

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EVALUACIÓN DE INDICADORES ECOSISTÉMICOS PARA LA
GESTIÓN DEL ARBOLADO URBANO MEDIANTE I-TREE CANOPY
EN SAN MIGUEL, LIMA, PERÚ”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

CESAR ALEXIS HERMOZA CUBA

LIMA-PERÚ

2023

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente
investigación (Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

Document Information

Analyzed document	TSP (2022-I)-Cesar A. Hermoza.docx (D167130052)
Submitted	2023-05-16 14:14:00
Submitted by	Rosa María Hermoza Espezúa
Submitter email	rosamaria@lamolina.edu.pe
Similarity	4%
Analysis address	rosamaria.unalm@analysis.orkund.com

Sources included in the report

SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / MONOGRAFÍA VB FINAL BAN (1).pdf Document MONOGRAFÍA VB FINAL BAN (1).pdf (D151226382) Submitted by: rramirez@lamolina.edu.pe Receiver: rramirez.unalm@analysis.orkund.com	 5
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TESIS_MANYAHUILLCA final.docx Document TESIS_MANYAHUILLCA final.docx (D163760156) Submitted by: mmanta@lamolina.edu.pe Receiver: mmanta.unalm@analysis.orkund.com	 4
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / Documento deTesis_AlexNina.docx Document Documento deTesis_AlexNina.docx (D141795959) Submitted by: reynel@lamolina.edu.pe Receiver: reynel.unalm@analysis.orkund.com	 1
W	URL: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81rbol Fetched: 2019 10-24 08:11:23	 2
W	URL: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392019000100005 Fetched: 2021 12-20 18:48:31	 3
SA	Universidad Nacional Agraria La Molina / TSP Veliz Javier. 2023. Final (1).docx Document TSP Veliz Javier. 2023. Final (1).docx (D159829805) Submitted by: grivera@lamolina.edu.pe Receiver: grivera.unalm@analysis.orkund.com	 2
SA	2A_Angulo_Paz_Carlos_Titulo_Profesional_2018.docx Document 2A_Angulo_Paz_Carlos_Titulo_Profesional_2018.docx (D40031665)	 1
SA	G.Orellana_trabajo final.pdf Document G.Orellana_trabajo final.pdf (D122123780)	 2
SA	BRIONES QUIROZ, JOVANA MARILÚ_TÍTULO PROFESIONAL_2021.docx Document BRIONES QUIROZ, JOVANA MARILÚ_TÍTULO PROFESIONAL_2021.docx (D116463064)	 3
SA	Practica1-EU (1).pdf Document Practica1-EU (1).pdf (D140803034)	 2
W	URL: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98592/110-214-1-PB.pdf?sequence=1&isAll Fetched: 2023 05-16 14:17:00	 3

Entired document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“EVALUACIÓN DE INDICADORES ECOSISTÉMICOS PARA LA
GESTIÓN DEL ARBOLADO URBANO MEDIANTE I-TREE CANOPY
EN SAN MIGUEL, LIMA, PERÚ”**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL**

CESAR ALEXIS HERMOZA CUBA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

**Ing. José Eloy Cuellar Bautista, Dr.
PRESIDENTE**

**Ing. Carlos Rafael Vargas Salas
MIEMBRO**

**Ing. Roxana Guillén Quispe, Mg. Sc.
MIEMBRO**

**Ing. Rosa María Hermoza Espezúa
ASESOR**

DEDICATORIA

*A mis padres,
por ser mis guías de toda la vida.*

*A mi abuelita Trini,
ejemplo de humildad, fortaleza y sacrificio.*

*A mi esposa Brenda,
por su cariño, comprensión y apoyo constante.*

*A mi tía Clory,
por ser un ejemplo de admiración y resiliencia.*

*†A mi suegro (Q.E.P.D.),
por su amistad y consejos para seguir estudiando.*

*†A Ciro (Q.E.P.D.),
por su compañerismo, complicidad y por ser mi eterno amigo.*

AGRADECIMIENTOS

A mi asesora, la ingeniera Rosa María Hermoza Espezúa, con profunda admiración y respeto, por sus enseñanzas, consejos, apoyo y guía constantes en la realización de este trabajo de suficiencia profesional.

A los miembros del jurado, por aportar con sus sugerencias y con sus diferentes puntos de vista que ayudaron a mejorar el documento.

A Esteban Pedro Bravo Pacheco subgerente de Parques y Jardines de la Municipalidad Distrital de San Miguel, por conceder los permisos del acceso a la información necesaria para elaborar el documento.

A mis ex compañeros de labores de la Municipalidad Distrital de San Miguel, especialmente a Marco Antonio Polo Ludeña, Marco Antonio Burgos Malca y a Carlos Antonio Araujo Berríos, por ayudarme y brindarme su apoyo desinteresado en obtener los datos e información relevantes para desarrollar el documento.

A toda mi familia, en especial a mis padres, hermanos y esposa, siendo ellos símbolo de unión y fortaleza en cada paso importante que doy.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del centro de trabajo	1
1.1.1 Ubicación y breve descripción.....	1
1.1.2 Actividad y funciones	1
1.1.3 Misión y visión	3
1.1.4 Organización.....	3
1.2 Descripción general de la experiencia.....	4
1.2.1 Labor desempeñada	4
1.2.2 Propuesta de mejora de la gestión ambiental.....	5
II. DESARROLLO DEL TRABAJO	7
2.1 Fundamento teórico	7
2.1.1 Marco normativo	7
2.1.2 Definiciones	8
2.1.3 Inventario forestal urbano.....	11
2.1.4 Alcances de la herramienta i-Tree Canopy.....	12
2.1.5 Importancia del arbolado o bosque urbano y periurbano	20
2.1.6 Beneficios de servicios ecosistémicos	22

2.1.7 Contaminación atmosférica	29
2.1.8 Indicadores de servicios ecosistémicos.....	34
2.2 Planteamiento de soluciones frente a la problemática	37
2.3 Metodología.....	39
2.3.1 Definición del área de estudio.....	39
2.3.2 Secuencia de actividades propuesta.....	40
2.3.3 Recopilación de información base	41
2.3.4 Levantamiento y procesamiento de información proporcionada por el inventario forestal urbano	42
2.3.5 Aplicación de la herramienta i-Tree Canopy	44
2.3.6 Análisis de información obtenida	49
2.3.7 Obtención de indicadores ecosistémicos.....	50
2.3.8 Interpretación de resultados obtenidos a partir de los indicadores de servicios ecosistémicos	52
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Resultados y discusiones.....	53
3.1.1 Información base obtenida.....	53
3.1.2 Inventario forestal.....	53
3.1.3 Herramienta i-Tree Canopy	55
3.1.4 Indicadores ecosistémicos	67
3.1.5 Aplicación de indicadores ecosistémicos en la gestión ambiental....	70
3.1.6 Nivel de beneficio obtenido por el centro laboral.....	77
3.1.7 Análisis de contribución en términos de las competencias y habilidades adquiridas	77
IV. CONCLUSIONES	78
V. RECOMENDACIONES	80
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
VII. ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación de los servicios ecosistémicos prestados en distintas ciudades...	14
Tabla 2: Clasificación de la cobertura de suelo en los centros de las ciudades irlandesas	15
Tabla 3: Remoción potencial de contaminación (en kg/año) por las copas de los árboles	15
Tabla 4: Indicadores de infraestructura verde en ciudades irlandesas.....	16
Tabla 5: Diferencias entre las características de imágenes satelitales (SIG) y i-Tree Canopy	19
Tabla 6: Estimación de σ_p (N = 1000) con diferentes p... ..	49
Tabla 7: Indicadores relacionados a la salud pública... ..	50
Tabla 8: Indicadores relacionados a la gestión ambiental... ..	51
Tabla 9: Indicadores relacionados a la cuantificación económica de remoción de contaminantes.....	51
Tabla 10: Lista de las diez especies más frecuentes (MDSM).....	54
Tabla 11: Lista de las diez especies más frecuentes (PATPAL).....	55
Tabla 12: Clases de cobertura (número de puntos, % de cobertura y área en km ²).	62
Tabla 13: Beneficios ecosistémicos de secuestro y almacenamiento de carbono... ..	63
Tabla 14: Beneficios ecosistémicos de remoción de contaminantes del aire	64
Tabla 15: Análisis de resultados y generación de indicadores ecosistémicos en San Miguel... ..	67
Tabla 16: Indicadores relacionados a la salud pública del distrito.....	68
Tabla 17: Indicadores relacionados a la remoción anual de contaminantes por árbol... ..	69
Tabla 18: Indicadores de contaminantes removidos por árbol (expresados en valor monetario)... ..	70
Tabla 19: Evolución de la arborización en el distrito de San Miguel (años 2016-2021). ..	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama resumido de la MDSM...	3
Figura 2: Clasificación de los servicios ecosistémicos...	23
Figura 3: Efectos de los contaminantes del aire en la salud...	30
Figura 4: Relación de cantidad de árboles per cápita en distintas ciudades...	37
Figura 5: Porcentaje (%) de cobertura arbórea en distintas ciudades...	37
Figura 6: Punto de referencia de ubicación del “Parque de las Leyendas” en San Miguel...	40
Figura 7: Secuencia de actividades en la metodología del trabajo...	41
Figura 8: Efecto del valor de CAU en el σ_p estimado y el número de muestras aleatorias...	48
Figura 9: Vista previa de los resultados después de guardar el proyecto con 3 000 puntos...	57
Figura 10: Imagen satelital del reporte de resultados en el distrito de San Miguel...	59
Figura 11: Imagen del mapa del reporte de resultados en el distrito de San Miguel...	60
Figura 12: Gráfico de columnas de clases de cobertura en % y en km ² del distrito de San Miguel...	61
Figura 13: Gráfico de columnas de la remoción de contaminantes del aire...	65
Figura 14: Gráfico circular de la valorización estimada de la remoción de contaminantes...	66
Figura 15: Gráfico resumen de la remoción de contaminantes anuales (servicios ecosistémicos)...	67
Figura 16: Campaña sembrando futuro: Malecón Av. Costanera...	71
Figura 17: Campaña sembrando futuro: I.E. N° 024 Rosa Irene Infante...	72
Figura 18: Programa “Árboles de Lima” en las áreas verdes de San Miguel...	73
Figura 19: Árboles de Tulipán africano en Parque Juan Pablo II...	74

Figura 20: Arborización diversificada en Parque Juan Pablo II... ..	75
Figura 21: Arborización diversificada en Malecón Bertolotto... ..	75

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Porcentajes de coberturas en ciudad de Tuxtla Gutiérrez usando i-Tree Canopy...	90
Anexo 2: Inundaciones en superficies y % de cobertura arbórea en la Cuenca del río Sabinal (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México).....	91
Anexo 3: Pantalla de inicio de la herramienta i-Tree Canopy...	92
Anexo 4: Establecimiento manual de límites, vista satelital...	93
Anexo 5: Establecimiento manual de límites, vista de mapa...	94
Anexo 6: Creación de cobertura de suelos.....	95
Anexo 7: Configuración de zonas, moneda local y de unidades de medida.....	96
Anexo 8: Ejemplo de encuesta y toma de datos.....	97
Anexo 9: Ejemplo de reporte de resultados: Gráfico de columnas e imagen satelital... ..	98
Anexo 10: Ejemplo de reporte de resultados: Gráfico de columnas y cuadro de coberturas.....	99
Anexo 11: Ejemplo de reporte de resultados: Cuadro de beneficios... ..	100
Anexo 12: Reporte de resultados (gráfico de columnas y cuadros de coberturas).....	101
Anexo 13: Reporte de resultados (cuadro de beneficios estimados de remoción de contaminantes).....	102
Anexo 14: Punto número 15 de la encuesta de puntos... ..	103
Anexo 15: Punto número 682 de la encuesta de puntos... ..	104
Anexo 16: Punto número 685 de la encuesta de puntos... ..	105
Anexo 17: Punto número 837 de la encuesta de puntos... ..	106
Anexo 18: Punto número 838 de la encuesta de puntos... ..	107
Anexo 19: Punto número 949 de la encuesta de puntos... ..	108
Anexo 20: Punto número 1088 de la encuesta de puntos... ..	109

Anexo 21: Punto número 1612 de la encuesta de puntos... ..	110
Anexo 22: Punto número 1630 de la encuesta de puntos... ..	111
Anexo 23: Punto número 1632 de la encuesta de puntos... ..	112
Anexo 24: Punto número 2483 de la encuesta de puntos... ..	113

RESUMEN

Este documento sustenta la experiencia laboral como coordinador general en la Subgerencia de Parques y Jardines de la Municipalidad Distrital de San Miguel, donde se describe la aplicación de una herramienta digital con el fin de realizar el diagnóstico sobre la problemática ambiental del distrito, proponiendo mejoras vinculadas a la gestión ambiental. Como objetivo general se planteó evaluar los indicadores de servicios ecosistémicos del arbolado urbano usando la herramienta i-Tree Canopy para contribuir con un mejor manejo y gestión ambiental en el distrito de San Miguel. Para ello, se analizó la información proporcionada por el inventario forestal urbano, se reunió información demográfica y de áreas verdes, y se cuantificó la captura de carbono y la remoción de los principales agentes contaminantes del aire, aplicando la herramienta digital; así como interpretar los resultados obtenidos a partir de los indicadores ecosistémicos para proponer mejoras en el manejo de la cobertura arbórea. La metodología aplicada se basó en definir el área de estudio, diseñar el plan de trabajo de acuerdo a la problemática encontrada, levantar y procesar la información relevante obtenida a partir del inventario; posteriormente, aplicar la herramienta i-Tree Canopy, analizar los resultados, los mismos que permitieron identificar los insumos para la obtención de los indicadores ecosistémicos. El inventario forestal urbano identificó un total de 22 123 individuos de porte arbóreo; aplicando i-Tree Canopy se halló que el contaminante más removido fue el ozono (O₃) con más de 7,8 toneladas/km²/año, seguido de PM₁₀ con más de 2,2 toneladas/km²/año y que se secuestró 1 635,91 toneladas/km²/año de CO₂ (equivalente); asimismo, como indicadores principales se tuvo que la cobertura arbórea per cápita fue de 9,4 m²/habitante y que existen 0,14 árboles/persona. Estos resultados permitieron reajustar el plan de trabajo para mejorar la gestión del arbolado urbano, a través del incremento y diversificación de especies en la arborización.

Palabras clave: indicadores, inventario forestal, arboricultura urbana, gestión ambiental, contaminantes.

ABSTRACT

This document supports the work experience as general coordinator in the Department of Parks and Gardens of the District Municipality of San Miguel, where the application of a digital tool is described in order to carry out the diagnosis of the environmental problems of the district, proposing improvements related to environmental management. As a general objective, it was proposed to evaluate the indicators of ecosystem services of urban trees using the i-Tree Canopy tool to contribute to better management and environmental management in the district of San Miguel. For this, the information provided by the urban forest inventory was analyzed, gathering demographic and green area information, quantifying carbon sequestration and the removal of the main air pollutants, applying the digital tool, as well as interpreting the results obtained from based on ecosystem indicators to propose improvements in the management of tree cover. The applied methodology was based on defining the study area, designing the work plan according to the problems found, gathering and processing the relevant information obtained from the inventory; subsequently, apply the i-Tree Canopy tool, analyze the results, the same ones that allowed identifying the inputs to obtain the ecosystem indicators. The urban forest inventory identified a total of 22 123 individuals of tree size; Applying i-Tree Canopy, it was found that the most removed pollutant was ozone (O₃) with more than 7,8 tons/km²/year, followed by PM₁₀ with more than 2,2 tons/km²/year and that were sequestered 1 635,91 tons/km²/year of CO₂ (equivalent); Likewise, the main indicators were that the tree cover per capita was 9,4 m²/inhabitant and that there are 0,14 trees/person. These results allowed readjusting the work plan to improve the management of urban trees, through the increase and diversification of species in the afforestation.

Keywords: indicators, forest inventory, urban arboriculture, environmental management, pollutants.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del centro de trabajo

1.1.1 Ubicación y breve descripción

La Subgerencia de Parques y Jardines (SPJ) es una de las tres subgerencias de la Gerencia de Gestión Ambiental y Servicios a la Ciudad (GGASC) de la Municipalidad Distrital de San Miguel (MDSM). Su oficina y almacén se encuentran ubicados en la calle Comandante Ladisiao Espinar N°117-119 en San Miguel, punto de partida desde donde se recorría diariamente todo el distrito para poder realizar los trabajos programados.

1.1.2 Actividad y funciones

De acuerdo con los artículos 1°; 2°; 3° y 4° de la Ordenanza Municipal N°403 (MDSM 2020), la MDSM es el órgano autónomo de gobierno promotor del desarrollo local, con personería jurídica de derecho público y plena capacidad para el cumplimiento de sus fines, aplica las leyes y disposiciones de conformidad con las facultades establecidas en la Constitución Política del Perú y tiene su origen en la Ley N°4101. Esta institución edil ejerce jurisdicción en el Distrito de San Miguel, de la Provincia y Departamento de Lima, dentro de las competencias descritas en la Ley Orgánica de Municipalidades. Asimismo, representa al vecindario, promueve la adecuada prestación de los servicios públicos locales y el desarrollo integral, sostenible y armónico de su circunscripción. Son fines de la Municipalidad Distrital de San Miguel los siguientes:

- a. Promover el desarrollo económico sostenible y armónico del distrito.

- b. Promover y elevar el desarrollo social del distrito e integrar los distintos estilos de vida de la población.
- c. Asegurar la representación política y organizacional de los vecinos en el Gobierno Local, promoviendo, concertando e integrando acciones con la sociedad civil y entidades públicas.
- d. Fomentar el bienestar de los vecinos mediante la adecuada prestación de los servicios públicos, satisfaciendo sus necesidades de seguridad, salubridad, cultura, recreación, desarrollo urbano, tránsito, transporte y otros en el marco de competencias del Gobierno Local.

Por otro lado, de acuerdo con el artículo 45° de la Ordenanza Municipal N°403 (MDSM 2020), la Subgerencia de Parques y Jardines (SPJ) es una de las tres unidades orgánicas que se encuentran bajo el cargo de la Gerencia de Gestión Ambiental y Servicios a la Ciudad (GGASC); la misma que tiene dentro de sus diferentes funciones las siguientes:

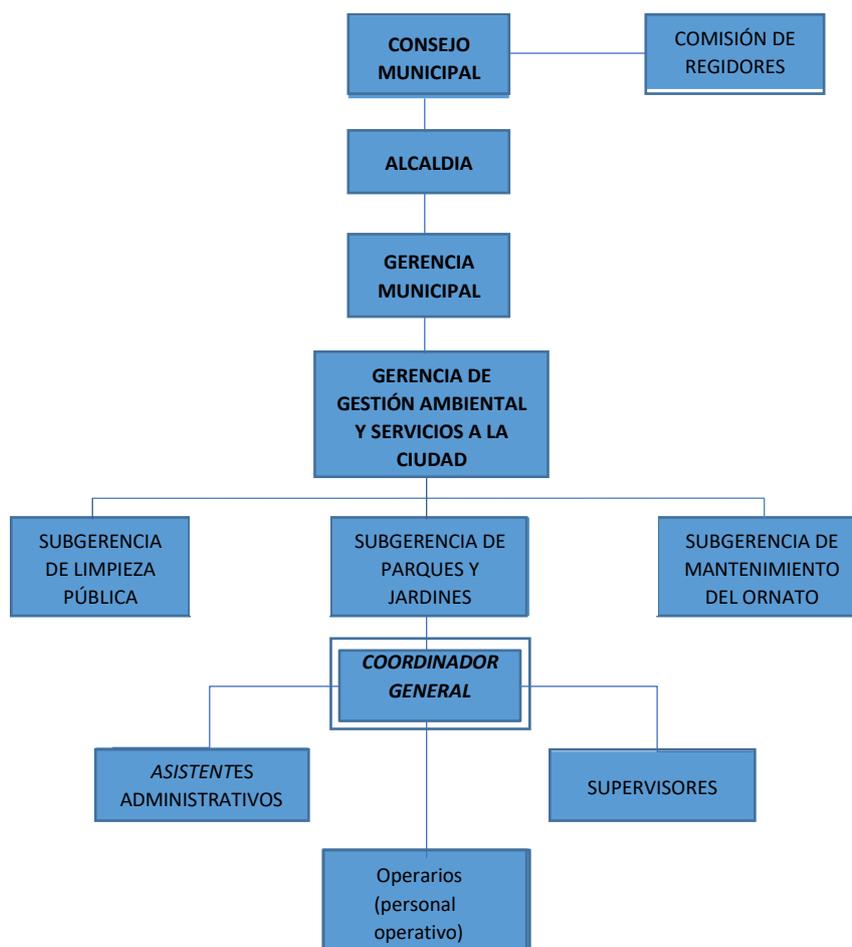
- Planear, conducir y supervisar las actividades relacionadas con el medio ambiente, esto es, la limpieza pública, la conservación y protección del hábitat, así como el control de la contaminación ambiental, sea aire, agua, tierra y ruidos.
- Dirigir programas de educación ecológica en coordinación con entidades públicas y privadas relacionadas con la actividad, a fin de promover la conservación ambiental y el eco hábitat.
- Formular procedimientos destinados a regular el equilibrio entre el desarrollo económico, la conservación ambiental y el empleo de los recursos naturales en el distrito.
- Conducir el Programa de Gestión Ambiental (PGA) en el distrito, elaborando políticas, normas e instrumentos que sean necesarios para garantizar el cumplimiento de las obligaciones y responsabilidades en el marco de la ley general del ambiente.
- Conformar la Comisión Ambiental Municipal (CAM) y regular los comités que fueren creados dentro de esta.
- Proponer y ejecutar los estudios, planes, programas y proyectos necesarios para el cuidado y promoción del medio ambiente, exigidas por el Ministerio del Ambiente.

