



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO



Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra “Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy”



Maestría en Geociencias y Planificación Del Territorio

“Servicios ecosistémicos de regulación suministrados por el suelo en
espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia,
Michoacán”

T E S I S

Para obtener el título de:

Maestra en Geociencias y Planificación del Territorio

Presenta

Lic. Diana Laura Rangel Vargas

Directora de tesis

Dra. María Lourdes González Arqueros

Codirector de tesis

Dr. Armando Navarrete Segueda

Morelia, Michoacán. Julio 2025

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra por brindarme la oportunidad de cursar este programa de maestría, así como por el apoyo académico y formativo durante esta etapa.

Agradezco profundamente a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero otorgado, a través de la beca proporcionada durante mis estudios de maestría, sin la cual no habría sido posible este esfuerzo académico.

Gracias al proyecto de investigación “La importancia de los suelos urbanos y periurbanos: variación espacial del suministro de servicios ecosistémicos en centros urbanos” Dir-038/2022. Del cual se deriva este trabajo de tesis, por permitirme participar en sus actividades.

A mi directora de tesis, la Dra. María Lourdes González Arqueros, por todo el conocimiento compartido, por su guía, confianza y compromiso en todo el proceso de desarrollo de este trabajo. Por el ejemplo que representa como mujer, investigadora y docente. Su acompañamiento ha sido fundamental en mi crecimiento académico y también personal. Me honra profundamente haber contado con su apoyo y amistad a lo largo de este proceso.

A mi codirector de tesis, el Dr. Armando Navarrete Segueda, por su acompañamiento, por su tiempo y sus conocimientos compartidos y por sus valiosas y enriquecedoras observaciones en el desarrollo de esta tesis. Su apoyo y claridad contribuyeron significativamente en mi crecimiento académico.

Agradezco a los miembros de mi comité sinodal, Dra. Erna Martha López Granados, Dr. Rafael Trueba Regalado, Dr. Boris Chako Tchamabe, y Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, por su atenta revisión y los comentarios y observaciones que enriquecieron esta tesis.

Agradezco al Dr. Xavier Domene Casadesús, al CREA y a la Universidad Autónoma de Barcelona por haberme permitido realizar una estancia académica, que fue sumamente enriquecedora para este trabajo y para mi formación académica.

Agradezco a mis compañeras María Luisa González Hernández, Katia Vianney Miranda Gallegos, Diana Sarai Santillán Gaona, Abril Soria Nambo cuyos trabajos previos fueron fundamental para la obtención de parte de los datos utilizados en esta tesis y con quienes compartí el trabajo de campo y de laboratorio. Haber realizado estas actividades en conjunto no solo facilitó el proceso, sino que lo volvió más enriquecedor.

Agradezco a la Mtra. Dulce María Bocanegra Ramírez, por su constante apoyo en el laboratorio, su paciencia y su disposición para orientarnos en cada procedimiento.

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en el desarrollo de esta tesis.

Agradecimientos personales

Agradezco infinitamente a mi madre Josefina Vargas y a mi padre Manuel Rangel, por ser mi mayor apoyo, por todo lo que han hecho por mí, todo su amor y dedicación. Por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, por siempre estar presentes e impulsarme a realizar mis sueños. Y por la valiosa confianza que siempre han tenido en mí. Este logro es para ustedes.

Agradezco a la mujer más increíble que he conocido, mi abuelita †Felipa, por su amor incondicional, por elegirnos y por enseñarme a ser una mujer fuerte y valiente.

A mi hermana Julia y a mi hermano Juan por su apoyo y amor incondicional, por ser tan inspiradores, trabajadores y talentosos, por ser mis mejores amigos y ser una gran motivación en mi vida.

A Eduardo por llegar a mi vida y hacer mis días más felices, por su amor, su apoyo y por motivarme a dar lo mejor de mí.

A Itza, por su valiosa amistad, su cercanía y cariño que alegran mis días.

Agradezco a mis compañeros y amigos Katia, Diego y Gildardo por todos los gratos momentos y experiencias compartidas y por volver este camino más divertido y enriquecedor.

Índice

Resumen	1
Abstract.....	2
1 Introducción	3
2 Antecedentes	9
3 Justificación.....	14
4 Hipótesis.....	16
5 Objetivos	16
5.1 Objetivo general	16
5.2 Objetivos específicos.....	16
6 Materiales y métodos	18
6.1 Localización del área de estudio.....	18
6.2 Metodología.....	20
6.3 Muestreo.....	22
6.4 Análisis de laboratorio.....	24
6.5 Medición de la infiltración del suelo	27
6.6 Funciones de regulación de los suelos.....	29
6.6.1 Capacidad amortiguadora (AMT)	29
6.6.2 Retención de agua (RET)	30
6.6.3 Control de erosión (ERO).....	32
6.6.4 Mitigación de inundaciones (MIT).....	32
7 Resultados	34
7.1 Propiedades de los suelos y su agrupación.....	34
7.2 Variación de las funciones del suelo en función de las propiedades	36
7.3 Índices de los servicios ecosistémicos.....	41
7.4 Espacios verdes y suministro de servicios ecosistémicos	45
8 Discusión.....	55
9 Conclusiones	60
10 Referencias bibliográficas	61

Índice de figuras

Figura 1. Tipos de espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán.	19
Figura 2. Diagrama de flujo metodológico.....	21
Figura 3. Contribución de las variables cuantitativas obtenidas mediante el FAMD.....	34
Figura 4. Agrupaciones de las propiedades del suelo de los distintos tipos de EV obtenidas mediante el FAMD.	36
Figura 5. Relación de las propiedades del suelo con las funciones.....	38
Figura 6. Gráfica de correlación de propiedades de la función de mitigación de inundaciones (MIT). (Da = densidad aparente, CE= conductividad eléctrica, Mo= materia orgánica, FG= fragmentos gruesos).....	40
Figura 7. Gráfica de puntos de las funciones de capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión.	42
Figura 8. Curvas de infiltración acumulada de los distintos espacios verdes.....	44
Figura 9. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en bosques.	46
Figura 10. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en camellones.	47
Figura 11. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en jardines institucionales.	48
Figura 12. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en parques periurbanos.....	50
Figura 13. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en parques urbanos.	51
Figura 14. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en riberas.	52
Figura 15. Mapa del servicio de mitigación de inundaciones en espacios verdes.....	54
Figura 16 . Mapa de función de mitigación de inundaciones con lámina máxima de agua.	59

Índice de tablas

Tabla 1. Tipo de espacios verdes muestreados, clase y clave de referencia.	22
Tabla 2. Datos de infiltración medidos para la evaluación de la función de mitigación de inundaciones.	33
Tabla 3. Correlaciones de Pearson de las propiedades del suelo de los ejes producidos por el análisis de componentes principales (PCA)	37

Lista de acrónimos

AMT= Capacidad amortiguadora

Bos = Bosque

Cam= Camellón

CE = Conductividad eléctrica

Da = Densidad aparente

ERO= Control de erosión

EV = Espacio verde

EVP= Espacio verde periurbano

EVU = Espacio verde urbano

FG = Fragmentos gruesos

Ins= Institucional

MIT= Mitigación de inundaciones

Mo = Materia orgánica

Ppu= Parque periurbano

Pu= Parque urbano

RET= Retención de agua

Rib = Ribera de río

SE= Servicio ecosistémico

TF = Tierra fina

Resumen

Los espacios verdes urbanos (EVU) y periurbanos (EVP) son espacios públicos y privados dentro y alrededor de áreas urbanas, están compuestos principalmente por vegetación, agua y suelo y otros componentes como infraestructura, accesibilidad e iluminación entre otros. Los EV son los principales proveedores de servicios ecosistémicos (SE) en las ciudades. El suelo es un componente crucial para el sustento de procesos ecosistémicos y del suministro de SE. Los SE, definidos por la FAO, son beneficios que los ecosistemas proporcionan al bienestar humano. El crecimiento urbano y la deficiente planificación urbana han puesto en riesgo estos espacios y provocado la disminución de estos. En esta investigación se evaluaron los SE de capacidad amortiguadora, retención de agua, control de erosión y mitigación de inundaciones de los EVU y EVP suministrados por el suelo de los EV de la ciudad de Morelia, con el fin de analizar variación del suministro de SE en función del tipo de EV. Se recolectaron muestras en los EV, se analizaron en laboratorio las propiedades del suelo. A partir de los resultados se establecieron indicadores asociados a los SE para su posterior evaluación. Los EV muestran una agrupación en función de sus propiedades, sin embargo, esta agrupación no es uniforme. Los resultados muestran que los SE están condicionados por distintos factores y, por tanto, que su evaluación requiere un enfoque multifactorial. Este trabajo destaca la importancia de los EV y del suelo en el suministro de SE, con el fin de concientizar sobre su manejo adecuado y su inclusión en la planificación urbana para construir una ciudad sostenible y resiliente ante cambios ambientales globales.

Palabras clave: Espacios verdes, suelo, funciones del suelo, servicios ecosistémicos, planeación urbana.

Abstract

Urban (EVU) and peri-urban (EVP) green spaces are public and private spaces in and around urban areas, composed mainly of vegetation, water and soil and other components such as infrastructure, accessibility and lighting among others. EVs are the main providers of ecosystem services (ES) in cities. Soil is a crucial component for sustaining ecosystem processes and the provision of ES. Ecosystem services, defined by FAO, are benefits that ecosystems provide to human well-being. Urban growth and deficient urban planning have put these spaces at risk and caused their decline. In this research, the ES buffering capacity, water retention, erosion control and flood mitigation of the EVUs and EVPs supplied by the soil of the EVs of the city of Morelia were evaluated in order to analyze variation in the supply of ES as a function of the type of EV. Samples were collected in the EVs, and soil properties were analyzed in the laboratory. Based on the results, indicators associated with the ES were established for subsequent evaluation. The ES show a grouping according to their properties; however, this grouping is not uniform. The results show that ES are conditioned by different factors and, therefore, that their evaluation requires a multifactorial approach. This paper highlights the importance of EVs and soil in the supply of ES, in order to raise awareness of their proper management and their inclusion in urban planning to build a sustainable and resilient city in the face of global environmental changes.

Keywords: green spaces, soil, soil functions, ecosystem services, urban planning.

1 Introducción

Los espacios verdes (EV) se definen como espacios abiertos públicos y privados dentro de las áreas urbanas (Baycan et al., 2002) cubiertos principalmente por vegetación, que generan beneficios directos (e.g., recreación) o indirectos (e.g., aumento de la calidad ambiental) para los seres humanos (Haq, 2011). Los EV son elementos naturales de las ciudades, que brindan servicios ecosistémicos, que de acuerdo con el Millennium Ecosystem Assessment (2005) estos servicios están relacionados con aspectos que garantizan el bienestar humano. Los EV además tienen un rol crucial en la habitabilidad de las ciudades y son importantes en cualquier tipo de desarrollo comunitario, ya sea en viviendas, negocios, zonas de esparcimiento entre otros (Baycan et al., 2002). Los espacios verdes urbanos y periurbanos (EVU y EVP) son los principales proveedores de servicios ecosistémicos en las ciudades (Breuste et al., 2013).

Los espacios verdes urbanos (EVU) forman parte de paisajes fuertemente modificados, caracterizados por una superficie mayor de infraestructura y una alta densidad de población. Son toda la infraestructura verde, incluyendo los sistemas naturales tanto como los seminaturales y los artificiales que se encuentran dentro de los límites urbanos en todas las escalas espaciales (Sandstrom, 2002). Los componentes de los EVU son la vegetación, el agua, la accesibilidad, servicios de sanitarios, mobiliario urbano, áreas de juegos y deportivas, condiciones de calidad ambiental y recursos como iluminación, seguridad, elementos y artefactos artísticos como esculturas (Vargas-Hernandez et al., 2018).

Por otra parte, los espacios verdes periurbanos (EVP) son aquellos espacios que se encuentran en la periferia de las áreas urbanas, en áreas de transición donde se mezcla el entorno urbano con el entorno rural (FAO, 2017). Principalmente están compuestos por vegetación y agua estos suelen carecer de la infraestructura y equipamiento que caracteriza a

los EVU, lo que reduce el uso de estos espacios para realizar actividades recreativas y culturales.

El componente vegetación está conformado por elementos que pueden ser árboles, hierbas o arbustos. Los espacios verdes urbanos pueden diferir ampliamente en sus características, no obstante, se pueden agrupar a partir de la forma, la extensión, el tipo o intensidad de manejo, así como por la forma de crecimiento vegetal dominante en ellos, a partir de ello, se pueden identificar parques, jardines, bosques, campos deportivos, riberas, camellones, áreas naturales protegidas, así como otros espacios menos convencionales como panteones, azoteas verdes, terrenos baldíos entre otros (Roy et al., 2012).

El suelo es otro componente fundamental de los espacios verdes urbanos y periurbanos, el cual es soporte de la mayoría de la vegetación presente en los EV. El suelo, como material, se refiere a la mezcla compuesta de minerales, gases, agua, sustancias orgánicas y microorganismos. Los suelos son cuerpos naturales compuestos por suelo, además de raíces, animales, rocas y otros artefactos, etc. (Weil y Brady, 2017).

Los suelos son el soporte de múltiples procesos que ocurren en los ecosistemas terrestres, alojan una gran proporción de la biodiversidad de la Tierra y son la base para numerosas actividades humanas, además de que tienen un papel fundamental en la mayoría de los ciclos biogeoquímicos de diversos elementos y en el ciclo del agua (Weil y Brady, 2017).

Los suelos urbanos contribuyen considerablemente a la calidad de vida en los sistemas urbanos, el cumplimiento de sus funciones favorece el bienestar de los habitantes urbanos, y el seguimiento de su calidad o degradación permite estimar el riesgo de exposición de la población al impacto de factores perjudiciales y aunque el rol de los suelos urbanos en la provisión de servicios ecosistémicos no difiere tanto de los suelos en áreas no urbanas,

muchas veces los datos revelan que más personas, animales y plantas se benefician de las funciones de los suelos en asentamientos (Petrova y Nikolov, 2023).

Las propiedades del suelo permiten reconocer información sobre las funciones que este desempeña y así mismo establecer indicadores de ellas y de los servicios ecosistémicos (Ungaro et al., 2022). Los procesos ocurren en los suelos dan como resultado funciones de los suelos, las cuales son conductoras clave para la provisión de servicios ecosistémicos (SE). Algunas de las funciones del suelo enlistadas por la FAO (2015) son la retención de carbono, la purificación del agua, el suministro de alimentos, fibras y combustibles, la regulación del clima, el ciclo de nutrientes, el hábitat para organismos, la purificación del agua y la regulación de inundaciones.

Los servicios ecosistémicos (SE), como los define la FAO (2021), son beneficios que los ecosistemas aportan a los seres humanos, estos beneficios hacen posible la vida humana como se conoce al proporcionar alimentos, regular el clima, regular los flujos de agua, mitigar los desastres naturales, además de ofrecer bienes recreativos y culturales. De acuerdo Millennium Ecosystem Assessment (2005) los SE pueden clasificarse en cuatro tipos: aprovisionamiento, soporte, culturales y regulación.

Los servicios de aprovisionamiento son los productos que se obtienen de los ecosistemas como los alimentos, agua, madera, recursos forestales no maderables y recursos genéticos. Los servicios de soporte son aquellos que mantienen los procesos ecosistémicos fundamentales, como el hábitat, los ciclos biogeoquímicos, la producción de oxígeno, formación del suelo, entre otros. Los servicios culturales son aquellos beneficios estéticos, psicológicos y de otra índole no material que obtienen las personas al estar en contacto con los ecosistemas. Algunos de estos servicios son la recreación, la diversidad cultural, el valor

espiritual e histórico, entre otros (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Los servicios de regulación son aquellos que los ecosistemas proporcionan mediante la regulación de los procesos naturales, y estos son fundamentales para mantener el equilibrio ambiental. Algunos ejemplos de estos servicios son la regulación del clima, la regulación de flujos de agua, el control de la erosión y la fertilidad de los suelos, entre otros (FAO, 2021). Los SE de regulación son poco tangibles o perceptibles de forma física, por lo que con frecuencia se pasan por alto, lo que conlleva que al realizarse actividades que puedan afectar negativamente su provisión generando pérdidas significativas y difíciles de recuperar. En este trabajo serán abordados algunos servicios ecosistémicos de regulación.

Existe una tipología de los SE de regulación establecida por “La economía de los ecosistemas y la biodiversidad” (TEEB, por sus siglas en inglés) en donde se enlistan: a) clima local y la calidad del aire; b) secuestro y almacenamiento de dióxido de carbono; c) moderación de fenómenos extremos como las inundaciones; d) tratamiento de aguas residuales; e) prevención de la erosión y conservación de la fertilidad del suelo; f) polinización, g) control biológico de plagas, y; h) regulación de los flujos de agua.

Bolund y Hunhammar (1999) consideran seis SE como los de mayor importancia en los espacios verdes urbanos, los cuales son: filtración del aire, regulación de microclimas, reducción del ruido, regulación de agua, tratamiento de aguas residuales y valores recreativos y culturales.

En el marco de los SE, actualmente se ha incrementado la atención hacia los suelos como: a) componentes clave para el mantenimiento de los procesos de los ecosistemas, b) el soporte de múltiples actividades humanas y c) eje fundamental para el cumplimiento de múltiples objetivos de desarrollo sostenible de la ONU (Lal et al., 2021; Pereira et al., 2018). Los suelos

además son parte de la cultura humana, convirtiéndose en un componente crucial la existencia humana, siendo la base para las plantas, la producción de alimento y de las materias primas (Pereira et al., 2018). Por tanto, la inclusión de los suelos en la política y toma de decisiones es esencial para conservar los servicios que brindan (Dominati et al., 2010).

