0.358
DOC	0.425	0.062	-0.039	0.369	-0.150
Ca	-0.552	-0.021	0.490	-0.239	0.104
Mg	-0.047	-0.233	0.197	0.739	-0.388
K	0.337	-0.013	0.044	-0.071	0.337
Na	-0.145	-0.106	-0.142	-0.382	-0.250
P	0.424	0.225	-0.044	-0.374	-0.028
NO ₂ ⁻	0.619	0.380	0.179	0.295	0.078
NO ₃ ⁻	0.538	0.545	0.248	0.145	-0.195
PO ₄ ³⁻	0.176	0.206	-0.446	-0.172	0.187
Ni	-0.253	-0.264	0.172	0.731	-0.266
Pb	-0.453	0.478	0.097	0.091	-0.003
Cd	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cu	-0.375	0.077	0.414	0.243	0.254
Cr	-0.255	-0.175	0.126	0.825	-0.089
Zn	0.077	0.483	0.349	0.078	-0.320
Hg	0.015	0.241	-0.018	0.558	0.104

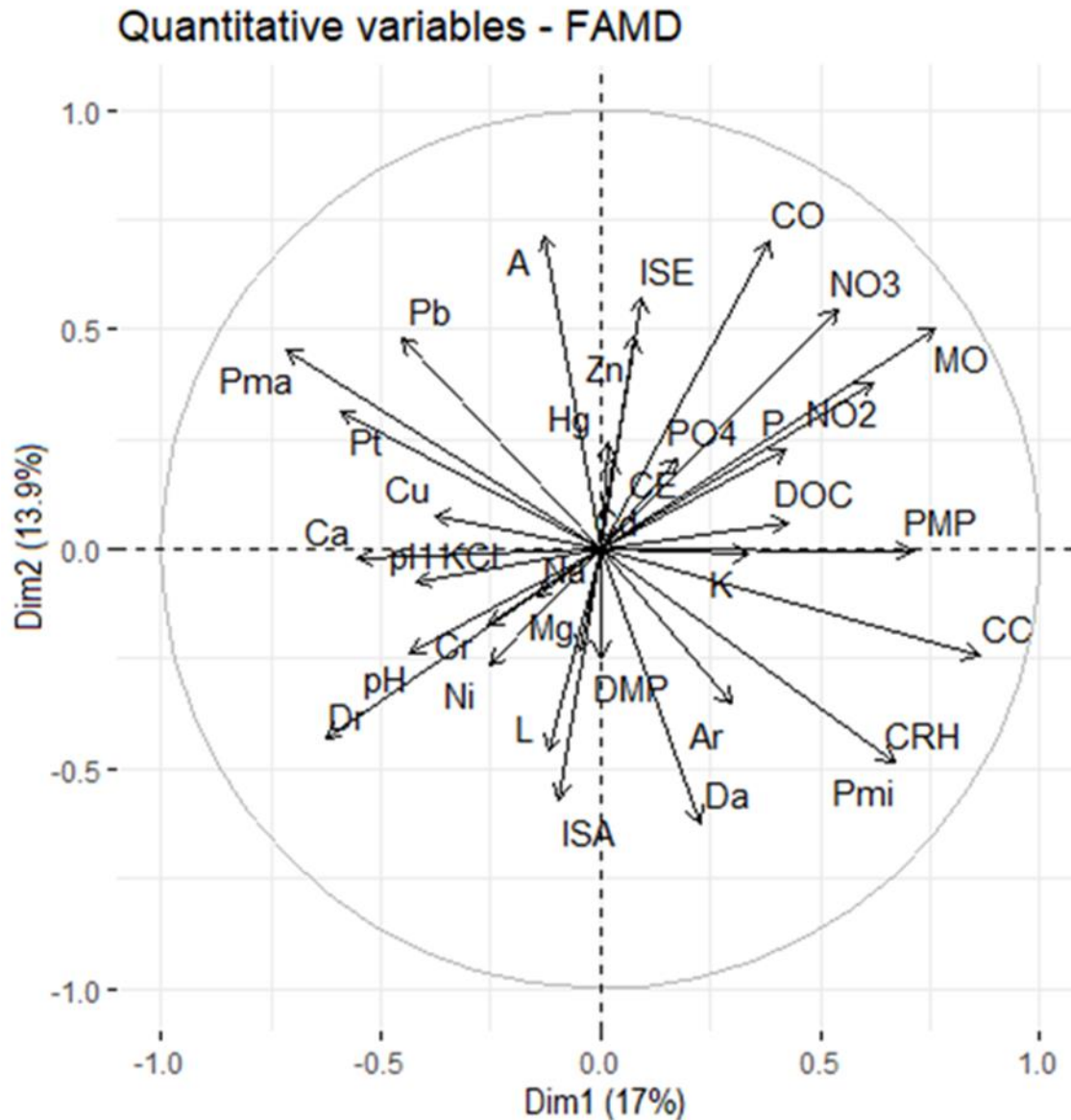


Figura 2. 6. Análisis de componentes principales (PCA). La figura muestra los resultados del análisis de componentes principales (PCA) que fue aplicado a las variables de forma radial, se muestra las cargas de las variables en los dos primeros componentes principales Dim 1 y 2, que explican una proporción significativa de la variabilidad en los datos (31%). Las flechas en el gráfico indican la dirección y la fuerza de las correlaciones entre las variables. Las flechas largas representan relaciones fuertes, lo que sugiere que la variable está estrechamente relacionada con el componente correspondiente. En contraste, las flechas cortas indican relaciones débiles, señalando que la variable tiene una menor influencia en ese componente. Las flechas que apuntan hacia el mismo sentido en una dimensión sugieren una relación positiva, mientras que las que apuntan en direcciones opuestas indican una relación negativa. La materia orgánica (MO) está fuertemente relacionada con la Dim1 y es inversamente proporcional a la densidad real (Dr). Variables como la capacidad de campo (C.C, capacidad de retención de humedad (CRH) y microporosidad (Pmi) están altamente correlacionadas entre sí en la Dim1 y estas a su vez están inversamente relacionadas con la macroporosidad (Pma). La Dim2 está altamente relacionada con variables como carbono orgánico (C.O), arena (A), y densidad aparente (Dap), siendo estas últimas dos inversamente proporcionales.

9.4.3 Metales traza

Debido a la falta de normatividad local, la concentración de metales traza en cada una de las categorías de suelo urbano se analizaron con los rangos permitidos por la normatividad internacional (CCME, 1991) (ver tabla 2.8).

Tabla 2. 8. Traza de metales pesados, normatividad canadiense, muestras de suelo urbano

Categoría		Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Hg (mg/kg)
Parque	Min	188,1	4,1	<LOQ	52,4	285,2	49,1	0,05
	Max	2407,9	31,9	<LOQ	91,	4936,2	139,0	0,27
SEM		278,47	3,22	<LOQ	4,35	522,62	11,29	0,02
Institucional	Min	0,4	1,4	<LOQ	24,0	31,2	69,2	0,03
	Max		27,1	<LOQ	43,9	541,8	107,8	0,19
SEM		0,05	2,63	<LOQ	2,43	57,44	4,53	0,02
Vehicular	Min	205,6	14,8	<LOQ	43,	184,2	19,6	0,05
	Max		185,3	<LOQ	127,2	381,9	317,3	0,17
SEM		34,27	27,38	<LOQ	12,50	30,78	44,25	0,02
Residencial	Min	165,8	3,4	<LOQ	38,7	25,5	9,7	0,05
	Max	385,3	28,2	<LOQ	94,5	709,9	387,3	0,24
SEM		47,73	2,38	<LOQ	5,74	78,61	35,54	0,02

9.5 Discusión

La textura del suelo en todas las categorías analizadas se caracterizó por ser franca, lo cual sugiere una baja variabilidad en las proporciones de arena, limo y arcilla. Este equilibrio textural favorece la provisión de servicios ecosistémicos como la infiltración y retención de agua, el ciclo de nutrientes, la mitigación de contaminantes y la estabilidad estructural del suelo al ofrecer una resistencia óptima del suelo frente a condiciones naturales y antrópicas, manteniendo al mismo tiempo las dinámicas funcionales del entorno y su uso (Mavi et al., 2012).

Los suelos de las categorías parque e institucional mostraron condiciones buenas para la regulación del ciclo hídrico. Esto principalmente a propiedades como la densidad

real, la densidad aparente, la porosidad total y capacidad de retención de humedad. Estos resultados indican una alta capacidad de infiltración y almacenamiento de agua, lo que favorece la regulación del ciclo del agua en entornos urbanos (Kukul et al., 2012). En ambas categorías, la buena porosidad y retención de humedad permiten una infiltración eficiente, reducen el riesgo de inundaciones y favorecen la recarga de acuíferos, lo que resulta en un manejo sostenible de los recursos hídricos (Phillips et al., 2019). Por otro lado, en la categoría vehicular, aunque la porosidad es adecuada (46%) para permitir una infiltración moderada, la densidad aparente del suelo ($1,44 \text{ g/cm}^3$) sugiere un mayor grado de compactación lo que puede limitar la capacidad de infiltración de agua. Los suelos vehiculares tienden a ser más compactos debido a la presión constante ejercida por el tráfico, lo que disminuye su permeabilidad y puede llevar a un mayor riesgo de escorrentía superficial (Das et al., 2023). En cuanto a los suelos de la categoría residencial, se observa una mayor variabilidad en sus características, con una porosidad que varía entre el 37-46%, lo que indica que su capacidad de infiltración puede ser más limitada en comparación con las categorías parque e institucional. Sin embargo, la propiedad que presentó mayor variabilidad en esta categoría (residencial) fue la conductividad eléctrica, que osciló entre 488,68-1179,25 $\mu\text{S/cm}$. Este amplio rango sugiere la posible acumulación de sales, que puede afectar negativamente la estructura del suelo. Por otra parte, su alto contenido de MO (17-24%) y C.O (3,89-5,84%) favorecen la CICef (13,42-19,01 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$) y por ende su capacidad para infiltrar agua de manera eficiente (Tresch et al., 2018).