1.1.3 Misión y visión

La municipalidad tiene la misión de: “Promover el desarrollo integral y sostenible de la comunidad San Miguelina de manera inclusiva, con calidad de servicios y gestión municipal moderna”. Asimismo, tiene la visión de: “Al 2030, San Miguel es un distrito seguro, ordenado, saludable, moderno, competitivo, turístico y sostenible, con habitantes que gozan de calidad de vida y que disfrutan de zona de playa con infraestructura de servicios a lo largo de su litoral” (Municipalidad Distrital de San Miguel [MDSM], s.f.).

1.1.4 Organización

Figura 1
Organigrama resumido de la MDSM



Fuente: Reglamento de Organización y Funciones de la MDSM (2021).

1.2 Descripción general de la experiencia

1.2.1 Labor desempeñada

Las labores desarrolladas como coordinador general de la Subgerencia de Parques y Jardines de la MDSM consistieron en el manejo y gestión de todas las actividades diarias de mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito, que fueron previamente coordinadas con el subgerente y los supervisores a cargo de cada actividad específica. Asimismo, el coordinador general era el segundo al mando en las labores operativas y de gestión; el mismo que elaboraba los planes de trabajo para su ejecución diaria y semanal, de acuerdo a lo solicitado por el subgerente de Parques y Jardines.

Como principales funciones y responsabilidades del cargo se tiene:

- Elaboración de planes de trabajos anuales, semestrales, mensuales, semanales y diarios para el mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito, donde se especificaban las actividades del personal operativo y las rutas de todas las unidades de transporte.
- Gestión de riesgo del arbolado urbano, coordinando las actividades con el subgerente, el supervisor a cargo y los operarios o trabajadores del árbol.
- Supervisión del correcto uso de los equipos y elementos de protección personal para cada tipo de actividad, evaluando los potenciales peligros y riesgos.
- Capacitación y charlas de seguridad y salud ocupacional para los operarios antes de cumplir con sus labores diarias.
- Comunicación directa con otras gerencias o subgerencias para la coordinación de trabajos en beneficio de la ciudad y asistencia a eventos oficiales en donde se representaba a la Subgerencia de Parques y Jardines.
- Redacción de informes y reportes dirigidos directamente al subgerente.

1.2.2 Propuesta de mejora de la gestión ambiental

Con el fin de cumplir con los compromisos y funciones de la Gerencia de Gestión Ambiental y Servicios a la Ciudad (GGASC), a través de la Subgerencia de Parques y Jardines (SPJ), se desarrollaron propuestas para mejorar la gestión ambiental del distrito, los que se basaron principalmente en el uso de herramientas e indicadores para diagnosticar y mitigar la contaminación ambiental, desarrollo de planes de trabajo con metas claras, programas de cooperación con entidades públicas y privadas, mejor selección de especies forestales y el incremento de árboles instalados (arborización); las mismas que están descritas a continuación:

Uso de herramientas e indicadores para mejor toma de decisiones

Ante la carencia de herramientas e indicadores que nos ayuden a evaluar el estado de la cobertura arbórea para poder diagnosticar y mitigar el impacto de la contaminación ambiental, se propuso la ejecución de inventarios forestales urbanos al 100% por lo menos cada 3 años, el uso de herramientas digitales del programa i-Tree (Canopy) y la obtención de indicadores ecosistémicos, los mismos que nos brindaran una mejor orientación en relación a las acciones a implementar en el futuro.

Desarrollar planes de trabajo con metas claras

Con la ayuda de las metodologías más convenientes, el uso de herramientas e indicadores se podrán desarrollar mejores planes de trabajo a corto, mediano o largo plazo, debido a que se contará con información necesaria para proponer metas más claras año a año.

Programas de cooperación con entidades públicas y privadas

Siguiendo con el cumplimiento de los compromisos y funciones de la GGASC se propone generar programas de cooperación con empresas privadas y asociaciones vinculadas a la arboricultura urbana, así como con la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML), otras municipalidades e instituciones de educación básica

(colegios) y de educación superior (institutos y universidades), con el fin de lograr los objetivos propuestos.

Mejor selección y variedad de especies forestales a instalar

Los resultados obtenidos del inventario forestal urbano, de la herramienta i-Tree Canopy y de los conocimientos adquiridos permitieron aplicar criterios técnicos más sólidos para elegir adecuadamente las especies a plantar en el programa de arborización de distrito.

Incremento de la arborización

Una de las propuestas más importantes es la de incrementar la tasa de arborización anual en el distrito, trabajando de manera conjunta la recuperación de áreas sin cobertura vegetal y la selección de especies forestales más adecuadas, esto ayudará a mejorar los indicadores de servicios ecosistémicos, en beneficio de la población sanmiguelina.

II. DESARROLLO DEL TRABAJO

2.1 Fundamento teórico

2.1.1 Marco normativo

Los objetivos del trabajo se encuentran relacionados con el seguimiento y el cumplimiento del marco normativo vigente, el cual se describe a continuación:

- Constitución Política del Perú de 1993 (con todas sus modificaciones hasta la fecha).
- Ley N°4101: División del distrito de Magdalena del Mar y creación del distrito de San Miguel con categoría de villa.
- Ley Orgánica de Municipalidades (Ley N°27972): Establece normas sobre la creación, origen, naturaleza, autonomía, organización, finalidad, tipos, competencias, clasificación y régimen económico de las municipalidades; así como su relación entre ellas.
- Ordenanza Municipal N°403/MDSM: Según el artículo 45, la Subgerencia de Parques y Jardines (SPJ) es una de las tres unidades orgánicas que se encuentran bajo el cargo de la Gerencia de Gestión Ambiental y Servicios a la Ciudad (GGASC).
- Ordenanza N°1852/MML: Ordenanza que promueve la conservación y Gestión de áreas verdes en la provincia de Lima.
- Ley General del Ambiente (Ley N°28611): Establece principios y normas básicas que aseguran el correcto ejercicio del derecho a un ambiente saludable; así como el cumplimiento del deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente, con el fin de mejorar la calidad de vida de la población y lograr el desarrollo sostenible del país.

- Ley Marco del Sistema Nacional de Gestión Ambiental (Ley N°28245): Asegura el más eficaz cumplimiento de los objetivos ambientales de las entidades estatales.
- Ley de Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (Ley N°30215): Promueve, regula y supervisa los mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos que devienen de acuerdos voluntarios, estableciendo acciones de conservación, recuperación y uso sostenible que asegura la permanencia de todo tipo de ecosistemas.
- Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire (Decreto Supremo N°074-2001-PCM): Norma que busca proteger la salud, establece los estándares nacionales de calidad ambiental del aire y los lineamientos de estrategia para alcanzarlos progresivamente en el tiempo mediante el uso de distintas herramientas y metodologías.
- Otras normas legales de carácter administrativo y operativo que regulen la gestión ambiental.

2.1.2 Definiciones

Arbolado urbano: son las especies arbóreas tratadas de forma conjunta. Su existencia involucra al terreno donde estos se asientan y el espacio mínimo vital necesario para su adecuado desarrollo y estabilidad (MML, 2014).

Áreas verdes: son aquellas áreas o espacios verdes, capaces de sostener o en donde se pueden establecer toda clase de especies vegetales (plantas de cobertura, arbustos, macizos florales, palmeras, árboles, entre otros) sin restricción alguna y están conformados por el subsuelo, el suelo y los aires (MML, 2014).

Áreas verdes de uso público: constituyen áreas o espacios verdes de dominio y uso público ubicados en los parques, plazas, paseos, alamedas, malecones, bosques naturales o creados, jardines centrales o laterales de las vías públicas o de intercambios viales, y en general, los aportes para recreación pública establecidos en las habilitaciones urbanas, los cuales se pueden encontrar cubiertos o no de vegetación (MML, 2014).

Cobertura arbórea o forestal: porcentaje del terreno cubierto por una proyección vertical del perímetro exterior de la propagación natural del follaje de las plantas (IPCC, 2003, como se citó en FAO, 2016b).

Contaminante del aire: sustancia o elemento que en determinados niveles de concentración en el aire genera riesgos a la salud y al bienestar humano (PCM, 2001).

Ecosistema: es el sistema natural de organismos vivos que interactúan entre sí y con su entorno físico como una unidad ecológica. Los ecosistemas son la fuente de los servicios ecosistémicos. También es considerado como ecosistema generador de dichos servicios aquel recuperado o establecido por intervención humana (MINAM, 2014).

Elección de especies: es la selección de especies, tanto para el arbolado como para las demás especies vegetales, y debe tomar en consideración diferentes criterios como las condiciones del medio físico, espacio disponible, estética y variedad, mínimo mantenimiento y consumo de agua (MML, 2014).

Especie arbórea: toda especie de planta perenne de tallo leñoso que se ramifica a cierta altura del suelo y que producen ramas secundarias nuevas cada año que parten de un único fuste o tronco, dando lugar a una nueva copa separada del suelo; se incluye también en esta definición a todas las especies de palmeras (MML, 2014).

Estándares de calidad del aire: son estándares primarios que consideran los niveles de concentración máxima de contaminantes del aire que en su condición de cuerpo receptor es recomendable no exceder para evitar riesgo a la salud humana, los que deberán alcanzarse a través de mecanismos y plazos detallados en la presente norma (PCM, 2001).

Indicador: es una medida cualitativa o cuantitativa observable, que permite describir características, comportamientos o fenómenos, a través de su comparación con períodos anteriores o con metas o compromisos; asimismo, es un enunciado que define una medida sobre el nivel de logro en el resultado, los productos y/o actividades (MEF *et al.*, 2015).

Inventario distrital de áreas verdes y arbolado urbano: herramienta metodológica con el que las municipalidades distritales elaboran y mantienen actualizada la información de las áreas verdes y arbolado urbano de su jurisdicción, usando los formatos de la Gerencia del Ambiente de la MML a fin de homogenizar criterios en el desarrollo y procesamiento de la información; los mismos que serán actualizados cada tres (3) años y serán remitidos a la Gerencia del Ambiente de la Municipalidad Metropolitana de Lima o la entidad delegada, para incorporarlo al Inventario Metropolitano de Áreas Verdes (MML, 2014).

Servicios ambientales: son servicios que los procesos naturales de un ecosistema nos brindan y que satisfacen indirectamente o directamente necesidades de la población humana como la filtración del aire, regulación del microclima, producción de sombra, filtración de rayos ultravioleta, reducción del ruido, captación de agua, recreación y cultura, producción de alimentos y control de la erosión de los suelos, entre otros (MML, 2014).

Servicios ecosistémicos: son aquellos beneficios económicos, sociales y ambientales, directos e indirectos, que las personas obtienen del buen funcionamiento de los ecosistemas, tales como la regulación hídrica en cuencas, el mantenimiento de la biodiversidad, el secuestro de carbono, la belleza paisajística, la formación de suelos y la provisión de recursos genéticos, entre otros (MINAM, 2014).

Silvicultura urbana: conjunto de técnicas que tienen por finalidad el cultivo, mantenimiento, planificación y ordenación de los árboles dentro de los límites de una ciudad y en su periferia con miras a servir para el bienestar colectivo y calidad de vida de la población urbana (MML, 2014).

Valorización económica del arbolado urbano: es el valor ligado a su naturaleza de patrimonio natural dado por factores como la especie, dasometría, estado físico y sanitario, afectación urbana, etc. (MML, 2014).

2.1.3 Inventario forestal urbano

Es una herramienta que está diseñada para proporcionar datos oportunos y fiables sobre los bosques urbanos, y satisfacer una creciente necesidad de información sobre árboles ubicados en comunidades donde más del 80% de la gente vive; asimismo, monitorea el estado y las tendencias de los árboles en entornos urbanos (bosques urbanos), permitiendo la evaluación de su composición y estructura, servicios ecosistémicos y valores, salud y riesgo de plagas y enfermedades. Además de la información de referencia, el inventario forestal urbano realizado por el programa de Inventario y Análisis Forestal (FIA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, proporcionará información sobre los cambios en los bosques urbanos para que los administradores ayuden a guiar o mitigar los cambios forestales y ambientales hacia los resultados deseados. El inventario forestal urbano es un paso significativo hacia un monitoreo rural- urbano más continuo y evaluaciones de "todos los árboles" que serán necesarios para abordar los desafíos que presenta la expansión urbana para las tierras rurales y forestales adyacentes (Edgar *et al.*, 2021).

Asimismo, los inventarios de los árboles urbanos en cualquier ciudad nos arrojan información muy valiosa, no sólo acerca de cuantas especies y cuantos individuos existen de cada una de ellas en una zona determinada, sino también acerca de su condición y sus necesidades de mantenimiento de árboles individuales, generando lineamientos y consideraciones en el manejo de las áreas verdes; que nos permite elaborar un plan rector de las plantaciones que se requieren con su debida planeación (López y Zamudio, 2004).

2.1.4 Alcances de la herramienta i-Tree Canopy

a. Antecedentes

La herramienta i-Tree Canopy es una aplicación de navegador web que se puede utilizar para determinar la cantidad de un área de interés cubierta por la copa de los árboles y otras superficies definidas por el usuario, generando automáticamente puntos de trazado aleatorios dentro de los límites de su área de estudio; asimismo, estima estadísticamente los beneficios de los árboles (i-Tree Tools, s.f.).

Como antecedente, se aplicó la herramienta en un estudio realizado en la localidad de Pigüé, provincia de Buenos Aires, Argentina, tomando datos del inventario forestal, en donde los resultados obtenidos tuvieron por finalidad mejorar la gestión ambiental de dicha localidad (Benedetti *et al.*, 2016). En países de la región como México, Argentina, Colombia, Chile y Brasil se han realizado estudios en base al uso de la herramienta i-Tree Canopy, entre ellos los estudios hechos por el equipo de S. López (especialista en aplicación de i-Tree) en distintas ciudades de México y Latinoamérica, cuyos trabajos se presentaron en Lima (Perú) en los años 2018 y 2020 en talleres organizados por la US Forest Service (International Programs/programa México).

En primera medida a través de i-Tree Canopy se identifica el porcentaje de cobertura del arbolado y posteriormente se estima los servicios ecosistémicos. Es por esto que Latinoamérica ha avanzado en el uso de éste, ingresando especies vegetales, datos de clima y contaminación e incluso adaptándolo en su totalidad en México. En el caso de Colombia observamos el potencial para la gestión y valorización del arbolado urbano a través del uso de i-Tree Eco y i-Tree Canopy, los cuales han sido usados en ciudades como Medellín, pero no aún en Bogotá (Vanegas y Martínez, 2021). Aun cuando existen diferentes modelos y herramientas para la evaluación y estimación de servicios ecosistémicos, i-Tree cada vez es acogida por más países. Como es el caso de China, en ciudades como Luohe, donde se utilizó la herramienta

para estimar los servicios proporcionados por distintas coberturas evaluadas (Song *et al.*, 2020, como se citó en Vanegas y Martínez, 2021).

Otro dato a destacar en el trabajo realizado con la aplicación de herramientas i-Tree (Eco y Canopy) en Colombia, es que las especies que mayor cantidad de carbono secuestran y almacenan carbono son el *Eucalyptus globulus* como principal especie en la localidad de Suba (captura 13,9%, almacenado 18,4%) y Bosa (captura 33,8%, almacenado 53,5%), estando en también especies con mayor almacenamiento y captura, como el *Fraxinus chinensis*, *Cupressus lusitanica* y *Acacia decurrens* siendo todas especies introducidas; sin embargo, encontramos especies nativas (*Salix humboldtiana* y *Ficus soatensis*) con valores representativos en la captura anual (Vanegas y Martínez, 2021).

En otra investigación realizada aplicando la herramienta i-Tree en el bosque urbano del Valle de Aburrá (Colombia), se concluyó que esta cobertura arbórea remueve aproximadamente 228 t de contaminantes atmosféricos al año, lo que equivale a un valor monetario de \$2 130 136,00 USD y que con el fin de optimizar este servicio ecosistémico, se requerirá seleccionar las especies arbóreas con las características que faciliten la remoción (copa densa, follaje permanente, alta área foliar, superficies foliares cerosas y pubescentes) y los diseños florísticos en los que se constituya una barrera lateral densa y porosa, y que a su vez permita la dispersión vertical de los contaminantes. Se recomendó avanzar en el conocimiento de las especies que tengan los rasgos funcionales asociados a este servicio y que, además, toleren la contaminación del aire, dado que el estado de salud del árbol repercute en el cumplimiento de sus funciones (Arroyave *et al.*, 2018).

Por otro lado, como se observa en la Tabla 1, se comparan los servicios ecosistémicos prestados en distintas ciudades. Se debe tener en cuenta que los resultados de cada estudio dependen de las características propias de cada ciudad, como lo son las condiciones climáticas que pueden afectar la estructura y funciones del arbolado urbano (González, 2019, como se citó en Vanegas y Martínez, 2021).

Tabla 1***Comparación de los servicios ecosistémicos prestados en distintas ciudades***

Ciudad	Suba	Fontibón	Bosa	Medellín (González, 2019)	Leon Guanajuato (De La Concha, 2020)	Valle de Aburrá (Arroyave et al., 2019)
Número de árboles evaluados	5.056	2.139	361	2.263	760	687.867
Remoción contaminantes (ton/año)	0,712	0,3	0,079	1	139 *	228
Captura Carbono (ton)	44,93	18,93	2,414	40	3,99	4.669
Almacenamiento Carbono (ton)	2000,44	914	148,8	807	135,2	241.264

Nota: Esta tabla compara los servicios ecosistémicos de varias zonas y ciudades de Colombia (Suba, Fontibón, Bosa, Medellín y Valle de Aburrá) y de México (León, Guanajuato), los mismos que contrastan con el distrito de San Miguel. Fuente: Vanegas y Martínez, 2021.

Se ha demostrado que, en Brasil, el aumento del 9% en los árboles puede eliminar 16,8 kg de PM10 al año, con el beneficio económico de 390 reales, usando i-Tree Canopy. Los resultados simulados pueden ser importantes para la implementación de acciones de control de la contaminación del aire. Asimismo, se encontraron 97 especies arbóreas cuantificadas en el área del mercado municipal de Saõ Paulo, que representaban solo el 5% del área total. Teniendo en cuenta los niveles de 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (por encima de los estándares nacionales) de PM10 en el área central de Aracaju, se observa que es necesario al menos el 20% de cobertura arbórea para alcanzar el límite de buena calidad del aire, con un nivel de hasta 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Anjos *et al.*, 2018).

En Irlanda se evaluó el bosque urbano y su beneficio ambiental en siete ciudades irlandesas utilizando la herramienta i-Tree Canopy. Con base en los resultados, los autores mostraron la necesidad de guiar las políticas para mejorar la calidad del aire maximizando la infraestructura verde de las ciudades (Mills *et. Al*, 2015). Los resultados de su investigación usando i-TreeCanopy se resumen en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2**Clasificación de la cobertura de suelo en los centros de las ciudades irlandesas**

Land-cover	Belfast	Cork	Derry	Dublin	Galway	Limerick	Waterford
Tree	3.54±0.26	9.12±0.41	16.2±0.52	4.52±0.29	6.64±0.35	10.6±0.44	6.14±0.34
Shrub	0.86±0.13	0.98±0.14	4.74±0.30	1.24±0.16	4.78±0.30	8.10±0.39	7.10±0.36
Grass	4.20±0.28	21.1±0.58	14.8±0.50	3.68±0.27	14.6±0.50	11.6±0.45	14.7±0.50
Road	36.4±0.68	26.4±0.62	9.92±0.42	18.4±0.55	13.2±0.48	13.0±0.48	14.3±0.50
Roof	32.0±0.66	31.1±0.65	24.7±0.61	39.6±0.69	22.1±0.59	24.1±0.60	28.3±0.64
Other Impervious	17.7±0.54	6.06±0.34	11.9±0.46	28.5±0.64	18.0±0.54	18.9±0.55	13.7±0.49
Water	4.44±0.29	5.10±0.31	14.2±0.49	3.88±0.27	11.3±0.45	12.3±0.46	13.8±0.49
Other	0.78±0.12	0.10±0.04	3.52±0.26	0.28±0.07	9.46±0.41	1.42±0.17	1.88±0.19
Land area (ha)	300	300	269	302	279	275	271
Green (%)	8.67	31.23	37.04	9.47	28.74	30.74	28.48
Impervious (%)	86.78	63.62	48.22	86.74	58.87	56.81	57.38

Basada en 5000 puntos seleccionados al azar dentro de un área circular (radio de 1 km) utilizando el software i-Tree Canopy, los mismos que pueden ser comparados con ciudades como San Miguel. Fuente: Mills *et al.* (2015).