En México, así como en otras partes del mundo, el crecimiento urbano ha generado una importante presión sobre los espacios verdes, lo cual pone en riesgo la provisión de servicios ecosistémicos. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud se requieren de 9 a 12 m² de espacios verdes por habitante (Habitat - ONU, 2015). En la ciudad de Morelia, el promedio es de 4.3 m² de espacios verdes por habitante según la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP, 2018). Mientras que en otras ciudades como la Ciudad de México el promedio es de 5.3 m² por habitante (Nuñez, 2022), y en la ciudad intermedia de León, Guanajuato es de 2.6 m² por habitante (IMPLAN, 2019).

La urbanización provoca una reducción de los espacios verdes y un incremento en las superficies impermeables, lo que ha traído consigo otras consecuencias como las inundaciones, que son un asunto prioritario ya que su frecuencia e intensidad ha ido incrementando, además de que generan un deterioro en el sistema hídrico y en la sustentabilidad urbana (Yang y Lee, 2021).

A través del análisis de las propiedades del suelo y de la asociación con funciones clave del suelo que sustentan la provisión de los servicios ecosistémicos de regulación, este estudio evalúa los servicios ecosistémicos de i) control de erosión (ERO), ii) retención de agua (RET), iii) capacidad amortiguadora (AMT) y, iv) mitigación de inundaciones (MIT),

suministrados por los suelos de diferentes tipos de espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán.

2 Antecedentes

Las investigaciones sobre servicios ecosistémicos (SE) provistos por los espacios verdes urbanos y periurbanos (EVU y EVP) han aumentado considerablemente en las últimas décadas, y esto se debe a la creciente urbanización, ya que de acuerdo con la ONU (2019) se estima que en 2019 aproximadamente el 56 % de la población a nivel mundial vivía en áreas urbana, con un aumento estimado del 70% para el año 2050, lo que vuelve a las áreas urbanas el hábitat predominante de la mayoría de la población a nivel mundial. Esto ha puesto en un estado vulnerable a los espacios verdes, ya que disminuyen conforme la urbanización incrementa, por lo que es clave exhibir los beneficios que representan para las ciudades, ya que contribuyen de manera significativa para su sustentabilidad fungiendo como indicadores ambientales, económicos y sociales para la calidad de vida (Chiesura, 2004).

El estudio sobre los SE en suelos urbanos es muy reciente, ya que los trabajos se concentran en la última década, mientras que los estudios en suelos no urbanos se remontan a finales del siglo pasado (O’Riordan et al., 2021). El aumento de estas investigaciones en torno a los SE dentro de los ecosistemas urbanos genera un reconocimiento para ser incorporados en la planificación urbana (Colding, 2011)

El suelo tiene un papel crucial en el funcionamiento de los ecosistemas, décadas antes de abordar los servicios ecosistémicos ya se tenía conocimiento de la multifuncionalidad de los suelos y de su importancia en diversos procesos y actividades para el bienestar del ser humano (Baveye et al., 2016). La provisión de SE de los suelos dependen de las propiedades del suelo y de sus interacciones, y están prioritariamente influenciadas por el uso y manejo del suelo (Adhikari y Hartemink, 2016). Incorporar los suelos al marco de los servicios

ecosistémicos resulta esencial para enlazarlos a las múltiples funciones que proveen (Daily et al., 1997), además, es necesario considerar tanto las funciones como los servicios ecosistémicos del suelo (Baveye et al., 2016), que en muchos casos se identifican con el mismo término (Adhikari y Hartemink, 2016), siempre y cuando estén articulados en relación con las propiedades y procesos del suelo (Bünemann et al., 2018). Los conocimientos derivados del estudio de los servicios ecosistémicos del suelo pueden ampliarse aún más considerando una perspectiva de zona crítica terrestre, la cual amplía el enfoque tradicional de los procesos ecológicos y los patrones espaciales en el entorno cercano a la superficie, al considerar la extensión completa de meteorización vertical, lo que permite una mejor integración de los procesos que determinan las restricciones que limitan la provisión de servicios ecosistémicos (Field et al., 2015). La zona crítica terrestre se refiere a la capa superficial de la Tierra que se extiende desde la parte superior de la cubierta vegetal a través del suelo y hasta el lecho rocoso fresco y el fondo del agua subterránea (Grant y Dietrich, 2017)

Los suelos urbanos sustentan SE que son indispensables para el bienestar humano y la resiliencia urbana (Gómez-Baggethun y Barton, 2013), pueden proveer tantos servicios ecosistémicos como los suelos no urbanos (Setälä et al., 2014). Algunos de los servicios más relevantes son la amortiguación de islas de calor urbanas, captura de contaminación del aire, cultivo de alimentos urbanos, ciclo de nutrientes, almacenamiento de carbono (O’Riordan et al., 2021; Vargas-Hernandez et al., 2018), la regulación del clima, la fertilidad del suelo, la calidad del agua (Dominati et al., 2010), y sumado a esto, la adaptación al cambio climático y la mitigación y prevención de fenómenos extremos (Dagenais et al., 2017; Ishimatsu et al., 2017; Yang y Lee, 2021).

Los espacios verdes urbanos y periurbanos son reservorios de suelo en las ciudades, por lo que tienen un papel clave en la provisión de servicios ecosistémicos de regulación, como el manejo de agua pluvial para la regulación de agua. Estos espacios urbanos permeables tienen el potencial de infiltrar altos volúmenes de escorrentía provenientes de superficies impermeables (Bergeson et al., 2022), contribuyendo a la reducción de la escorrentía. Asimismo, contribuyen a la recarga de los acuíferos a través de la infiltración en los suelos, y en la mejora de la calidad del agua, debido a su capacidad de amortiguar y atrapar ciertos contaminantes impidiendo que estos lleguen a las reservas de agua (Burbano-Orjuela, 2016; Gómez-Baggethun y Barton, 2013). Algunos autores consideran importante incorporar los datos sobre el uso de suelo y la cobertura del suelo para mejorar la precisión de las estimaciones de las tasas de infiltración (Bergeson et al., 2022).

Los EV presentan multifuncionalidad, es decir que pueden proveer múltiples servicios ecosistémicos de manera simultánea (Ungaro et al., 2022), aportan un carácter cultural a las ciudades e incentivan el sentido de pertenencia de los habitantes de las mismas ya que brindan beneficios recreativos que son parte de una mejor calidad de vida apoyan distintas formas de vida (Gaston, 2010)

Los servicios ecosistémicos que proveen los EVU y EVP pueden verse alterados o disminuidos debido a la perturbación estructural recurrente a la que están sometidos (Setälä et al., 2017). En este aspecto, es relevante el tiempo que ha transcurrido desde la perturbación, ya que la calidad del suelo se ve afectada durante el impacto inicial de la urbanización. Posteriormente, las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo y con ello sus funciones (Scharenbroch et al., 2005) pueden mejorar con el tiempo.

No hay suelos explotados con más intensidad (basado en número de usuarios por metro cuadrado de superficie de suelo) que los suelos urbanos (Petrova y Nikolov, 2023). Los suelos son alterados considerablemente por las actividades humanas en los ambientes urbanos, ya que la modificación física del suelo es necesaria para la infraestructura urbana (Scharenbroch et al., 2005). Los diversos procesos que trae consigo la perturbación antrópica, como el sellado, compactación, degradación, relleno y mezcla genera que los suelos tanto urbanos como periurbanos tengan un grado extremo de heterogeneidad (Ungaro et al., 2022). Propiedades como la materia orgánica del suelo se ha visto afectada por las condiciones urbanas, por ejemplo la remoción de la capa superficial del suelo para infraestructura (Pouyat et al., 2002). Aspectos importantes a considerar para tener un manejo sustentable del suelo y una provisión integral de SE, son el reconocimiento de las propiedades del suelo, de sus procesos y un manejo adecuado (Lal et al., 2021).

En cuanto a propiedades como la densidad aparente, el contenido de carbono y la capacidad de infiltración presentan diferencias significativas entre espacios verdes de acuerdo con el uso y manejo y las estructuras vegetales que contienen (Edmondson et al., 2011). Los suelos urbanos podrían agruparse o clasificarse en función del tipo de espacio verde donde se encuentran, lo que tiene implicaciones relevantes para la planificación urbana.

En los procesos de planificación urbana, el papel que tiene los suelos y sus funciones es limitado, y en la mayoría de casos se utiliza un enfoque aleatorio o enfocado en la vegetación para medir los indicadores de servicios ecosistémicos, lo que podría no reflejar adecuadamente que son un factor clave para abordar problemas ambientales en ciudades (Anne et al., 2018; Teixeira da Silva et al., 2018). En ocasiones los planificadores urbanos perciben el suelo meramente como soporte lo que resulta en una falta generalizada de

conciencia sobre la contribución que tienen al bienestar de los pobladores y a la mitigación y adaptación a la crisis climática actual (Calzolari et al., 2020). Además, el enfoque casi exclusivo en algunas funciones específicas como el almacenamiento de carbono, exhibe que aún quedan pasos por seguir para proporcionar información sobre el suelo que cubra un espectro más amplio de los SE relacionados con el suelo adaptados a un contexto urbano latinoamericano, en particular en servicios culturales y de regulación (Teixeira da Silva et al., 2018).

Algunos estudios han realizado evaluaciones de los SE provistos por los suelos de espacios verdes urbanos y periurbanos. Drobniak et al. (2018) midieron las propiedades del suelo para analizar las funciones del suelo y ligarlas a los servicios ecosistémicos, con el fin de establecer indicadores del suelo que sustenten la provisión de SE, teniendo en consideración el tipo de espacio verde en el que se encuentra el suelo y su manejo (Ungaro et al., 2022). Calzolari et al. (2020) realizaron estudios en distintos tipos de espacios verdes urbanos, mediante el mapeo de las propiedades del suelo, las funciones y SE, y la evaluación de la calidad general del suelo en términos de prestación de servicios, proceso que también integra la cuantificación de pérdidas de SE específicos para la comunidad debido a la transformación de superficies permeables en superficies impermeables por el sellamiento de los suelos en el por la toma de decisiones respecto al proceso de urbanización.

En México se han realizado estudios para evaluar SE en espacios verdes urbanos utilizando principalmente inventarios de datos vegetación, así como mediante generación de datos a partir de entrevistas y encuestas con el fin de obtener la valoración de la sociedad respecto a estos espacios. Plazola Zamora et al. (2020) encontraron que en un parque urbano los SE más valorados socialmente son los culturales, por otro lado González-Oreja et al. (2019)

mencionan que estos espacios son importantes proveedores de regulación climática y recreación cultural y destacan la necesidad de incrementar la cantidad y su manejo adecuado.

En la ciudad de Morelia, recientemente se formuló el Sistema Municipal de Áreas de Valor Ambiental (SAMAVA) (Sánchez Sepúlveda, 2020) con el fin de clasificar áreas con diversas categorías de protección y manejo que aseguren los servicios ambientales. Esta iniciativa surgió de la urgencia de una intervención estratégica en áreas con altas presiones y alta vulnerabilidad.

Recientemente, Bollo Manent et al. (2022) presentaron las superficies de áreas verdes y su relación con la cantidad de habitantes en la ciudad de Morelia mediante un enfoque geoecológico con sensores remotos, concluyendo que la tasa de área verde del territorio es baja, por debajo de las normas reconocidas internacionalmente. Evidenciando la necesidad urgente de la creación de indicadores a través de proyectos innovadores para que tengan mayor presencia en la planificación urbana.

En esta investigación, se propone estudiar las propiedades del suelo en distintos espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, con el fin de analizar funciones y servicios ecosistémicos del suelo y establecer como varía la provisión de SE según la tipología y el manejo de estos espacios.

3 Justificación

La deficiente planificación urbana y el escaso conocimiento que se tiene sobre los beneficios que proveen espacios verdes urbanos (EVU) y periurbanos (EVP) ha traído consigo una reducción y eliminación de estos espacios, así como también la degradación como consecuencia del mal manejo. Esto ha conducido a que el suelo se vea afectado de tal forma

que pueda llegar a perder algunas de sus propiedades, alterando sus funciones y a su vez el suministro de SE, que son indispensables en las ciudades.

Por lo anterior, resulta crucial realizar estudios que exhiban la relevancia de los suelos en los espacios verdes que den a conocer los beneficios que estos aportan a las áreas urbanas y a la población en general. La determinación de indicadores del suelo permite evaluar las funciones y servicios ecosistémicos de regulación del suelo en espacios verdes. Además de que con los indicadores se podría analizar su comportamiento en función de los diferentes tipos espacios verdes, información que podría contribuir significativamente en la toma de decisiones respecto a la conservación e inclusión en planes de urbanización de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Morelia es una ciudad intermedia que expone un gran vínculo entre las zonas urbanas y periurbanas, por lo que representa un escenario ideal para el estudio de la funcionalidad de suelos y los espacios verdes, con el fin de generar estrategias que promuevan la conservación y preservación de los servicios ecosistémicos.

4 Hipótesis

Los suelos de los espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán, se pueden agrupar en función del tipo de espacio verde como reflejo del manejo al que son sometidos. Para posteriormente, y a partir de las propiedades del suelo, establecer indicadores de las funciones y servicios ecosistémicos que estos proveen. Por lo que el suministro de los servicios ecosistémicos cambiará de acuerdo con el tipo de EV.

5 Objetivos

5.1 Objetivo general

Evaluar los servicios ecosistémicos de regulación de capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión que proveen los suelos de los espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, mediante el análisis de las propiedades del suelo y la determinación de indicadores de las funciones del suelo.

5.2 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades del suelo de los espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia.
- Analizar las agrupaciones de los espacios verdes urbanos y periurbanos en función de las propiedades del suelo,
- Evaluar la capacidad amortiguadora mediante el uso de indicadores basados en las propiedades del suelo.
- Evaluar la retención de agua mediante el uso de indicadores basados en las propiedades del suelo

- Evaluar el control de erosión del suelo mediante el uso de indicadores basados en las propiedades del suelo
- Evaluar la mitigación de inundaciones mediante el uso de un indicador basado en la infiltración del suelo.
- Analizar el comportamiento de los servicios ecosistémicos en los distintos tipos de espacios verdes.

6 Materiales y métodos

6.1 Localización del área de estudio

La ciudad de Morelia se localiza en la porción noreste del estado de Michoacán, en el municipio de Morelia, a una altitud promedio de 1920 msnm. El municipio ocupa una superficie de 1193 km² (H. Ayuntamiento de Morelia, 2021), de los cuales la ciudad de Morelia abarca alrededor de 150 km² (IMPLAN, 2021), 12.6 % del municipio.

La ciudad de Morelia, por su ubicación geográfica y su directa conexión con otros sistemas urbano-regionales, permite que actúe como uno de los nodos integradores del dinamismo en el centro del país. Asimismo, el dinamismo y crecimiento de la ciudad han desencadenado la agrupación de funciones, actividades e integración económica entre los municipios aledaños a esta (H. Ayuntamiento de Morelia, 2021).

El presente estudio se realizó en la ciudad de Morelia y en una zona de influencia (buffer) de 7 km (

Figura 1) con el fin de evaluar los servicios ecosistémicos (SE) que tienen influencia en la ciudad de Morelia, es decir urbanos y periurbanos.

De los espacios verdes urbanos y periurbanos que conforman el área de estudio de este estudio, se consideraron los siguientes tipos: bosque, camellón, institucional, parque periurbano, parque urbano y ribera de río (

Figura 1). Con fines prácticos, se consideraron tanto los bosques como las plantaciones forestales dentro de la misma categoría de EV de bosque.