Para los servicios ecosistémicos relacionados con la regulación climática y la captura de carbono, la categoría residencial se destaca como la más efectiva debido a sus altos niveles de materia orgánica (MO), carbono orgánico (C.O) y carbono orgánico disuelto (DOC) que varía entre 4.2 y 5.7 mg. Estos valores indican que los suelos residenciales tienen una alta capacidad para almacenar carbono, lo que los convierte en un reservorio clave para la captura de CO_2 atmosférico (Bhattacharyya et al., 2022, Sanchez et al., 2005). La alta materia orgánica en estos suelos no solo contribuye a la captura de carbono, sino también a la mejora de la estructura del suelo y la actividad biológica. La categoría institucional ocupa el segundo lugar en términos de capacidad para capturar carbono, con un contenido MO entre el 14% y el 15%, y valores de DOC que oscilan entre 5.5 y 5.7 mg. Aunque el contenido de MO es ligeramente inferior al de la categoría residencial, sigue siendo considerablemente alto. En las categorías de parque y vehicular, los contenidos de MO y DOC son moderadas, con valores de entre 12-13% y 3.6 a 6.2 mg respectivamente. Aunque los niveles de carbono almacenado en estos suelos

son más bajos, siguen desempeñando un papel importante en la captura de carbono. Los suelos de parque, al contar con vegetación y menos perturbaciones, contribuyen de manera estable al secuestro de carbono, lo que favorece la regulación del clima local y la moderación de las temperaturas urbanas. Sin embargo, en el caso de los suelos vehiculares, la compactación y el menor contenido de materia orgánica pueden limitar su capacidad de captura de carbono, aunque siguen contribuyendo efectivamente al almacenamiento de carbono en el suelo (Pranskevicius & Paliulis, 2021).

En cuanto a los servicios ecosistémicos relacionados con el soporte de biodiversidad y el ciclo de nutrientes, todas las categorías de suelos urbanos evaluadas presentan condiciones de calidad moderadas y un pH ligeramente ácido por lo que pueden sostener crecimiento vegetal y actividad microbiana (Li et al., 2013, Neina, 2019). Aunque los suelos urbanos presentan altos niveles de materia orgánica (MO), la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICef), relación de Ca/Mg y la relación de absorción de sodio (RAS); los niveles de P, NO_2^- , NO_3^- y PO_4^{3-} , son relativamente bajos, lo que podría limitar el crecimiento de especies que requerían mayores concentraciones. Las categorías parque mixto y residencial arbórea presentaron los niveles de P más bajo y alto 2,5-10,5 mg/kg respectivamente, los niveles de NO_2^- oscilaron entre 0,04-2,00 ppm siendo la categoría institucional mixto la más baja y residencial mixto las más alta. Los niveles de NO_3^- oscilaron entre 0,70-135,22 ppm siendo la categoría institucional césped la más baja y residencial césped la más alta y para PO_4^{3-} oscilaron entre 0,77-1,28 ppm siendo la categoría residencial mixto la más baja y residencial arbóreo la más alta. No obstante, siguen siendo aptos para sostener una vegetación urbana saludable y actividad microbiana. Adicionalmente el pH de las muestras es ligeramente ácido y se presentaron bajas condiciones de conductividad eléctrica entre 291,32-1179,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo la categoría parque mixto la más baja y residencial césped la más alta, creando condiciones que permiten el crecimiento de vegetación ornamental o de paisajismo urbano. Además, la baja salinidad mejora la actividad microbiana, lo que a su vez promueve el reciclaje eficiente de nutrientes, facilitando la disponibilidad de estos para las plantas. Aunque los nutrientes esenciales están presentes en cantidades adecuadas, la compactación reduce la porosidad del suelo y restringe la infiltración de agua y la circulación de aire, lo que afecta negativamente el crecimiento de las raíces y la actividad microbiana.

La interpretación de PCA proporciona interacciones entre las variables del suelo lo cual se puede relacionar con los servicios ecosistémicos. Para la Dim1, las variables con

mayor correlación son la Pt, Pmi, Pma, CRH, C.C y PMP. Lo que sugiere estar altamente relacionado con los servicios ecosistémicos de regulación hídrica y la estabilidad estructural del suelo. La CRH, C.C y PMP son cruciales para determinar la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas, lo cual no solo soporta el crecimiento vegetal, sino que también ayuda a reducir el riesgo de inundaciones y la escorrentía en áreas urbanas, desempeñando un papel importante en la regulación hídrica y el microclima. Por otra parte, Pt, Pmi y Pma favorecen la estructura del suelo y su resistencia a la compactación y erosión, lo cual es esencial para el soporte de la vegetación urbana, la filtración de agua y la mitigación de contaminantes (Drobnik et al., 2018). La Dim2 está fuertemente relacionada con variables como arena (A), DApa, ISA, ISE y C.O lo que está altamente relacionado con la estructura, fertilidad del suelo y el ciclo de nutrientes. Los índices de estabilidad estructural y de agregados proporcionan un entorno más saludable para las raíces, así como una baja densidad aparente permiten una mejor infiltración de agua, reduciendo la escorrentía y mejorando la calidad del agua al filtrar contaminantes. Por otra parte, un mayor contenido de carbono orgánico en el suelo contribuye a la mitigación del cambio climático, ya que los suelos pueden actuar como sumideros de carbono, reduciendo la concentración de CO₂ en la atmósfera y también mejora capacidad del suelo para intercambiar cationes y retener materia orgánica lo cual es crucial para el ciclo de nutrientes (Hyun et al., 2022).

Finalmente, la acumulación de metales pesados como Ni (188,1-2407,9 mg/kg) y Cr (285,2-4936,2 mg/kg) en parques puede estar relacionada con fuentes cercanas, deposiciones atmosféricas o actividad antropogénica. Aunque estas áreas presentan buenos valores de MO y porosidad, la presencia de estos metales puede afectar la salud de los ecosistemas y de los usuarios del parque, limitando la capacidad del suelo para prestar servicios ecosistémicos seguros (Bakhmatova et al., 2022). En las áreas vehiculares, los suelos tienen altos niveles de Pb (14,8-185,3 mg/kg) y Cu (43,9-127,2 mg/kg), típicos de la contaminación por tráfico y desgaste de piezas de automóviles vías. Estos metales no solo pueden afectar negativamente la salud del suelo y la biodiversidad, sino que también contribuyen a la contaminación del aire, dado que el polvo del suelo contaminado puede ser dispersado (Zafra et al., 2019). Aunque la categoría residencial muestra mayor materia orgánica y capacidad de retención de agua, los niveles de metales pesados, como Zn (9,70-387,3 mg/kg) y Cr (25,47-709,91 mg/kg), reflejan una contaminación posiblemente asociada a productos domésticos, actividades de construcción y deposición atmosférica. Esto podría comprometer la calidad del suelo y del

agua subterránea. La acumulación de metales pesados sugiere estar relacionada con el manejo y uso del suelo urbano (Tresch et al., 2018).

9.6 Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman el papel clave de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la provisión de servicios ecosistémicos en entornos urbanos. La variabilidad entre las categorías no solo destaca el uso del suelo institucional fue el más favorable para la prestación de servicios ecosistémicos en aspectos de la regulación hidrológica y del clima, la captura de CO₂ y el soporte para la biodiversidad, sino que también advierte los diferentes usos y manejos en cada una de las categorías de uso del suelo urbano, especialmente en áreas vehiculares y residenciales, donde la compactación y la acumulación de sales y metales pesados pueden limitar significativamente su capacidad para prestar estos servicios ecosistémicos. Adicionalmente la dinámica urbana y la historia de cada uno de los suelos urbanos brindan condiciones de amplia heterogeneidad en las variables analizadas.

Se sugiere que, en futuros estudios se aumente el tamaño de la muestra del suelo urbano con el fin de obtener varianzas significativas entre los diferentes usos y sus propiedades fisicoquímicas. Finalmente, continuar con la formulación de prácticas de gestión del suelo urbano, así como para optimizar el rendimiento en la prestación de servicios ecosistémicos en áreas urbanas. La implementación de estrategias basadas en estos hallazgos puede fortalecer la funcionalidad de los suelos urbanos y su capacidad para adaptarse a los desafíos ambientales actuales.