Por otro lado, como referencia, se estima que la ciudad de Dublín (115 km²) emite 5 millones de toneladas de CO₂ por año; si esto se distribuye de manera uniforme, entonces la mayor área de estudio emite alrededor de 136 000 000 kg. En otras palabras, la copa de los árboles en esta área necesitaría 850 años para secuestrar la emisión anual actual; alternativamente, el stock de árboles existente almacena 34 años de emisiones actuales (Codema, 2010, como se citó en Mills *et al.*, 2015).

Tabla 3**Remoción potencial de contaminación (en kg/año) por las copas de los árboles**

City	CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀	CO _{2sg}	CO _{2st}
Belfast	14.1	77.8	601.0	38.3	30.7	170.6	124224	3133631
Cork	36.4	200.6	1548.3	98.6	79.1	439.5	320035	8073084
Derry	64.6	356.3	2750.3	175.1	140.5	780.7	568484	14340346
Dublin	18.0	99.4	767.4	48.8	39.2	217.8	158614	4001134
Galway	26.5	146.0	1127.3	71.8	57.6	320.0	233008	5877772
Limerick	42.3	233.1	1799.6	114.6	91.9	510.8	371971	9383190
Waterford	24.5	135.0	1042.4	66.4	53.2	295.9	215462	5435168

Estas estimaciones se basan en multiplicadores derivados de una extensa investigación realizada sobre los bosques urbanos y la calidad del aire ambiental en los EE. UU., que se emplean en el modelo i-Tree Canopy, los mismos que pueden compararse con ciudades como San Miguel. Fuente: Mills *et al.* (2015).

Tabla 4***Indicadores de infraestructura verde en ciudades irlandesas***

City	Green area (ha)	Tree canopy (ha)	Population in city centre	Green per cap.	Tree canopy per cap.
Belfast	26.0	11.1	9199	0.28	0.12
Cork	93.7	28.6	22151	0.42	0.13
Derry	99.6	50.9	9282	1.07	0.55
Dublin	28.6	14.2	40385	0.07	0.04
Galway	80.2	20.8	11896	0.67	0.18
Limerick	84.5	33.3	15602	0.54	0.21
Waterford	77.2	19.3	11728	0.66	0.16

La población residente dentro de las áreas del centro de la ciudad se estimó a partir de los censos de 2011 de Irlanda del Norte e Irlanda. Área total estimada (ha) y el área per cápita (m² per cápita). Fuente: Tabla adaptada de Mills *et al.* (2015).

Otro estudio demuestra que la clasificación de 7 939 puntos aleatorios en la ciudad estimó que Oxford tenía más del 21 por ciento de la cubierta del dosel (árboles, bosques, arbustos) y más del 48% de la cubierta verde (áreas que incluyen pasto, etc.). Esta estimación proporciona una línea de base para la cobertura de copas de los árboles del 21,4 por ciento con intervalos de confianza del 95 por ciento (Rogers *et al.*, 2015). Por otro lado, cuanto mayor es el número de puntos, menor es el margen de error de la estimación (Richardson y Moskal, 2014, como se citó en Anjos *et al.*, 2018).

En un estudio realizado en la ciudad de Woodland (California), se determinó los beneficios ambientales del bosque urbano (árboles públicos y privados) analizando la cobertura del suelo con i-Tree Canopy (v6.1). El análisis estima que los árboles de Woodland proporcionan anualmente \$568 075,00 USD en beneficios para la calidad del aire y la reducción de la escorrentía, lo que contempla eliminar 40 toneladas de contaminantes del aire, incluido el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el ozono (O₃), el dióxido de azufre (SO₂), y material particulado (PM10), valorado en \$181 749,00 USD. Reducir la escorrentía de aguas pluviales en 15,3 millones de galones al año, valorados en \$122 038,00 USD. Removiendo (secuestrando) 7 496 toneladas adicionales de CO₂, valoradas en \$264 288,00 USD (City of Woodland, 2018).

Según el US Forest Service-International Programs, la herramienta i- Tree Canopy nos ayuda a comparar las coberturas de copa en diferentes partes de una ciudad o región, como se indica en el estudio de J. Ayala en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez en Chiapas (USFS, 2020). De igual manera puede ayudar a identificar la cantidad de espacio disponible para plantar en proyectos de reforestación (ver Anexo 1).

Finalmente, se puede decir que i-Tree Canopy es una herramienta muy importante para estimar, de manera práctica, la cantidad de superficie impermeable que contribuye a la escorrentía de agua de lluvia (inundaciones) en las grandes ciudades, como en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez (Chiapas), la cual se ubica dentro de la cuenca del río Sabinal, y que fue estudiado también por José Félix Alaya. Asimismo, nos puede ayudar a examinar los cambios de cobertura en el tiempo (USFS, 2020) (ver Anexo 2).

b. Ventajas y desventajas

La universidad de Virginia Tech encontró que entre las ventajas del uso de i-Tree Canopy se observa que la herramienta proporciona una mayor accesibilidad a la evaluación de distintas cubiertas de suelo o cobertura, que permite analizar los tipos de cobertura más rápido que otras herramientas, no se requiere de mucho conocimiento para usarla y no se necesita un software especializado, ni datos de detección remota. Sin embargo, la herramienta tiene limitaciones inherentes relacionadas con los métodos de muestreo, debido a que los tamaños de muestra afectan la precisión de las estimaciones de tipos de suelo y debido a que no se proporciona un mapa de clasificación de pared a pared (Hwang, s.f.).

Según las notas técnicas y metodología en el uso de la herramienta, la precisión del análisis depende de la capacidad del usuario para clasificar correctamente cada punto en su clase correcta. Por lo tanto, las clases que se eligen para el análisis deben poder interpretarse a partir de una imagen aérea. A medida que aumenta el número de puntos, la precisión de la estimación aumentará a medida que disminuya el error estándar de la estimación. Si se clasifican muy pocos puntos, el

error estándar será demasiado alto para tener una certeza real de la estimación. Otra limitación de este proceso es que las imágenes de Google Earth pueden ser difíciles de interpretar en todas las áreas debido a una resolución de imagen relativamente pobre (por ejemplo, tamaño de píxel de imagen), factores ambientales o mala calidad de imagen (i-Tree Canopy, 2011)

La herramienta i-Tree Canopy es un método rápido y simple que ayuda a obtener estimaciones estadísticamente válidas para la cobertura de la cubierta y otros usos del suelo basados en el método de puntos. Su simplicidad, bajo costo y facilidad de uso significa que tiene ciertas limitaciones sobre otros métodos más caros. Por ejemplo, i-Tree Canopy no es espacialmente explícito y, por lo tanto, no hay una capa "georreferenciada" para usar en aplicaciones SIG. Además, como los valores se calculan "sobre la marcha", no se puede consultar como una base de datos. Por ejemplo, si quisiéramos averiguar la cubierta arbórea dentro de los usos de la tierra Agrícola o Residencial, se requeriría una nueva encuesta (Rogers *et al.*, 2015).

La precisión de la cobertura de copa de árboles urbanos estimada por i-Tree Canopy depende sobre todo de la capacidad del operador para interpretar correctamente las imágenes aéreas o satelitales y detectar la presencia o ausencia de cobertura de copa de árboles urbanos en cada punto de muestra. La precisión de la identificación de cobertura de árboles urbanos disminuye cuando la calidad de la imagen es pobre, debido a la baja resolución de la imagen o sombras (Richardson y Moskal, 2014, como se citó en Parmehr *et al.*, 2016). Puede suceder que los árboles suelen confundirse con arbustos, o incluso hierbas altas, lo cual puede conducir a una sobreestimación de puntos de muestras aleatorias. Asimismo, la precisión de la cobertura de la copa de los árboles estimados por i-Tree Canopy depende de la cantidad de puntos de muestra aleatorios. El mayor número de muestra puntos conduce a una mayor precisión de la cobertura de árboles urbanos (urban tree cover ó UTC por sus siglas en inglés) estimado. Sin embargo, la categorización de más puntos de muestra aleatorios aumenta el tiempo y, por lo tanto, el costo de la recopilación de datos. Un equilibrio entre precisión y costo es necesario para la aplicación práctica de la técnica (Parmehr *et al.*, 2016).

Por último, S. López, (i-Tree Eco México Consultant, USFS-IP), miembro del US Forest Service-International Programs (Programa México, 2020), indica, basada en su experiencia de trabajo, que la herramienta i-Tree Canopy genera datos sobre la estimación de los servicios de remoción de contaminantes, captura y almacén de carbono (C) que provee la cubierta arbolada y su valor económico; sin embargo, éste tiene menor precisión que la herramienta i-Tree Eco. Asimismo, refirió las diferencias entre las características de las imágenes satelitales en SIG y las que se ven en i-Tree Canopy, donde reflejan las ventajas y desventajas de ambas herramientas (ver Tabla 5).

Tabla 5

Diferencias entre las características de imágenes satelitales (SIG) y i-Tree Canopy

Características	Imágenes satelitales en SIG	i-Tree Canopy
Plataforma de trabajo	Se requiere de software especializado para el procesamiento de imágenes satelitales.	i-Tree Canopy genera una interfaz de trabajo sin la necesidad de instalar algún programa.
Conocimientos del usuario	Usuario con nivel intermedio de conocimientos en el procesamiento de imágenes satelitales en SIG	Usuario familiarizado con Google Earth y Google Maps.
Costo de insumo	La adquisición de imágenes y de software especializado puede ser costosa	Gratuito
Tiempo del procesamiento	Lleva más tiempo, debido a que las imágenes requieren de un procesamiento previo para la clasificación de coberturas.	Menos tiempo, pues el usuario puede iniciar la fase de clasificación de coberturas casi de manera inmediata.
Insumo utilizado	Si se cuenta con imágenes satelitales de buena calidad el resultado es mucho más robusto.	Si bien las imágenes de Google Earth cuentan con una resolución espacial aceptable, no siempre resulta suficiente
Escala	Aplicable en pequeñas a grandes escalas	Limitado en escalas pequeñas
Técnicas de clasificación	Varias técnicas de clasificación automatizadas que reducen la subjetividad del usuario.	Depende de la habilidad del usuario para reconocer y asignar correctamente los puntos a cada categoría.
Metodología	Emplea un muestreo aleatorio, técnicas de clasificación e índices para estimar la precisión de las coberturas estimadas (índice Kappa, matrices de confusión).	A través de un MAS cualitativo se calcula el porcentaje de las coberturas de interés y su error estándar.

Análisis temporal	Es posible, si se adquirieran las imágenes necesarias.	Es posible mediante imágenes de Google Earth (verificar disponibilidad).
Productos	Mapas de coberturas de visualización rápida con acceso a información detallada sobre extensión, ubicación geográfica, etc. Posibilidad de representarla según las necesidades del usuario.	Porcentaje que ocupan las coberturas de interés en el área de estudio. Cuantificación y valoración económica de los beneficios del arbolado*.

Fuente: US Forest Service-International Programs (Programa México, 2020).

2.1.5 Importancia del arbolado o bosque urbano y periurbano

El bosque urbano y periurbano son las redes o sistemas que comprenden todas las arboledas, grupos de árboles y árboles individuales ubicados en las áreas urbanas y periurbanas; incluyen, por tanto, bosques, árboles en la calle, árboles en parques y jardines y en las esquinas. Los bosques urbanos son la columna vertebral de la infraestructura verde que conecta las áreas rurales con las urbanas y mejora la huella ambiental de una ciudad (FAO, 2016b).

Es cierto que las ciudades deterioran su ambiente urbano día a día, y al mismo tiempo deterioran también los elementos capaces de mejorar esa disminución de la calidad de vida de los habitantes. El arbolado ha tenido históricamente un papel importante en el espacio público. Hoy resulta paradójico hablar del árbol urbano, ya que es probable que en lugar donde las ciudades fueron emplazadas, el árbol estaba primero, garantizando la continuidad con la naturaleza y aportando beneficios de subsistencia a la dispersa población (Priego, 2002).

El árbol urbano representa un valor muy importante para una ciudad, ya que provee servicios ecosistémicos como beneficios paisajísticos, sociales, recreativos, ambientales y económicos para la población, lo que hace que los bosques urbanos sean una pieza fundamental que ayuda a hacer una ciudad más integra. En el orden ambiental, los árboles urbanos ayudan a disminuir la contaminación atmosférica por medio de la captura de los gases contaminantes a través de sus hojas, retienen partículas que puedan causar enfermedades cardiorrespiratorias, regulan el clima de la ciudad mediante el control de la

radiación solar, y aumentan la humedad mediante la evapotranspiración, lo que ayuda a aumentar el grado de confort en las personas (Tovar, 2007, como se citó en Berrío, 2016).

El primer esfuerzo por estimar el impacto general del bosque urbano de una ciudad en relación a la captura de concentraciones de contaminación de partículas finas (partículas menores de 2.5 micrones o PM2.5), fue desarrollado por el Servicio Forestal de los Estados Unidos y el instituto Davey, demostrando que los árboles y bosques urbanos están ahorrando el promedio de una vida cada año por ciudad. En la ciudad de New York, los árboles salvan un promedio de ocho vidas cada año. Asimismo, la reducción en la mortalidad humana varió de una persona por cada 365 000 personas en Atlanta a una persona por cada 1,35 millones de personas en San Francisco (Nowak *et al.*, 2013b).

a. Uso de tierra y los bosques urbanos

Para entender mejor el concepto de bosques urbanos, se deben ver las ciudades desde el aire, porque desde esa perspectiva se puede visualizar mejor la cobertura arbórea urbana. Por ejemplo, en el este de los Estados Unidos, las ciudades parecen estar rodeadas de bosque y casi amenazadas de desaparición bajo el dosel del bosque. En lugar de que la expansión y el desarrollo urbano eliminen totalmente el bosque circundante, las nuevas subdivisiones de viviendas y negocios hacen esfuerzos significativos para preservar los árboles residuales y replantar los perdidos en la construcción. Los vecindarios construidos en tierra abierta se llenan rápidamente de árboles jóvenes; Con el tiempo, las líneas geométricas se desvanecen bajo los contornos naturales de las copas de los árboles (Miller *et al.*, 1994). Así también, los árboles son los guardianes de las áreas verdes: es mucho más difícil cambiar de uso un área verde cuando hay árboles (Rivas, 2012).

En los paisajes urbanos altamente modificados, una buena proporción de los suelos naturales puede estar cubierta y reemplazada por superficies impermeables (p.e.: pavimento, carreteras y edificaciones), lo que aumenta la

susceptibilidad de los entornos urbanos ante inundaciones y eventos climáticos extremos. La contaminación, sellado y erosión del suelo pueden afectar irreversiblemente la sanidad y resiliencia de los ecosistemas urbanos y periurbanos, disminuyendo su capacidad de contribuir al sustento y a los medios de vida de las comunidades urbanas y periurbanas (FAO, 2016b).

b. Dosel del arbolado urbano y su cuantificación

Muchos autores han identificado la cuantificación de la cubierta del dosel como uno de los primeros pasos en el manejo del bosque urbano. De ahí la importancia de este parámetro en el uso de la herramienta i-Tree Canopy. La cubierta del dosel, cubierta de copa de árbol, cubierta de árbol urbano o cubierta de dosel urbano, se puede definir como el área de hojas, ramas y tallos de árboles que cubren el suelo cuando se ve desde arriba. La cubierta del dosel es una métrica bidimensional, que indica la extensión de la cubierta del dosel en un área. Asimismo, señalan que es importante tener en cuenta que, al usar la interpretación de imágenes aéreas para determinar una cubierta de dosel, esta estimación incluirá tanto la cubierta de dosel de árboles como la de arbustos. Es difícil o imposible diferenciar entre árboles y arbustos utilizando fotografías aéreas, por lo que debe tenerse en cuenta que las figuras de la cubierta del dosel que se presentan aquí incluyen tanto árboles como arbustos (Rogers *et al.*, 2015). Se puede decir que el primer paso para reincorporar la infraestructura verde al marco de planificación de una comunidad es medir el dosel del bosque urbano y establecer metas de dosel (Schwab, 2009).

2.1.6 Beneficios de servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos, también llamados servicios ambientales, son “los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas, sean económicos o culturales” como lo definió La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés) en el año 2005; lo cuales ayudan a mantener la calidad de vida de las personas, bien sea de manera directa o indirecta (Onaindia, 2010, como se citó en Berrío, 2016). Por otro lado, los servicios ambientales o servicios ecosistémicos son los beneficios intangibles que los

diferentes ecosistemas o biomas ponen a disposición de la sociedad de manera natural y, además de influir directamente en el mantenimiento de la vida, generan beneficios y bienestar para las personas y las comunidades; entre otros elementos asociados con lo anterior, destacan los bosques, selvas, desierto, sabana y tundra (SEMARNAT, 2003:8-15).

Dentro de los servicios directos se encuentran los servicios de aprovisionamiento, que corresponden a los productos que se obtienen a través de los ecosistemas: alimentos, agua potable, madera, recursos energéticos, entre otros. Por otro lado, los servicios indirectos se clasifican en servicios de apoyo y servicios culturales. Los de apoyo corresponden a aquellos que ayudan a la producción de otros servicios ecosistémicos como la producción de oxígeno, la formación de suelos, el reciclaje de nutrientes, la producción primaria, etc. Los servicios culturales son los beneficios no materiales, sino espirituales y religiosos, recreativos, educativos, estéticos, de herencia cultural, turísticos, entre otros (Camacho y Ruiz, 2012, como se citó en Berrío, 2016) (ver Figura2).

Figura 2

Clasificación de los servicios ecosistémicos



Fuente: Camacho & Ruiz, 2012, como se citó en Berrío, 2016.

Los servicios ambientales que brindan los árboles y que más destacan entre otros son los siguientes: 1) Captura de Carbono; 2) Regulación de la temperatura; 3) Provisión de agua en calidad y cantidad; 4) Generación de oxígeno; 5) Amortiguamiento del impacto de los fenómenos naturales; 6) Protección y recuperación de suelos (estabilización de taludes); 7) Barrera contra ruidos (diversos estudios señalan que se logra una disminución del ruido hasta por 10 a 12 decibeles con la plantación estratégica de árboles); 8) Biodiversidad; 9) Paisaje y recreación (Reyes y Gutiérrez, 2010).

a. Beneficios de servicios de regulación: ambientales y sanitarios

La vegetación urbana puede directa o indirectamente afectar a la calidad del aire a nivel local o regional. Las cuatro principales formas en las que el arbolado urbano afecta a la calidad de aire son: reducción de la temperatura y efectos microclimáticos, disminución de los contaminantes atmosféricos, emisión de compuestos orgánicos volátiles y efectos energéticos en las construcciones. En estudios realizados por la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Entre Ríos (Argentina) se demostró que existía diferencia significativa entre los patrones estudiados Con Árboles/ Sin Árboles, llegando en algunos casos de 4°C de diferencia de temperatura y del hasta un 11% de diferencia en humedad (Priego, 2002). La temperatura es una de las variables más sensibles a los procesos de urbanización, registrándose valores superiores en el centro de la ciudad, respecto su entorno natural. Este efecto urbano sobre el campo térmico superficial en la ciudad se denomina “isla calórica” (Camilloni y Barros, 1991, como se citó en Priego, 2002).

Los árboles disminuyen los contaminantes gaseosos del aire por medio de la captación de éstos por las estomas de las hojas. Una vez dentro de las hojas, los gases difusos entran en los espacios intracelulares y podrían ser absorbidos por películas de agua constituyendo formas ácidas o, reaccionar con las superficies internas de la hoja. Pero sin lugar a dudas, donde la vegetación juega un papel importante es la reducción de pequeñas partículas que están en suspensión en la atmósfera (Smith, 1990, como se citó en Priego, 2002).

Algunas partículas pueden ser absorbidas por los árboles, aunque la mayoría de las partículas que son interceptadas, son retenidas en la superficie de la planta. Estas partículas que se encuentran adheridas a la superficie volverán al sistema cuando las hojas caigan o sean lavadas por la acción de la lluvia (Ziegler, 1973 y Rolfe, 1974, como se citó en Priego, 2002).

Los beneficios de los árboles en la salud y bienestar de las personas son evidentes, basta pensar en la respiración de aire limpio y fresco. Se han identificado efectos benéficos para reducir gran cantidad de enfermedades físicas y emocionales: el verde del paisaje reduce el estrés en las personas, introduciendo calma y tranquilidad, haciéndolas más productivas y felices. Se ha demostrado una recuperación más pronta en los pacientes de los hospitales que cuentan con vistas a las áreas verdes arboladas. También los niños con déficit de atención presentan un mejor comportamiento en ambientes arbolados (USDA-Forest Service, 2012, como se citó en Rivas, 2012). Asimismo, distintas pruebas en terreno han demostrado que las plantaciones de árboles y arbustos diseñadas apropiadamente pueden reducir de manera significativa el ruido (contaminación sonora). Las hojas y ramas reducen el sonido transmitido, principalmente dispersándolo, mientras el suelo lo absorbe (Aylor, 1972, como se citó en Priego, 2002).