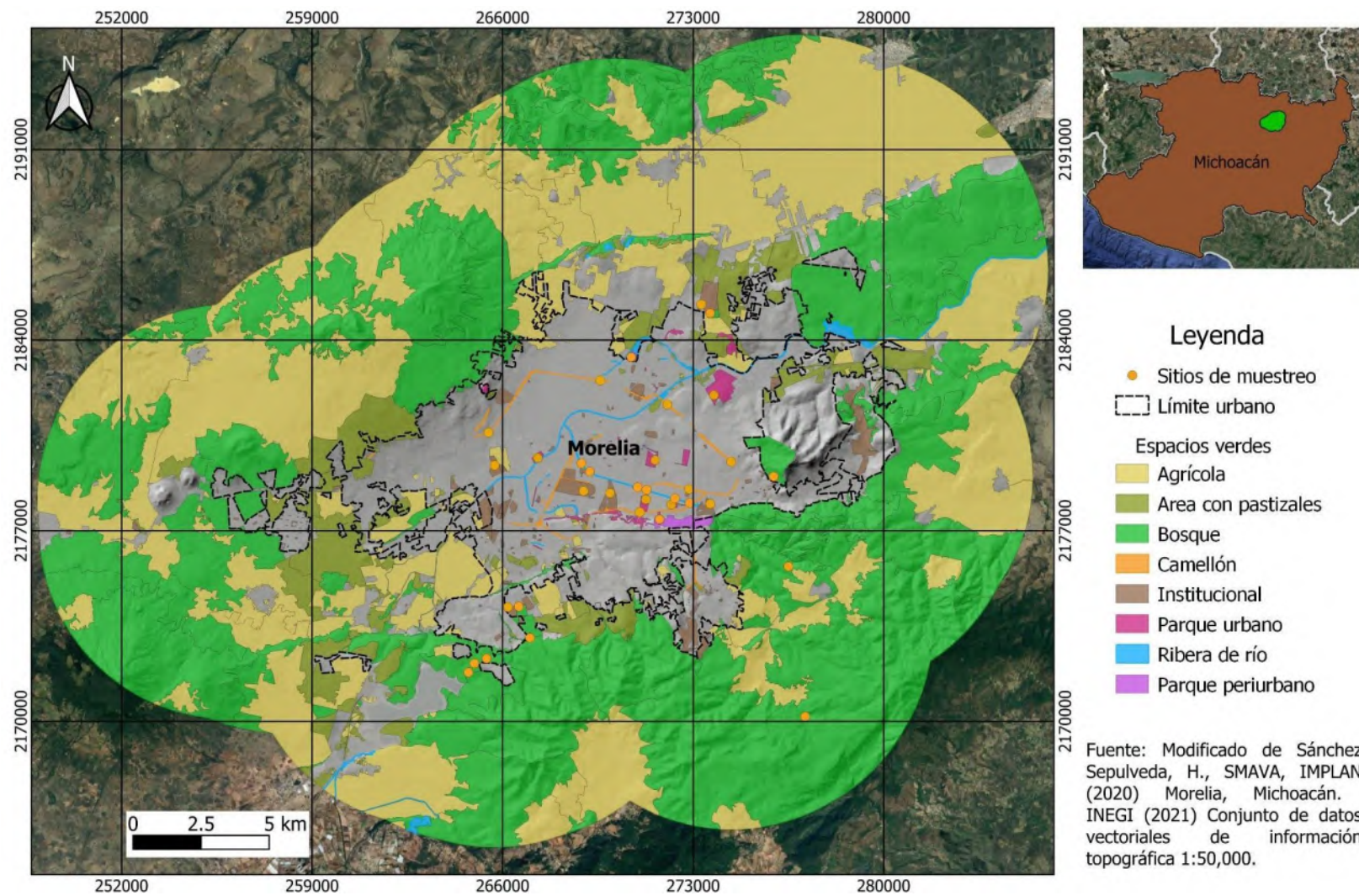


Figura 1. Tipos de espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia, Michoacán.

6.2 Metodología

En la metodología utilizada (Figura 2), el trabajo de campo consistió en la medición de la infiltración y en el muestreo de suelo. Posteriormente se realizaron análisis de laboratorio de las propiedades de los suelos. Con este conjunto de datos se realizó un Análisis Factorial de Datos Mixtos (FAMD) para observar las asociaciones entre las propiedades y los distintos tipos de EV y el establecimiento y evaluación de los indicadores de las funciones de capacidad amortiguadora (AMT), retención de agua (RET), control de erosión (ERO) y mitigación de inundaciones (MIT) (Batjes, 1996; Bergeson et al., 2022; Calzolari et al., 2016; Renard et al., 1977). Las funciones de AMT, RET y ERO se analizaron bajo la misma metodología debido a que comparten la misma estructura y número de los datos colectados, a diferencia de MIT se utilizó otra metodología debido a que la naturaleza de los datos es distinta, y el número de datos colectados es menor.

A partir de la evaluación de las funciones se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) y un análisis de correlaciones de Pearson para obtener las propiedades del suelo más representativas del eje 1 y eje 2, con los que posteriormente se realizaron modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) para observar los efectos de los cambios en las propiedades en los distintos tipos de EV.

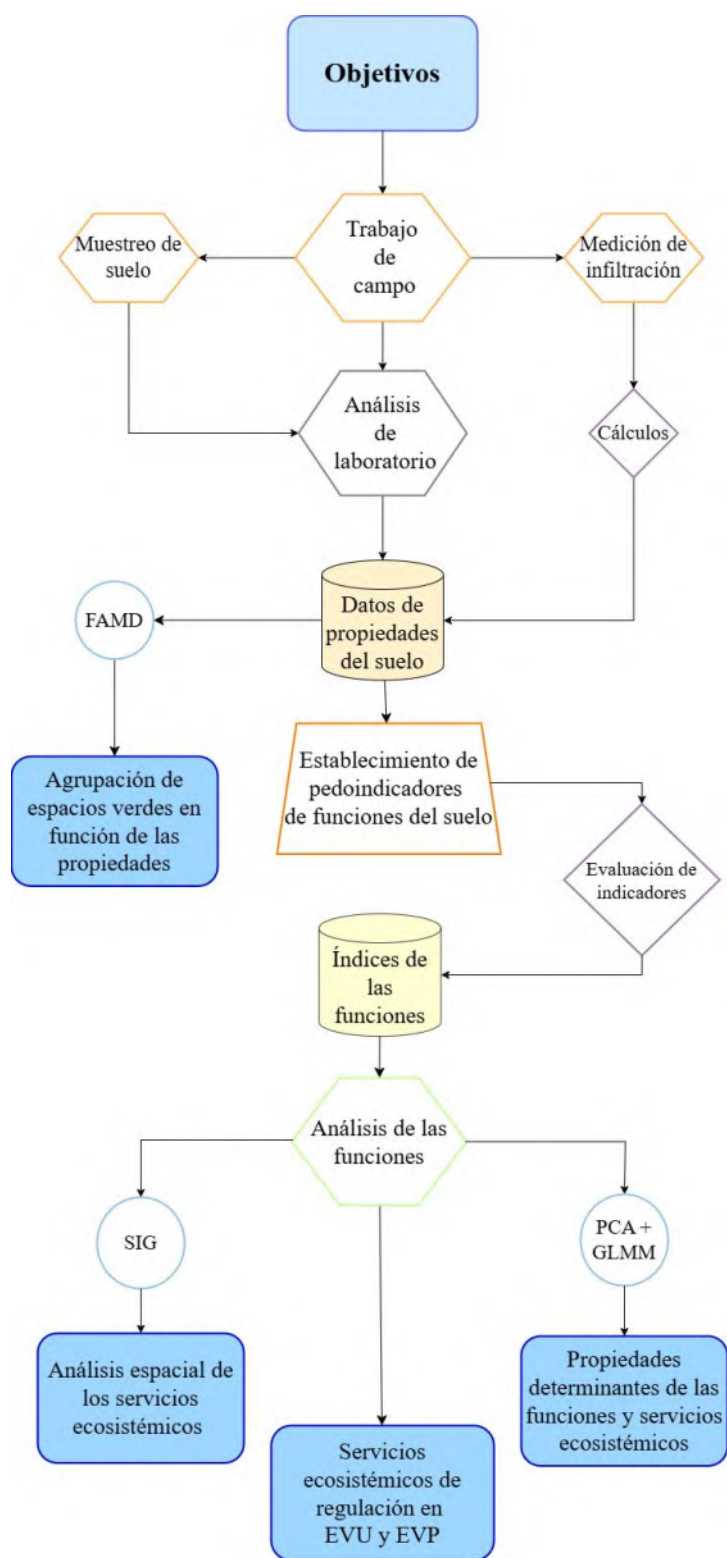


Figura 2. Diagrama de flujo metodológico.

6.3 Muestreo

La información de los espacios verdes de Morelia que se utilizó en el presente trabajo fue tomada y modificada de Sánchez Sepúlveda (2020). Los espacios verdes usados se clasifican en función de la tipología: bosque, camellón, institucional, ribera de río, parque urbano y periurbano (Tabla 1. Tipo de espacios verdes muestreados, clase y clave de referencia.). No se contemplaron aquellos de los que no se tiene una información sobre su manejo.

Se muestreó el suelo de 34 sitios ubicados en los distintos tipos de EV. En cada sitio se realizaron 4 transectos lineales ($400 \text{ m}^2/\text{transecto}$). Por transecto se obtuvo una muestra compuesta de suelo y 6 muestras inalteradas por el método del cilindro.

Tabla 1. Tipo de espacios verdes muestreados, clase y clave de referencia.

Espacio verde	Clase	Referencia
Bosque	Periurbano	Bos 1
Bosque	Periurbano	Bos 2
Bosque	Periurbano	Bos 3
Bosque	Periurbano	Bos 4
Bosque	Periurbano	Bos 5
Bosque	Periurbano	Bos 6
Bosque	Periurbano	Bos 7
Bosque	Periurbano	Bos 8
Bosque	Periurbano	Bos 9
Camellón	Urbano	Cam 1
Camellón	Urbano	Cam 2
Camellón	Urbano	Cam 3
Camellón	Urbano	Cam 4
Camellón	Urbano	Cam 5

Camellón	Urbano	Cam 6
Institucional	Urbano	Ins 1
Institucional	Urbano	Ins 2
Institucional	Urbano	Ins 3
Institucional	Urbano	Ins 4
Institucional	Urbano	Ins 5
Institucional	Urbano	Ins 6
Parque	Periurbano	Ppu 1
Parque	Periurbano	Ppu 2
Parque	Urbano	Pu 1
Parque	Urbano	Pu 2
Parque	Urbano	Pu 3
Parque	Urbano	Pu 4
Parque	Urbano	Pu 5
Ribera de río	Urbano	Rib 1
Ribera de río	Urbano	Rib 2
Ribera de río	Urbano	Rib 3
Ribera de río	Urbano	Rib 4
Ribera de río	Urbano	Rib 5
Ribera de río	Urbano	Rib 6

6.4 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo se secaron al aire y se realizaron los siguientes análisis:

a) Fragmentos gruesos y fracción fina.

Una vez seca, la muestra se disgregó a mano, con la ayuda de un martillo o rodillo. Se eliminan los residuos vegetales de mayor tamaño. Una vez disgregada la muestra se pasó por un tamiz de 2 mm de luz de malla (ASTM N° 10 diámetro 8”). Posteriormente se pesaron tanto los fragmentos gruesos (FG) que no pasan a través del tamiz, como la tierra fina tamizada (TF), para obtener los porcentajes utilizando las ecuaciones (1) y (2).

$$\% FG = \frac{PFG}{PFG + PTF} \times 100 \quad (1)$$

$$\% TF = \frac{PTF}{PFG + PTF} \times 100 \quad (2)$$

PFG = peso de los fragmentos gruesos (g)

PTF= peso de la tierra fina (g)

b) Contenido de materia orgánica

Se determinó el contenido de carbono orgánico según Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 por el método AS-07 de Walkley y Black (1934). Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de la reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado.

Una vez diluida la mezcla, se adiciona ácido fosfórico y el dicromato de potasio residual es valorado con sulfato ferroso. Con este procedimiento se detecta entre un 70 y 84 % del carbón orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección, el cual puede variar para cada suelo.

El contenido de carbono orgánico del suelo se obtuvo utilizando la ecuación (3)

$$\% C = M \times \frac{V1 - V2}{s} \times 0.39 \times mcf \quad (3)$$

M = molaridad de la solución de sulfato ferroso (prueba en blanco)

V1 = volumen requerido de sulfato ferroso para el blanco (ml)

V2 = volumen requerido de sulfato ferroso para la muestra (ml)

s = peso de la muestra (g)

mcf = factor de corrección de humedad

La conversión del porcentaje de carbono al de materia orgánica se obtiene multiplicando con el factor empírico 2 (Nelson y Sommers, 1982) ecuación (4).

$$\% \text{ materia orgánica} = 2 \times \% \text{ carbono orgánico} \quad (4)$$

c) Textura

La determinación de la textura se realizó mediante el método AS-09 de Bouyoucos (1962) según la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, el cual estima el tamaño de los sólidos en suspensión a partir de la densidad de la solución, con una corrección en función de la temperatura. A partir de este método se obtuvieron los contenidos en porcentaje de

arcilla, limo y arena, a partir de los cuales y mediante el triángulo de texturas se obtuvo la clase textural.

d) Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco a 105°C. La densidad aparente se determinó mediante el método del cilindro de volumen conocido, a partir de las ecuaciones (5), (6) y (7).

$$\text{Hum (\%)} = (\text{psh (g)} - \text{pss}) / \text{pss}) * 100 \quad (5)$$

$$V_c = \pi * r^2 * h \quad (6)$$

$$D_a = \text{pss} / V_c \quad (7)$$

Donde:

psh = peso suelo húmedo (g)

pss= peso suelo seco (g)

V_c = volumen del cilindro (cm^3)

r = radio (cm)

h = altura del cilindro (cm^3)

D_a = densidad aparente (g/cm^3)

e) pH

El grado de acidez o alcalinidad es expresado como el pH, el cual es una variable que afecta en gran medida las propiedades químicas y biológicas del suelo. Además, el pH del suelo afecta la movilidad de diversos contaminantes en el suelo influenciando la velocidad de su

descomposición, su solubilidad y la absorción a los coloides (Weil y Brady, 2017). Para determinar esta propiedad se utilizó el potenciómetro medidor de pH HANNA ® HI 9812-5.

f) Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la capacidad de una solución acuosa para transportar corriente eléctrica. Su determinación es una forma indirecta de medir la salinidad del suelo. Para determinarla se utilizó el medidor portable de CE HANNA ® HI 9812-5.

6.5 Medición de la infiltración del suelo

La infiltración es el proceso por el cual el agua entra al suelo por sus espacios porosos (Weil y Brady, 2017). Esta propiedad permite conocer cómo se comportan los flujos de agua en el suelo. Se realizaron mediciones de la infiltración utilizando un infiltrómetro de doble anillo Turf-Tec®.

Se midieron 21 espacios verdes, tomando en cuenta todos los tipos de EV. Se realizaron repeticiones de cada tipología, para las riberas de río fueron seis, para los bosques y camellones fueron cuatro, para los parques urbanos tres y para los parques periurbanos e institucionales dos.

Con los datos obtenidos se calculó la infiltración acumulada (d), la cual es el volumen de agua que se ha infiltrado en el suelo desde que comienza el proceso de infiltración, mediante el uso de la ecuación (8) de Kostiakov (1932) y mejorada por Philip (1957):

$$d = K . t^m \quad (8)$$

donde:

d = infiltración acumulada en el tiempo t (mm)

K = constante que depende de la estructura inicial del suelo (en seco). Es la lámina que se infiltra en el primer instante mayor que cero (mm)

m = constante que depende de la estabilidad de la estructura del suelo frente al agua.

Teniendo los valores medidos de las láminas infiltradas (d) en el tiempo (t), para obtener los valores de K y m se utilizaron las ecuaciones (9) y (10).

$$m = \frac{\frac{\sum(\log t \cdot \log d)}{n} - \frac{\sum \log t}{n} \cdot \frac{\sum \log d}{n}}{\frac{\sum(\log t)^2}{n} - \left(\frac{\sum \log t}{n}\right)^2} \quad (9)$$

$$\log K = \frac{\log d}{n} - m \cdot \frac{\log t}{n} \quad (10)$$

Obteniendo estos valores, posteriormente se calculó la infiltración instantánea (I), la cual se refiere a la rapidez con la que el agua se infiltra en el suelo en un instante dado (también llamada velocidad de infiltración), con la ecuación (11).

$$I = k \cdot t^{-n} \quad (11)$$

donde:

I = infiltración instantánea en un tiempo t (mm/h)

$$k = K \cdot m \cdot 60$$

$$-n = m - 1$$

A partir de la infiltración instantánea se determinó cuándo se produce la infiltración básica (Ib).

La velocidad de infiltración tiende a hacerse constante en el tiempo, a esa velocidad se le denomina “infiltración básica”. La infiltración básica se puede observar al calcular la

velocidad de infiltración, sin embargo, también puede calcularse por un método analítico, aplicando la ecuación

(12).

$$b = k \cdot \left(\frac{n \cdot k}{0.1} \right)^{\frac{-n}{n+1}} \quad (12)$$

6.6 Funciones de regulación de los suelos

Se evaluaron cuatro funciones del suelo mediante el establecimiento de indicadores basados en las propiedades del suelo y se obtuvieron índices de cada función.

6.6.1 Capacidad amortiguadora (AMT)

El suelo tiene la capacidad de filtrar contaminantes que pueden ser potencialmente dañinos para el ambiente y/o la salud humana. La capacidad amortiguadora es una función del suelo que determina la capacidad del suelo para filtrar contaminantes o bien resistir influencias externas que generan cambios en el pH para generar buenas condiciones para las plantas y los microorganismos del suelo. Esta función de amortiguamiento del suelo previene que materiales contaminantes alcancen el subsuelo. En este proceso amortiguador, las sustancias son filtradas del agua de percolación y se unen a superficies de fase sólida del suelo, principalmente coloides del suelo: minerales arcillosos y materiales húmicos (Makó et al., 2017).

La capacidad amortiguadora está relacionada con la condición general del ecosistema del y otras propiedades del suelo (Dvořáčková et al., 2022). Para evaluarla se utilizó la

metodología utilizada por Costanza Calzolari et al. (2016) la cual es considerada por los autores como una aproximación ya que no se consideró la actividad biológica del suelo.

Se calculó la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (ecuación (13) a partir de valores de propiedades del suelo utilizando una función de pedotransferencia (FPT).

$$\text{CIC} = 6.332 + 0.404 \text{ Ar} + 1.690 \text{ Mo} \quad (13)$$

Ar = contenido de arcilla (%)

Mo = contenido de materia orgánica (%)

Los valores de CIC se transformaron logarítmicamente (ecuación (14) para abordar la asimetría de su distribución y se estandarizaron al rango de 0 a 1.

$$\text{AMT}_{0-1} = \text{Log CIC (pH,FG)}_{0-1} \quad (14)$$

Posteriormente, se realizaron ajustes a este valor. Si $\text{pH} < 6.5$ el índice se redujo 0.25 para valores de $\text{CIC} < 10 \text{ cmol kg}^{-1}$, y 0.5 para valores de $\text{CIC} > 10 \text{ cmol kg}^{-1}$. Si $\text{FG} > 30 \%$ el índice se redujo 0.25.