9.7 Referencias

Alcaldía de Medellín. (2021). Espacio público de esparcimiento y encuentro. Departamento Administrativo de Planeación. DAP-Subdirección de Prospectiva, Información y Evaluación Estratégica. <https://storymaps.arcgis.com/stories/b53e7c4382ff4020b9d18476030cf5cd>

Amézketa, E. (1999). Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14(2–3), 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08

AMVA. (2019). ¿Cuáles son los servicios ecosistémicos? Valores Naturales, Sociales y Culturales Que Proveen Calidad de Vida En El Territorio Metropolitano.

<https://www.metropol.gov.co/planeacion/areas-protegidas/Paginas/contexto/servicios-ecosistemicos.aspx>

Anne, B., Geoffroy, S., Cherel, J., Warot, G., Marie, S., Noël, C. J., Louis, M. J., & Christophe, S. (2018). Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils. *Landscape and Urban Planning*, 176, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2018.03.019>

APHA, AWWA, & WEF. (2014). 5310B TOTAL ORGANIC CARBON. In American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation (Eds.), *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). <https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.104>

Bakhmatova, K. A., Matynyan, N. N., & Sheshukova, A. A. (2022). Anthropogenic Soils of Urban Parks: A Review. *Eurasian Soil Science*, 55(1), 64–80. <https://doi.org/10.1134/S1064229322010021>

Bhattacharyya, S. S., Ros, G. H., Furtak, K., Iqbal, H. M. N., & Parra, S. R. (2022). Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of The Total Environment*, 815, 152928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152928>

Blake, G. R. (2015). Particle Density (pp. 371–373). <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c29>

Bonilla, B. S., Ángel, H. M., Vaca, A., Salazar, L., Zalakeviciute, R., Mejía, D., & López, U. M. (2022). Urban soil management in the strategies for adaptation to climate change of cities in the Tropical Andes. *Geoderma*, 417, 115840. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115840>

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105–125. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2018.01.030>

Castro, J. L. de, Souza, M. G., Rufini, M., Guimarães, A. A., Rodrigues, T. L., & Moreira, F. M. de S. (2017). Diversity and Efficiency of Rhizobia Communities from Iron Mining Areas Using Cowpea as a Trap Plant. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 41(0). <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160525>

CCME. (1991). Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health.

Cedeño, C. E. P., Dilas, J. J. O., & Carrillo, Z. M. D. (2024). Cambios de algunas propiedades químicas en tres suelos salinos, tratados con cinco enmiendas cálcicas. *Agronomía Costarricense*, 111–123. <https://doi.org/10.15517/rac.v48i1.59139>

Das, T. K., Kabir, A., Zhao, W., Stenstrom, M. K., Dittrich, T. M., & Mohanty, S. K. (2023). A review of compaction effect on subsurface processes in soil: Implications on stormwater treatment in roadside compacted soil. *Science of The Total Environment*, 858, 160121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160121>

De Vos, B., Lettens, S., Muys, B., & Deckers, J. A. (2007). Walkley–Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management*, 23(3), 221–229. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00084.x>

Delbecque, N., Dondeyne, S., Gelaude, F., Mouazen, A. M., Vermeir, P., & Verdoodt, A. (2022). Urban soil properties distinguished by parent material, land use, time since urbanization, and pre-urban geomorphology. *Geoderma*, 413, 115719. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115719>

Drobnik, T., Greiner, L., Keller, A., & Grêt, R. A. (2018). Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. *Ecological Indicators*, 94, 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>

Gallego, J. L., & Olivero, V. J. (2021). Cytogenetic toxicity from pesticide and trace element mixtures in soils used for conventional and organic crops of *Allium cepa* L. *Environmental Pollution*, 276, 116558. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116558>

Gallego, J. L., Shipley, E. R., Vlahos, P., & Olivero, V. J. (2024). Occurrence and toxicological relevance of pesticides and trace metals in agricultural soils, sediments, and water of the Sogamoso River basin, Colombia. *Chemosphere*, 354, 141713. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141713>

Garrido, P. A. D. (2023). Validación de un método analítico para la determinación de fosforo total en agua naturales y residuales por el método del ácido ascórbico. Universidad de Córdoba.

Godfray, C., Beddington, J., Crute, I., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S., & Toulmin, C. (2010). Food Security: The Challenge of Feeding

9 Billion People. *Science* (New York, N.Y.), 327, 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

Haghighi, F., Gorji, M., & Shorafa, M. (2010). A study of the effects of land use changes on soil physical properties and organic matter. *Land Degradation & Development*, 21(5), 496–502. <https://doi.org/10.1002/ldr.999>

Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on Ignition as a Method for Estimating Organic and Carbonate Content in Sediments: Reproducibility and Comparability of Results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101–110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>

Hyun, J., Kim, Y. J., Kim, A., Plante, A. F., & Yoo, G. (2022). Ecosystem services-based soil quality index tailored to the metropolitan environment for soil assessment and management. *Science of The Total Environment*, 820. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153301>

ICONTEC. (1994). NTC3656; Gestión ambiental. Suelo. Tomas de muestras de suelo para determinar contaminación.

ICONTEC. (1997a). NTC4113-1; Gestión ambiental. Calidad de suelo. Muestreo. Guía para el diseño de programas de muestreo.

ICONTEC. (1997b). NTC4113-6; Gestión ambiental. Calidad de suelo. Muestreo. Guía para la recolección, manejo y almacenamiento de suelo para la evaluación de procesos microbianos aeróbicos en el laboratorio.

Karkanis, P., and Au, K., & Schaalje, G. (1991). Comparison of four measurement schedules for determination of soil particle-size distribution by the hydrometer method. *Canadian Agricultural Engineering*, 33(2), 211–216. https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/33/33_2_211_ocr.pdf

Keesstra, S., Geissen, V., Mosse, K., Piirainen, S., Scudiero, E., Leistra, M., & van, S. L. (2012). Soil as a filter for groundwater quality. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 507–516. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.007>

Kiefer, W. S., Macke, R. J., Britt, D. T., Irving, A. J., & Consolmagno, G. J. (2012). The density and porosity of lunar rocks. *Geophysical Research Letters*, 39(7). <https://doi.org/10.1029/2012GL051319>

Kome, G. K., Enang, R. K., Yerima, B. P. K., & Lontsi, M. G. R. (2018). Models relating soil pH measurements in H₂O, KCl and CaCl₂ for volcanic ash soils of Cameroon. *Geoderma Regional*, 14, e00185. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00185>

Kukal, S., Debasish, S., Bhowmik, A., & Dubey, R. K. (2012). Water retention characteristics of soil bio-amendments used as growing media in pot culture. *Applied Horticulture*, 14(2), 92–97. https://www.researchgate.net/publication/265382743_Water_retention_characteristics_of_soil_bio-amendments_used_as_growing_media_in_pot_culture

Li, Z., Zhang, G., Liu, Y., Wan, K., Zhang, R., & Chen, F. (2013). Soil Nutrient Assessment for Urban Ecosystems in Hubei, China. *PLoS ONE*, 8(9), e75856. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0075856>

MacFarland, T. W., & Yates, J. M. (2016). Kruskal–Wallis H-Test for Oneway Analysis of Variance (ANOVA) by Ranks. In *Introduction to Nonparametric Statistics for the Biological Sciences Using R* (pp. 177–211). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30634-6_6

Maroyi, A. (2022). Traditional uses of wild and tended plants in maintaining ecosystem services in agricultural landscapes of the Eastern Cape Province in South Africa. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 18(1), 17. <https://doi.org/10.1186/s13002-022-00512-0>

Mavi, M. S., Marschner, P., Chittleborough, D. J., Cox, J. W., & Sanderman, J. (2012). Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. *Soil Biology and Biochemistry*, 45, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.003>

McBratney, A., Field, D. J., & Koch, A. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 213, 203–213. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>

Molina, G. N. I., Varon, B. L. M., Sierra Parada Ronal, & López, J. P. A. (2022). Urban growth and heat islands: A case study in micro-territories for urban sustainability. *Urban Ecosystems*, 25(5), 1379–1397. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01232-9>

Montoya, A. J., Lena, J. C., & Windmüller, C. C. (2019). Adsorption of gaseous elemental mercury on soils: Influence of chemical and/or mineralogical characteristics.