Por otro lado, se estima que un árbol grande (superficie foliar >100 m²) retiene de 30 a 80 t/ha-año de polvo, según la especie y la densidad de la cubierta foliar (Seoáñez, 1996, como se citó en Codina *et al.*, 2002).

b. Beneficios de servicios socioculturales

Pasar tiempo cerca de los árboles mejora la salud física y mental aumentando los niveles de energía y la velocidad de recuperación, a la vez que descienden la presión arterial y el stress. Los árboles colocados de manera adecuada entorno a los edificios reducen las necesidades de aire acondicionado en un 30% y ahorran entre un 20% y un 50% de calefacción. Los árboles proporcionan hábitat, alimentos y protección a plantas y animales, aumentando la biodiversidad urbana. Asimismo, el paisajismo, especialmente

con árboles, pueden incrementar el valor de los inmuebles en al menos un 20% (FAO, 2016a).

Los árboles dan oportunidades de recreación, disminuyendo por tanto la violencia juvenil. En las áreas verdes arboladas es posible realizar diferentes actividades deportivas como caminatas, ciclismo, observación de aves, ardillas, mariposas y otras especies silvestres, estudios biológicos, fotografía, trepa, campismo, días de campo, etc. Los árboles crean un fuerte sentido de comunidad, no solamente son estéticos en sí mismos, sino que agregan belleza al paisaje circundante: dando color al escenario urbano, suavizando las rígidas líneas de los edificios, dando privacidad y sentido de aislamiento y seguridad, contribuyendo de manera general a dar carácter y sentido de pertenencia a la comunidad (Rivas, 2012).

Experiencias demuestran como vecindarios con planes de naturalización de sus barrios, trabajando, organizándose e interactuando juntos, empezaron a conocerse unos a otros, desarrollando un sentido de unidad y gratificación de lo que estaban realizando (Brunson *et al.*, 1998, Berman, 1996, Lewis, 1992, como se citó en Priego, 2002). Asimismo, en casas con áreas de más arbolado, los rangos de violencia doméstica eran menores que en idénticas casas con pocos o ningún árbol (Kuo y Sullivan, 1999, como se citó en Priego, 2002). La disminución del estrés y el mejoramiento de la salud física de los residentes urbanos han estado asociados con la presencia de árboles y bosque urbanos.

Con el embellecimiento de todas las áreas en una ciudad, por ejemplo, de igual forma los bosques urbanos pueden ayudar a reducir desigualdades sociales, ambientales y de viviendas. Al ofrecer a los residentes entornos para actividades y eventos locales, las áreas verdes pueden aumentar la cohesión social y ayudar a construir comunidades más fuertes, más estables. La existencia de árboles en la calle puede mejorar la seguridad pública, aumentando el sentido de privacidad y reduciendo los delitos (FAO, 2016b).

c. Beneficios económicos

A diferencia del árbol presente en los bosques, el árbol urbano cumple servicios sociales y ambientales y, en recientes estudios llevados a cabo en Estados Unidos y Europa, también se le asocia con un componente económico. Los árboles de acuerdo a sus diferentes hábitos de crecimiento, modifican el espacio en el cual son plantados (Priego, 2002). En Chicago un aumento del 10% de la cobertura del arbolado (tres árboles más por edificio) podría reducir la energía usada para calefacción y refrigeración entre un 5-10% (McPherson *et al.*, 1995, como se citó en Priego, 2002). Por otro lado, a un nivel nacional se estimó que plantando 3 árboles adicionales por edificio en los EE.UU. podrían ahorrarse más de US\$ 2 Billones en costos energéticos anuales (Akbari *et al.*, 1998, como se citó en Priego, 2002).

La valoración económica es un mecanismo que logra establecer las pérdidas y ganancias económicas de la sociedad por la protección, restauración y conservación del medio ambiente, o los costos por la transformación y deterioro de los recursos naturales. Asimismo, los servicios ecosistémicos se logran cuantificar económicamente mediante el cálculo del valor económico total compuesto por lo que se denomina valores de uso, que representan los beneficios que resultan del uso o aprovechamiento de un recurso que generalmente tiene un mercado asociado, y los valores de no uso, que representan los beneficios que no tienen un precio relacionado a un mercado económico y se basa en aspectos éticos, culturales, recreación de las personas, etc. (Castiblanco, 2013, como se citó en Berrío, 2016). Por otro lado, en el año 2015, el Ministerio de Medio Ambiente de la República del Perú expresó que el valor económico total tiene en cuenta que “cualquier bien o servicio ecosistémico puede estar compuesto por diferentes valores”, los cuales pueden ser fácilmente medibles (tangibles) y otros no tan fáciles de cuantificar (intangibles); siendo estos valores de uso (VU) y valores de no uso (VNU) respectivamente (Berrío, 2016).

En 1994, los árboles en la ciudad de New York (NY) removieron un estimado de 1 821 toneladas métricas de contaminantes del aire, suponiendo

un ahorro para la sociedad de US\$9,5 millones. La remoción de estos contaminantes en la ciudad de NY fue más alta que en Atlanta (1 196 t; US\$6,5 millones) y en Baltimore (499 t; US\$2,7 millones) (Nowark, 2000). Sin embargo; la eliminación de PM2.5 por los árboles urbanos es sustancialmente menor que para las partículas más grandes (PM10), pero las implicaciones para la salud son mucho más altas. La cantidad total de PM2.5 removida anualmente por los árboles varió de 4,7 toneladas métricas en Syracuse a 64,5 toneladas métricas en Atlanta, con valores anuales que varían de \$ 1,1 millones en Syracuse a \$ 60,1 millones en la ciudad de NY. La mayoría de estos valores estaban dominados por los efectos de reducir la mortalidad humana; el valor promedio por muerte reducida fue de US\$ 7,8 millones (Nowak *et al.*, 2013b).

Asimismo, también hay costos hidrológicos asociados con la vegetación urbana, particularmente en ambientes áridos donde el agua escasea crecientemente. En Tucson, Arizona, el 16% de los requerimientos anuales de riego de árboles fue compensado por los ahorros de energía brindado por los árboles (Dwyer *et al.*, 1992, como se citó en Priego, 2002). En Tucson se estudió una plantación de 500 000 árboles para calcular sus beneficios a la comunidad. Se modeló con una plantación de 40 años y se comparó la plantación, el riego, costos de poda y eliminación frente a los servicios ecológicos que aportaba. Los servicios ecológicos estudiados fueron moderación de la temperatura, filtración del polvo y retención de las escorrentías. Para los primeros 5 años, los costos pesaban más que los beneficios, pero durante los siguientes 25 años, los beneficios sobrepasaban a los costos y más de tres veces (McPherson, 1991, como se citó en Priego, 2002).

Otros estudios han demostrado que un sólo árbol puede brindar beneficios netos de hasta 50 USD/año (en base al ahorro de energía y reducción del gas carbónico, la atenuación de las escorrentías, sin tomar en cuenta otros beneficios potenciales); por cada dólar invertido en la gestión, se calcula un rendimiento anual por el orden de los 1,4–3,0 USD (FAO, 2016b).

Asimismo, en la ciudad de New York cada dólar gastado en la plantación de árboles y en su cuidado genera hasta 5,6 USD en beneficios (Peper *et al.*, 2007, como se citó en FAO, 2016b).

El establecimiento de 100 millones de árboles maduros alrededor de las residencias en EE.UU. produjo un ahorro de unos 2 000 millones de USD al año en gastos de energía (Akbari *et al.*, 1988, Donovan y Butry, 2009, como se citó en FAO, 2016b). Los árboles urbanos dentro de Estados Unidos eliminan unas 784 000 t de aire contaminado al año, a un valor de 3 800 millones USD (Nowak *et al.*, 2006, como se citó en FAO, 2016b). Por último, desde el 2006, la ciudad de Filadelfia redujo los desbordamientos de alcantarillados y mejorado la calidad del agua por medio de políticas de infraestructura verde y proyectos piloto, ahorrando unos 170 millones de USD (Boyle *et al.*, 2014, como se citó en FAO, 2016b).

2.1.7 Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. Siempre ha existido contaminación atmosférica de origen natural, pero es a partir del descubrimiento del fuego por el hombre cuando aparece la contaminación atmosférica antropogénica, la cual ha cobrado importancia, sobre todo, a partir del uso masivo de combustibles fósiles como fuente de energía. Asimismo, aunque se puede originar contaminación atmosférica por diversas formas, la principal fuente de contaminación son los procesos que implican combustión, al producirse la oxidación de los distintos elementos que componen los combustibles, las materias primas y el aire (Aránguez *et al.*, 1999).

a. Principales agentes contaminantes atmosféricos

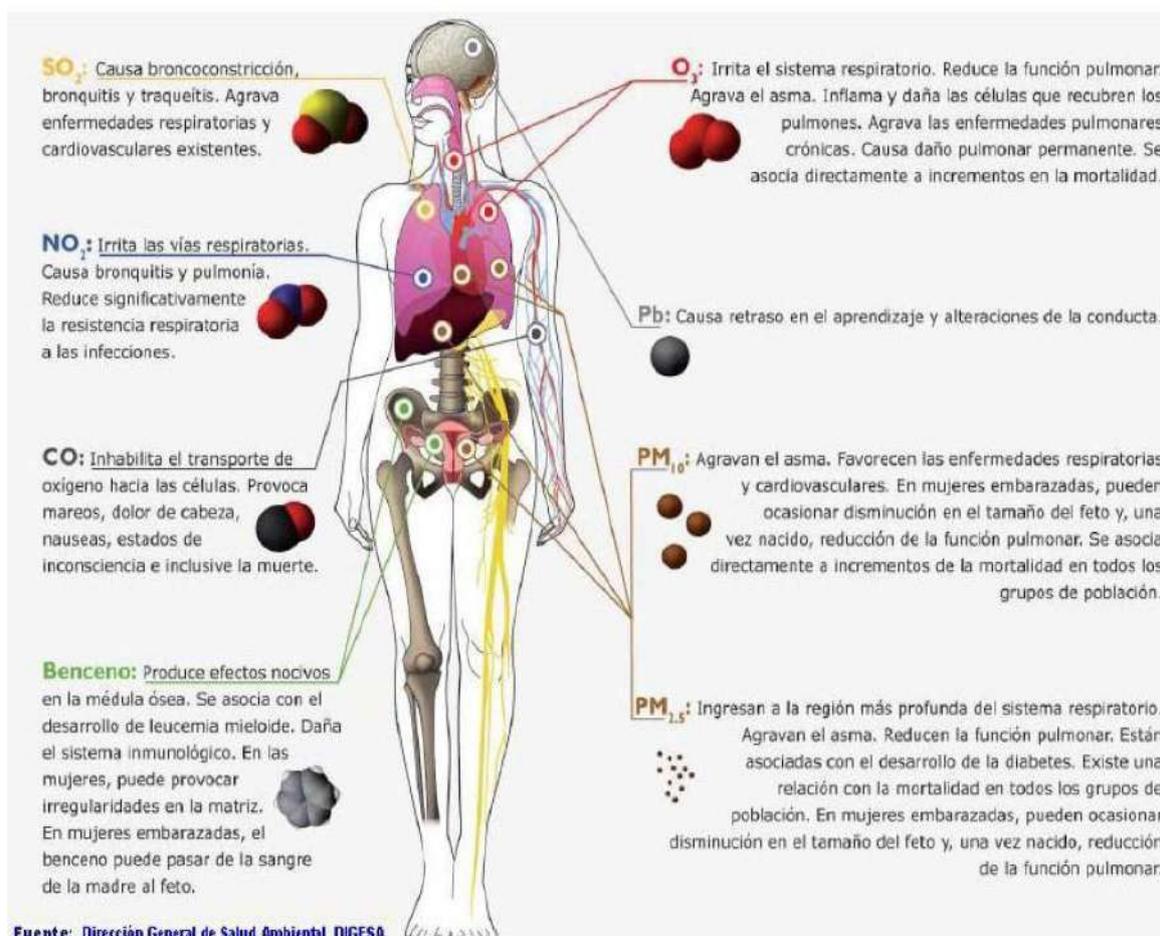
La salud humana puede verse afectada seriamente por la presencia de contaminantes en el aire, dependiendo de sus concentraciones, duración de la

exposición y susceptibilidad, principalmente material particulado (PM), O₃, NO₂ y SO₂ (DIGESA, 2011) (ver Figura 3).

Figura 3

Efectos de los contaminantes del aire en la salud

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES DEL AIRE EN LA SALUD



Fuente: Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA, 2011)

Monóxido de Carbono (CO)

Para la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, el monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro e inodoro que puede ser dañino cuando se inhala en grandes cantidades. El CO se libera cuando algo se quema. Las mayores fuentes de CO son los automóviles, camiones y otros vehículos o maquinaria que queman combustibles fósiles. Respirar aire con una alta concentración de CO reduce la cantidad de oxígeno que puede transportarse en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro. A niveles

muy altos, que son posibles en interiores o en otros entornos cerrados, el CO puede causar mareos, confusión, pérdida del conocimiento y la muerte (EPA, 2017). Para el monóxido de carbono, los valores máximos recomendados son concentraciones medias en 8 horas de 10 mg/m³ y valores máximos horarios de 30 mg/m³ (Aránguez *et al.*, 1999).

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es uno de un grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno u óxidos de nitrógeno (NO_x). NO₂ se utiliza como indicador para el grupo más grande de óxidos de nitrógeno. El NO₂ entra principalmente en el aire por la quema de combustible. El NO₂ se forma a partir de las emisiones de automóviles, camiones y autobuses, centrales eléctricas y equipos todoterreno. También se sabe que respirar aire con una alta concentración de NO₂ puede irritar las vías respiratorias. Las personas con asma, así como los niños y los ancianos, generalmente tienen un mayor riesgo de los efectos del NO₂ sobre la salud (EPA, 2017). Las guías de la OMS de calidad de aire para la Unión Europea (UE) recomendaban no superar valores horarios de 400 µg/m³ y medias diarias de 150 µg/m³; sin embargo, estos valores van a ser rebajados a 200 µg/m³ y entre 40 y 50 µg/m³ respectivamente (Aránguez *et al.*, 1999).

Ozono (O₃)

El ozono es un gas compuesto por tres átomos de oxígeno (O₃). El ozono ocurre tanto en la atmósfera superior de la Tierra como a nivel del suelo. El ozono puede ser “bueno” o “malo”, dependiendo de dónde se encuentre. Llamado ozono estratosférico, el ozono bueno ocurre naturalmente en la atmósfera superior, donde forma una capa protectora que nos protege de los dañinos rayos ultravioleta del sol. El ozono a nivel del suelo es un contaminante dañino del aire, debido a sus efectos sobre las personas y el medio ambiente, y es el ingrediente principal en el “smog”. El ozono troposférico, o al nivel del suelo, no se emite directamente al aire, sino que se crea cuando los contaminantes emitidos por automóviles, plantas de energía, calderas industriales, refinerías, plantas químicas y otras fuentes reaccionan químicamente en presencia de la luz

solar. Como consecuencia de ello, respirar ozono puede desencadenar una variedad de problemas de salud, como dolor en el pecho, tos, irritación de garganta e inflamación de las vías respiratorias (EPA, 2017). Se considera un contaminante con capacidad irritante sobre los tejidos vivos y sobre muchos materiales. Las recomendaciones de las guías de la OMS de calidad de aire sitúan los valores medios para 8 horas en $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Aránguez *et al.*, 1999).

Dióxido de azufre (SO_2)

El SO_2 es el componente de mayor preocupación del grupo más grande de óxidos de azufre gaseoso (SO_x). La mayor fuente de SO_2 en la atmósfera es la quema de combustibles fósiles por las centrales eléctricas y otras instalaciones industriales. El SO_x puede reaccionar con otros compuestos en la atmósfera para formar pequeñas partículas en suspensión (PM). Las partículas pequeñas pueden penetrar profundamente en los pulmones y en cantidad suficiente pueden contribuir a problemas de salud (EPA, 2017). Asimismo, el dióxido de azufre es un gas incoloro que a altas concentraciones puede ser detectado por su sabor y por su olor cáustico e irritante. Las guías de la OMS de calidad del aire para Europa recomiendan no superar concentraciones medias diarias de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 con máximos de 10 minutos de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores medios anuales de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Aránguez *et al.*, 1999).

Material particulado o partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀)

Las siglas “PM” significan material particulado: el término para una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Algunas partículas, como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes u oscuras como para verse a simple vista. Otros son tan pequeños que solo se pueden detectar con un microscopio electrónico. La contaminación por partículas incluye: PM₁₀ partículas inhalables, con diámetros que generalmente son de 10 micrómetros y más pequeños; y PM_{2.5}: partículas finas inhalables, con diámetros que generalmente son de 2,5 micrómetros y más pequeños. El material particulado contiene sólidos microscópicos o gotas de líquido que son tan pequeñas que pueden inhalarse y causar serios problemas de salud. Algunas partículas de menos de 10 micrómetros de diámetro pueden

penetrar profundamente en los pulmones y algunas incluso pueden ingresar al torrente sanguíneo. De estas, las partículas de menos de 2,5 micrómetros de diámetro, también conocidas como partículas finas o PM2.5, presentan el mayor riesgo para la salud (EPA, 2017).

La definición de partículas se suele establecer en términos de la velocidad de depósito de las mismas. La revisión de las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) así como la futura normativa europea, establecen límites referidos a PM10 o PM2.5 (Aránguez *et al.*, 1999). Por otro lado, se asegura que el excelente estándar para medir la calidad del aire generalmente se basa en PM2.5. Estudios recientes han demostrado que PM2.5 es más dañino que PM10, porque cuanto más pequeña es la partícula, es más fácil que ingrese al sistema respiratorio y más dañino para el cuerpo humano (Guttikunda y Rahul, 2013, como se citó en Anjos *et al.*, 2018). Finalmente, se analizaron la asociación entre PM y los ingresos hospitalarios en la ciudad de São Paulo y se descubrió que un aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en PM está asociado con un aumento de 4,6% en los ingresos por asma en niños, de 4,3% para enfermedad pulmonar obstructiva crónica y 1,5% para enfermedad cardíaca isquémica en los ancianos (Gouveia y col, 2006, como se citó en Anjos *et al.*, 2018).

b. Dióxido de carbono (CO_2) secuestrado anualmente en los árboles

La captura de carbono por la vegetación urbana se refiere a la tasa anual de captura y almacenamiento de CO_2 durante una temporada de crecimiento (anual) de la vegetación, para el caso del arbolado esta dependerá principalmente de las tasas de crecimiento (los árboles de crecimiento rápido inicialmente capturan más CO_2 que uno de crecimiento lento) (Chaparro y Terradas, 2009, como se citó en Domínguez, 2016).

La forestería puede contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro, almacenamiento y la sustitución de carbono. El monitoreo del secuestro de carbono es una herramienta fundamental en los

proyectos de mitigación (MacDiken, 1997, como se citó en Andrade e Ibrahim, 2003). En un estudio de 418 individuos, entre árboles y palmeras, con diferentes clases diamétricas, producen un total de 119,03 toneladas de biomasa y secuestran 217,87 toneladas de CO₂ (Cabudivo, 2017). En otro estudio se encontró que dentro de los resultados el *Eucalyptus globulus* secuestró la mayor parte del CO₂, con 84 374 kg de CO₂ durante el 2015 (Domínguez, 2016).

c. Carbono (C) almacenado en árboles

El contenido de carbono en la vegetación es el almacenado en la biomasa por efecto de su incorporación durante la fotosíntesis, por lo tanto, la cantidad de carbono almacenado es proporcional a su biomasa. (McPherson, 1998, Aguaron, 2012, como se citó en Domínguez, 2016). Por otro lado, la captura y fijación del CO₂ en los árboles se realiza durante su crecimiento, es decir, la tasa anual de carbono almacenado debido al incremento de su biomasa, aproximadamente 50% de la biomasa de un árbol (materia seca) es carbono (Quiñónez, 2010, Strohbach *et al.*, 2012, como se citó en Domínguez, 2016). Asimismo, se estima que la cantidad de carbono en el suelo puede ser de 2 a 4 veces más grande que el almacenado por encima del suelo (Pouyat *et al.*, 2006; Velasco *et al.*, 2016, como se citó en Domínguez, 2016).

La cantidad de carbono almacenado en un árbol depende de la densidad de su madera, es decir mientras más densa y dura la madera, más carbono contiene. Un árbol de tamaño promedio de 15 metros de altura con una densidad de madera promedio contiene alrededor de 100 kilogramos de carbono. De modo que se necesitan más o menos 10 árboles para hacer una tonelada de carbono (IWGIA *et al.*, 2010, como se citó en Cabudivo, 2017).

2.1.8 Indicadores de servicios ecosistémicos

Los indicadores son generalmente variables y proveen información agregada de cierto fenómeno. Son seleccionados para respaldar objetivos específicos de manejo, con un valor integrativo y sinóptico, que funcionan como descriptores

de cualidades, cantidades, estados o interacciones que no son directamente accesibles (Dale y Beyeler, 2001; Turnhout *et al.*, 2007; Niemeijer y de Groot, 2008; ten Brink *et al.*, 2011; como se citó en MMA, 2014). Por ende, se clasifica a los indicadores de servicios ecosistémicos como representaciones relevantes de política, para identificar brechas y comunicar tendencias sobre el uso sustentable de dichos servicios (Layke, 2011, como se citó en MMA, 2014).