6.6.2 Retención de agua (RET)

La retención de agua del suelo es un parámetro que influye en el flujo de agua, transporte de solutos, crecimiento y producción de cultivos (Wösten et al., 1985). Es el resultado de fuerzas de atracción entre las fases sólidas del suelo (ej. arcillas, limos, arenas y materia orgánica) y las fase líquidas, y que permite que el suelo retenga agua, principalmente en microporos del suelo sin que esta se pierda totalmente por la gravedad, la evaporación o la absorción por las raíces de las plantas (Batjes, 1996).

Las estimaciones de la capacidad de agua disponible (CAD) se basan únicamente en el potencial matricial, el cual es la fuerza con la que el agua es retenida por las partículas del suelo, este puede ser expresado en una variedad de unidades fácilmente intercambiables. Batjes (1996) utiliza la base de datos WISE (World Inventory of Soil Emission Potentials) en donde utilizan las unidades pF, que por definición es el logaritmo del agua en el potencial matricial del suelo. El agua disponible (AD) puede definirse como la diferencia entre el agua retenida a capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). La capacidad de campo (CC) se utiliza para describir el contenido máximo de agua que queda en el suelo después de un par de días de haber sido humedecido y cuando el drenaje libre no es significativo.

Para evaluar la función de retención de agua se calcularon el punto de marchitez permanente (PMP) y la capacidad de campo (CC) según Batjes (1996) en donde se utilizaron regresiones lineales con coeficientes de regresión a partir de los porcentajes de arcilla, limo y carbono orgánico. La CAD se obtuvo mediante la diferencia entre CC y PMP.

Posteriormente, los valores obtenidos de las tres funciones se estandarizaron a un índice (ecuación (15) propuesto por Costanza Calzolari et al. (2016).

$$Xi = (Xi - Xmin) / (Xmax - Xmin) \quad (15)$$

6.6.3 Control de erosión (ERO)

La erosión del suelo es el desprendimiento y movimiento de las partículas desde su lugar de origen por acción de distintos factores y agentes como el agua o el viento (FAO, 2019), en este estudio solo se contempló la erosión por agua. Esta función fue evaluada mediante el cálculo de la erodabilidad (factor K) utilizando la ecuación (16) de RUSLE (Renard et al., 1977). La erodabilidad es la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado, y se determina a partir de la materia orgánica, la estructura del suelo, y la textura (Figueroa Sandoval et al., 1991). Se usó el factor K invertido para evaluar la función de control de erosión, ya que a mayor erodabilidad del suelo menor control de erosión.

$$100 K = 0.000271 M^{1.14} (12 - a) + 4.20 (b - 2) + 3.23 (c - 3) \quad (16)$$

Donde:

M = diferencia entre el 100 % y el porcentaje de arcilla de la muestra de suelo.

a = materia orgánica (%)

b = número correspondiente a la estructura del suelo (adimensional)

c = clase de permeabilidad del perfil del suelo, según la codificación del Soil Survey Manual (USDA, 1951) (adimensional).

6.6.4 Mitigación de inundaciones (MIT)

La función de mitigación de inundaciones (MIT) se evaluó a partir de los datos medidos de la infiltración del suelo (Tabla 2). Los valores resultantes (ecuación 17) se utilizaron directamente como indicador de la función de mitigación de inundaciones. Además, se

utilizaron las láminas acumuladas como indicador para graficar curvas de infiltración acumuladas y poder observar las diferencias de comportamiento en los distintos tipos de EV.

Tabla 2. Datos de infiltración medidos para la evaluación de la función de mitigación de inundaciones.

Referencia	Laminas acumuladas (mm)	Infiltración básica (cm/h)	Velocidad
Bos 3/1	683	14.2	Rápida
Bos 5/1	643	16.6	Rápida
Bos 7/4	354	8.7	Moderadamente rápida
Bos 9/1	275	4.9	Moderada
Cam 1/2	125.5	5.0	Moderada
Cam 3/1	335	12.0	Rápida
Cam 4/3	956	13.1	Rápida
Cam 6/1	711	14.9	Rápida
Ins 1/3	473	11.1	Moderadamente rápida
Ins 3/3	473	7.8	Moderadamente rápida
Ppu 1/1	6	0.2	Lenta
Ppu 2/2	1072	20.8	Muy rápida
Pu 1/1	41	1.4	Moderadamente lenta
Pu 2/1	3513	66.0	Muy rápida
Pu 4/2	587	22.8	Muy rápida
Rib 1/1	725	16.1	Rápida
Rib 2/2	82.5	2.3	Moderada
Rib 3/2	700	18.8	Muy rápida
Rib 4/3	1130	35.9	Muy rápida
Rib 5/1	878	20.4	Muy rápida
Rib 6/3	1745	34.3	Muy rápida

A partir de la infiltración básica se calculó el índice de infiltración, estandarizando los valores, tomando como base el índice implementado por Bergeson et al., (2022) (ecuación (17)).

$$\text{Índice de Infiltración} = \frac{\ln(\text{Infiltración básica} + 1)}{\max(\ln(\text{infiltración básica} + 1))} \quad (17)$$

7 Resultados

7.1 Propiedades de los suelos y su agrupación

El análisis factorial de datos mixtos (FAMD) (Figura 3) explicó en dos dimensiones el 39.2 % de la varianza. La dimensión 1 capturó el 22.1 % de la varianza y se representó por la conductividad eléctrica, el contenido de arcilla, el pH y el contenido de arena. La dimensión 2 capturó el 17.1% de la varianza y se representó por el contenido de arena, la densidad aparente, el contenido de arcillas y los fragmentos gruesos.

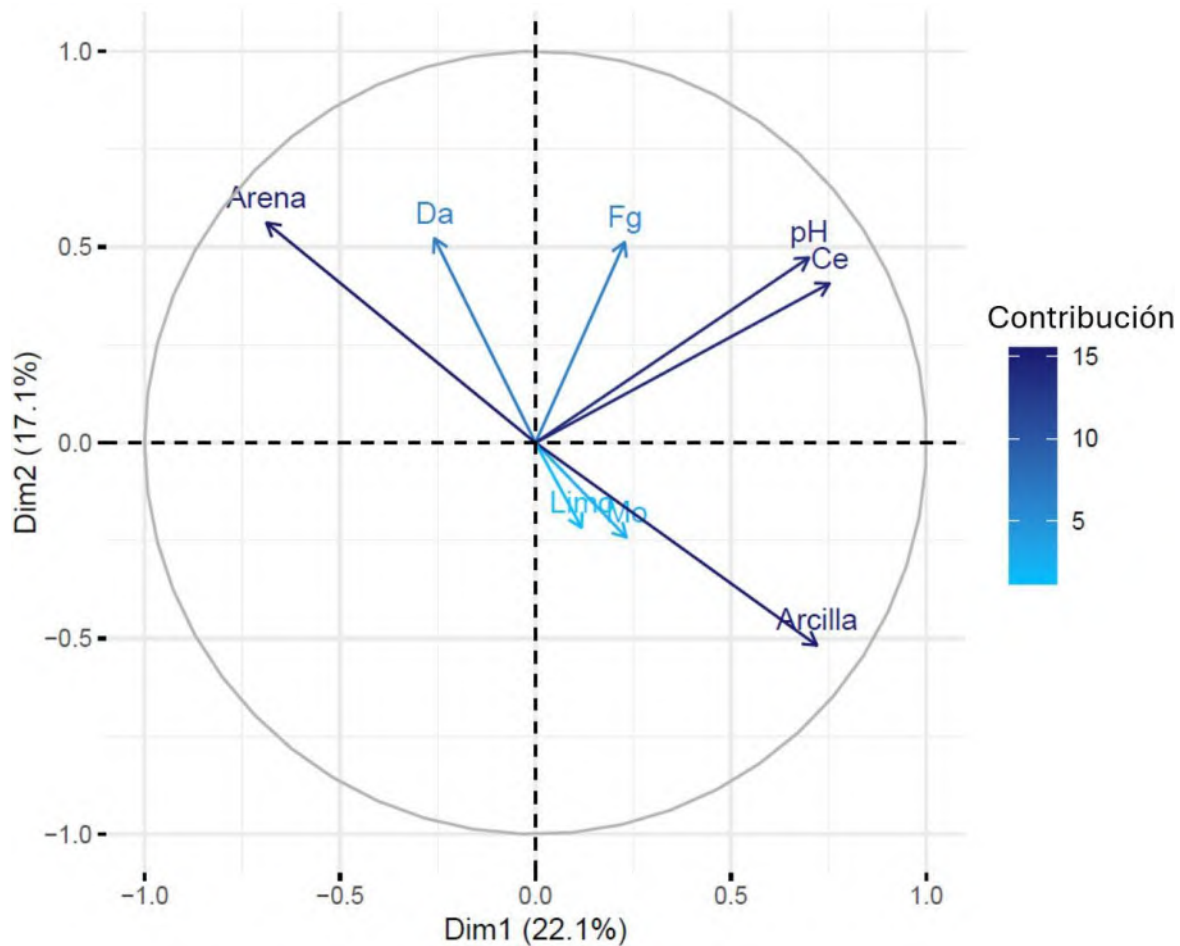


Figura 3. Contribución de las variables cuantitativas obtenidas mediante el FAMD.

El análisis (Figura 4) mostró una agrupación de los bosques en el cuadrante inferior izquierdo, siendo la tipología mejor diferenciada y con menor variabilidad. Las riberas de río también se agruparon, sin embargo, se observaron transectos de otras tipologías muy cercanas a su media. Los parques periurbanos y los parques urbanos también mostraron agrupación. Sin embargo, todas las tipologías compartieron propiedades del suelo. En general, por una parte, los bosques y parques urbanos y periurbanos se encontraron más cercanos entre sí, y por otra los camellones, institucionales y riberas de río.

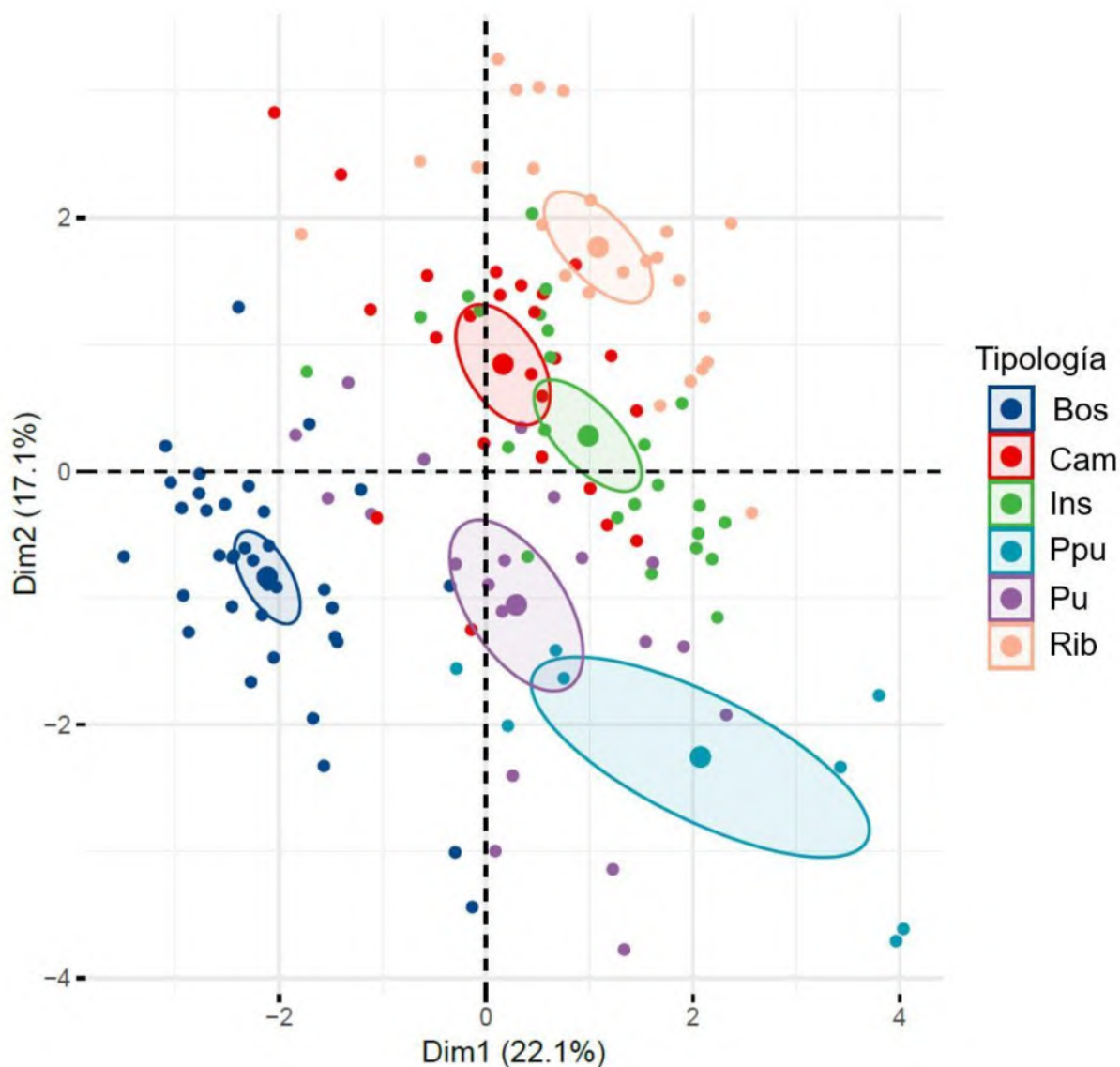


Figura 4. Agrupaciones de las propiedades del suelo de los distintos tipos de EV obtenidas mediante el FAMD.

7.2 Variación de las funciones del suelo en función de las propiedades

Mediante un análisis de componentes principales (PCA) de las propiedades del suelo, se obtuvieron los Ejes 1 y 2 a partir de los que se obtuvieron las correlaciones de Pearson (Tabla 3). El Eje 1 del PCA resume la mayor parte de la variación, principalmente influenciada por el contenido de arena, arcilla, materia orgánica y limo, con una varianza de 32.2 %. Por lo

tanto, se utilizó este eje para graficar la relación de las propiedades del suelo con las funciones.

Tabla 3. Correlaciones de Pearson de las propiedades del suelo de los ejes producidos por el análisis de componentes principales (PCA)

Propiedades	Eje 1	Eje 2
Arcilla (%)	-0.85***	0.35***
Arena (%)	0.96***	0.03 ^{ns}
Densidad aparente (g/cm ⁻³)	0.43***	-0.46***
Fragmentos gruesos (%)	0.00 ^{ns}	-0.72***
Limo (%)	-0.43***	-0.67***
Materia orgánica (%)	-0.44***	-0.41***
pH	-0.23**	-0.01 ^{ns}
Varianza acumulada (%)	32.2	53.1

Para realizar el PCA no se consideraron los valores de conductividad eléctrica, ya que los resultados en todos los transectos fueron menores a 0.9 dS/cm, sin mostrar salinidad (Weil y Brady, 2017).

En todos los espacios verdes, las funciones AMT, RET y ERO mostraron una disminución con el aumento de contenido de arena y de densidad aparente, y un aumento a mayor contenido de arcilla, limo y materia orgánica (Figura 5).