Ecotoxicology and Environmental Safety, 170, 98–106.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.054>

Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019, 5794869.
<https://doi.org/10.1155/2019/5794869>

O’Riordan, R., Davies, J., Stevens, C., Quinton, J. N., & Boyko, C. (2021). The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*, 395, 115076.
<https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2021.115076>

Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>

Phillips, T. H., Baker, M. E., Lautar, K., Yesilonis, I., & Pavao, Z. M. A. (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://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.127>

Powlson, D. S., Whitmore, A. P., & Goulding, K. W. T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62(1), 42–55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>

Pranskevicus, M., & Paliulis, D. (2021). Evaluation of Total Organic Carbon Quantity and Emissions of CO₂ from Soil Into the Atmosphere Near Street. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 28(3), 399–410. <https://doi.org/10.2478/eces-2021-0027>

Restrepo, de la P. J. (2023, January 20). Valle de Aburrá: una de las zonas más afectadas y propensas a deslizamientos en Colombia. *Academia Ciencia Sociedad; Universidad de Antioquia*. https://udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia/!ut/p/z0/fYwxD4lwFIT_igsjaQVEHYmDiXFwMAa6mCd90adtH5RCjL9e1MG4uFzuLt-dUKIUysFAZwjEDsyYK5UfF8tVMi0yuZV5Issi32WzebJO9wcpNkL9B8YHuratKoSq2QW8B1E27AOYXiNEErrfdGGLH__SieNANUEXyffakeYX9a0b9MSaagZjwUJAH0mNnaEHWEIXulsHMAZjjTGceu8hbsDOK1Q0N1U9ARW/cqt0!/

Rey, G. G., Barrigón, M. J. M., Montes, G. D., & Vilchez, G. R. (2023). Influence of Green Areas on the Urban Sound Environment. *Current Pollution Reports*, 9(4), 746–759. <https://doi.org/10.1007/s40726-023-00284-5>

Sanchez, B., Ruiz, M., & Rios, M. M. (2005). Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Agronomía Trop*, 55(4), 507–534. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2005000400004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Telo, da G. J. (2023). The Role of Soils in Sustainability, Climate Change, and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. *Ecologies*, 4(3), 552–567. <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>

Tresch, S., Moretti, M., Le Bayon, R.-C., Mäder, P., Zanetta, A., Frey, D., & Fliessbach, A. (2018). A Gardener's Influence on Urban Soil Quality. *Frontiers in Environmental Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00025>

Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G. M., Baronti, S., & Calzolari, C. (2022). Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127455. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127455>

Yang, J.-L., & Zhang, G.-L. (2015). Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61(sup1), 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>

Zafra, M. C., Gutiérrez, M. Á., & Hernández, P. Y. (2019). Correlation between vehicular traffic and heavy metal concentrations in road sediments of Bogotá, Colombia. *Revista de La Facultad de Medicina*, 67(2), 193–199. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n2.68269>

Zuleta, V. J. F. (2024, February 21). La “eterna primavera” quedó en el pasado: Medellín tendría en el futuro altas temperaturas al menos 150 días cada año. *EI Colombiano*. <https://www.elcolombiano.com/medellin/altas-temperaturas-en-medellin-seran-la-constante-en-los-proximos-anos-por-cambio-climatico-JP23797952>

10. CAPÍTULO 3

Patrones de emisión de gases CO₂, CO, NO₂ y NH₃ en suelos de áreas verdes de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos

10.1 Resumen

La expansión urbana y el cambio en los usos del suelo en Medellín están generando alteraciones significativas en las emisiones de gases contaminantes hacia el ambiente. Este estudio investiga la relación entre las emisiones de gases —monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), amoníaco (NH₃) y dióxido de nitrógeno (NO₂)— y las propiedades fisicoquímicas de los suelos urbanos en distintos tipos de cobertura de la ciudad, con el objetivo de identificar su vínculo potencial con servicios ecosistémicos clave. Se aplicó un análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS) para representar visualmente las similitudes en las emisiones de gases según las características del suelo. Según gráfica NMDS las emisiones de CO y NH₃ presentan patrones de distribución centralizados para todas las categorías de uso del suelo, lo que sugiere menor actividad biológica anaerobia. Por otra parte, los patrones para las emisiones de CO₂ y NO₂ sugieren mayor actividad biológica principalmente por las buenas condiciones de retención de humedad y materia orgánica disponible. En relación con el capítulo 2, donde las categorías de parque e institucional mostraron mejores condiciones para la regulación del ciclo hídrico, se observó que las emisiones relativas promedio de NO₂ y NH₃ fueron mayores. En contraste con la categoría vehicular que presentó las menores emisiones de estos dos gases, pero la mayor emisión de CO₂.

Palabras clave

Análisis de escalamiento multidimensional no métrico (NMDS), Gases Efecto Invernadero (GEI), calidad del aire, cobertura vegetal, usos del suelo

Abstract

Urban expansion and changes in land use in Medellín are causing significant alterations in pollutant gas emissions to the environment. This study investigates the relationship between gas emissions—carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂),

ammonia (NH₃), and nitrogen dioxide (NO₂)—and the physicochemical properties of urban soils across different land cover types in the city, with the goal of identifying potential links with key ecosystem services. A non-metric multidimensional scaling (NMDS) analysis was applied to visually represent similarities in gas emissions according to soil characteristics. According to the NMDS graph, CO and NH₃ emissions show centralized distribution patterns across all land use categories, suggesting lower anaerobic biological activity. In contrast, the patterns for CO₂ and NO₂ emissions suggest higher biological activity, primarily due to favorable conditions for moisture retention and the availability of organic matter. In relation to Chapter 2, where the park and institutional land use categories showed better conditions for water cycle regulation, higher average relative emissions of NO₂ and NH₃ were observed. This contrasts with the vehicular category, which exhibited the lowest emissions of these two gases but the highest CO₂ emission.

Keywords

non-metric multidimensional scaling (NMDS), Greenhouse Gases (GHG), air quality, vegetation cover, land use

10.2 Introducción

La a urbanización y el cambio en los usos del suelo urbano afectan no solo las propiedades físicas y químicas sino también las biológicas. Alterando significativamente la actividad microbiana y los procesos asociados a la respiración del suelo (Carpio et al., 2021). Estudios recientes han demostrado que la urbanización, especialmente cuando conlleva sellado del suelo (pavimentos, superficies impermeables), reduce significativamente la biomasa microbiana, la mineralización de nutrientes y la respiración del suelo, como se observa en suelos urbanos comparados con áreas verdes no selladas. Por ejemplo, Pereira et al., 2021 describe las reducciones en contenido de carbono, nitrógeno y humedad, con la consiguiente disminución de la actividad microbiana. Por lo tanto, la intensificación del uso del suelo afecta la respiración microbiana y la eficiencia en el uso del carbono, vinculando dichos cambios a alteraciones en las propiedades químicas y físicas del suelo.

La respiración del suelo se refiere a la actividad biológica en la que los organismos del suelo consumen materia orgánica y liberan CO₂. Esta función está estrechamente vinculada con las propiedades fisicoquímicas del suelo. En suelos urbanos, estas propiedades fisicoquímicas y la emisión de gases pueden verse afectada por factores

como la compactación, contaminación (Romero et al., 2016), cambio en los usos del suelo y cambios de temperatura conocidos como islas de calor urbano. Se estima que las ciudades emiten entre el 30 y el 40% de las emisiones de GEI y son responsables entre el 45 y el 70% de las emisiones totales de CO₂ relacionadas con actividades antropogénicas. Dado que el suelo es uno de los mayores reservorios de CO₂ en el mundo, la respiración del suelo, como indicador biológico, revela cómo la contaminación altera la actividad microbiana y contribuye a cambio climático (Churkina, 2016, Wei et al., 2021).

La respiración del suelo se analiza principalmente en el contexto del ciclo del carbono, ya que constituye un proceso clave en la dinámica de este elemento. Durante las condiciones aerobias, la actividad microbiana promueve la descomposición de la materia orgánica (MO), utilizando las fuentes de carbono (C) como sustrato energético. Como resultado de la oxidación del carbono en estos procesos metabólicos, se libera dióxido de carbono (CO₂), el cual representa un indicador directo de la respiración microbiana del suelo (Blagodatskaya et al., 2010, Phillips & Nickerson, 2015). La liberación de CO₂ constituye un componente esencial del ciclo global del carbono y desempeña un papel determinante en la regulación climática, uno de los servicios ecosistémicos más relevantes de los suelos urbanos (Raupach, 2013). En estos entornos, donde la contaminación y el cambio climático ejercen presiones adicionales sobre el sistema edáfico, la descomposición microbiana no solo contribuye a mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero, sino que también favorece la salud del suelo al mantener sus procesos biogeoquímicos activos. Este equilibrio promueve un ambiente propicio para el crecimiento de la vegetación y el sostenimiento de la biodiversidad urbana (Weissert et al., 2016). No obstante, durante la investigación se consideró también la emisión de monóxido de carbono (CO) debido a que, en condiciones de baja disponibilidad de oxígeno, puede generarse CO en pequeñas cantidades debido a la oxidación incompleta de la MO. Y, otros gases generados durante el ciclo del nitrógeno (N) como, el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el amoníaco (NH₃) los cuales son influenciados por el manejo de la vegetación urbana existente, la actividad microbiana y los procesos biogeoquímicos que microorganismos realizan en el ciclo del carbono y del nitrógeno. En el ciclo del N durante la nitrificación, las bacterias nitrificantes oxidan el amonio (NH₄⁺) a nitrito (NO₂⁻) y luego a nitrato (NO₃⁻), Bajo condiciones de estrés, como la limitación de oxígeno, pueden liberarse pequeñas cantidades de NO₂ gaseoso al ambiente. Así mismo, durante la desnitrificación las bacterias desnitrificantes (anaerobias o baja disponibilidad de oxígeno) reducen los nitratos (NO₃⁻) a nitritos (NO₂⁻) y posteriormente a óxido de nitroso (N₂O) y en nitrógeno molecular (N₂). No