Los servicios ecosistémicos son las contribuciones que los ecosistemas realizan al bienestar humano. De ahí nace la importancia de los indicadores, porque estos simplifican la información de manera que ésta pueda ser fácilmente comunicada y entendida. Con los indicadores, los planificadores pueden basar sus decisiones en evidencia concreta, identificar y priorizar intervenciones, monitorear el progreso de objetivos, e informar acciones de corrección de manera oportuna (Haines-Young y Potschin, 2010, como se citó en Nahuelhual *et al.*, 2016). Los indicadores de servicios ecosistémicos en particular hacen posible que tomadores de decisión conozcan y entiendan la condición, tendencias y tasas de cambio de los servicios ecosistémicos (Nahuelhual *et al.*, 2016).

Los indicadores de rendimiento para los servicios ecosistémicos y los esquemas de pago por el suministro de esos servicios necesitan más desarrollo. Los servicios ecosistémicos a menudo se dejan de un lado en los debates económicos, a pesar de que son esenciales para ciudades saludables y dinámicas. La creación de métodos de medición de su valor contribuiría a aumentar la sensibilización pública sobre ellos. La cartografía de servicios ecosistémicos potenciales suministrados por los bosques urbanos y demás áreas verdes es una forma para elaborar estimaciones de los beneficios para las comunidades urbanas. Esta clasificación puede ayudar en la planificación municipal con horizontes temporales de mediano a largo plazo, además de ofrecer información transparente sobre los valores económicos, sociales y medioambientales de los servicios ecosistémicos. Dos de las principales lagunas de conocimiento que son precisos abordar son indicadores de beneficios derivados de la gestión forestal urbana sostenible e indicadores para el monitoreo y evaluación de los efectos de los bosques urbanos sobre la salud y el bienestar (FAO, 2016b).

Por otro lado, los ayuntamientos de Oakville y Ajax (Canadá) han incorporado un conjunto de criterios e indicadores para la planificación forestal urbana y su gestión en sus planes forestales estratégicos urbanos a largo plazo (en 2008 y en 2010, respectivamente). Los criterios e indicadores ofrecen un conjunto estándar de 25 medidas del rendimiento dirigidas a ayudar a los gerentes a evaluar la eficacia de sus enfoques de gestión forestal urbana y, además, para guiarlos en la conservación de los recursos forestales urbanos. En virtud de su experiencia exitosa, esta herramienta se ha tomado como modelo para el desarrollo de planes similares en otros ayuntamientos (Kenney, van Wassenaeer y Satel, 2011; Clark *et al.*, 1997, como se citó en FAO, 2016b).

Por su parte la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha recomendado que por lo menos debe haber un árbol por cada 3 personas, en la capital colombiana únicamente 4 localidades (Santa fe, Teusaquillo, Chapinero y la Candelaria) tienen suficientes árboles que satisfacen la recomendación. En términos de indicadores respecto al arbolado, la ciudad de Bogotá tiene una densidad de 33,5 árboles por hectárea, Fontibón cuenta con 15,5 árboles por hectárea que representa 1 árbol por cada 6 personas (0,16 árb/per). Se identificó como contraste una de las localidades con mayor densidad siendo Suba con 44,63 árboles/ha que indica 1 árbol por cada 3,5 personas (0,28 arb/per) y Bosa siendo una de las de menor densidad con un total de 12,45 árboles/ha que indica 1 árbol por cada 20 personas (0,05 arb/per) (Vanegas y Martínez, 2021). A nivel distrital se cuenta con 0,17 árboles por persona, lo que equivale a un árbol por cada seis personas, lo que indica un déficit que despierta una alarma sobre la calidad del aire, esto se refleja en las localidades en estudio ya que ninguna alcanza al valor recomendado (DAPEP, 2017, como se citó en Vanegas y Martínez, 2021).

Uno de los indicadores de servicios ecosistémicos más usados es el de árboles per cápita. En un estudio con base a los resultados de los plots muestreados se estima que la ciudad de Cartagena cuenta con 58 500 árboles y con una población aproximada de 950 000 habitantes, dando una relación de 0,06 árboles por habitante. Realizando comparaciones internacionales en cuanto a este indicador y

en base al porcentaje de cobertura arbórea se tiene lo mostrado en la Figura 4 y 5. Finalmente, se obtuvo una propuesta de indicadores ambientales elaborados a partir del modelo PER (Establecimiento Público Ambiental, 2013).

Figura 4

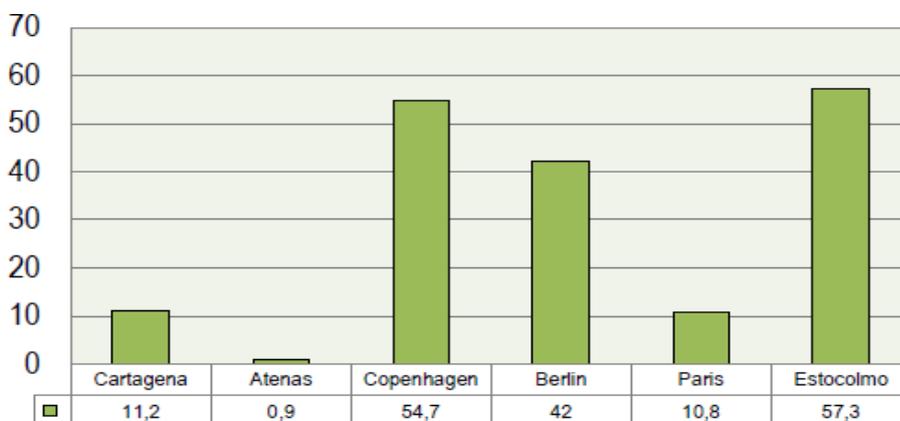
Relación de cantidad de árboles per cápita en distintas ciudades



Nota: El indicador de número de árboles per cápita en distintas ciudades puede servir para compararlos con los resultados encontrados en San Miguel. Fuente: EPA (2013).

Figura 5

Porcentaje (%) de cobertura arbórea en distintas ciudades



Nota: El porcentaje de cobertura arbórea en distintas ciudades puede servir para compararlos con los resultados encontrados en San Miguel. Fuente: EPA (2013)

2.2 Planteamiento de soluciones frente a la problemática

El incremento poblacional del distrito, la expansión de zonas industriales, comerciales y parque automotor, y el aumento de la contaminación ambiental representan factores críticos que pueden ser contrarrestados a través de una buena gestión de las áreas verdes.

En base a los conocimientos adquiridos durante mi formación profesional y mi experiencia de trabajo como coordinador general en el área de parques y jardines durante los años 2017-2018, se identificaron como puntos prioritarios a ser atendidos los siguientes:

Necesidad de diseñar, programar y ejecutar un inventario forestal urbano con bajo presupuesto

La Subgerencia de Parques y Jardines (SPJ) de la MDSM tenía el compromiso de diseñar, programar y ejecutar un inventario forestal urbano por solicitud expresa de la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML); sin embargo, a pesar de que no se contaba con todos los recursos necesarios para ejecutarlo, se logró realizarlo con el apoyo del coordinador general y de los supervisores, alternando las actividades diarias con las labores de inventario.

Carencia de herramientas para diagnosticar y mitigar la contaminación ambiental

De acuerdo a vacíos de información encontrados, se propuso realizar un inventario forestal a fin de aplicar la herramienta. En base a los resultados obtenidos, y apoyado en datos demográficos y de áreas verdes, se definieron indicadores ecosistémicos, para luego mejorar dichos indicadores en los siguientes planes de trabajo, pero con metas claras.

Reformulación del manejo y gestión ambiental del arbolado urbano

El buen manejo y gestión ambiental de los bosques urbanos ayuda a cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuesta por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), los cuales están relacionados con los objetivos número 3 (salud y bienestar) y número 11 (ciudades y comunidades sostenibles), de acuerdo a las Directrices para la Silvicultura Urbana y Periurbana de la FAO (2016). Es por ello que para mejorar el manejo y gestión ambiental del arbolado urbano, se desarrollaron planes de trabajo con metas más claras, la coordinación de programas de cooperación con entidades públicas y privadas, una mejora sustancial en la correcta selección de

especies forestales (teniendo en cuenta también que se debe tener variedad y diversidad) y el incremento de árboles instalados (arborización), recuperando las áreas con escasa o nula cobertura vegetal detectadas con ayuda de la herramienta, la misma que fue corroborada con la supervisión de campo por parte del coordinador general.

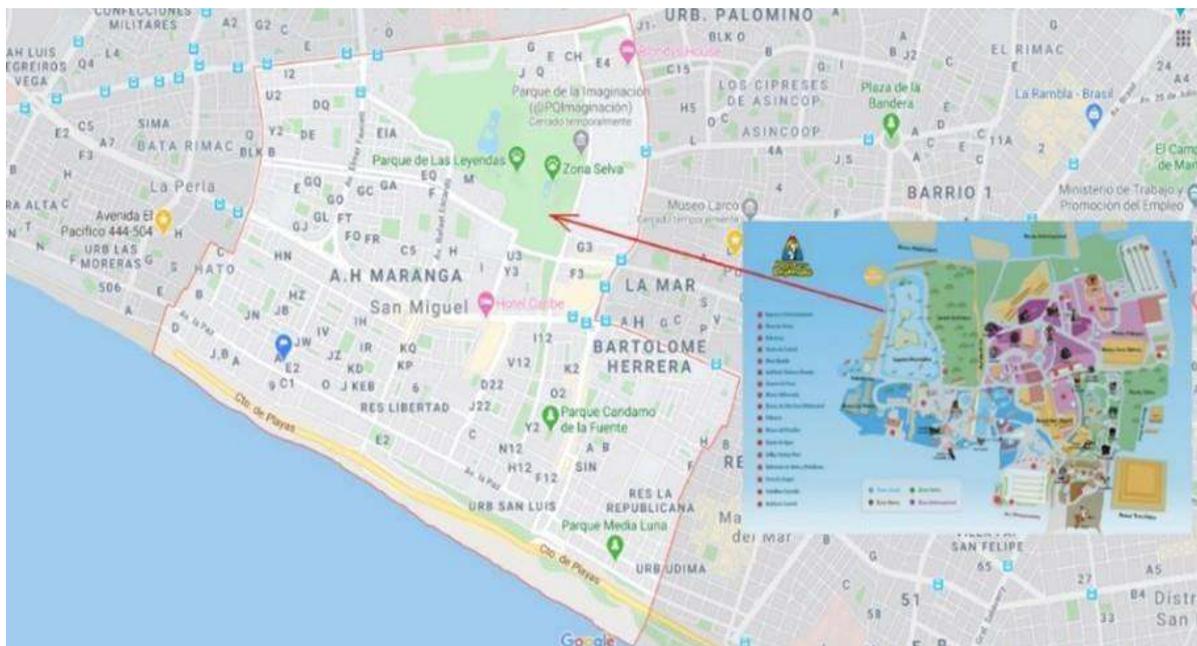
2.3 Metodología

2.3.1 Definición del área de estudio

El presente trabajo profesional se desarrolló en toda la jurisdicción del distrito de San Miguel (10,72 km²), abarcando todos los límites físicos en los que la SPJ tenía acceso para ejecutar los trabajos de campo, en donde la amplitud del inventario forestal fue del 100% de individuos de porte arbóreo. Asimismo, para el procesamiento de la información se contaba con una oficina, y para el acceso a los elementos de logística se tenía un almacén, ambos ubicados en la Calle Comandante Ladisiao Espinar 117-119, en la zona conocida como “Comunales”, entre la Av. Costanera y Av. La Paz; lugar donde se concentraban todas las unidades móviles, el personal administrativo y el personal operativo. Asimismo, dentro del distrito se encuentra también el Patronato del Parque de las Leyendas “Felipe Benavides Barreda” (PATPAL-FBB), del cual también se obtuvieron datos (ver Figura 6).

Figura 6

Punto de referencia de ubicación del “Parque de las Leyendas” en San Miguel



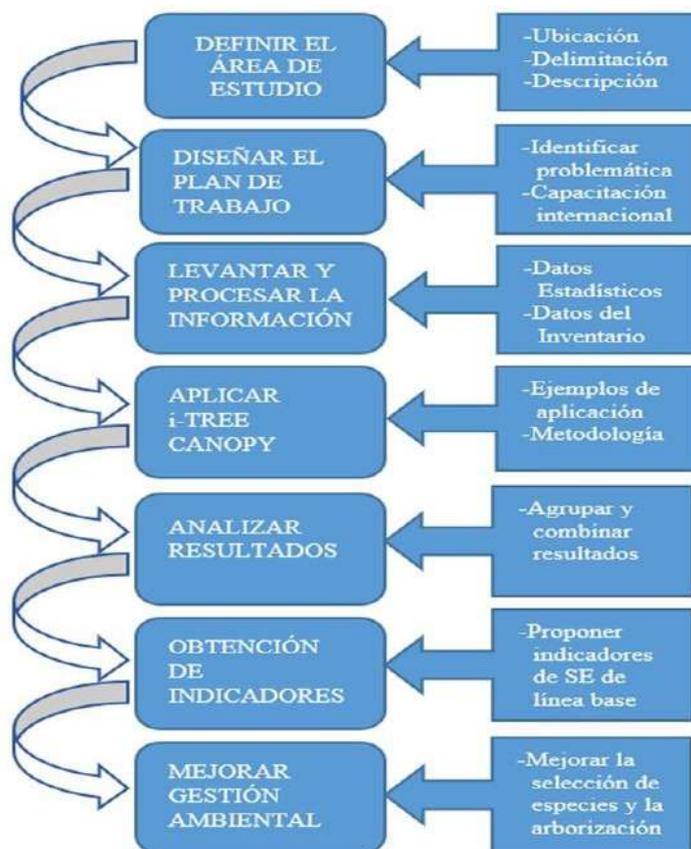
Punto de referencia de ubicación del “Parque de las Leyendas” en San Miguel. Fuente: Google Maps y www.leyendas.gob.pe

2.3.2 Secuencia de actividades propuesta

En base a los objetivos planteados a continuación se presenta el detalle de actividades seguidas:

Figura 7

Secuencia de actividades en la metodología del trabajo



2.3.3 Recopilación de información base

a. Datos demográficos

Se recopilaron datos estadísticos de superficie territorial, población y densidad poblacional para el distrito de San Miguel, obtenidos de fuentes oficiales como el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) y la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML) que servirán para crear indicadores de servicios ecosistémicos.

b. Datos de áreas verdes

Se recopilaron datos estadísticos de superficie horizontal de área verde total para el distrito de San Miguel, los mismos que fueron obtenidos de fuentes oficiales como el INEI o la MML, los que ayudarán a crear indicadores de servicios ecosistémicos.

2.3.4 Levantamiento y procesamiento de información proporcionada por el inventario forestal urbano

a. Inventario forestal urbano de la MDSM

En el año 2017, a solicitud de la MML, se ejecuta el inventario forestal urbano al 100% de las áreas públicas del distrito de San Miguel, a cargo de la Subgerencia de Parques, Jardines y Medio Ambiente (SPJMA) de la Municipalidad Distrital de San Miguel (MDSM). Durante los años 2017 y 2018 se logra levantar y procesar la información solicitada de todos los árboles, arbustos de porte arbóreo y palmeras con una altura total (HT) mayor o igual (\geq) a 2 metros, como parte de las responsabilidades profesionales encomendadas como coordinador general y supervisor. Se realizó un control de calidad de datos del inventario usando la metodología brindada por la MML, la cual estuvo a cargo del coordinador general y del subgerente.

b. Inventario forestal urbano del PATPAL-FBB

De acuerdo con Tejada y Rivera (2018), se realizó el inventario del Patronato del Parque de Las Leyendas Felipe Benavides Barreda (PATPAL-FBB) en el año 2018 en individuos con un $DAP \geq 10\text{cm}$ y $HT \geq 2\text{m}$, teniendo en cuenta especies arbóreas, palmeras y especies arbustivas. El control de calidad de datos fue realizado por el personal supervisor del PATPAL-FBB.

c. Metodología del inventario forestal urbano

La ejecución del inventario forestal del arbolado urbano al 100% se basó en la metodología aplicada en anteriores inventarios en la MDSM solicitados por la MML, que posteriormente se adaptó y mejoró de acuerdo a los objetivos y parámetros a medir para el último inventario forestal urbano. Las fases están descritas a continuación:

Fase preparatoria:

Son todas aquellas acciones que nos ayudarán a programar y a planificar un inventario, en donde se establecerán las variables y parámetros, así como el tipo de diseño a aplicar. Entre ellas tenemos las más importantes:

- Selección de parámetros: En el caso de la MDSM se tomará en cuenta el formato brindado por la Municipalidad Metropolitana de Lima (MML) para la identificación botánica de especies (nombre común y nombre científico), parámetros dasométricos básicos ($DAP_{1.3m} \geq 10\text{cm}$ y $HT(\text{altura total}) \geq 2\text{m}$) y estado fitosanitario. Según Tejada y Rivera (2018) el personal del PATPAL-FBB formuló su propio formato para el registro de datos.
- Sectorización: El distrito de San Miguel se divide en 4 sectores o cuadrantes, en donde habrá un supervisor y un ayudante por cada sector. De acuerdo con Tejada y Rivera (2018), el personal del PATPAL-FBB zonificó las áreas en 8 unidades arbóreas.
- Capacitación y preparación de herramientas, materiales, equipos e insumos: de acuerdo con el formato de inventario forestal urbano de la MML el personal capacitado de la MDSM preparó los materiales (copias de formato de inventario, lápiz, borrador, tabla con clip), las herramientas (cinta diamétrica, forcípula y clinómetro casero validado en campo), equipos (calculadora y computadora) e insumos (rollo de rafia roja). Asimismo, el personal de PATPAL-FBB preparó placas de codificación, de acuerdo a la metodología descrita por Tejada y Rivera (2018).

Fase de campo:

En esta fase se ejecutaron las actividades propiamente dichas del inventario, aplicando la metodología de toma de datos e información de cada individuo, considerando los parámetros seleccionados a ser evaluados, de acuerdo a lo solicitado por la MML en el formato de inventario alcanzado a la subgerencia de parques, jardines y medio ambiente de la Municipalidad Distrital de San Miguel. El PATPAL-FBB siguió la metodología descrita por Tejada y Rivera (2018).

Fase de gabinete:

Es la fase donde se procesaron todos los datos e información obtenida en campo, en el que cada árbol urbano es la unidad fundamental y en donde se analizaron los datos cuantitativos del inventario forestal urbano para luego ser aplicados estadísticamente en los resultados obtenidos por la herramienta i- Tree Canopy. El personal del PATPAL-FBB sistematizó los datos obtenidos usando Mapsource, Basecamp, Google Earth y ArcGis 10.5, de acuerdo a la metodología descrita por Tejada y Rivera (2018).

2.3.5 Aplicación de la herramienta i-Tree Canopy

Según la participación de la Mg.Sc. S. López (i-Tree Eco México Consultant USFS-IP), miembro de US Forest Service-International Programs/programa México (2020), los pasos a seguir en el uso de i-Tree Canopy se resumen en:

- a. Determinar el área de estudio.
- b. Definir los tipos de cobertura a estimar.
- c. Generar puntos al azar dentro del área de estudio por parte de Canopy.
- d. Categorizar los puntos en los tipos de cobertura definidos.
- e. Guardar el proyecto.
- f. Ver el reporte de resultados.

a) Procedimientos para el uso de la herramienta

A continuación, se describen paso a paso los procedimientos a seguir para la correcta aplicación de la herramienta en el distrito de San Miguel:

1. Tal como se muestra en el Anexo N°3, se abre el vínculo de la herramienta Canopy en la página web de i-Tree (<https://canopy.itreetools.org/>).
2. Se carga un archivo de límites geográficos (formato .shp o .prj) o simplemente se dibuja manualmente los límites que identifiquen el área de interés, en este caso el distrito de San Miguel. Esto permite que el

software se vincule con Google Earth y nos presenta una vista aérea en planta de esa área (Anexo N°4 y 5). Hacer clic en “next” o “próximo”.

3. Creación de categorías de cobertura del suelo: en este paso se definirán categorías de cobertura del suelo, de las cuales las más simples son “árbol” y “no árbol”; además de otras como cuerpo de agua, impermeable, suelo desnudo, entre otros tipos de coberturas, los cuales dependieron del criterio del usuario y de las características de la zona de estudio. Para este proyecto se tomaron en cuenta coberturas de suelo como “árbol”, “pasto/herbácea”, “impermeable”, “agua”, “desnudo” y “arena”. Asimismo, se completaron los datos para el ítem de “Descripción”, “Abreviación” y “Cobertura arbórea”. El color de cada clase de cobertura también se definió de acuerdo al criterio del usuario (Ver Anexo N°6). Terminado este paso, se hizo clic en “siguiente” o “próximo” (Next).
4. Dependiendo de la ubicación del área de estudio, se eligió la opción más adecuada entre zona rural, zona urbana o ambas opciones; en este proyecto se seleccionó la zona urbana. De igual manera se eligió el código y simbología de la moneda de interés (PEN o S/ para Perú), para poder expresar los datos económicos en dicho valor monetario. Asimismo, las unidades de medición pueden darse entre el sistema métrico o el sistema inglés; para este caso se eligió el sistema métrico. Dado que la herramienta fue desarrollada en los Estados Unidos, los valores generados fueron en base a los índices y coeficientes de ese país, siendo estos los únicos datos que no se pudo cambiar en este paso (Ver Anexo N°7).
5. Base de datos de dosel: Canopy generó un punto geográfico al azar que se superpuso en la imagen de Google Earth. En este punto se clasificó la característica debajo del punto de muestra en la categoría de cobertura terrestre que corresponda según la imagen. Este proceso se repitió hasta el momento en que se toma una muestra geográfica suficientemente

grande y representativa del distrito de San Miguel (Ver Anexo N°8). El proyecto se guardó para salvar los datos que hasta el momento se generaron.