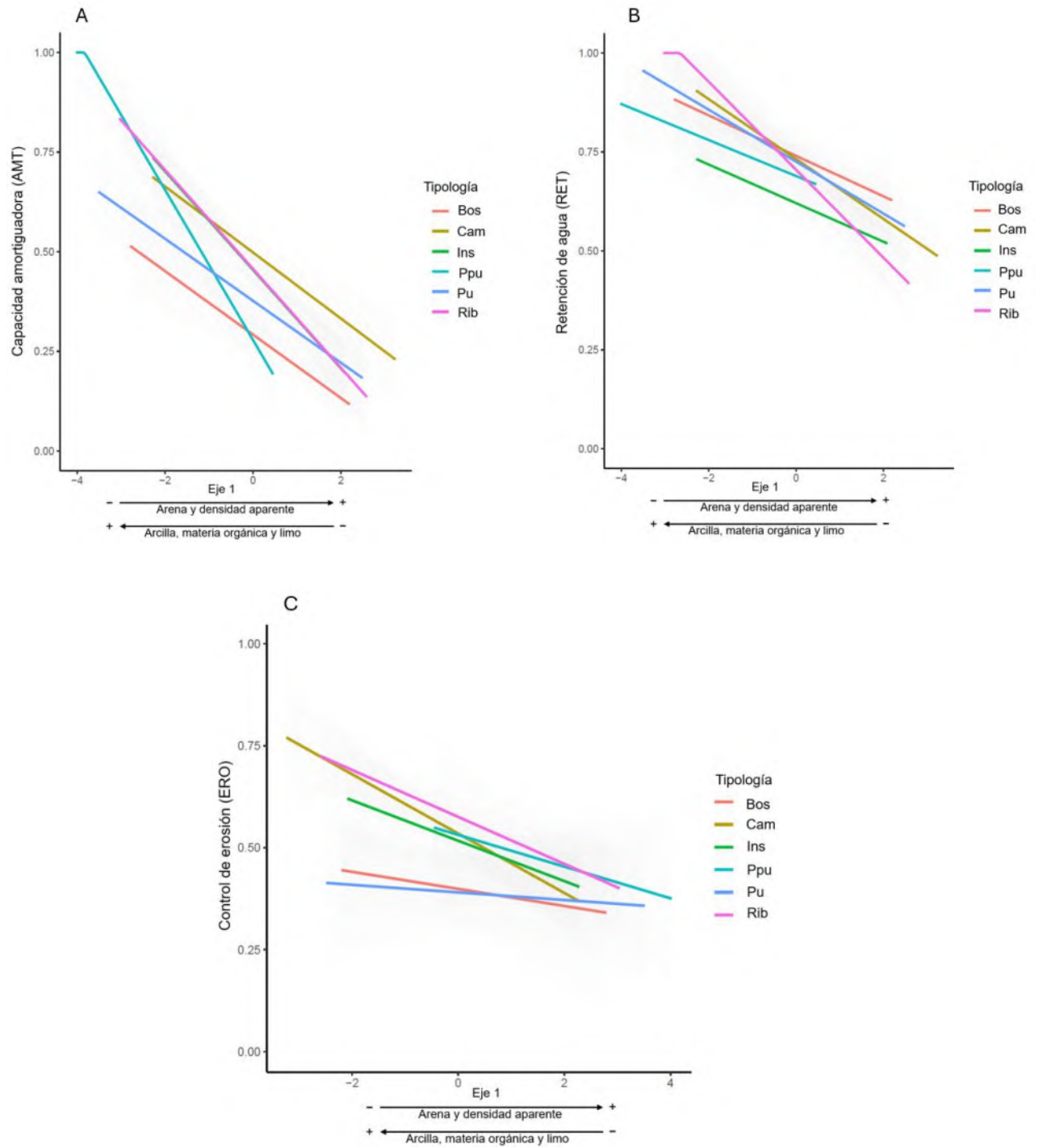


Figura 5. Relación de las propiedades del suelo con las funciones

La AMT (Figura 5A) mostró los cambios más abruptos a los cambios en las propiedades del suelo. Los bosques (Bos), los camellones (Cam) y los parques urbanos (Pu) mostraron la misma tendencia (pendiente) a los cambios en el eje 1 aunque con diferente magnitud. Al igual que los jardines institucionales (Ins) y las riberas de río (Rib), sin embargo, las Rib presentaron una mayor variabilidad, expresada por una mayor longitud de la línea. Los parques periurbanos (Ppu) mostraron mayor sensibilidad a los cambios en el eje 1 disminuyendo de manera abrupta ante cambios en las propiedades.

Para la RET (Figura 5B), Para la RET (Figura 5B), los Bos, los Ppu y los Ins tuvieron la misma repuesta ante los cambios en las propiedades del suelo. Los Ppu y los Ins, representados con líneas más cortas, mostraron menor variabilidad; siendo las Rib las que presentaron los efectos más abruptos.

Para el ERO (Figura 5C), los Bos y los Pu mostraron una respuesta mínima ante los cambios. En cambio, los Cam mostraron una mayor respuesta, seguido por Rib, Ins y Ppu.

En cuanto a MIT, el análisis de la correlación de propiedades (Figura 6) mostró una correlación positiva con la materia orgánica, contenido de limo y fragmentos gruesos. Mientras que mostró una correlación el pH y el contenido de arena (por colinealidad), a mayor pH y contenido de arena la función disminuye.

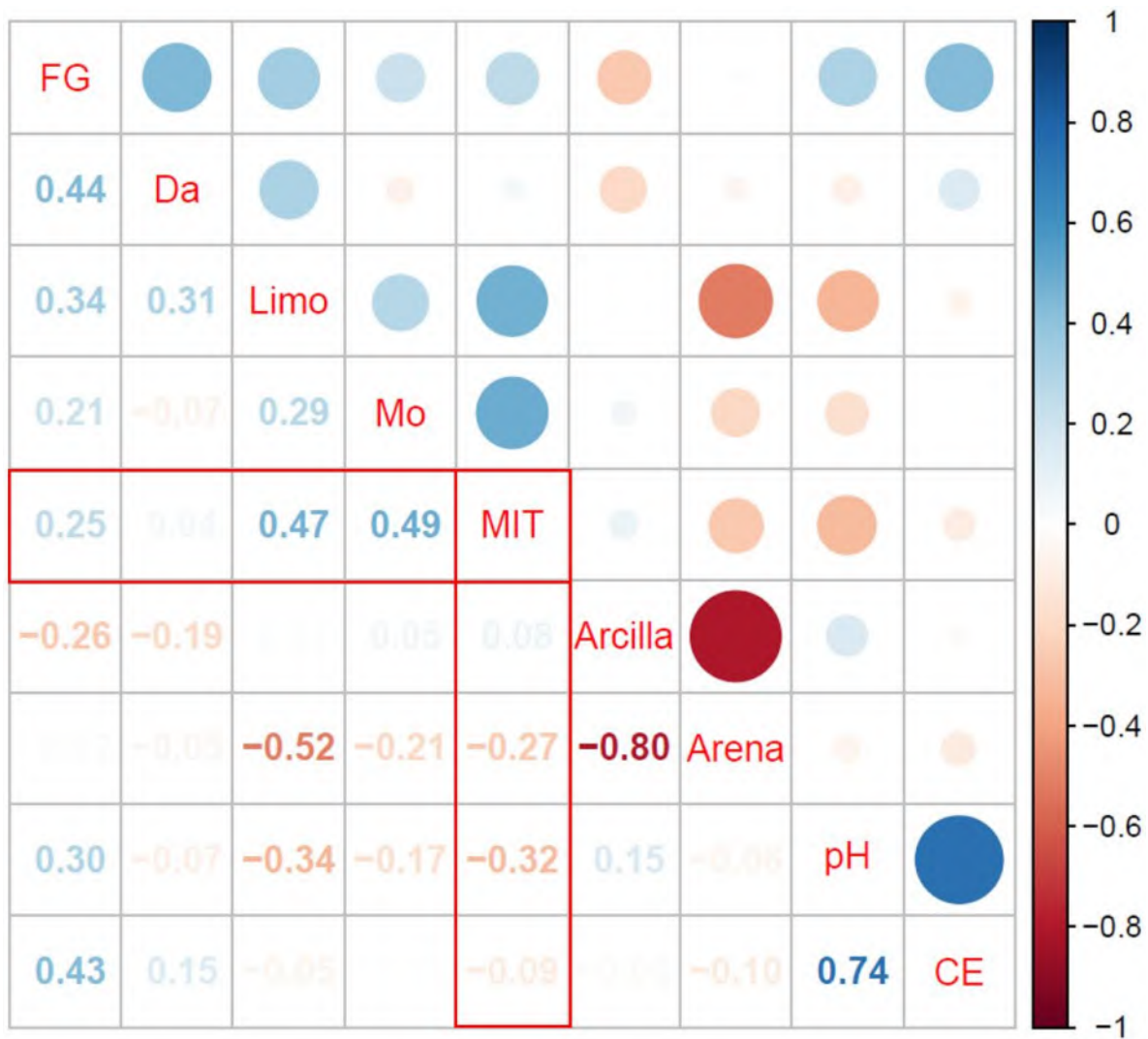


Figura 6. Gráfica de correlación de propiedades de la función MIT.

7.3 Índices de los servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos están directamente relacionados a las propiedades del suelo, y por tanto a las funciones que estas desempeñan. Por lo tanto, de acuerdo con Adhikari y Hartemink (2016), las funciones y los servicios ecosistémicos podrían identificarse con el mismo término. En muchos casos, una función puede estar relacionada con más de un servicio ecosistémico o viceversa. En este trabajo se estableció una correspondencia de una función para un servicio ecosistémico con fines de análisis e interpretación.

En la AMT, los bosques (Figura 7a), de manera homogénea, muestran un bajo suministro en comparación con otras tipologías, que, aunque con una dispersión amplia, mostraron una tendencia hacia valores medios, con presencia de algunos valores bajos. En especial en parques urbanos y riberas; y, de valores altos en parques periurbanos. Se observaron transectos que, a pesar de pertenecer a diferentes tipos de EV, mostraron coincidencias, como es el caso de los sitios Bos 8, Cam 1, Pu 3, Rib 3 y Rib 5, en el que todos presentaron un transecto con un valor muy cercano a 0.2.

En la RET, en general, la mayoría de los tipos de EV se distribuyeron por encima de los valores medios (mayores a 0.5) (Figura 7b). No obstante, ningún tipo de EV mostró un patrón definido.

En el ERO, la mayoría de los valores de los transectos tienden hacia valores medios, comprendidos entre 0.3 y 0.7 (Figura 7c). En particular, los Bos mostraron los valores más bajos. En el caso de las Rib, los valores mostraron menor variación, sin embargo, no difieren considerablemente de los obtenidos en otros tipos de EV. Al igual que en los SE anteriores, los valores no permitieron diferenciar claramente entre tipos de EV.

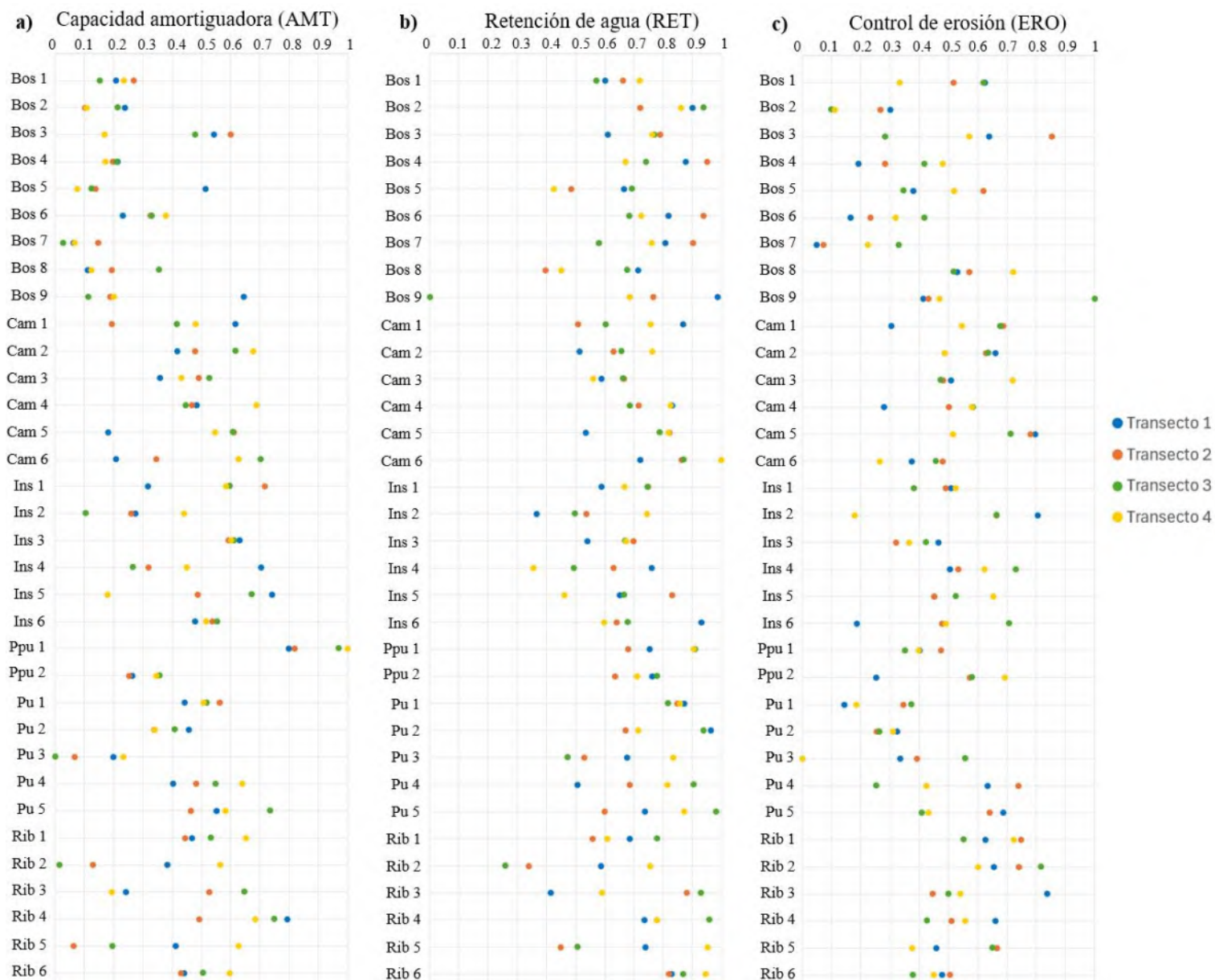


Figura 7. Gráfica de puntos de las funciones de capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión.

Las curvas de infiltración acumulada (Figura 8), utilizadas como indicador de MIT, presentan una pendiente pronunciada al inicio, que indica una tasa alta de infiltración inicial. Progresivamente, la tasa de infiltración se estabiliza aproximándose a un valor constante. En Bos (Figura 8a), las curvas presentaron patrones parcialmente consistentes, con formas similares entre sí, a excepción de Bos 7 donde la tasa de infiltración inicial presenta pequeñas variaciones en la entrada de agua. Las curvas de Ins y Rib (Figura 8Figura 8b, 8f) también presentan similitud entre ellas. Sin embargo, Rib 2 presenta valores más bajos de infiltración en general. En contraste, los Cam (Figura 8b), los Ppu (Figura 8d) y los Pu (Figura 8e) mostraron una variabilidad considerable. Posteriormente, un análisis de covarianza (ANCOVA) demostró que estadísticamente no existe una relación entre la infiltración acumulada y los tipos de EV.

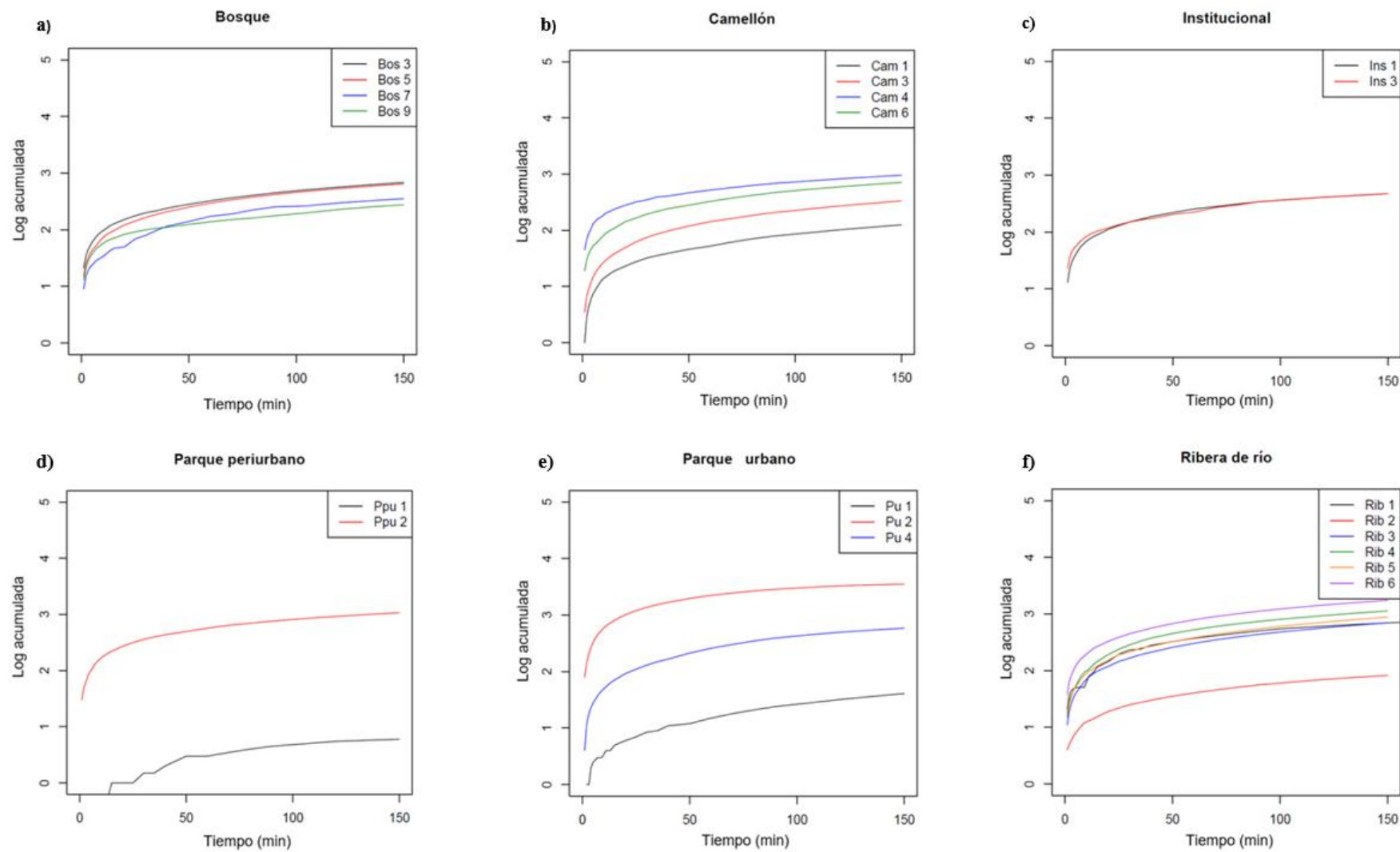


Figura 8. Curvas de infiltración acumulada de los distintos espacios verdes.