obstante, el NO_2 puede liberarse en pequeñas cantidades por procesos de desnitrificación incompletos al ser limitado por la disponibilidad de oxígeno. En suelos donde la nitrificación es activa, el NH_4^+ se convierte en NO_2^- y NO_3^- , disminuyendo la disponibilidad de NH_4^+ y, por tanto, reduciendo la cantidad de NH_3 que puede volatilizarse. Sin embargo, NH_3 también se produce cuando los microorganismos descomponen compuestos orgánicos nitrogenados, liberan NH_4 . En suelos con pH alcalinos, el NH_4^+ puede transformarse en NH_3 gaseoso y volatilizarse, contribuyendo a la pérdida de N del suelo (Robinson & Robbins, 1970). Estos gases vinculados directamente con el ciclo del nitrógeno son claves para la fertilidad del suelo, y su alteración afecta la capacidad de las áreas verdes urbanas para sustentar vegetación y mejorar la calidad del aire (Enloe et al., 2015). Estos gases, también se encuentran presentes en ambientes agrícolas y contribuyen entre el 10% y el 12% a las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) (García et al., 2016). La aplicación intensiva de fertilizantes aumenta la concentración de N en el suelo, y la adición continua de materia orgánica, como hojarasca y desechos animales, favorece la producción de óxidos nitrosos (N_2O) a partir de la oxidación de NO_2^- y NH_3^- ; este proceso contribuye a la producción de lluvias ácidas y a la formación de ozono troposférico (O_3) (Ferretti et al., 2017). El objetivo de esta investigación es definir patrones de emisión de gases de CO_2 , CO , NO_2 y NH_3 en suelos de áreas verdes urbanas de la ciudad de Medellín e identificar cual podría ser su contribución relativa al mantenimiento de servicios ecosistémicos asociados a esos gases.

10.3 Materiales y métodos

La descripción del área de estudio se presenta en el capítulo 1 *“Tendencias de crecimiento urbano en la ciudad de Medellín y su relación con los servicios ecosistémicos del suelo”*, figura 1 y capítulo 2 *“Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín”*, figura 2.1.

10.3.1 Protocolo de muestreo

Todas las muestras fueron tomadas bajo el protocolo de muestreo que se presenta en el capítulo 2 *“Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín”*. Sección 3. Materiales y métodos; 3.2 Protocolo de muestreo.

Para la medición de gases emitidos por las muestras de suelo urbano, primero se humedeció del suelo por ascenso capilar, que consiste en el movimiento ascendente del agua hasta llenar el espacio poroso del suelo (Haney & Haney, 2010) y posteriormente, se utilizó una cámara medidora de gases con las características presentadas por (Pineda & Pérez, 2017), excepto que se incluyeron sensores semiconductores para determinar CO, NO₂ o NH₃; y un sensor infrarrojo calibrado de fabrica para determinar concentración de CO₂ (ver figura 3.1).

El patrón de emisión de gases compuesto por lecturas cada segundo de CO₂, o cada seis segundos de CO, NO₂ y NH₃ se presenta como unidades de conversión análogas a digitales (ADC), excepto para la concentración de CO₂, que se presenta directamente en unidades de concentración en aire como partes por millón (ppm). Las mediciones se realizaron durante 24 horas para cada muestra de suelo urbano.



Figura 3. 1 Montaje de equipos para la medición de los patrones de gases emitidos por las muestras de suelo urbano. Se describen los equipos: A. Cámara Dinámica Abierta, permite el intercambio de gases entre el interior de la cámara y el ambiente, garantizando que los gases emitidos por el suelo sean transportados fuera de la cámara para su medición. B. sensor CO_2 (ppm) en forma tubular el cual permite en paso del gas a través de sus aberturas C. Sensor CO , NO_2 o NH_3 (ADC) que permite el paso del gas emitido por el suelo a través de la ventilación.

10.3.2 Propiedades fisicoquímicas

Para la identificación de las propiedades fisicoquímicas de las muestras se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en el capítulo 2 *“Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín”* del presente estudio.

10.3.3 Análisis estadístico

Se implementó análisis descriptivo; medidas de tendencia central, dispersión, tablas y gráficos. Para identificar de forma visual similitudes o disimilitudes en los patrones de emisión de gases con respecto a las categorías y coberturas de las muestras, se realizó un plano de escalado multidimensional no métrico (EMD-NM) calculado con base en distancias euclidianas (López González & Sánchez, 2010). Cabe resaltar, que esta metodología se utilizó como técnica exploratoria debido a que no se disponía de información preliminar que permita probar hipótesis y por consiguiente utilizar o planear otros métodos basados en pruebas de hipótesis y métodos paramétricos. Los análisis se realizaron en el software R versión 4.4.1 (2024-06-14 ucrt).

10.4 Resultados

Los patrones de emisión de gases se midieron en partes por millón (ppm) para CO₂ y en unidades análogas digitales (ADC) para CO, NO₂ y NH₃, dichos patrones de medición oscilaron de la siguiente manera: CO₂, presentó una emisión promedio entre 350 y 487 ppm siendo la categoría residencial césped la más baja y vehicular mixto la más alta (ver figura 3.2); CO, presentó una emisión relativa promedio entre 881 (ADC) siendo el valor más bajo para la categoría vehicular y 664 (ADC) siendo el valor más alto para la categoría institucional arbórea (ver figura 3.3); NO₂, presentó una emisión relativa promedio entre 483 (ADC) siendo el valor más bajo para la categoría vehicular y 304 (ADC) siendo el valor más alto para la categoría parque arbóreo (ver figura 3.4) y NH₃, presentó una emisión relativa promedio entre 869 (ADC) siendo el valor más bajo para la categoría vehicular y 641 (ADC) siendo el valor más alto para la categoría parque arbóreo (ver figura 3.5). Cabe resaltar que la relación en la emisión relativa de los gases CO, NO₂ y NH₃ es inversa respecto a las mediciones de ADC, cuanto mayor es el valor de las unidades análogas digitales, menor es la emisión relativa.

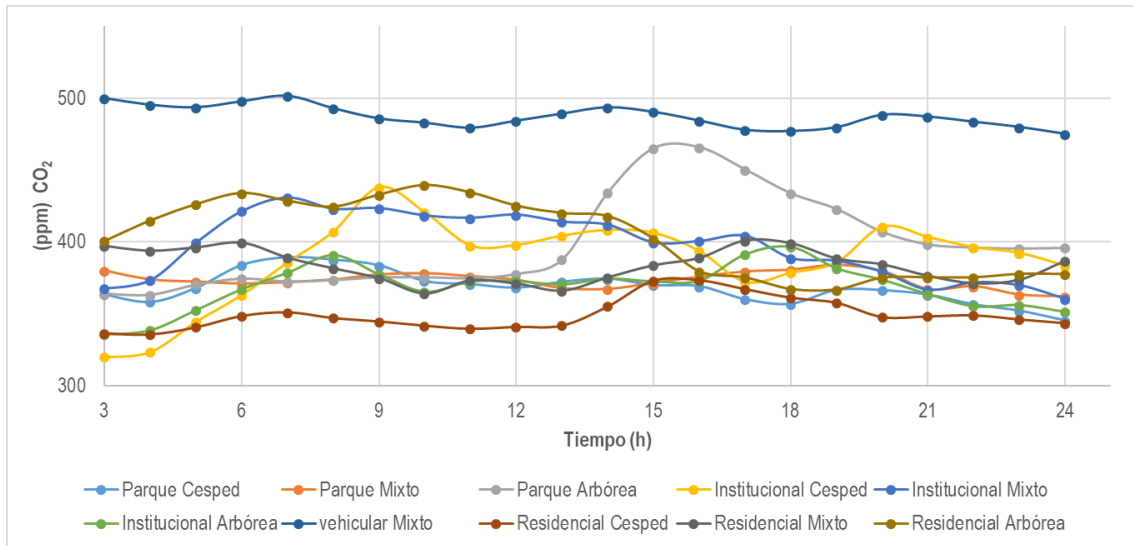


Figura 3. 2. Patrón de emisión de gas CO₂ (ppm). promedio entre 350 (categoría residencial césped) y 487 (categoría vehicular) ppm