A medida que el muestreo de puntos de cobertura avanzó, se pudieron visualizar los puntos que anteriormente habían sido muestreados y que debieron identificarse para que no cause confusión al momento de clasificar el nuevo punto en el que uno se encontraba. Se debe recordar que el punto actual de la encuesta siempre se ubica al centro de la pantalla con respecto al programa y no al del ordenador, tal y como se aprecia en el Anexo N°8.

La cobertura del suelo se evaluó en todo el distrito hasta alcanzar la cantidad de puntos aleatorios necesarios que nos permitieron tener el menor error estándar posible, de acuerdo a la superficie a estudiar.

6. Finalmente, luego de haber generado la cantidad de puntos necesarios, según el criterio del usuario, y luego de haber guardado el proyecto, se pudo visualizar el reporte. Éste nos mostró los resultados de la encuesta con la ayuda de gráficos, imágenes y cuadros o tablas; los cuales fueron interpretados por el usuario (Ver Anexos 9, 10 y 11).

b) Metodología de selección de puntos de muestreo en la herramienta

De acuerdo a la metodología aplicada por diversos investigadores, se tienen los siguientes cálculos de intervalos de error estándar (σ_p) a partir de estimaciones de la cubierta arbórea mediante imágenes fotográficas interpretadas por la herramienta:

Mills *et al.* (2015) mencionan que una evaluación basada en un área fija ubicada en la ciudad es razonable, ya que es ahí en donde existe mayor densidad poblacional, polución, contaminantes atmosféricos, inundaciones, etc. Sin embargo, reconoce que esto dificulta las

comparaciones internacionales. Todas las imágenes disponibles fueron tomadas en condiciones de cielo despejado durante la temporada de crecimiento para que las copas de vegetación fueran claras. Para evaluar la cobertura del suelo, se clasificarán 5 000 puntos seleccionados al azar con cada área de estudio. Estos datos se usaron para estimar la proporción de una cubierta terrestre seleccionada (p) y el error estándar (σ_p), la cual viene dada por la Ecuación (i-Tree Canopy, [s.d.]):

Donde:

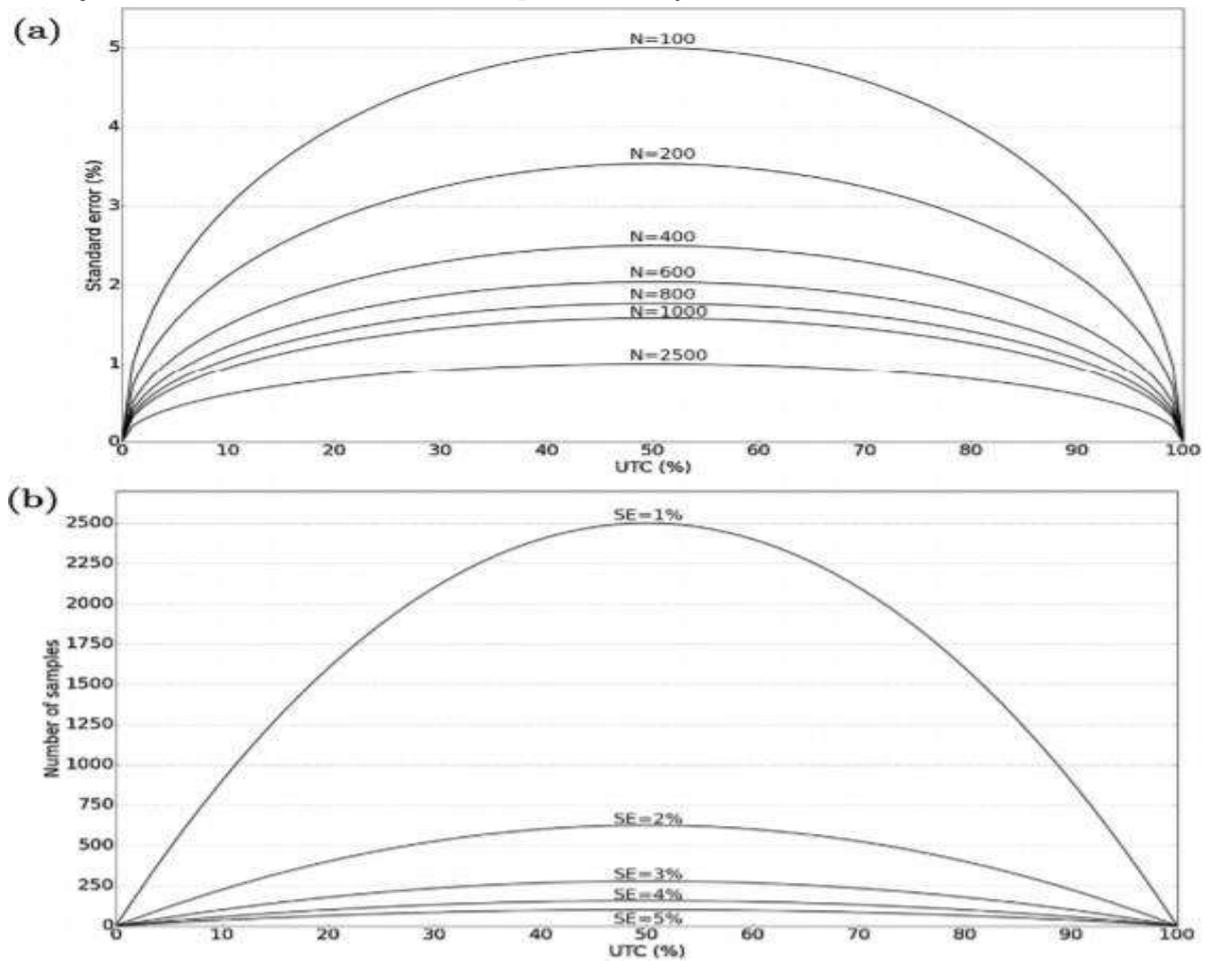
$$\sigma_p = \sqrt{\frac{[p(1-p)]}{N}}, p = n/N$$

La letra “N” representa el número de puntos aleatorios (en su caso: 3 000) y “n” el número de puntos que corresponde a la clase de uso de la tierra. Por lo tanto, una vez que se estima la tasa de cobertura de árboles (km^2), se pueden estimar los beneficios de los árboles, especialmente el potencial para eliminar los contaminantes atmosféricos y su valor monetario compensatorio (Anjos *et al.*, 2018).

Aunque las pautas para el usuario de i-Tree Canopy (<http://www.itreetools.org/canopy/>) sugieren utilizar 500 – 1 000 puntos de muestra, el valor real del número de puntos de muestra depende de la precisión requerida en la estimación de la Cobertura de Árboles Urbanos (CAU). La precisión se puede medir por el error estándar (ES) de la CAU estimado. El error estándar se usa como una forma de estimar la incertidumbre de la cobertura de copa de árboles urbanos en la herramienta, y éste disminuye si el número de puntos de muestra aleatorios aumenta. Asimismo, indica que teóricamente el ES estimado con valores de cobertura de copa de árboles urbanos variables para diferentes números de muestra de puntos (N) y la relación entre el número de puntos de muestra de CAU para diferentes valores de error estándar se muestran en la Figura 8 (Parmehr *et al.*, 2016).

Figura 8

Efecto del valor de CAU en el σ_p estimado y el número de muestras aleatorias



Nota: (a) error estándar estimado con valores de CAU variables, (b) número de muestras aleatorias con valores de CAU variables. Fuente: Parmehr *et al.* (2016).

De acuerdo con las notas técnicas y metodología de i-Tree Canopy (2011), en la interpretación fotográfica, los puntos seleccionados al azar se colocan sobre imágenes aéreas y un intérprete clasifica cada punto en una clase de cobertura (por ejemplo, árbol, edificio, agua). Luego, a partir de esta clasificación de puntos, se puede calcular una estimación estadística de la cantidad o porcentaje de cobertura en cada clase de cobertura junto con una estimación de la incertidumbre de la estimación (error estándar (σ_p)). Para ilustrar cómo se hace esto, supongamos que 1 000 puntos han sido interpretados y clasificados dentro de una ciudad como "árbol" o "noárbol" como un medio para determinar la cubierta arbórea dentro de esa ciudad, y 330 puntos fueron clasificados como "árbol".

Así que para calcular el porcentaje de cobertura arbórea y σ_p , asumiremos que:

N = número total de puntos muestreados (es decir, 1 000)

n = número total de puntos clasificados como árbol (es decir, 330), y

$p = n / N$ (es decir, $330/1\ 000 = 0,33$)

$q = 1 - p$ (es decir, $1 - 0,33 = 0,67$)

$\sigma_p = \sqrt{(pq/N)}$ (es decir, $\sqrt{(0,33 \times 0,67/1\ 000)} = 0,0149$)

Por lo tanto, en este mismo ejemplo, el autor afirma que la cobertura arbórea en la ciudad se estima en 33% con un σ_p del 1,5%. Basado en la fórmula de σ_p , el error estándar es mayor cuando $p=0,5$ y menor cuando p es muy pequeño o muy grande (ver Tabla 6).

Tabla 6

Estimación de σ_p ($N = 1000$) con diferentes p .

p	σ_p
0,01	0,0031
0,1	0,0095
0,3	0,0145
0,5	0,0158
0,7	0,0145
0,9	0,0095
0,99	0,0031

2.3.6 Análisis de información obtenida

Canopy estima el potencial de calidad del aire de los árboles urbanos utilizando funciones que se basan en la cubierta del dosel. Los contaminantes que considera incluyen los contaminantes urbanos comunes, a saber: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y partículas (PM) con diámetros menores a 2,5 μm (PM2.5) y menores a 10 μm (PM10). Además, el software calcula el dióxido de carbono anual secuestrado (CO₂ (sq)) y almacenado (CO₂ (st)) por el bosque urbano (Mills *et al.*, 2015). La herramienta i-Tree Canopy genera gráficos y un mapa con los tipos de cobertura definidos por las muestras al azar realizadas en la encuesta. De igual manera cuantifica los tipos de cobertura definidos y la precisión

estadística de las estimaciones; así como también los cambios en el tiempo de los tipos de cobertura si se emplea con Google Earth. Por último, la herramienta estima los servicios ecosistémicos que provee la cubierta arbolada, tales como la remoción de contaminantes, captura de carbono (C), almacén de carbono (C) y reducción de escorrentías (US Forest Service-International Programs/programa México, 2020). Dichos resultados pueden visualizarse en los Anexos 10 y 11.

Asimismo, esta herramienta nos da una idea de la cuantificación económica del arbolado urbano por remover o capturar los agentes contaminantes del aire. Este y otros resultados generados por la herramienta pueden ser agrupados y combinados con los resultados obtenidos en los inventarios forestales urbanos al 100% y con los datos demográficos y ambientales del distrito para formular nuevos resultados que puedan obtener indicadores de servicios ecosistémicos de importancia para este trabajo.

2.3.7 Obtención de indicadores ecosistémicos

Con los datos obtenidos de instituciones oficiales sobre población y áreas verdes del distrito, datos de los inventarios forestales y los resultados obtenidos de la herramienta i-Tree Canopy se determinaron las variables para los indicadores de servicios ecosistémicos (SE), los mismos que pueden ser utilizados como línea base para futuros trabajos similares. Asimismo, los indicadores de SE para este trabajo se obtuvieron usando tablas (Ver Tablas 7, 8 y 9) para que los datos estén más ordenados y fáciles de analizar e interpretar.

Tabla 7
Indicadores relacionados a la salud pública

SALUD PÚBLICA				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE 1	VALOR VARIABLE 2	RESULTADO (V1/V2)
Número de áreas verdes por habitante	m ² /hab	m ²	habitante	
Número de árboles por habitante	árb/hab	árbol	habitante	
Número de área de cobertura de dosel arbóreo por habitante	m ² /hab	m ²	habitante	

Tabla 8***Indicadores relacionados a la gestión ambiental***

GESTIÓN AMBIENTAL				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE 1	VALOR VARIABLE 2	RESULTADO (V1/V2)
Cantidad de C secuestrado anualmente por árbol	t(anual)/árb	t(anual)	árbol	
Cantidad de CO2 (equiv.) secuestrado anualmente por árbol	t(anual)/árb	t(anual)	árbol	
Cantidad de C almacenado por árbol (no es una tasa anual)	t/árb	t	árbol	
Cantidad de CO2 (equiv.) almacenado por árbol (no es una tasa anual)	t/árb	t	árbol	
Cantidad CO removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	
Cantidad de NO2 removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	
Cantidad de O3 removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	
Cantidad de PM10 removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	
Cantidad de PM2.5 removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	
Cantidad de SO2 removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb	Kg(anual)	árbol	

Tabla 9***Indicadores relacionados a la cuantificación económica de remoción de contaminantes***

CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE 1	VALOR VARIABLE 2	RESULTADO (V1/V2)
Cantidad de C secuestrado anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Cantidad de CO2 (equiv.) secuestrado anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Cantidad de C almacenado por árbol (no es una tasa anual)	S//árb.	S/	árbol	
Cantidad de CO2 (equiv.) almacenado por árbol (no es una tasa anual)	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de CO removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de NO2 removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de O3 removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de PM10 removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de PM2.5 removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	
Valor de compensación monetaria de SO2 removido anualmente por árbol	S//árb.	S/	árbol	

2.3.8 Interpretación de resultados obtenidos a partir de los indicadores de SE

Se desarrolló una propuesta orientada al manejo de las áreas verdes del distrito, tomando en cuenta los recursos humanos, logísticos y económicos asignados a la Subgerencia de Parques, Jardines y Medio Ambiente (SPJMA) de la MDSM. De esta manera se contribuyó en la gestión ambiental del distrito, a partir de los indicadores de servicios ecosistémicos, especialmente la calidad del aire, revalorando los parques más emblemáticos, recuperando áreas sin cobertura vegetal y promoviendo la arborización con especies forestales idóneas que contribuyan a mitigar el impacto ambiental. Estas medidas sirvieron a los funcionarios de la MDSM para mejorar la toma de decisiones.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados y discusiones

3.1.1 Información base obtenida

De acuerdo a fuentes oficiales se obtuvo la siguiente información:

- Población del distrito: 155 328 habitantes (INEI, 2018).
- Densidad poblacional: 14 494,78 hab./km² (INEI, 2018).
- Superficie: 10,72 Km² (INEI, 2018).
- Extensión total de áreas verdes públicas: 1 705 014,30 m² (Lima cómo vamos, 2014).

3.1.2 Inventario forestal

En el procesamiento de datos e información del inventario forestal urbano al 100% del distrito, que se llevó a cabo entre los años 2017 y 2018, se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos cuantitativos

- En el inventario realizado por el personal de la Municipalidad de San Miguel (MDSM) se contabilizó un total de 17 807 individuos de porte arbóreo (altura total mayor a 2 m), de estos, 9 693 son árboles, 6 168 arbustos y 1 946 palmeras.
- De acuerdo al inventario realizado por el personal del Patronato del Parque de Las Leyendas (PATPAL) se contabilizó un total 4 316 individuos ya establecidos, de los cuales 3 364 son árboles, 706 palmeras y 246 arbustos. Estos individuos corresponden a 267 especies botánicas y están distribuidos en toda la extensión de la institución.

- Ambos inventarios dan un total de 22 123 individuos de porte arbóreo (arbustos, árboles y palmeras), lo que significa que existe aproximadamente 0,14 árboles por habitante en el distrito, número por debajo de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (1 árbol por cada 3 habitantes o 0,33 árboles por habitante).

Lista de especies más frecuentes .

En relación al inventario forestal urbano realizado por el personal de la MDSM en las áreas verdes públicas, se obtuvo la lista de las doce especies más importantes o las más frecuentes, que representan el 76,99% del total de especies del distrito (Ver Tabla 10).

Tabla 10

Lista de las diez especies más frecuentes (MDSM)

Ítem	Nombre común	Nombre científico	Abundancia por especie	Frecuencia (%) por especie
1	Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	2 682	15,06
2	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolius</i>	2 518	14,14
3	Ponciana	<i>Delonix regia</i>	1 776	9,97
4	Palmera abanico	<i>Washingtonia robusta</i>	1 355	7,61
5	Cactus candelabro(*)	<i>Euphorbia</i> (<i>E. ingens</i> y <i>E. lactea</i>)	1 138	6,39
6	Molle serrano	<i>Schinus molle</i>	1 080	6,06
7	Palmera hawaiiana	<i>Dyopsis lutescens</i>	951	5,34
8	Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i>	869	4,88
9	Yucca	<i>Yucca Elephantipes</i>	795	4,46
10	Meijo	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	547	3,07
TOTAL			13 710	

Nota: (*) Las especies *Euphorbia ingens* y *Euphorbia lactea*, con el mismo nombre común, fueron clasificadas dentro del género *Euphorbia* en un solo ítem, para fines prácticos.

Según el inventario forestal urbano realizado por el personal del PATPAL, se obtuvo la lista de las 10 especies más abundantes y más frecuentes, que representa el 52,30% del total de especies inventariadas en el “Parques de Las Leyendas” (Ver Tabla 11).

Tabla 11***Lista de las diez especies más frecuentes (PATPAL)***

Ítem	Nombre común	Nombre científico	Abundancia por especie	Frecuencia (%) por especie
1	Casuarina	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	568	13,1
2	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolius</i>	364	8,4
3	Palmera abanico	<i>Washingtonia robusta</i>	252	5,84
4	Palmera botella	<i>Roystonea regia</i>	251	5,81
5	Tipa	<i>Tipuana tipu</i>	183	4,24
6	Molle serrano	<i>Shinus molle</i>	178	4,12
7	Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i>	134	3,10
8	Melia	<i>Melia azederach</i>	125	2,89
9	Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	108	2,5
10	Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	95	2,2
TOTAL			2258	

Fuente: Tejada y Rivera, 2018

3.1.3 Herramienta i-Tree Canopy

a. Ejecución de la herramienta i-Tree Canopy

Siguiendo la metodología descrita en el presente trabajo, se ubicaron 3 000 puntos aleatorios en el distrito de San Miguel, los cuales fueron clasificados de acuerdo a las clases de cobertura de suelo previamente definidas según la ubicación del lugar de estudio. Cabe señalar que se realizaron en total 3 003 puntos en la encuesta o toma de datos, debido a que tres de estos puntos no llegaron a ser reconocidos por el sistema, por lo que se tuvo que realizar tres puntos adicionales para poder llegar a los 3 000 puntos necesarios de acuerdo al criterio estadístico para reducir en mayor medida el error estándar.

Se tomaron capturas de pantalla de algunos puntos obtenidos a través de la herramienta i-Tree Canopy con los resultados parciales de la encuesta de cobertura del suelo y el potencial del ecosistema proporcionado por la cubierta del dosel en el distrito de San Miguel (ver Anexos 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24).

b. Vista previa de resultados

Una vez terminada la encuesta con los puntos necesarios, de acuerdo al criterio usado, se guardó el proyecto para poder tener un respaldo de la información obtenida antes de generar el reporte. Una vez guardado el proyecto se generó una vista resumida de los resultados en la generación de los puntos (ver Figura 9). Ésta vista previa y resumida de los resultados de la cantidad de puntos encuestados nos muestra la distribución de éstos dentro de los límites del distrito, la lista de las 10 primeras tomas de puntos con sus respectivas clases de cobertura, longitud y latitud, y el gráfico de columnas final que nos ayuda a tener una idea acerca de qué clases de coberturas dominan sobre el área de estudio y las barras de error (**I**) que se usan para representar gráficamente el error estándar encima de cada clase de cobertura definida para el estudio.

En la Figura 9 se puede apreciar que los 3 000 puntos encuestados cubren casi totalmente de crucetas amarillas la superficie del distrito de San Miguel, dándonos una muestra bastante representativa del total de puntos posibles que se podrían haber generado si hubiéramos seguido ejecutando más puntos en la encuesta con i-Tree Canopy.

Figura 9

Vista previa de los resultados después de guardar el proyecto con 3 000 puntos



Nota: Cada cruz de color amarillo representa cada uno de los 3000 puntos tomados por la herramienta i-Tree Canopy.