7.4 Espacios verdes y suministro de servicios ecosistémicos

Los bosques mostraron una alta variabilidad en la provisión de capacidad amortiguadora (AMT), retención de agua (RET) y control de erosión (ERO) (Figura 9), mostrando los valores más bajos de AMT y ERO. De manera general, los tres servicios mostraron suministros que van de medios a bajos. Bos 2, 4 y 6 mostraron un suministro parecido de los tres SE. Todos los bosques mostraron un alto suministro de RET, a excepción de Bos 9.

Los camellones mostraron variabilidad de suministro en Cam 1 y Cam 6 y en los otros sitios se observó una distribución más homogénea del suministro (Figura 10Figura 10). De manera general, los tres servicios mostraron suministros que van de medios a altos. El SE que más se suministró en los camellones fue RET, seguido de ERO, y por último AMT.

Los jardines institucionales mostraron una variabilidad alta del suministro de SE (Figura 11). De manera general, los tres servicios mostraron suministros medios. En general, el suministro de RET es alto en estos EV. AMT y ERO registraron valores muy variables entre sitios y entre transectos.

Capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión en bosques

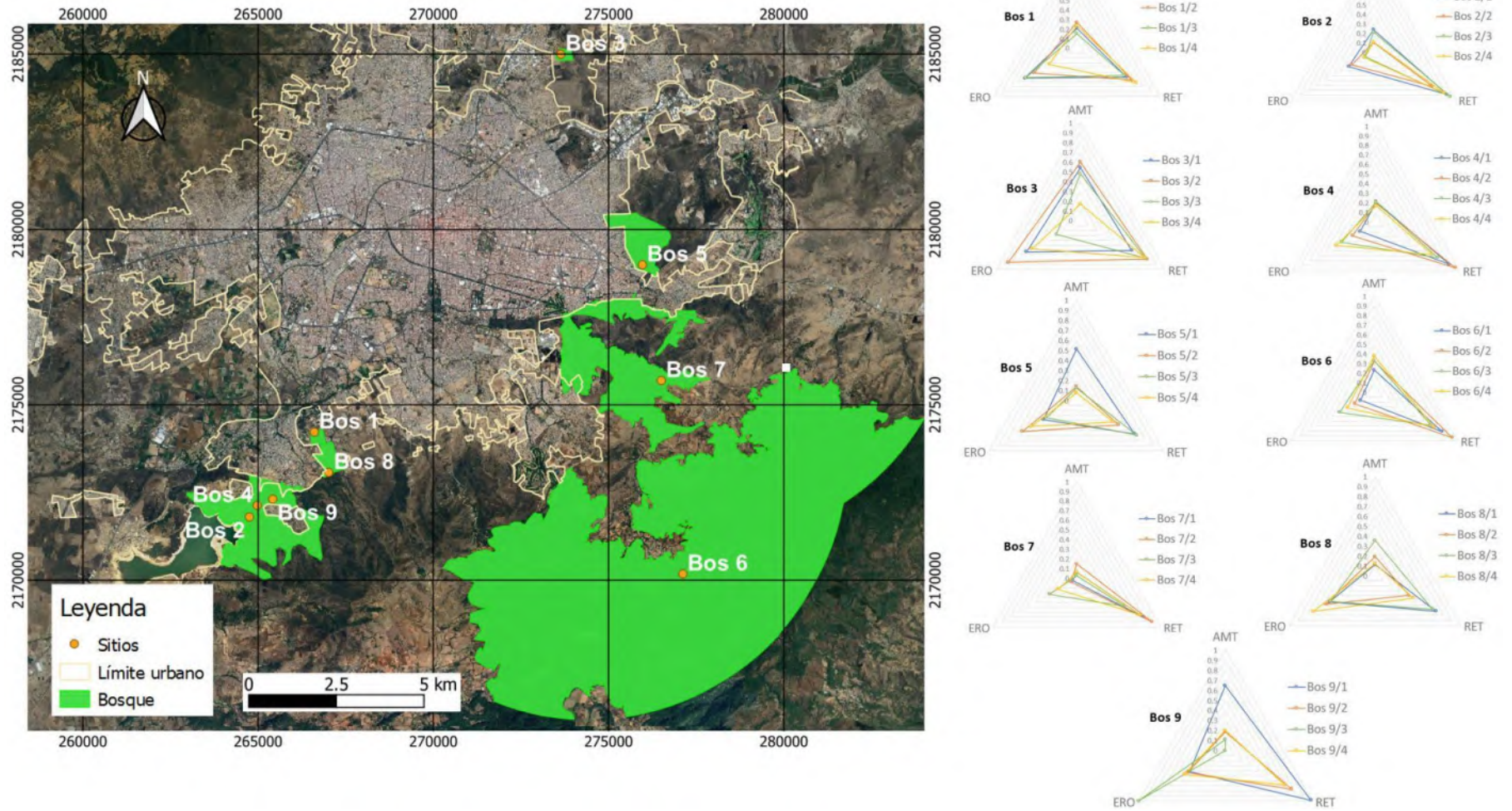


Figura 9. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en bosques.

Capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión en camellones

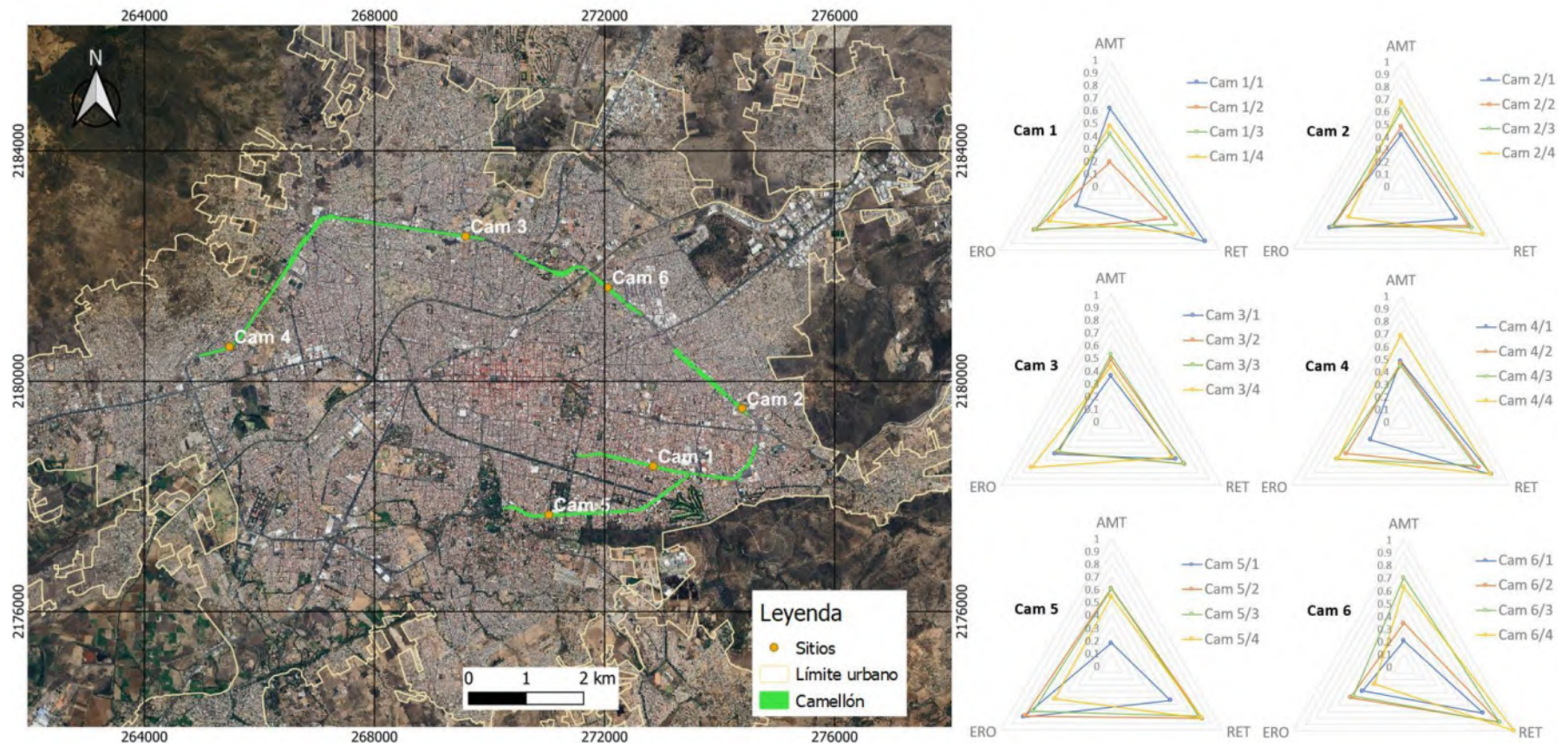


Figura 10. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en camellones.

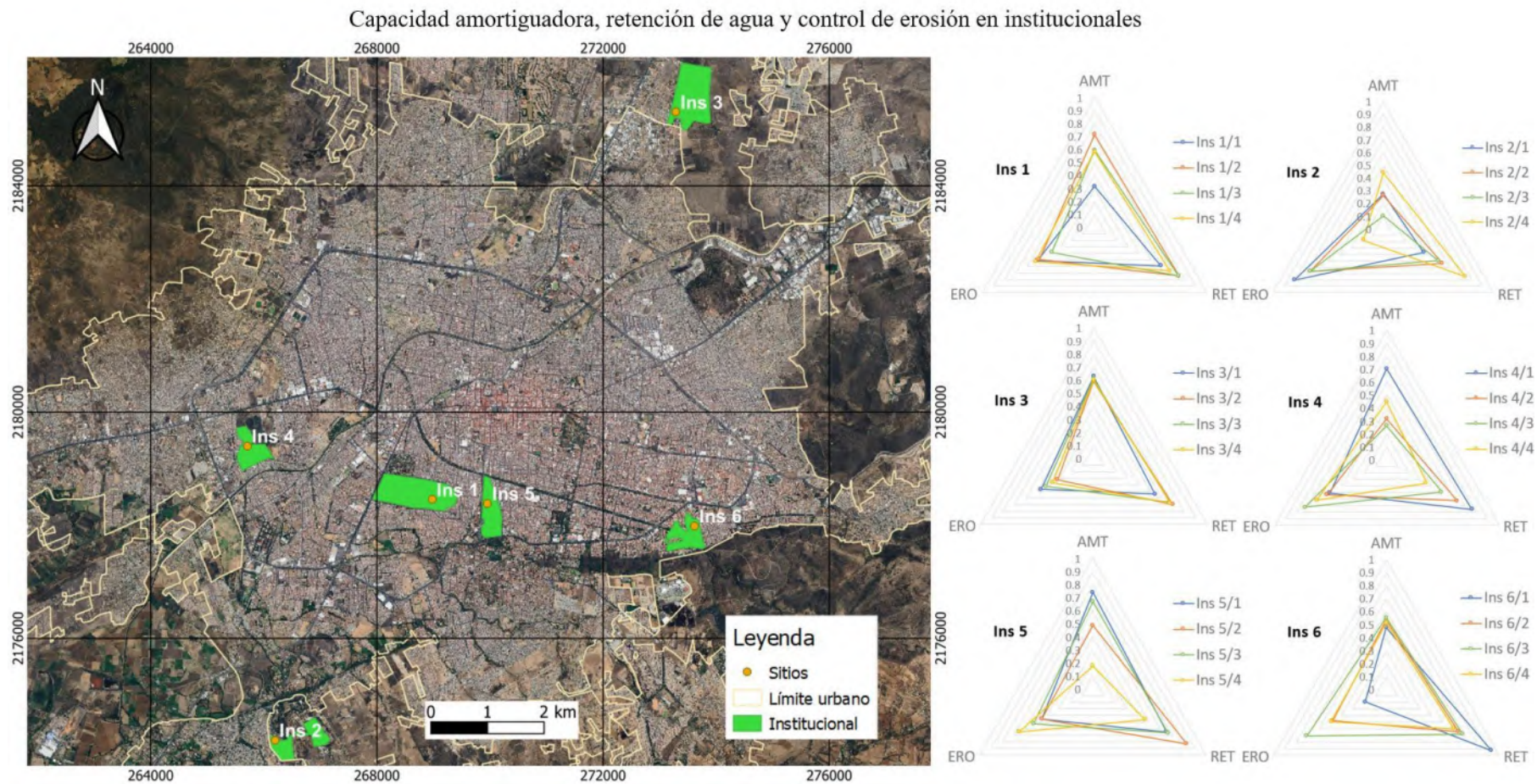


Figura 11. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en jardines institucionales.

Los parques periurbanos se mostraron una variabilidad muy alta entre los dos sitios evaluados, sin embargo, en los transectos de cada sitio la variabilidad es muy baja (Figura 12). En Ppu 1 los SE con suministro más alto son AMT y RET y ERO el más bajo. Por otra parte, Ppu 2 mostró un suministro de RET y ERO medio y bajo de AMT.

Los parques urbanos mostraron variabilidad alta de los SE entre los sitios y en particular en Pu 4 entre sus transectos (Figura 13). De manera general, AMT y ERO mostraron suministros de medios a bajos y RET de medios a altos. El SE que más se suministro fue el de RET.

Las riberas de río mostraron una variabilidad alta en el suministro de los SE (Figura 14). Sin embargo, se observaron algunos valores similares tanto entre transectos como entre sitios. Los tres SE tienen valores muy variables del suministro en las Rib, que van de bajos a altos. El SE que más se suministro fue el de RET.

Capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión en parques periurbanos

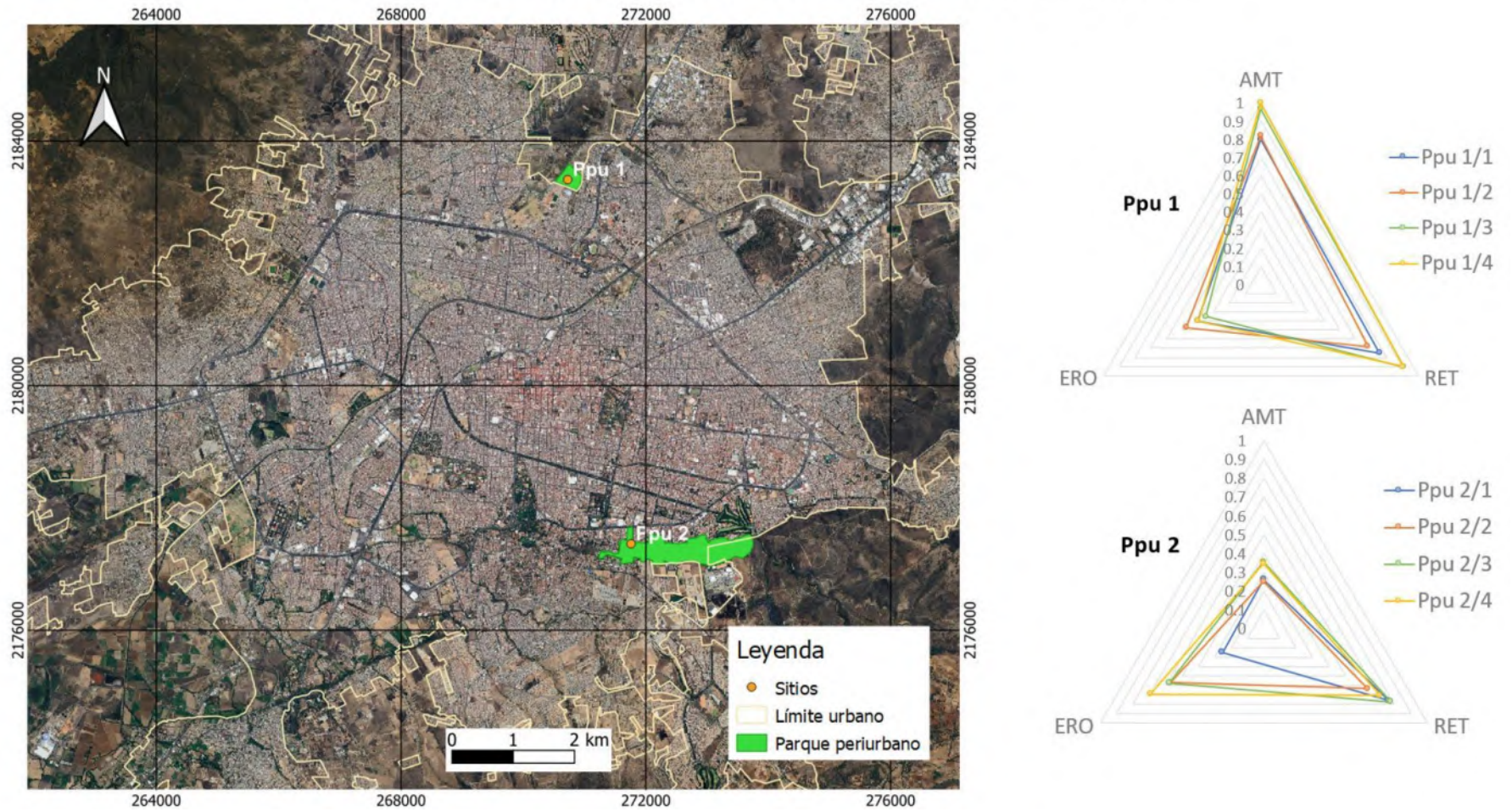


Figura 12. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en parques periurbanos.

Capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión en parques urbanos

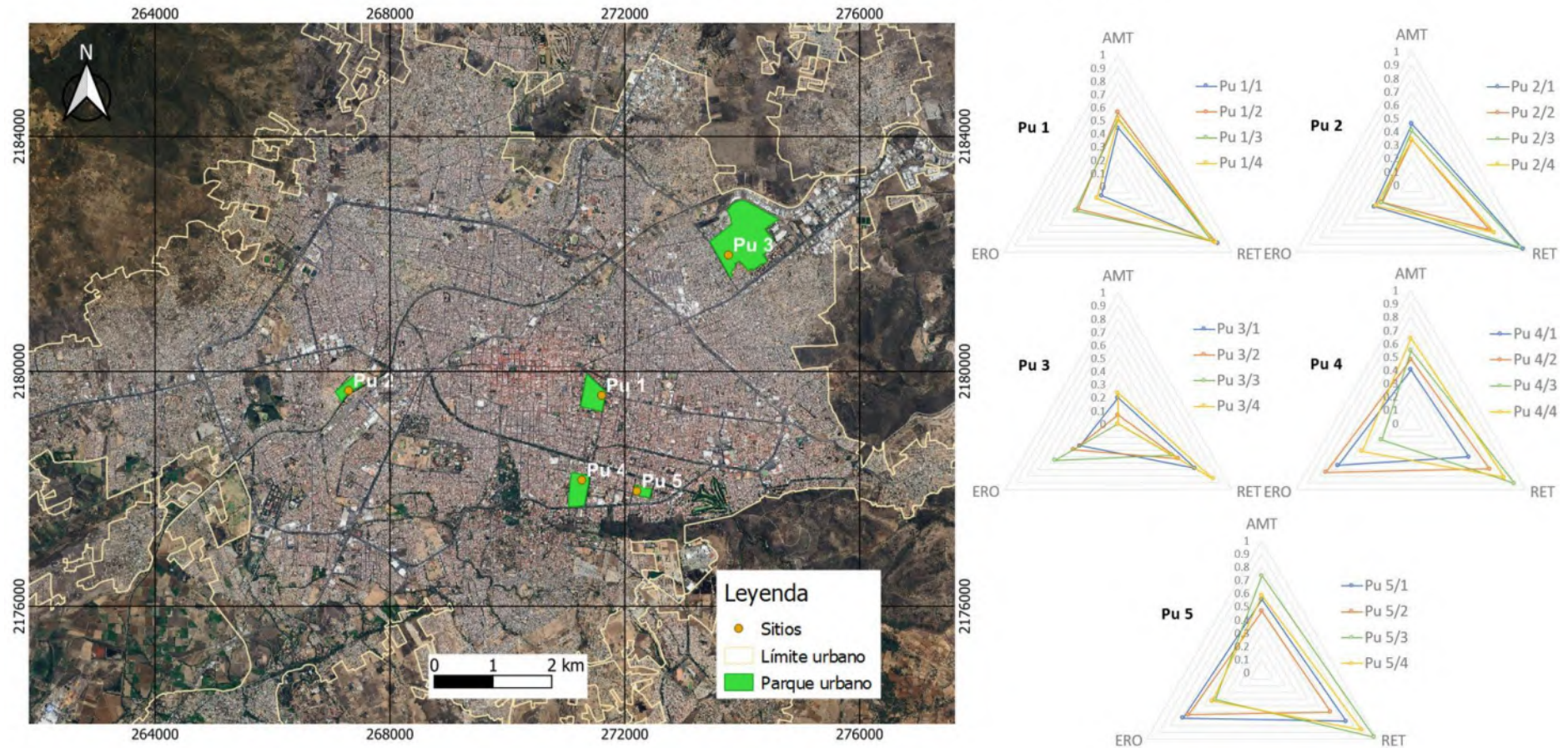


Figura 13. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en parques urbanos.

Capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión en riberas de río

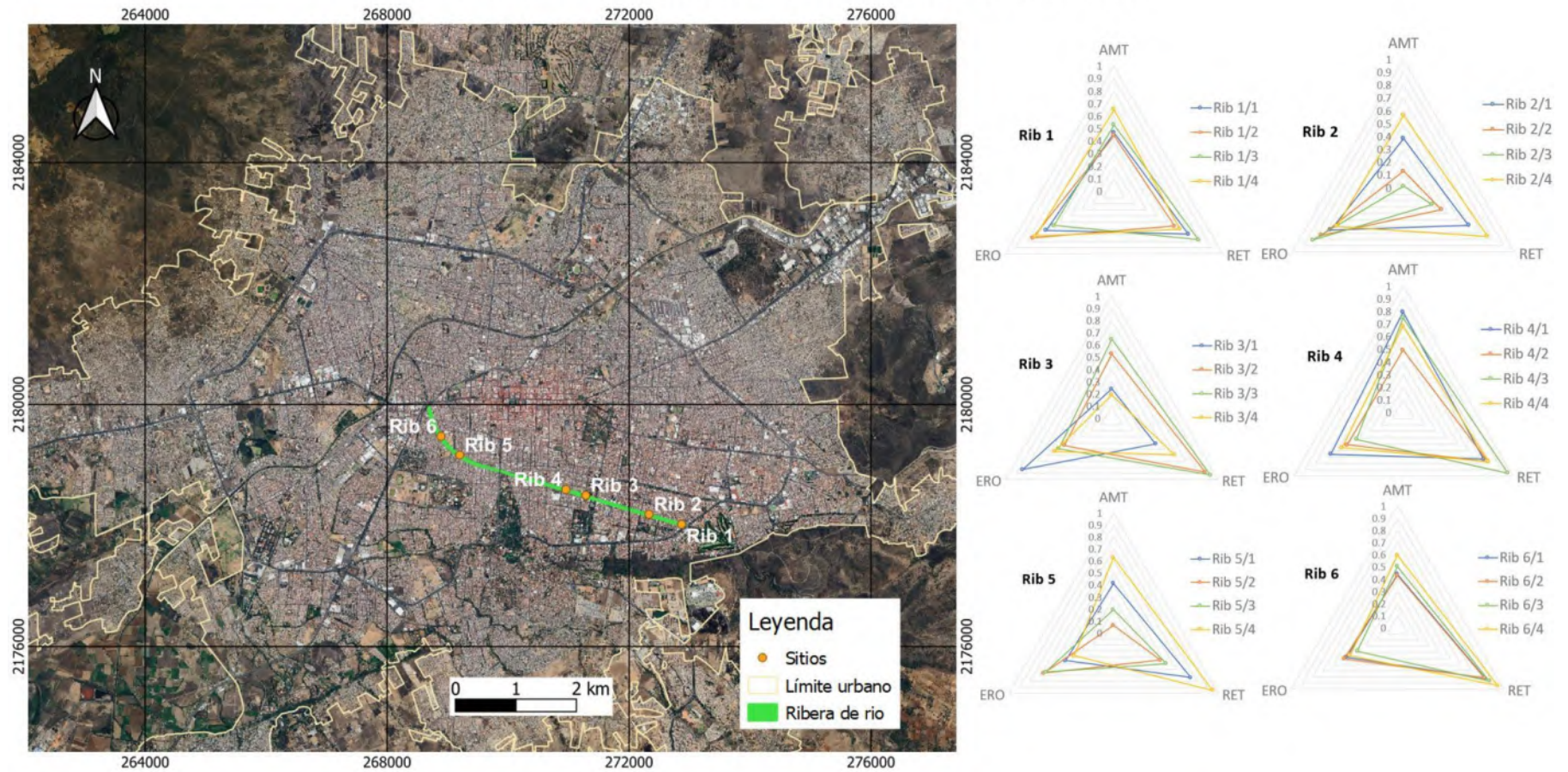


Figura 14. Mapa de los servicios de capacidad amortiguadora, control de erosión y retención de agua en riberas.

La mitigación de inundaciones (MIT) mostró el suministro más alto en parques urbanos (Pu 2 y Pu 4), riberas de río (Rib 4, Rib 6, Rib 5), un parque periurbano (Ppu2) y un bosque (Bos 7) (Figura 15) y la mayoría de los sitios analizados mostraron valores medios. Los resultados más bajos se registraron en ribera de río (Rib 2), parque urbano (Pu 1) y parque periurbano (Ppu 1). Las riberas de río, los parques urbanos y los bosques mostraron mayor variación.

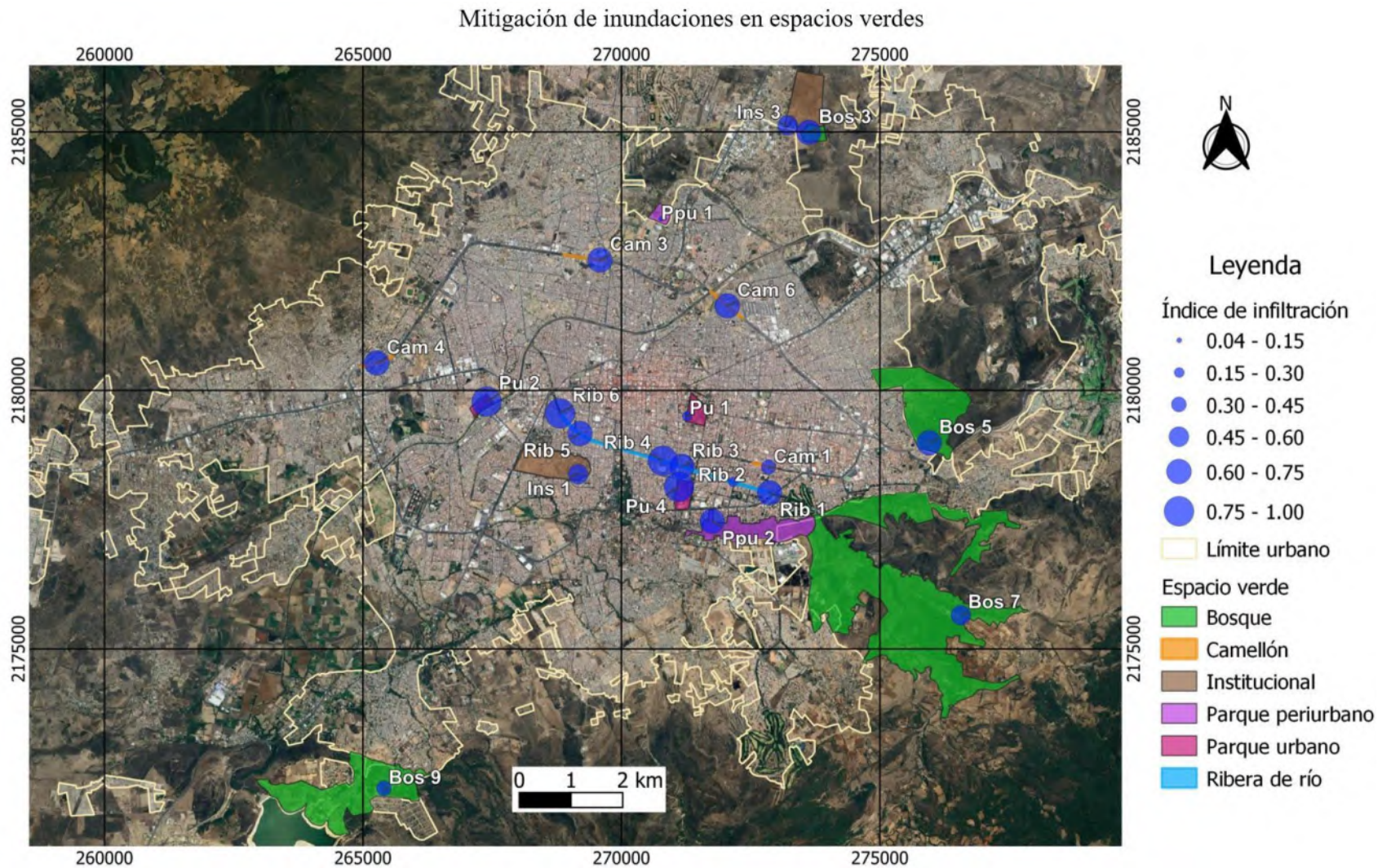


Figura 15. Mapa del servicio de mitigación de inundaciones en espacios verdes.

8 Discusión

De manera general, los espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia muestran una tendencia a la agrupación en función de sus propiedades. No obstante, esta tendencia no se observa de manera uniforme ya que algunos bosques (Bos) y riberas de río (Rib) muestran una clara agrupación conforme a su tipología. Asimismo, se identificaron agrupaciones entre tipologías distintas, tales como los camellones con los espacios institucionales, y los parques urbanos con los periurbanos. Estas agrupaciones indican que los suelos urbanos y periurbanos pueden compartir propiedades similares, lo que revela un cierto grado de homogeneidad entre ellos, y contrasta con Ungaro et al. (2022), quienes destacan una alta heterogeneidad entre los suelos urbanos y periurbanos. Esto indica la necesidad de incorporar análisis más detallados, ya sea profundizando en las propiedades del suelo o integrando otros componentes relevantes, como las estructuras vegetales, tal como lo proponen Edmondson et al. (2011).

De acuerdo con Nero y Anning. (2018) las propiedades del suelo que demostraron tener mayor influencia en la agrupación de EV fueron la materia orgánica, la densidad aparente y la granulometría. Se observó una tendencia clara en la que los EV con mayor contenido de arcilla, materia orgánica y limo presentaron valores más altos en el índice de las funciones de capacidad amortiguadora, retención de agua y control de erosión.

La mayor variación en el suministro de AMT se presentó en los parques periurbanos, aunque cabe destacar que de esta tipología solo se muestrearon y evaluaron dos sitios, por lo que para facilitar la comparación y cálculo, se recomienda utilizar al menos 3 muestreos y el mismo número de muestras entre cada tipo en (Grafius et al., 2018). En el suministro de RET,

la mayor variación se presentó en las riberas de río, donde también se registraron las mayores variaciones en el manejo del EV, ya que se espera mayores suministro de SE en los EV menos perturbados y viceversa (Scharenbroch et al., 2005). En el caso del suministro de ERO, los bosques y los parques urbanos fueron las tipologías que mostraron menor variación en el suministro.

En el suministro relacionado a la mitigación de inundaciones, la materia orgánica, el contenido de limo y de fragmentos gruesos mostraron una correlación positiva, debido a que estas propiedades mejoran la estructura del suelo, y por tanto facilitan el paso del agua (Weil y Brady, 2017).

La diferencia en la respuesta del suministro de SE en función de las propiedades evaluadas sugiere la relevancia de incluir otros factores en la evaluación, tales como el tiempo o antigüedad de los espacios verdes, los niveles de perturbación o la contaminación a la que están expuestos. Como mencionan Scharenbroch et al. (2005) y Setälä et al. (2017), estos factores modifican las propiedades de los suelos, y en consecuencia las funciones y servicios ecosistémicos que suministran.

El suministro similar de SE entre diferentes tipos de EV sugiere la existencia de patrones compartidos y confirmar la similitud entre sus propiedades. De acuerdo con Ungaro et al. (2022), esto pone de manifiesto la multifuncionalidad de los suelos de los EV, con una contribución simultánea de múltiples SE en un mismo EV. Sin embargo, estas tendencias entre EV distintos fluctúan según el SE evaluado, lo que sugiere que los factores que determinan su suministro puedan ser diferentes para cada SE.

En el mapa de mitigación de inundaciones con la lámina máxima de agua (Figura 16) se observa que donde hay más presencia de espacios verdes los valores de lámina de agua son

menores, lo que podría indicar que contrarrestan los efectos de las inundaciones, como ha sido mencionado por diversos autores (Dagenais et al., 2017; Ishimatsu et al., 2017; O’Riordan et al., 2021). El sitio Pu 2, se encuentra muy cerca del Rio Grande, tiene valores altos de infiltración y está en una zona donde la inundación alcanza hasta los 4.2 m, este espacio permite que se infiltre el agua lo que reduce la altura de la inundación. Algo similar pasa con el Ppu 1, ya que se encuentra en una zona donde también se alcanzan hasta los 4 metros de inundación y aunque el valor de la función en este espacio es el más bajo, tiene una gran importancia ya que este espacio verde funge como amortiguador para evitar que se extienda la inundación hacia las zonas urbanas.

A pesar de que existen EV fuera de las zonas inundables, estos también suministran el SE de MIT, ya que participan en el control de la escorrentía hacia las zonas más bajas del área de estudio, como menciona Bergeson et al., (2022). Asimismo, la vulnerabilidad a inundación del área de estudio (Figura 16) exhibe la falta de EV, principalmente en las zonas inundables.

Conviene resaltar, que a pesar de que algunos suministros de SE sean bajos no conlleva necesariamente que en esos EV no se amortigüen contaminantes, se retenga agua, que no contribuyan a la mitigación de inundaciones o que se esté erosionando en gran medida, sino que, esos valores representan el potencial que tiene el suelo a suministrar ciertos servicios ecosistémicos, con base en las propiedades del suelo. Aunado a lo anterior, resulta pertinente señalar lo planteado por Calzolari et al. (2020) sobre la sobreestimación o subestimación que se podría generar en algunos sitios por no incluir otros factores determinantes al utilizar indicadores estandarizados de funciones del suelo que sustentan la provisión de SE, como la

vegetación, la topografía o la profundidad del perfil del suelo muestreado, la cual tiene un impacto en la variabilidad de las propiedades del suelo (Nero y Anning, 2018).