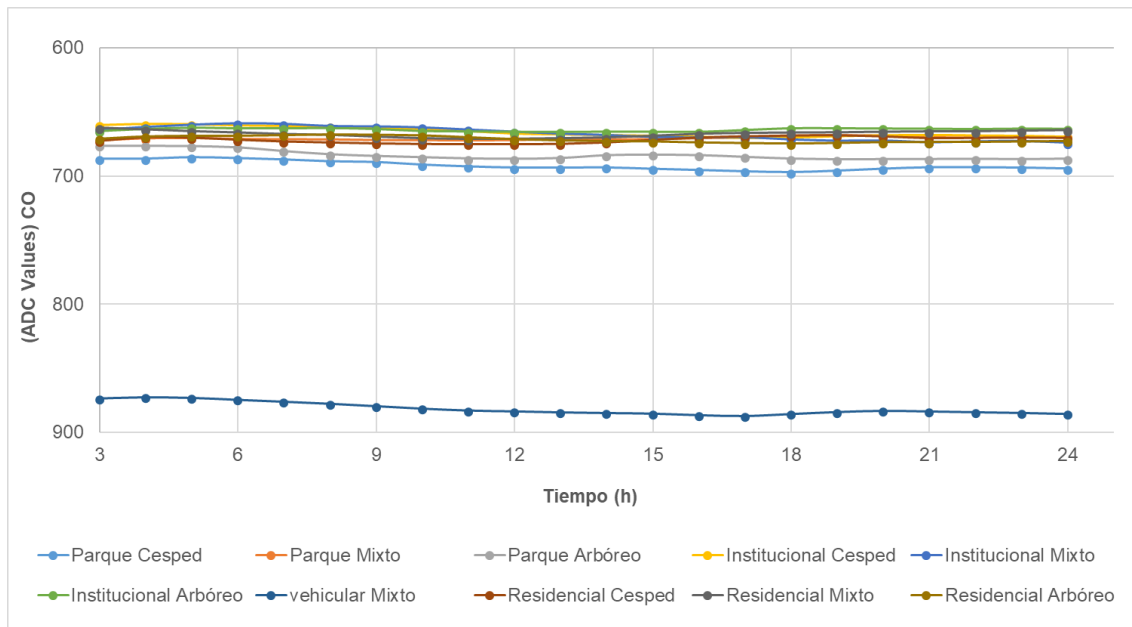


Figura 3. 3. Patrón de emisión relativa de gas CO (ADC). Emisión relativa promedio entre 881 (categoría vehicular) y 664 (categoría institucional arborea) ADC.

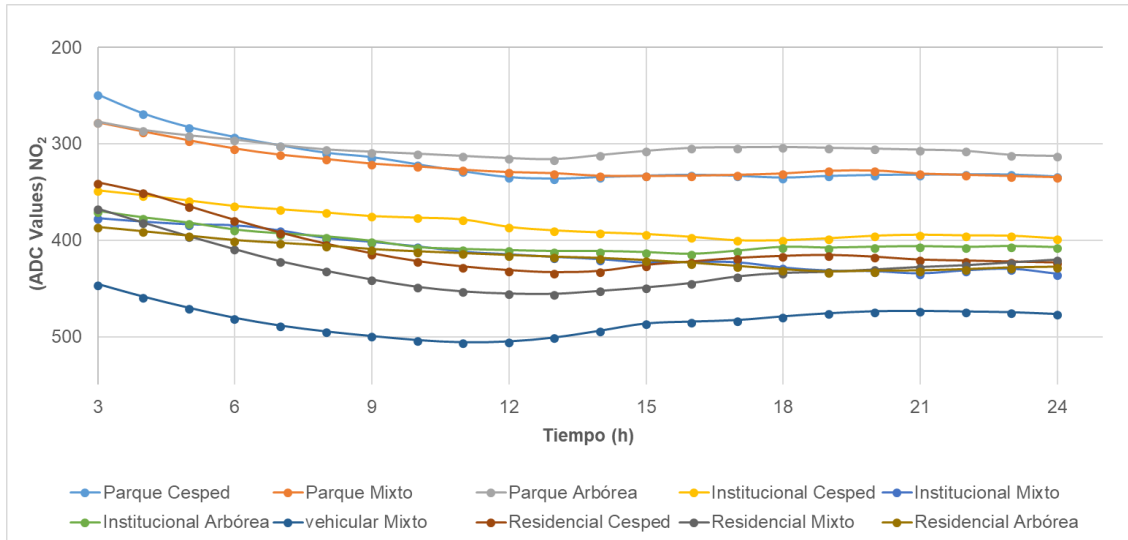


Figura 3. 4. Patrón de emisión relativa de gas NO₂ (ADC). Emisión relativa promedio entre 483 (categoría vehicular) y 304 (categoría parque arbórea) ADC.

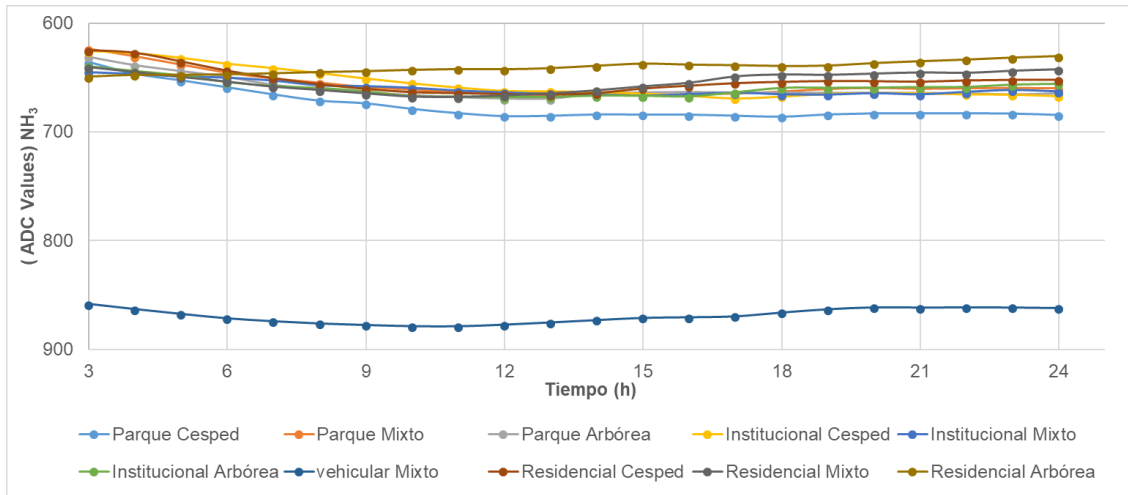


Figura 3. 5. Patrón de emisión relativa de gas NH₃ (ADC). Emisión relativa promedio entre 869 (categoría vehicular) y 641 (categoría parque arbórea) ADC.

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos analizados se discutieron en el capítulo 2 de esta tesis “*Relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y los servicios ecosistémicos en distintos usos del suelo en Medellín*”. Por lo que se realizó una correlación ajustada con los patrones de respiración con el fin de identificar tendencia en alguna de las variables, en la tabla 3.1 se presenta un promedio de los patrones de respiración por cada gas y en la tabla 3.2 la correlación ajustada.

Tabla 3. 1. Promedio emisión en los patrones de respiración por cada gas

Categoría	Cobertura	CO₂ (ppm)	CO (ADC)	NH₃ (ADC)	NO₂ (ADC)
Parque	Césped	367,99	691,85	675,51	317,80
	Mixto	373,29	670,65	656,43	321,12
	Arbórea	398,76	683,75	660,21	304,14
	SEM	2,74	1,11	2,15	3,07
Institucional	Césped	387,82	665,82	655,39	382,69
	Mixto	397,48	667,01	660,07	412,60
	Arbórea	368,78	663,77	659,48	401,85
	SEM	3,15	0,57	1,45	2,90
vehicular	Mixto	487,20	881,31	868,92	482,81
	SEM	3,27	1,11	1,98	4,95
Residencial	Césped	349,58	671,67	652,77	408,65
	Mixto	383,39	667,08	653,74	428,62
	Arbórea	403,04	671,38	640,61	415,83
	SEM	3,38	0,52	1,32	3,55

Tabla 3. 2. Correlación ajustada, propiedades fisicoquímicas con correlación fuerte a los patrones de respiración. Una correlación fuerte sugiere un coeficiente cercano a 1 o -1.

Categorías	CRH (%)				C.C (%)				TOC (mg/L)				pH (H₂O)			
	CO₂	CO	NH₃	NO₂	CO₂	CO	NH₃	NO₂	CO₂	CO	NH₃	NO₂	CO₂	CO	NH₃	NO₂
Parque	0,29	0,95	0,70	-0,60	0,81	0,56	0,13	-0,96	0,99	-0,19	-0,62	-0,87	-0,32	-0,94	-0,68	0,62
Institucional	0,06	0,02	-1,00	-0,97	0,21	0,18	-0,99	-0,92	0,80	0,82	0,55	0,74	0,06	0,09	0,99	0,99
Vehicular	0,76	0,55	-0,27	-0,95	0,20	1,00	1,00	-0,40	-0,87	0,08	0,13	0,90	0,34	0,18	0,23	0,71
Residencial	1,00	-0,25	-0,70	0,53	0,77	-0,78	-0,13	0,94	-0,68	0,86	0,00	-0,97	-0,98	0,41	0,58	-0,67

Considerando los patrones de respiración del suelo y los datos de la Tabla 3.1, se identificaron algunas relaciones respecto a los patrones de emisión de gases: la categoría vehicular sugiere una alta correlación con la emisión de CO₂ respecto a la capacidad de retención de humedad (CRH) y con el consumo de carbono orgánico disuelto (DOC). Por otra parte, las categorías institucional y residencial sugieren una fuerte correlación con la emisión de CO y el contenido de carbono orgánico disuelto (DOC) disponible. Así mismo,

la categoría parque presenta fuerte correlación con la emisión de CO respecto a la capacidad de retención de humedad (CRH). Respecto a la emisión de NH₃ y NO₂, la categoría presenta fuertes correlaciones con las variables de capacidad de retención de humedad (CRH) y capacidad de campo (C.C)

Además, como se observa en la Figura 3.6, se elaboró un plano de escalado multidimensional no métrico (NMDS) con el objetivo de sintetizar las variables y proporcionar una representación visual de la correlación entre los usos del suelo urbano y las diferentes categorías, en relación con los patrones de emisión de gases como CO₂, CO, NH₃ y NO₂).