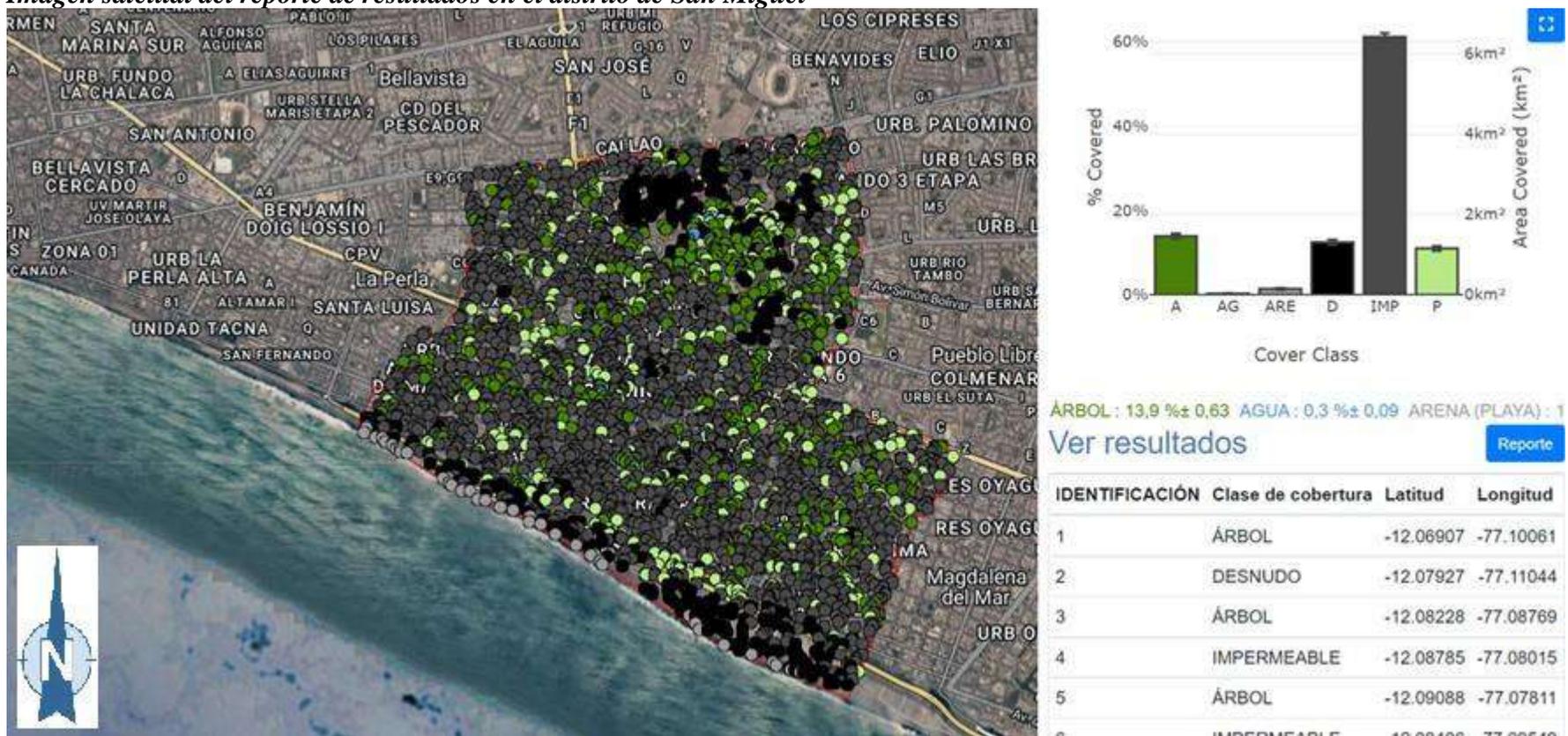
c. Reporte de resultados

La herramienta i-Tree Canopy generó un reporte de evaluación de cobertura y beneficios de árbol, en el cual se mostraron los puntos encuestados representados por los colores que se seleccionaron al momento de definir las clases de cobertura de suelo a usar en la encuesta de datos. La herramienta nos permitió guardar el reporte generado en formato .pdf antes de imprimirlo; asimismo, nos permitió guardar los cambios de cómo se muestran los puntos dentro de los límites del distrito en contraste con los tipos de imágenes mostrados en Google Earth (blanco, mapa o satelital).

En la Figura 10 se muestra la imagen satelital proporcionada por Google Earth a través de i-Tree Canopy en el distrito de San Miguel con los puntos encuestados, el cual se puede generar antes de guardar o imprimir el reporte.

Figura 10

Imagen satelital del reporte de resultados en el distrito de San Miguel

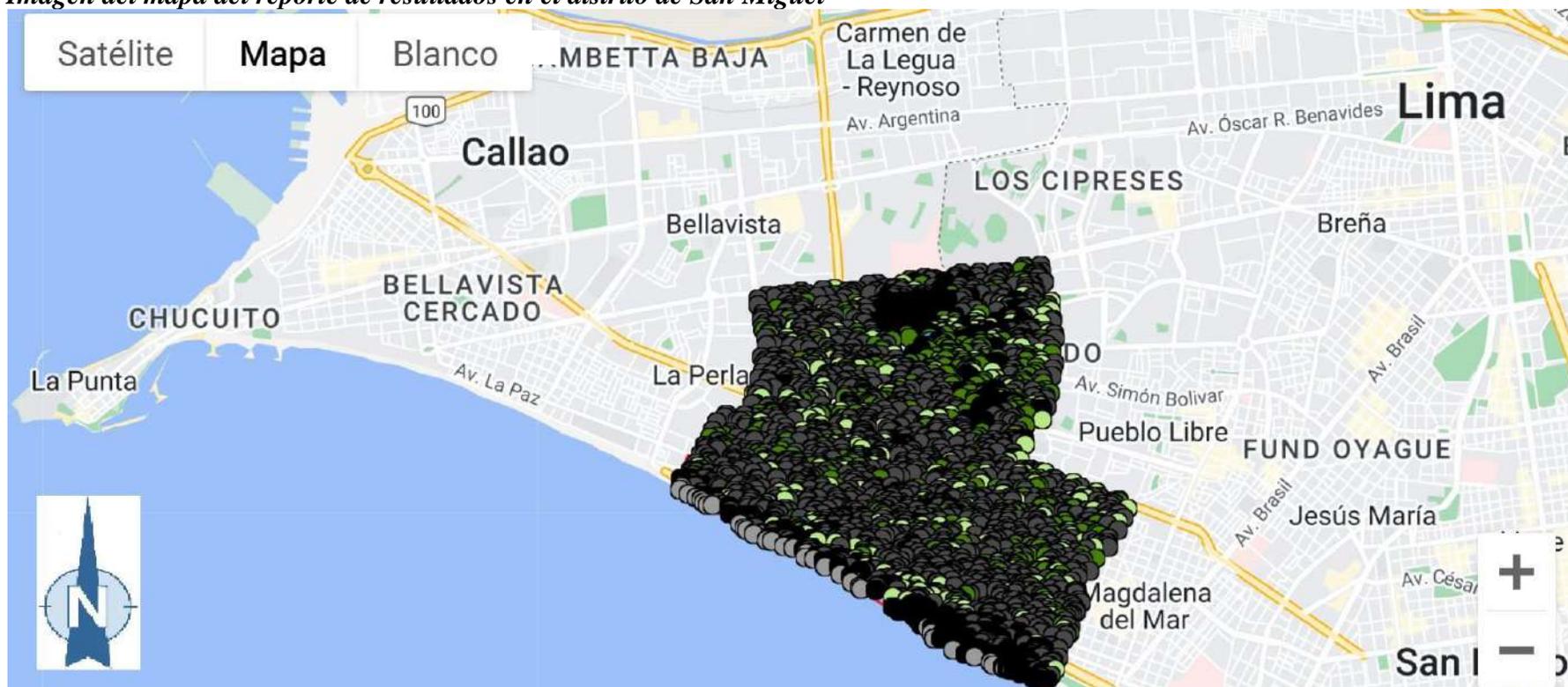


Nota: Cada color representa un tipo de cobertura de suelo distinto (Ver Tabla 12 y Figura 12). El color verde oscuro (árbol), color verde claro (pasto/herbácea), color azul (cuerpo de agua), color gris claro (arena), color gris oscuro (superficies impermeables) y el color negro (suelo desnudo o sin cobertura).

Asimismo, también se puede guardar e imprimir el reporte de resultados escogiendo la imagen de mapa (ver Figura 11) proporcionada también por Google Earth usando la herramienta Canopy de i-Tree.

Figura 11

Imagen del mapa del reporte de resultados en el distrito de San Miguel



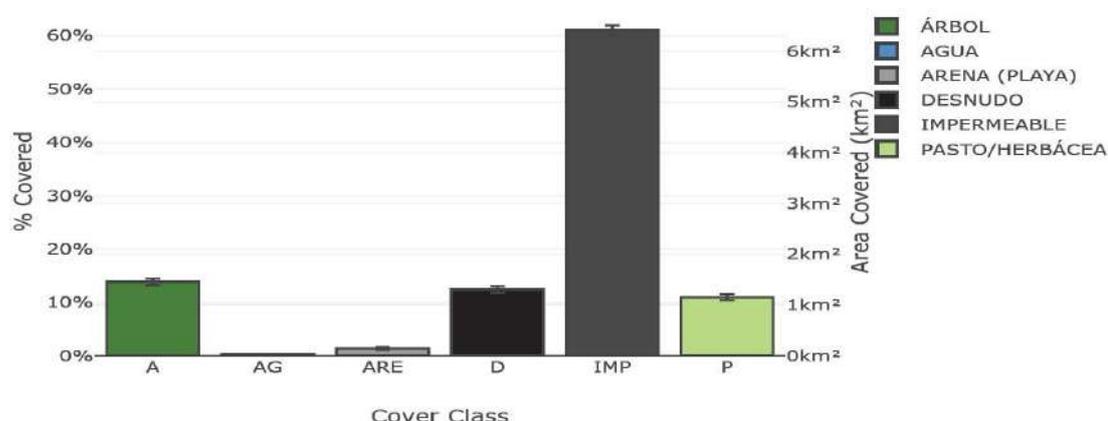
Nota: Cada color representa un tipo de cobertura de suelo distinto. El color verde oscuro (árbol), verde claro (pasto/herbácea), azul (cuerpo de agua), gris claro (arena), gris oscuro (superficies impermeables) y el color negro (suelo desnudo o sin cobertura).

Los resultados obtenidos en el reporte nos muestran los gráficos de columnas de las diferentes clases de cobertura de suelos creados a criterio personal, de acuerdo a las características de la zona de estudio. Estas clases de cobertura de suelo son: “árbol”, “agua”, “arena (playa)”, “desnudo”, “impermeable” y “pasto/herbácea”.

La Figura 12 nos muestra las distintas coberturas de suelo con sus respectivas barras de error y sus representaciones en colores para poder diferenciarlas; así como también el porcentaje de cobertura y el área cubierta en km². Se puede apreciar que la cobertura “impermeable” es la que tiene mayor frecuencia en la encuesta, superando el 60%, seguida de la cobertura “árbol” con un porcentaje mayor al 10%, cobertura “desnudo” también con un porcentaje superior al 10%, cobertura “pasto/herbácea” igualmente con un porcentaje apenas superior al 10%, cobertura “arena (playa)” con un porcentaje apenas mayor al 1% y por último la cobertura “agua” con un porcentaje inferior al 1%.

La cobertura “impermeable” es más frecuente y dominante en las ciudades o zonas urbanas que en las zonas rurales. El distrito de San Miguel se encuentra ubicado en un área urbana, ya que es parte de la ciudad metropolitana de Lima, por lo que dichos resultados son comunes en otras ciudades con zonificación urbana en las que se realizó la encuesta de estudio con la herramienta de i-Tree Canopy. Las barras de error (I) de la Figura 12 se hacen más notorias y grandes a medida que las columnas aumentan en tamaño y son más pequeñas o se hacen más imperceptibles a medida que las columnas disminuyen su tamaño.

Figura 12
Gráfico de columnas de clases de cobertura en % y en km² del distrito de San Miguel
 Land Cover



Nota: Árbol (cobertura arbórea o de arbustos de porte arbóreo); Agua (cobertura de cuerpos de agua como lagunas artificiales, piscinas, reservorios, etc.); Arena (cobertura cercana a las playas del distrito); Desnudo (cobertura con suelo desnudo o sin cobertura vegetal); Impermeable (cobertura con superficies impermeables como pistas, veredas, casas, edificios o cualquier infraestructura urbana); Pasto/Herbácea (cobertura compuesta por distintas especies de pastos o de hierbas).

La Tabla 12 representa de manera cuantitativa y numérica los resultados de las diferentes clases de cobertura de suelo estudiados en el proyecto. En este se muestran las cantidades de puntos generados por cada clase de cobertura, el porcentaje de cobertura por clase de cubierta, así como también el área en km² por cada una de ellas. Según los resultados de la herramienta, el total de la superficie estudiada es de 10,51 km²; sin embargo, de acuerdo con los datos oficiales, el distrito posee 10,72 km².

La variable que más nos interesa es la relacionada con la cobertura “árbol”, ya que es ésta la que nos ofrece los datos de los beneficios ecosistémicos de la cubierta del dosel del arbolado urbano. En el caso del distrito de San Miguel, la herramienta estimó un 13,87% ($\pm 0,63$) como cubierta del dosel arbóreo.

La gran cantidad de puntos encuestados en el proyecto ayudaron a disminuir el error estándar (ES) a números inferiores a 1, lo cual significa que el muestreo aleatorio de puntos tiene un gran porcentaje de confiabilidad en la toma de datos generados por la herramienta Canopy. De acuerdo a Parmehr *et al.* (2016), se requiere un mínimo de 2 500 puntos para obtener un error estándar igual a uno (ES=1); y dado que se tomaron un total de 3 000 puntos, se obtuvo un ES inferior a uno (ES<1).

Tabla 12
Clases de cobertura (número de puntos, % de cobertura y área en km²)

Coberturas de suelo					
Abr.	Clases de cobertura	Descripción	Puntos	% Cobertura \pm SE	Área (km ²) \pm SE
A	ÁRBOL	ÁRBOLES Y ARBUSTOS	416	13,87 \pm 0,63	1,46 \pm 0,07
AG	AGUA	CUERPOS DE AGUA	8	0,27 \pm 0,09	0,03 \pm 0,01
ARE	ARENA (PLAYA)	OTRAS SUPERFICIES	42	1,40 \pm 0,21	0,15 \pm 0,02
D	DESNUDO	SUELOS DESNUDOS	373	12,43 \pm 0,60	1,31 \pm 0,06
IMP	IMPERMEABLE	SUPERFICIES IMPERMEABLES	1 832	61,07 \pm 0,89	6,42 \pm 0,09
P	PASTO/ HERBÁCEA	SUPERFICIES CON PASTO Y HERBÁCEAS	329	10,97 \pm 0,57	1,15 \pm 0,06
Total			3 000	100	10,51

Fuente: Reporte i-Tree

Luego de que la herramienta estimara, mediante la toma de puntos, el porcentaje de cobertura para cada clase de cubierta de suelo, el siguiente resultado reporta un cuadro o tabla de estimaciones de beneficios de árboles relacionados al carbono en unidades métricas (ver Tabla 13). En este resultado se muestra el carbono secuestrado anualmente por los árboles, así como también el carbono almacenado en los árboles durante toda su vida. El carbono secuestrado y el carbono almacenado son expresados en toneladas métricas y su valor económico es expresado en soles (S/), cuya simbología internacional es PEN. El CO₂ equivalente quiere decir que se requieren 1 635,91 (±74,44) toneladas de CO₂ para obtener 446,16 (±20,30) toneladas de carbono secuestrado anualmente por los árboles, y que se requieren 41 083,90 (±1869,44) toneladas de CO₂ para obtener 11 204,70 (±509,85) toneladas de carbono almacenado en los árboles. Cada variable está acompañada de su propio error estándar, los cuales guardan relación a los errores estándar de los puntos encuestados.

Tabla 13
Beneficios ecosistémicos de secuestro y almacenamiento de carbono

Beneficios Estimados de los árboles: Carbono (unidades métricas)						
Descripción	Carbono (t)	±SE	CO₂ Equiv. (t)	±SE	Valor (PEN)	±SE
Secuestrado anualmente en árboles	446,16	±20,30	1 635,91	±74,44	297 144 S/	±13 521
Almacenado en árboles (Nota: este beneficio no es una tasa anual)	11 204,70	±509,85	41 083,90	±1 869,44	7 462 393 S/	±339 560

La moneda está en PEN. Los errores estándar de eliminación y los montos de beneficios se basan en errores estándar de puntos muestreados y clasificados. El carbono secuestrado se basa en 306 000 t/km²/año. El carbono almacenado se basa en 7 684 808 t/km². El carbono se valora en 181,64 S//t. (Unidades métricas: t=toneladas, toneladas métricas; km²=kilómetro cuadrado). Fuente: Reporte i-Tree Canopy.

Otros resultados importantes relacionados con la remoción y eliminación de los contaminantes del aire se encuentran en la Tabla 14. Estos valores resultan siendo muy importantes en el reporte que genera la herramienta, ya que se trata también de las estimaciones de los beneficios ecosistémicos de los árboles que más repercuten sobre la salud de las personas que viven en las áreas urbanas del

distrito de San Miguel. Según los datos mostrados, el ozono (O₃) eliminado anualmente es el contaminante más removido por el dosel arbóreo urbano con 7 878,90 (±358,51) kg, seguido por PM10 con 2 236,20 (±101,75) kg, NO₂ con 1 019,96 (±46,41) kg, SO₂ con 501,40 (±22,82) kg, PM2.5 con 402,50 (±18,32) kg y CO con 184,63 (±8,40) kg. Asimismo, es importante analizar que a pesar de que el mayor contaminante removido fue el ozono (O₃), el que mayor valor económico representa para la ciudad es la remoción anual de PM2.5 con un valor de S/ 167 331 (±7 614). La remoción de todos estos contaminantes representa un ahorro de S/ 304 963 (±13 877) para el distrito de San Miguel.

Tabla 14
Beneficios ecosistémicos de remoción de contaminantes del aire

Beneficios Estimados de los árboles: Contaminantes del aire (unidades métricas)					
Abr.	Descripción	Cantidad (kg)	±SE	Valor (PEN)	±SE
CO	Monóxido de carbono removido anualmente	184,63	±8,40	961	±44
NO ₂	Dióxido de nitrógeno removido anualmente	1 019,96	±46,41	1 740	±79
O ₃	Ozono removido anualmente	7 878,90	±358,51	79 929	±3 637
PM ₁₀ *	Partículas de más de 2.5 micras y menos de 10 micras removidas anualmente	2 236,20	±101,75	54 739	±2 491
PM _{2.5}	Partículas de menos de 2.5 micrones removidas anualmente	402,5	±18,32	167331	±7 614
SO ₂	Dióxido de azufre eliminado anualmente	501,4	±22,82	262	±12
Total		12 223,59	±556,21	304 963 S/	±13 877

La moneda está en PEN. Los errores estándar de eliminación y los montos de beneficios se basan en errores estándar de puntos muestreados y clasificados. Las estimaciones de la contaminación del aire se basan en estos valores en kg / km² / año @ S // kg / año:

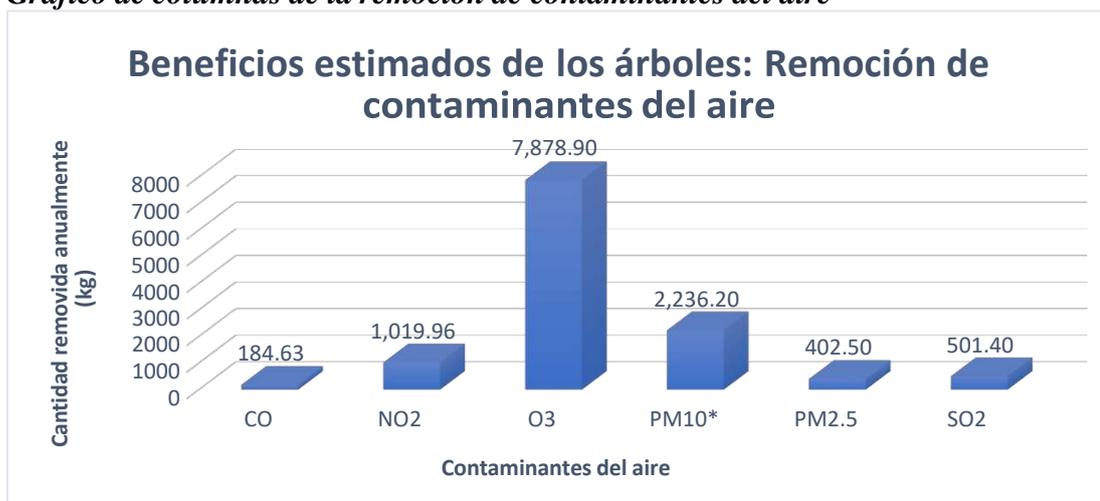
CO 126 629 @ 5,21 S / | NO₂ 699 548 @ 1,71 S / | O₃ 5 403 789 @ 10,14 S / | PM₁₀ * 1 533 708 @ 24,48 S / | PM_{2.5} 276 059 @ 415 73 S / | SO₂ 343 887 @ 0,52 S / (Unidades métricas: kg = kilogramos, km² = kilómetros cuadrados). Fuente: Reporte i-Tree Canopy.