Cada servicio ecosistémico puede estar condicionado por distintos factores, además de que sería pertinente analizar el papel que desempeñan dependiendo del tipo de espacio verde, por ejemplo, en los camellones al ser espacios verdes urbanos y estar ubicados en zonas planas principalmente, la función de control de erosión no representaría un SE prioritario a diferencia de la capacidad amortiguadora y la retención de agua, las cuales reducen los efectos de la exposición del suelo a agentes contaminantes y propician la conservación de la vegetación de estos espacios respectivamente. O bien en el caso de los bosques donde ERO tiene valores bajos (Figura 9), al ser espacios verdes periurbanos, conviene considerar una ampliación en el enfoque al evaluar los servicios ecosistémicos del suelo, que permita evaluar integralmente el estado de provisión de este SE tal como lo sugiere Field et al. (2015) respecto a la perspectiva de zona crítica.

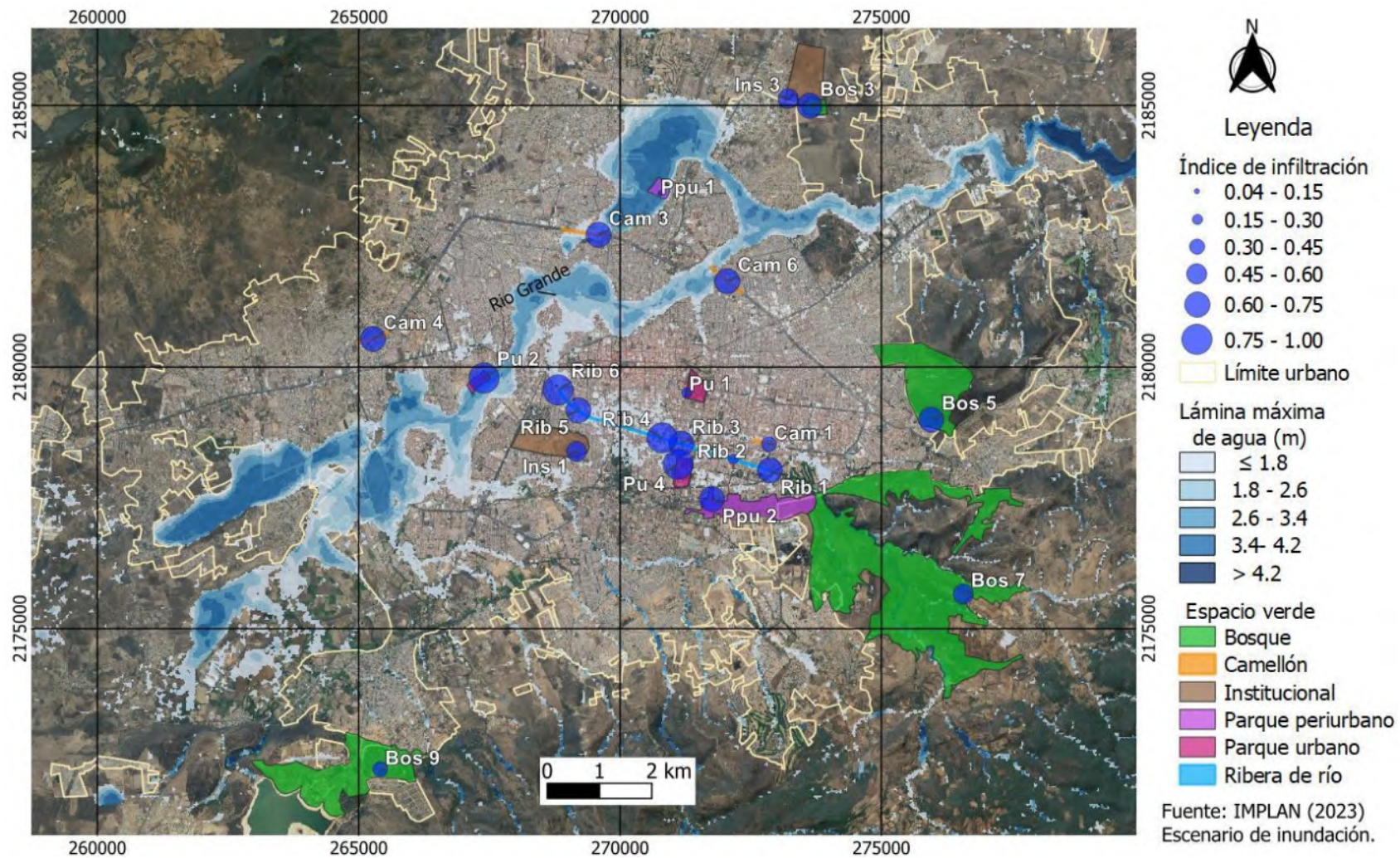


Figura 16 . Mapa de función de mitigación de inundaciones con lámina máxima de agua.

9 Conclusiones

Los suelos de los EV de la ciudad de Morelia, Michoacán, no muestran una agrupación de acuerdo con el tipo de EV al que pertenecen, ya que sitios de tipos diferentes de EV muestran agrupación entre sí.

Cada servicio ecosistémico está influenciado por factores distintos, por lo que determinar si el suministro de SE se da en función del tipo de espacio verde requeriría tomar en consideración variables más detallada y una ampliación en el enfoque que permita la evaluación integral de estos

Los resultados obtenidos permiten destacar la relevancia que tienen los espacios verdes como proveedores de múltiples servicios ecosistémicos de regulación del suelo. Esta multifuncionalidad, además de evidenciar su importancia ecológica, también refuerza su valor estratégico para generar entornos urbanos más sostenibles.

De esta manera, la inclusión de los espacios verdes en la toma de decisiones respecto a la planificación urbana de la ciudad de Morelia podría contribuir significativamente a la mitigación de los efectos del cambio climático y a la resiliencia local frente a futuras problemáticas ambientales.

10 Referencias bibliográficas

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- 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>
- Batjes, N. H. (1996). Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma*, 71, 31–52.
- Baveye, P. C., Baveye, J., & Gowdy, J. (2016). Soil “ecosystem” services and natural capital: critical appraisal of research on uncertain ground. *Frontiers in Environmental Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
- Baycan, T., van Leeuwen, E. S., Rodenburg, C. ., & Nijkamp, P. (2002). Development and management of green spaces in European cities. En *Research Memorandum* (Vol. 25). <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=dc4be681ca0a993c13a6023d98e690ef242521d8>
- Bergeson, C. B., Martin, K. L., Doll, B., & Cutts, B. B. (2022). Soil infiltration rates are underestimated by models in an urban watershed in central North Carolina, USA. *Journal of Environmental Management*, 313, 115004. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115004>
- Bollo Manent, M., Morales, G. M., & Martínez Serrano, A. (2022). Las áreas verdes en la ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas*, 107.

<https://doi.org/10.14350/rig.60494>

Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465.

<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>

Breuste, J., Schnellinger, J., Qureshi, S., & Faggi, A. (2013). Urban ecosystem services on the local level: urban green spaces as providers. *Ekologia*, 32(3).

<https://doi.org/10.2478/eko-2013-0026>

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, 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>

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117–124.

<https://doi.org/10.22267/rcia.163302.58>

Calzolari, C., Tarocco, P., Lombardo, N., Marchi, N., & Ungaro, F. (2020). Assessing soil ecosystem services in urban and peri-urban areas: From urban soils survey to providing support tool for urban planning. *Land Use Policy*, 99, 105037.

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105037>

Calzolari, C., Ungaro, F., Filippi, N., Guermandi, M., Malucelli, F., Marchi, N., Staffilani,

- F., & Tarocco, P. (2016). A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. *Geoderma*, 261, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.013>
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning*, 68, 129–138.
- Colding, J. (2011). The role of ecosystem services in contemporary urban planning. En *Urban Ecology* (pp. 228–237). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199563562.003.0028>
- CONANP. (2018). *Ciudades verdes y sustentables. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*. <https://www.gob.mx/conanp/articulos/ciudades-verdes-y-sustentables>
- Dagenais, D., Thomas, I., & Paquette, S. (2017). Siting green stormwater infrastructure in a neighbourhood to maximise secondary benefits: lessons learned from a pilot project. *Landscape Research*, 42(2), 195–210.
<https://doi.org/10.1080/01426397.2016.1228861>
- Daily, G. ., Matson, P. ., & Vitousek, P. . (1997). Ecosystem services supplied by soil. *Nature Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington DC, 113–132.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
- Dvořáčková, H., Dvořáček, J., Hueso González, P., & Vlček, V. (2022). Effect of different soil amendments on soil buffering capacity. *PLOS ONE*, 17(2), e0263456.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0263456>

Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McCormack, S. A., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2011).

Are soils in urban ecosystems compacted? A citywide analysis. *Biology Letters*, 7(5), 771–774. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0260>

FAO. (2015). *Año Internacional de los Suelos*. fao.org/soils-2015/es

FAO. (2017). *Planificación y gestión de la tierra en áreas periurbanas*.

FAO. (2019). Soil erosion: the greatest challenge to sustainable soil management. En

Australian Surveyor (Vol. 8, Número 5).

<https://doi.org/10.1080/00050326.1941.10437468>

FAO. (2021). *Definiciones y conceptos de servicios ecosistémicos*.

<https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/en/>

Field, J. P., Breshears, D. D., Law, D. J., Villegas, J. C., López-Hoffman, L., Brooks, P. D.,

Chorover, J., Barron-Gafford, G. A., Gallery, R. E., Litvak, M. E., Lybrand, R. A.,

McIntosh, J. C., Meixner, T., Niu, G.-Y., Papuga, S. A., Pelletier, J. D., Rasmussen, C.

R., & Troch, P. A. (2015). Critical Zone Services: Expanding Context, Constraints,

and Currency beyond Ecosystem Services. *Vadose Zone Journal*, 14(1),

vzj2014.10.0142. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.10.0142>

Figuerola Sandoval, B., Cortes Torres, H. G., Pimentel Lopez, J., Osuna Ceja, E. S.,

Rodriguez Olvera, J. M., & Morales Flores, F. J. (1991). *Manual de predicción de*

pérdidas de suelo por erosión hídrica.

Gaston, K. . (2010). *Urban Ecology* (1a ed.). Cambridge University Press.

- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- González-Oreja, J. ., Bonilla, E., & Ramos, J. (2019). Evaluación de servicios ecosistémicos de áreas verdes urbanas en la Ciudad de México. *Ecología y medio ambiente*, 45(3), 215–230.
- Grafius, D. R., Corstanje, R., & Harris, J. A. (2018). Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape Ecology*, 33(4), 557–573. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0618-z>
- Grant, G. E., & Dietrich, W. E. (2017). The frontier beneath our feet. *Water Resources Research*, 53(4), 2605–2609. <https://doi.org/10.1002/2017WR020835>
- H. Ayuntamiento de Morelia. (2021). *Plan Municipal de Desarrollo Morelia 2021-2024*.
- Habitat - ONU, (Programa de naciones unidas para los asentamientos humanos). (2015). *Habitat III, issue papers: 11-public space*.
- Haq, S. M. A. (2011). Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment. *Journal of Environmental Protection*, 02(05), 601–608.
<https://doi.org/10.4236/jep.2011.25069>
- IMPLAN. (2019). *Sistema de indicadores para el desarrollo del municipio de León, Guanajuato*. https://implan.gob.mx/pdf/sistema/Sistema_Indicadores_2019.pdf
- IMPLAN. (2021). *El municipio de Morelia en 2021*.
- Ishimatsu, K., Ito, K., Mitani, Y., Tanaka, Y., Sugahara, T., & Naka, Y. (2017). Use of rain

- gardens for stormwater management in urban design and planning. *Landscape and Ecological Engineering*, 13(1), 205–212. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0309-3>
- Kostiakov, A. . (1932). On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point view for purpose of amelioration. *Transactions of 6th Comittee International Society of Soil Science, Russia., A*, 17–21.
- Lal, R., Bouma, J., Brevik, E., Dawson, L., Field, D. J., Glaser, B., Hatano, R., Hartemink, A. E., Kosaki, T., Lascelles, B., Monger, C., Muggler, C., Ndzana, G. M., Norra, S., Pan, X., Paradelo, R., Reyes-Sánchez, L. B., Sandén, T., Singh, B. R., ... Zhang, J. (2021). Soils and sustainable development goals of the United Nations: An International Union of Soil Sciences perspective. *Geoderma Regional*, 25, e00398. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00398>
- Makó, A., Kocsis, M., Barna, G., & Tóth, G. (2017). *Mapping the storing and filtering capacity of European soils*.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis* (Island Press (ed.)).
- Nelson, D. ., & Sommers, L. . (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. En *Methods of Soil Analysis; Part 2*. (pp. 539–579).
- Nero, B. F., & Anning, A. K. (2018). Variations in soil characteristics among urban green spaces in Kumasi, Ghana. *Environmental Earth Sciences*, 77(8), 317. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7441-3>
- Nuñez, J. . (2022). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México.

Economía, sociedad y territorio, 21(67).

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>

ONU. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.

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>

Petrova, S., & Nikolov, B. (2023). Soil related ecosystem services in urban areas - a literature review. *Ecologia Balkanica*, 15(1), 203–231.

Philip, J. R. (1957). Theory of infiltration: The Infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83(5), 345–358. <https://doi.org/10.1097/00010694-195705000-00002>

Plazola Zamora, L., Sahagún Sánchez, F. J., Aceves Sánchez, J., & Sánchez Romero, E. (2020). Valoración de los servicios ecosistémicos en áreas verdes. El caso del Parque Metropolitano de Guadalajara, México. *Acta Universitaria*, 30, 1–17.

<https://doi.org/10.15174/au.2020.2635>

Pouyat, R., Groffman, P., Yesilonis, I., & Hernandez, L. (2002). Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 116, S107–S118.

[https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00263-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00263-9)

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. . (1977).

Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). En *Handbook No. 537*. U.S. Department of

Agriculture, Agriculture Handbook.

Roy, S., Byrne, J., & Pickering, C. (2012). A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones.

Urban Forestry & Urban Greening, 11(4), 351–363.

<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>

Sánchez Sepúlveda, H. U. (2020). *Apoyo al diseño de un sistema municipal de áreas verdes con valor ambiental (SMAVA) para el municipio de Morelia.*

Sandstrom, U. G. (2002). Green infrastructure planning in urban sweden. *Planning Practice and Research*, 17(4), 373–385. <https://doi.org/10.1080/02697450216356>

Scharenbroch, B. C., Lloyd, J. E., & Johnson-Maynard, J. L. (2005). Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, 49(4), 283–296.

<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.12.002>

Setälä, H., Bardgett, R. D., Birkhofer, K., Brady, M., Byrne, L., de Ruiter, P. C., de Vries, F. T., Gardi, C., Hedlund, K., Hemerik, L., Hotes, S., Liiri, M., Mortimer, S. R., Pavao-Zuckerman, M., Pouyat, R., Tsiafouli, M., & van der Putten, W. H. (2014). Urban and agricultural soils: conflicts and trade-offs in the optimization of ecosystem services. *Urban Ecosystems*, 17(1), 239–253. <https://doi.org/10.1007/s11252-013-0311-6>

Setälä, H., Francini, G., Allen, J. A., Jumpponen, A., Hui, N., & Kotze, D. J. (2017). Urban parks provide ecosystem services by retaining metals and nutrients in soils.

Environmental Pollution, 231, 451–461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.010>

Teixeira da Silva, R., Fleskens, L., van Delden, H., & van der Ploeg, M. (2018).

- Incorporating soil ecosystem services into urban planning: status, challenges and opportunities. *Landscape Ecology*, 33(7), 1087–1102. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0652-x>
- 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>
- USDA, S. S. S. (1951). *Soil Survey Manual* (18a ed.).
- Vargas-Hernandez, J. G., Pallagst, K., & Hammer, P. (2018). Urban green spaces as a component of an ecosystem functions, services, users, community involvement, initiatives and actions. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.08.555730>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37, 29–38.
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15a ed.). Pearson Education.
- Wösten, J. H. M., Bouma, J., & Stoffelsen, G. H. (1985). Use of soil survey data for regional soil water simulation models. *Soil Sci. Soc. Am.*, 49, 1238–1244.
- Yang, B., & Lee, D. K. (2021). Planning strategy for the reduction of runoff using urban green space. *Sustainability*, 13(4), 2238. <https://doi.org/10.3390/su13042238>

Diana Laura Rangel Vargas Diana Laura Rangel Va...

Servicios ecosistémicos de regulación suministrados por el suelo en espacios verdes urbanos y periur

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:471304989

Fecha de entrega

2 jul 2025, 8:24 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

2 jul 2025, 8:37 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

Servicios ecosistémicos de regulación suministrados por el suelo en espacios verdes urbanos y p....pdf

Tamaño de archivo

4.9 MB

75 Páginas

13.540 Palabras

74.317 Caracteres

33% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 31%  Fuentes de Internet
- 23%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	"Servicios ecosistémicos de regulación suministrados por el suelo en espacios verdes urbanos y periurbanos de la ciudad de Morelia"	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Diana Larva Pangel Vargas	1430996h@umich.mx
Director	María Lourdes González Arqueos	lourdes.gonzalez@umich.mx
Codirector	Armando Navarrete Segueda	anavarrete@cieco.unam.mx
Coordinador del programa	Boris Chato Tchamabe	mae.geociencias-planificacion-territorio@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán 01 de Julio 2025