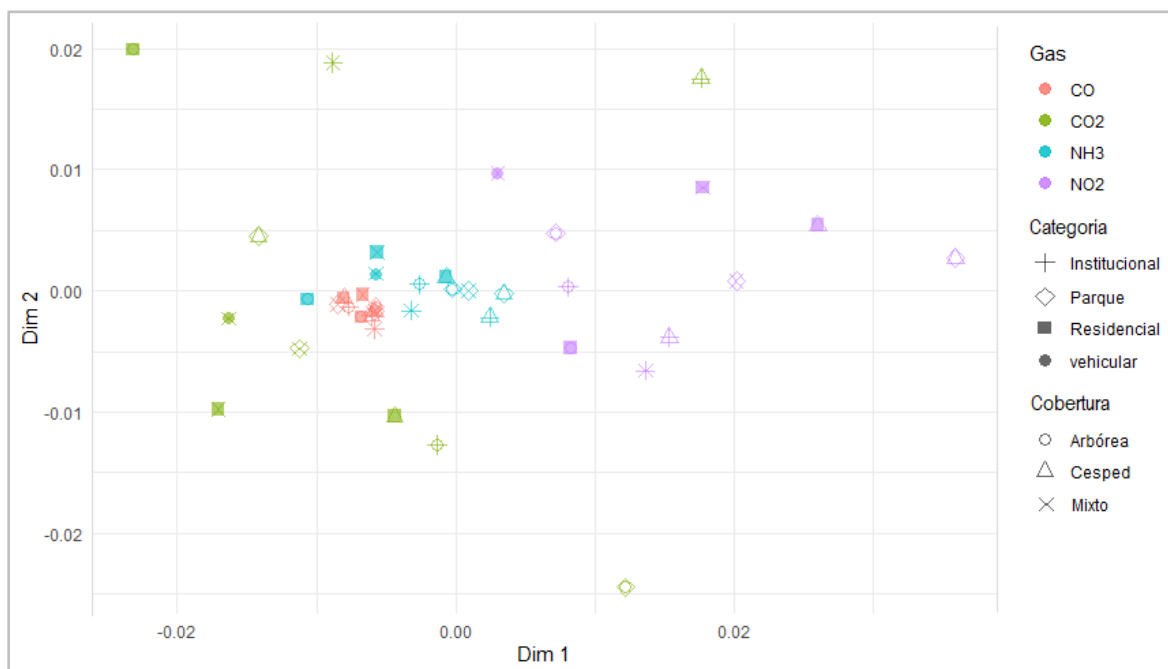


Figura 3. 6. Patrones generales de emisión de gases en cada categoría de suelo urbano. En el plano, el término 'gas' se refiere a los patrones específicos de emisión de CO₂, CO, NH₃ y NO₂ 'categoría' indica los diferentes usos del suelo urbano, y 'cobertura' representa la predominancia de vegetación evaluada en cada uso del suelo urbano. Mientras más agrupados y al centro se encuentren los puntos del plano menor tendencia o variabilidad presentan.

10.5 Discusión

La emisión de gases como subproducto de la actividad biológica del suelo se encuentra estrechamente relacionada con la calidad de las propiedades fisicoquímicas. Las cuales, a su vez, dependen no solo del uso y manejo del suelo, sino también de la historia que lo preside (Scharenbroch et al., 2005).

La categoría residencial se destacó como la más eficiente en la provisión de servicios ecosistémicos asociados a la regulación climática y la captura de carbono. En consecuencia, se esperaba que las emisiones de CO₂ en esta categoría fueran más bajas en comparación con las demás. Este comportamiento puede explicarse por el mayor contenido de materia orgánica y la menor compactación observada en los suelos residenciales, condiciones que favorecen la captura de carbono y estimulan la actividad biológica del suelo (Bhattacharyya et al., 2022). Estas condiciones físicas y biológicas promueven la formación y estabilidad de los agregados del suelo, lo cual es fundamental para conservar una estructura edáfica adecuada. Los agregados estables actúan como barreras físicas que protegen la materia orgánica de la descomposición acelerada por la respiración microbiana, permitiendo así una mayor retención del carbono en el sistema edáfico. Este mecanismo es clave para reducir las emisiones de CO₂ y refuerza el rol de los suelos urbanos residenciales como sumideros de carbono potenciales dentro del contexto de la mitigación del cambio climático (Edmondson et al., 2012). En contraste, las condiciones menos favorables se registraron en la categoría vehicular, la cual presentó un bajo contenido de MO (12%), una elevada densidad aparente (1.44 g/cm³) y una capacidad de retención de humedad del 28%. Estos valores reflejan una estructura del suelo más compactada, lo que podría estar asociado a mayores tasas de emisión de CO₂. Adicionalmente, la Figura 3.2 muestra una actividad biológica relativamente homogénea respecto a las demás categorías de uso del suelo, lo cual sugiere una fuente constante de carbono orgánico, respaldada por los valores de carbono orgánico disuelto (DOC), que alcanzan los 5,77 mg. Sin embargo, a pesar de esta disponibilidad de carbono, también se observa una menor retención de carbono en el sistema edáfico y una mayor emisión de CO₂ (Karvinen et al., 2024). En cuanto a la producción de CO, suele estar relacionada con procesos microbianos anaeróbicos en condiciones de baja disponibilidad de oxígeno. Este tipo de microambientes puede generarse localmente dentro de la matriz del suelo, especialmente en presencia de compuestos de carbono fácilmente degradables. No obstante, la Figura 3.3 indica una baja actividad anaerobia en la categoría vehicular, lo que sugiere que la emisión de CO en este caso no estaría significativamente influenciada por procesos estrictamente anaeróbicos, sino posiblemente por otros mecanismos de descomposición parcial de la materia orgánica.

Considerando que todas las categorías analizadas en este estudio presentaron condiciones moderadas y apropiadas para sustentar la biodiversidad y el crecimiento vegetal según la variabilidad de sus propiedades (Schittko et al., 2022), se evidenció que

las categorías de parque e institucional ofrecen un entorno más favorable para la provisión de servicios ecosistémicos, especialmente aquellos relacionados con el soporte de la biodiversidad, el ciclo de nutrientes y la regulación del ciclo hídrico. Estas categorías se caracterizan por una menor densidad aparente, una mayor porosidad, una mayor capacidad de retención de humedad y un alto contenido de materia orgánica, condiciones que favorecen la actividad microbiana aerobia e incrementan la mineralización de nitrógeno, lo cual podría estar asociado a una mayor emisión de NO_2 y NH_3 en comparación con las categorías residencial y vehicular (LIU et al., 2010). En particular, la categoría parque arbóreo presentó una humedad gravimétrica elevada (60%), que, en combinación con una densidad aparente relativamente alta (1.49 g/cm^3) y su bajo índice de estabilidad estructural (12%), presenta condiciones que son propensas a intensificar procesos como la desnitrificación y la volatilización de compuestos nitrogenados, contribuyendo así a la emisión de gases como NO_2 y NH_3 . En contraste, la categoría de uso vehicular está sometida a una presión antrópica constante, lo cual limita su funcionalidad ecológica y se traduce en propiedades fisicoquímicas más restrictivas para la provisión de servicios ecosistémicos, como lo evidencian sus menores niveles de humedad, contenido de materia orgánica y estabilidad estructural (Ungaro et al., 2022, Das et al., 2023).

Teniendo en cuenta lo anterior, el plano EMD-NM revela que los patrones de emisión de CO y NH_3 se concentran sin tendencia espacial clara (figuras 3.3 y 3.5), reflejando una menor actividad microbiana y condiciones anaeróbicas limitadas. Estos patrones son coherentes con sitios donde el flujo de oxígeno es restringido, favoreciendo rutas metabólicas limitadas. En contraste, los patrones de emisión de CO_2 y NO_2 , muestran una distribución más dispersa (Figuras 3.2 y 3.4), indicativa de una actividad microbiana aeróbica más intensa, promovida por suelos menos compactados y con mayor volumen poroso. Estos gases están claramente asociados al uso del suelo (residencial, parque, institucional) y no tanto a tipos específicos de vegetación, lo cual coincide con estudios que destacan la influencia dominante de la estructura y el manejo del suelo en la actividad microbiana urbana (Medriano et al., 2023).

Finalmente, La escasez de estudios integrales que relacionen de forma explícita las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano con los patrones de emisión de gases de origen biológico —como CO_2 , CO , NO_2 y NH_3 — representa una limitación significativa en el análisis de servicios ecosistémicos relacionados con la regulación atmosférica. Aunque existen investigaciones aisladas sobre la influencia de variables como el contenido de

materia orgánica, la densidad aparente, el pH o la humedad en la actividad microbiana del suelo, pocos estudios han abordado esta relación de manera multivariada y contextualizada en entornos urbanos altamente heterogéneos. Como, por ejemplo, las emisiones de gases como el CO_2 están asociadas principalmente a procesos de respiración microbiana aeróbica en suelos con buena porosidad y materia orgánica, mientras que la producción de NO_2 y NH_3 depende de procesos de nitrificación y desnitrificación que requieren condiciones más húmedas y disponibilidad de nitrógeno. A su vez, el CO puede generarse en microambientes anóxicos donde se da una descomposición parcial de la materia orgánica, fenómeno poco documentado en medios urbanos. La interacción entre estas variables se ve mediada por el uso del suelo, como lo han demostrado investigaciones recientes en suelos tropicales urbanos, donde los usos institucionales y de parques favorecen comunidades microbianas más activas en comparación con suelos vehiculares, debido a mejores condiciones edáficas. En este sentido, se hace imperativo fomentar investigaciones interdisciplinarias, longitudinales y multiescalares que integren características físicas, químicas y biológicas del suelo para desarrollar modelos de predicción y monitoreo de emisiones, orientados a fortalecer políticas urbanas sostenibles y estrategias de planificación verde.

10.6 Conclusiones

Los patrones de respiración del suelo urbano en Medellín están estrechamente vinculados al uso del suelo y a la alteración de sus propiedades fisicoquímicas. En este contexto, se destaca la necesidad urgente de implementar una gestión más sostenible del suelo, que permita mejorar tanto sus propiedades fisicoquímicas como biológicas. Estas propiedades son esenciales para la provisión de servicios ecosistémicos clave, como la regulación climática, la purificación del aire, el ciclo del carbono, la retención de agua y la fertilidad del suelo.

Los resultados obtenidos demuestran que usos del suelo como parques e instituciones presentan condiciones más favorables para la actividad microbiana y la captura de carbono, mientras que los suelos vehiculares muestran mayor compactación, menor retención de humedad y una tendencia a liberar mayores cantidades de CO_2 . Asimismo, se identificaron patrones diferenciados en la emisión de NO_2 y NH_3 , relacionados con la humedad y la estructura del suelo, lo que confirma la sensibilidad del sistema edáfico urbano frente al manejo y a la cobertura vegetal. Estas diferencias reflejan

la necesidad de considerar la ecología del suelo urbano como un componente central en la planificación ambiental.

Se resalta también la limitación actual para realizar comparaciones e interpretar los resultados con hallazgos previos debido a la escasez de estudios integrales en este campo. Por lo tanto, se recomienda fomentar investigaciones interdisciplinarias y multiescales que aborden la relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo urbano y las emisiones de gases de origen biológico. Este tipo de estudios puede ofrecer herramientas valiosas para una planificación urbana basada en evidencia científica.

En este sentido, los hallazgos de este estudio contribuyen al diseño de políticas socioambientales y administrativas orientadas a la organización territorial sostenible. Al identificar las zonas con mayor potencial de provisión de servicios ecosistémicos, se posibilita la toma de decisiones informadas para la conservación, restauración y expansión de áreas verdes urbanas, y la mitigación de emisiones en sectores críticos. Esto está directamente alineado con los ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), al promover espacios urbanos más saludables y resilientes; el ODS 13 (Acción por el clima), al fortalecer estrategias de captura de carbono y adaptación al cambio climático; y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al reconocer la importancia del suelo urbano como reservorio de biodiversidad y función ecosistémica. En suma, este trabajo contribuye a consolidar una visión de ciudad que integra la salud del suelo con la salud ambiental y social del territorio urbano.

10.7 Referencias

Bhattacharyya, S. S., Ros, G. H., Furtak, K., Iqbal, H. M. N., & Parra, S. R. (2022). Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of The Total Environment*, 815, 152928. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152928>

Blagodatskaya, E., Blagodatsky, S., Dorodnikov, M., & Kuzyakov, Y. (2010). Elevated atmospheric CO₂ increases microbial growth rates in soil: results of three CO₂ enrichment experiments. *Global Change Biology*, 16(2), 836–848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02006.x>

Carpio, A., Ponce, L. R., & Lozano, G. D. F. (2021). Urban form, land use, and cover change and their impact on carbon emissions in the Monterrey Metropolitan area, Mexico. *Urban Climate*, 39, 100947. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100947>

Churkina, G. (2016). The Role of Urbanization in the Global Carbon Cycle. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 3. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fevo.2015.00144>

Das, T. K., Kabir, A., Zhao, W., Stenstrom, M. K., Dittrich, T. M., & Mohanty, S. K. (2023). A review of compaction effect on subsurface processes in soil: Implications on stormwater treatment in roadside compacted soil. *Science of The Total Environment*, 858, 160121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160121>

Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2012). Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Scientific Reports*, 2(1), 963. <https://doi.org/10.1038/srep00963>

Enloe, H. A., Lockaby, B. G., Zipperer, W. C., & Somers, G. L. (2015). Urbanization effects on soil nitrogen transformations and microbial biomass in the subtropics. *Urban Ecosystems*, 18(3), 963–976. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11252-015-0462-8>

Ferretti, G., Keiblinger, K. M., Zimmermann, M., Di Giuseppe, D., Faccini, B., Colombani, N., Mentler, A., Zechmeister-Boltenstern, S., Coltorti, M., & Mastrocicco, M. (2017). High resolution short-term investigation of soil CO₂, N₂O, NO_x and NH₃ emissions after different chabazite zeolite amendments. *Applied Soil Ecology*, 119, 138–144. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.004>

García, D. C. G., Saraz, J. A. O., & Rosales, R. B. (2016). Estimation of greenhouse gas emissions from agricultural activities in the Aburra valley Metropolitan Area - Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 69, 7783–7792. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/rfna.v69n1.54746>

Haney, R. L., & Haney, E. B. (2010). Simple and Rapid Laboratory Method for Rewetting Dry Soil for Incubations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(12), 1493–1501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00103624.2010.482171>

Karvinen, E., Backman, L., Järvi, L., & Kulmala, L. (2024). Soil respiration across a variety of tree-covered urban green spaces in Helsinki, Finland. *SOIL*, 10(1), 381–406. <https://doi.org/10.5194/soil-10-381-2024>

LIU, X., LI, F.-M., LIU, D.-Q., & SUN, G.-J. (2010). Soil Organic Carbon, Carbon Fractions and Nutrients as Affected by Land Use in Semi-Arid Region of Loess Plateau of China. *Pedosphere*, 20(2), 146–152. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60002-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60002-1)

López, G. E., & Sánchez, R. (2010). Non-metric multidimensional scaling. An example with R using SMACOF algorithm. *Estudios Sobre Educacion*, 18, 9–35. https://www.researchgate.net/publication/287392204_Non-metric_multidimensional_scaling_An_example_with_R_using_SMACOF_algorithm

Medriano, C. A., Chan, A., De Sotro, R., & Bae, S. (2023). Different types of land use influence soil physiochemical properties, the abundance of nitrifying bacteria, and microbial interactions in tropical urban soil. *Science of The Total Environment*, 869, 161722. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161722>

Pereira, M. C., O’Riordan, R., & Stevens, C. (2021). Urban soil microbial community and microbial-related carbon storage are severely limited by sealing. *Journal of Soils and Sediments*, 21(3), 1455–1465. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-02881-7>

Phillips, C. L., & Nickerson, N. (2015). Soil Respiration. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09442-2>

Pineda, D. M., & Pérez, J. C. (2017). SENose: An under U\$50 electronic nose for the monitoring of soil gas emissions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 133, 15–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.12.004>

Raupach, M. R. (2013). Ecosystem Services and the Global Carbon Cycle. In *Ecosystem Services and Carbon Sequestration in the Biosphere* (pp. 155–181). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6455-2_8

Robinson, E., & Robbins, R. C. (1970). Gaseous Nitrogen Compound Pollutants from Urban and Natural Sources. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 20(5), 303–306. <https://doi.org/10.1080/00022470.1970.10469405>

Romero, F. A., Sierra, A. M., Martínez, G. F. J., & Martín, P. F. J. (2016). Is soil basal respiration a good indicator of soil pollution? *Geoderma*, 263, 132–139. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.09.006>

Scharenbroch, B. C., Lloyd, J. E., & Johnson, M. J. L. (2005). Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, 49(4), 283–296. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.12.002>

Schittko, C., Onandia, G., Bernard, V. M., Heger, T., Jeschke, J. M., Kowarik, I., Maaß, S., & Joshi, J. (2022). Biodiversity maintains soil multifunctionality and soil organic carbon in novel urban ecosystems. *Journal of Ecology*, 110(4), 916–934. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1365-2745.13852>

Ungaro, F., Maienza, A., Ugolini, F., Lanini, G. M., Baronti, S., & Calzolari, C. (2022). Assessment of joint soil ecosystem services supply in urban green spaces: A case study in Northern Italy. *Urban Forestry & Urban Greening*, 67, 127455. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127455>

Wei, T., Wu, J., & Chen, S. (2021). Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.696381>

Weissert, L. F., Salmond, J. A., & Schwendenmann, L. (2016). Variability of soil organic carbon stocks and soil CO₂ efflux across urban land use and soil cover types. *Geoderma*, 271, 80–90. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.014>