A partir de la Tabla 12 se analizaron los valores generados por la herramienta Canopy de i-Tree con la ayuda de gráficos, los cuales nos ayudarán a tener un mejor entendimiento de los datos obtenidos por la encuesta de puntos. En la Figura 13 se puede apreciar la representación de los datos con la ayuda de un gráfico de columnas de la cantidad removida anualmente (kg) de los principales contaminantes del aire en el distrito de San Miguel. En este gráfico de columnas se puede reafirmar que el contaminante más removido es el ozono (O₃) con más

de 7,8 toneladas, seguido por material particulado mayor a 2,5 micras y menor a 10 micras (PM10*) con más de 2,2 toneladas, dióxido de nitrógeno (NO₂) con poco más de 1 tonelada; a los cuales le suceden en menor cantidad removida a 1 tonelada los contaminantes como dióxido de azufre (SO₂), material particulado menor a 2,5 micras (PM2,5) y monóxido de carbono (CO).

Figura 13

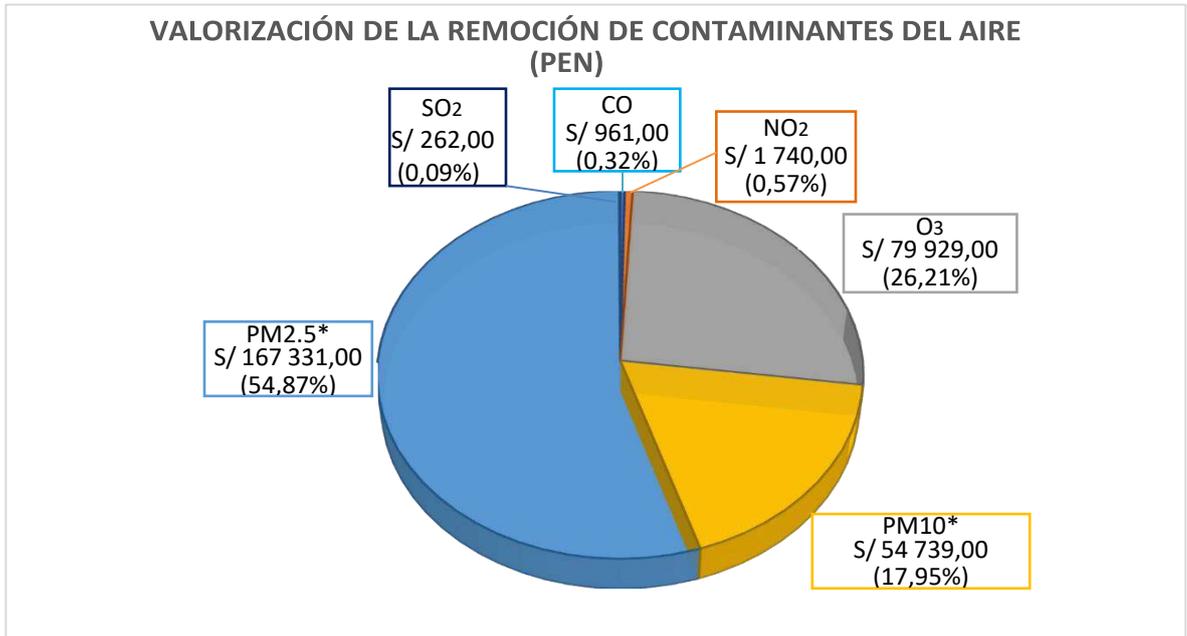
Gráfico de columnas de la remoción de contaminantes del aire



De igual manera se procesaron los datos obtenidos sobre los valores económicos que representa remover anualmente los contaminantes del aire por el dosel del arbolado urbano. En la Figura 14 se puede visualizar la distribución de la valorización de remoción de cada contaminante del aire, en el que el material particulado menor a 2,5 micras (PM2.5) tiene la mayor participación sobre la valorización total (S/ 304 963,00 ± S/ 13 877,00), con S/ 167 331,00 (54,87%), seguido por el ozono (O₃) con S/ 79 929,00 (26,21%), material particulado mayor a 2,5 micras y menor a 10 micras (PM10*) con S/ 54 739,00 (17,95%), dióxido de nitrógeno (NO₂) con S/ 1 740,00 (0,57%), monóxido de carbono (CO) con S/ 961,00 (0,32%) y por último dióxido de azufre (SO₂) con S/ 262,00 (0,09%).

Figura 14

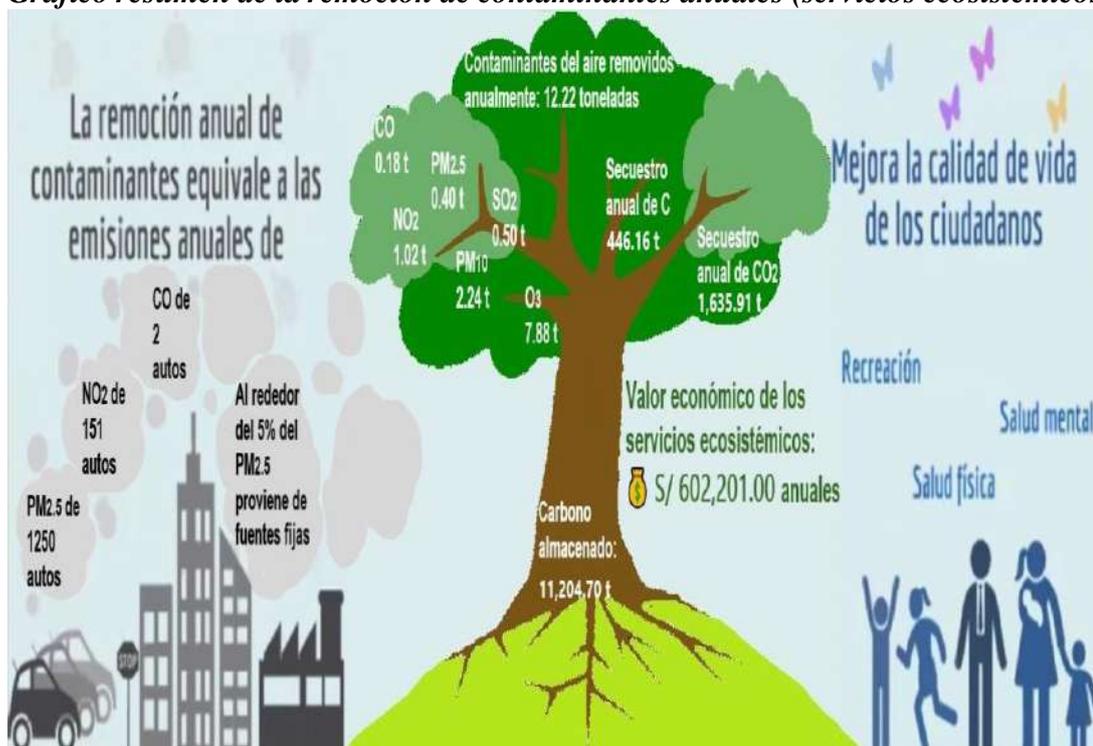
Gráfico circular de la valorización estimada de la remoción de contaminantes



Todos los beneficios estimados del arbolado urbano, de los cuales derivan los servicios ecosistémicos se ven resumidos en la Figura 15, los cuales fueron basados y adaptados a los datos presentados por M. del P. Arroyave (docente en la universidad EIA) en su exposición sobre “Aportes de la universidad EIA a la silvicultura urbana”, sobre el proyecto “Evaluación de servicios ecosistémicos del bosque urbano del valle de Aburra” del año 2017. En dicho gráfico se muestran las proporciones equivalentes de emisiones de contaminantes del aire por parte de los autos, zonas comerciales y fábricas, en relación a la captura y remoción de éstos por parte de la cobertura de dosel del arbolado urbano.

Figura 15

Gráfico resumen de la remoción de contaminantes anuales (servicios ecosistémicos)



Fuente: Elaboración basada en datos de la universidad EIA (2017).

3.1.4 Indicadores ecosistémicos

Con los datos obtenidos se puede analizar los beneficios y obtener indicadores ecosistémicos en el distrito de San Miguel, tomando en cuenta el dato de la población actual censada por el INEI (2018), los datos de cobertura brindados por i-Tree Canopy, los datos de la MML (2014) y la información obtenida del inventario forestal urbano. Para fines prácticos se hará la conversión de los datos a m², con la finalidad de obtener indicadores per cápita de m²/habitante (ver Tabla 15).

Tabla 15

Análisis de resultados y generación de indicadores ecosistémicos en San Miguel

Ciudad (distrito)	Área total cubierta (m ²)	Población urbana (hab.)	Área verde (m ²)	Cobertura arbórea (m ²)	Número de árboles (inventario)	Área verde per cápita (m ² /hab.)	Cobertura arbórea per cápita (m ² /ha.)	Árboles per cápita (árboles/hab.)
San Miguel	10 720 000	155 328	1 705 014,30	1 460 000	22 123	10,98	9,40	0,14

Los **indicadores ecosistémicos relacionados con la salud pública** del distrito se resumen en superficie de área verde por habitante, número de árboles por habitante y número de área de cobertura de dosel arbóreo por habitante (ver Tabla 16).

Los indicadores más importantes que se han obtenido son las áreas verdes por habitante (10,98 m²/hab), número de árboles por habitante (0,14 árb /hab) y el área de cobertura arbórea por habitante (9,4 m²/hab). Para el primer indicador se tiene un valor por encima de distritos como Jesús María (9 m²/hab) o La Molina (10,3 m²/hab), de acuerdo con el “Quinto Informe de Resultados Sobre Calidad de Vida” de la MML (2014). De acuerdo con Vanegas y Martínez (2021), para el segundo indicador se tiene un valor (aproximadamente 1 árbol por cada 7 personas) por debajo de lo recomendado por la OMS, que es al menos un árbol por cada 3 personas (0,33 árb/hab). El tercer indicador está por debajo del primer indicador, midiendo ambos cobertura vegetal por habitante.

Tabla 16
Indicadores relacionados a la salud pública del distrito

SALUD PÚBLICA				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE 1	VALOR VARIABLE 2	RESULTADO (V1/V2)
Número de áreas verdes por habitante	m ² /hab	1 705 014,3	155 328	10,98
Número de árboles por habitante	árb/hab	22 123	155 328	0,14
Número de área de cobertura de dosel arbóreo por habitante	m ² /hab	1 460 000	155 328	9,40

De igual manera se obtuvieron **indicadores de gestión ambiental**, relacionados a la remoción anual de contaminantes por árbol en kilogramos anuales por árbol (ver Tabla 17). Asimismo, para la cantidad de carbono (C) secuestrado anualmente por árbol y para la cantidad de CO₂ (equivalente) secuestrado anualmente por árbol se obtuvo resultados en toneladas anuales por árbol. Para la cantidad de C almacenado por cada árbol y para la cantidad de CO₂ (equivalente) almacenado por árbol se obtuvieron resultados en toneladas métricas por árbol (no anual).

Tabla 17*Indicadores relacionados a la remoción anual de contaminantes por árbol*

GESTIÓN AMBIENTAL				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE 1	VALOR VARIABLE 2	RESULTADO (V1/V2)
Cantidad de C secuestrado anualmente por árbol	t(anual)/árb.	446,16	22 123	0,020
Cantidad de CO ₂ (equiv.) secuestrado anualmente por árbol	t(anual)/árb.	1 635,91	22 123	0,074
Cantidad de C almacenado por árbol (no es una tasa anual)	t/árb.	11 204,7	22 123	0,506
Cantidad de CO ₂ (equiv.) almacenado por árbol (no es una tasa anual)	t/árb.	41 083,9	22 123	1,857
Cantidad CO removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	184,63	22 123	0,008
Cantidad de NO ₂ removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	1 019,96	22 123	0,046
Cantidad de O ₃ removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	7 878,9	22 123	0,356
Cantidad de PM ₁₀ removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	2 236,2	22 123	0,101
Cantidad de PM _{2.5} removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	402,5	22 123	0,018
Cantidad de SO ₂ removido anualmente por árbol	Kg(anual)/árb.	501,4	22 123	0,023

Por último, también se obtuvieron **indicadores de contaminantes removidos por el arbolado urbano, que fueron cuantificados económicamente con un valor monetario (soles)** por los servicios prestados por parte del arbolado urbano (ver Tabla 18). Cabe mencionar que los parámetros de medición del costo por remoción de contaminantes y el costo por captura de tonelada de CO₂ están en función a datos de los EE.UU. Asimismo, de acuerdo con MINAM (2020), el Perú ha dado un paso en valorizar el carbono al establecer el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), el precio social al carbono de 7,17 USD la tCO_{2e}; sin embargo, aún no está del todo implementado en el país.

Tabla 18*Indicadores de contaminantes removidos por árbol (expresados en valor monetario)*

CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA				
INDICADOR	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR VARIABLE	VALOR VARIABLE	RESULTADO (V1/V2)
Cantidad de C secuestrado anualmente por árbol	S// árb.	297 144	22 123	13,43
Cantidad de CO2 (equiv.) secuestrado anualmente por árbol	S// árb.	Equivalente*	22 123	Equivalente*
Cantidad de C almacenado por árbol (no es una tasa anual)	S// árb.	7 462 393	22 123	337,31
Cantidad de CO2 (equiv.) almacenado por árbol (no es una tasa anual)	S// árb.	Equivalente**	22 123	Equivalente**
Valor de compensación monetaria de CO removido anualmente por árbol	S// árb.	961	22 123	0,04
Valor de compensación monetaria de NO2 removido anualmente por árbol	S// árb.	1 740	22 123	0,08
Valor de compensación monetaria de O3 removido anualmente por árbol	S// árb.	79 929	22 123	3,61
Valor de compensación monetaria de PM10 removido anualmente por árbol	S// árb.	54 739	22 123	2,47
Valor de compensación monetaria de PM2.5 removido anualmente por árbol	S// árb.	167 331	22 123	7,56
Valor de compensación monetaria de SO2 removido anualmente por árbol	S// árb.	262	22 123	0,01

Nota: *Equivalente al C secuestrado anualmente por árbol.

**Equivalente al C almacenado por árbol (no anual).

3.1.5 Aplicación de indicadores ecosistémicos en la gestión ambiental

a. Uso de herramientas e indicadores para mejor toma de decisiones

Con la ejecución del inventario forestal urbano, la herramienta i-Tree Canopy y el uso de datos estadísticos se logró obtener indicadores de servicios ecosistémicos (ver Tablas 13, 14 y 15) que están ayudando a mejorar la toma de decisiones, teniendo en cuenta que los indicadores son una línea base y estos se deben incrementar para

mitigar el impacto de la contaminación ambiental. De esta manera se logró afrontar la escasez de presupuesto en la municipalidad, usando los mismos recursos humanos y económicos, así como una herramienta digital gratuita, que ayudará a visualizar los beneficios económicos al tomar mejores decisiones.

b. Desarrollo de planes de trabajo con metas claras a corto, mediano y largo plazo

Como consecuencia del trabajo realizado, a partir del año 2018 se logró desarrollar planes de trabajo trimestrales y anuales con objetivos y metas claras, que se continúan ejecutando para mejorar el manejo y la gestión ambiental del arbolado urbano del distrito, los mismos que han sido usados para desarrollar campañas ambientales como “sembrando futuro” con la participación de toda la comunidad sanmiguelina (ver Figuras 16 y 17). Asimismo, los indicadores podrían elevarse si se arborizan los espacios aprovechables de suelo desnudo o sin cobertura vegetal, que llegan aproximadamente a las 131 hectáreas, esto sin mencionar la arborización de espacios con cobertura de pastos o herbácea, que pueden llegar a las 115 hectáreas.

Figura 16

Campaña sembrando futuro: Malecón Av. Costanera



Figura 17

Campaña sembrando futuro: I.E. N° 024 Rosa Irene Infante



c. Programas de cooperación con entidades públicas y privadas

El producto de este trabajo tiene la intención de incrementar los indicadores ecosistémicos, y que en la búsqueda de la diversificación de especies, se logró tener una mejor comunicación con la MML, a través de SERPAR para desarrollar y ejecutar programas de cooperación concernientes a la arboricultura urbana; asimismo, se implementaron programas de educación ambiental y campañas de arborización con entidades públicas, organizaciones sin fines de lucro e instituciones privadas como colegios, institutos y universidades, como por ejemplo el programa “Árboles de Lima”, donde se tiene un convenio de cooperación con el Servicio de Parques de Lima (SERPAR) (ver Figura 18). Es por esta razón que se plantea la necesidad del uso y la aplicación de la familia de herramientas de i-Tree en todos los 42 distritos de Lima Metropolitana, tal y como se viene realizando en todas las megaciudades del mundo.

Figura 18
Programa “Árboles de Lima” en las áreas verdes de San Miguel



d. Selección y variedad de especies forestales a instalar

De acuerdo a las necesidades de mejorar la calidad del aire y de incrementar otros beneficios ecosistémicos se hizo una selección de especies forestales, de acuerdo a las características deseables en cuanto a forma de copa y tipo de hojas, dependiendo de las necesidades de las diferentes zonas del distrito. Así, por ejemplo, se evitó realizar excesivamente la instalación de plantones de *Hibiscus tiliaceus*, y en su lugar, se comenzó a instalar sólo en zonas con mayor impacto de la brisa marina o en áreas previamente seleccionadas.

Por tal motivo, se seleccionó especies exóticas y nativas, adaptadas al clima de San Miguel para cubrir áreas sin cobertura vegetal y con poco acceso a un riego constante. Las demás especies (nativas o exóticas) se seleccionaron para cubrir otros espacios con una mayor demanda hídrica y con acceso constante de riego. También se eligieron aquellas especies aptas para cada espacio, teniendo en cuenta siempre el favorecimiento para el correcto desarrollo de sus raíces, acceso a luz, acceso a nutrientes, entre otros factores importantes.

e. Incremento y diversificación de la arborización

Gracias a la información obtenida por la herramienta i-Tree Canopy, los datos del inventario forestal urbano, los indicadores de servicios ecosistémicos y a la mejora en la toma de decisiones, se diversificó la selección de especies e incrementó el número de árboles instalados a partir del año 2019 con diferentes especies (ver Tabla 19). Asimismo, se revalorizó los parques, calles y avenidas más emblemáticos del distrito de San Miguel, como el Pq. Juan Pablo II, los alrededores del Pq. Media Luna, el malecón de la Av. Costanera y el malecón de la Av. Bertolotto, entre otras áreas verdes de gran valor e historia del distrito (ver Figura 19, 20, 21); sin embargo, debido a la pandemia, el ritmo de plantación bajó drásticamente a partir del año 2020. Por otro lado, se consideró instalar estas especies en sistemas multiestratos para que no compitan en altura, luz, copa y nutrientes del suelo.

Figura 19

Árboles de Tulipán africano en Parque Juan Pablo II



Figura 20

Arborización diversificada en Parque Juan Pablo II



Figura 21

Arborización diversificada en Malecón Bertolotto



Tabla 19

Evolución de la arborización en el distrito de San Miguel (años 2016-2021)

AÑO	NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	CANTIDAD	TOTAL POR AÑO	LUGAR DE INSTALACIÓN
2016	Palmera Phoenix	<i>Phoenix dactylifera</i>	8	628	Instalación: Alrededores del Pq. Machupicchu
	Meijo	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	620		Instalación: Alrededores del Pq. Machupicchu, Av. Libertad y Av. Costanera (cdra. 17 y 18)
2017	Huarango	<i>Acacia macracantha</i>	640	2105	Instalación: Bermas laterales de parques, calles y avenidas
	Meijo	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	1465		Instalación: Bermas laterales de la Costa Verde y malecón de Av. Costanera (cdra. 14-29)
2018	Meijo	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	280	530	Instalación: Bermas laterales de parques, calles y avenidas
	Huarango	<i>Acacia macracantha</i>	250		Instalación: Bermas laterales de parques, calles y avenidas
2019	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolius</i>	500	800	Instalación: Malecón de Av. Costanera (cdra.7-13), Pq. Juan pablo II, Pq. Chicama-Pucalá, Pq. José Martí, Pq. Monitor Huáscar, Pq. Israel, Pq. Túpac Amaru II, Pq. Del Trabajo, Pq. Lindley y Pq. Sagrada Familia.
	Fresno	<i>Fraxinus excelsior</i>	60		Instalación: Pq. Juan Pablo II, Pq. José Martí, Pq. Monitor Huáscar, Pq. Israel, Pq. Túpac Amaru II, Pq. Del Trabajo, Pq. Lindley y Pq. Sagrada Familia.
	Choloque	<i>Sapindus saponaria</i>	40		
	Eucallipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	40		
	Jacarandá	<i>Jacaranda mimosifalia</i>	80		
	Tipa	<i>Tipuana tipu</i>	80		
2020	Jacarandá	<i>Jacaranda mimosifalia</i>	50	200	Instalación: Pq. Raoul Wallenberg, Pq. Sagrada Familia, Pq. del Trabajo, Pq. Miramar, Jr. Mariscal Antonio José de Sucre (cdra. 1), Pq. Sta. Eulalia, Pq. Pq. Fraternidad, Pq. Junín, Pq. Pershing, Jr. Alfredo Novoa, Pq. César Vallejo, Pq. Carabobo, Pq. 200 Millas, Pq. Miguel Grau, Pq. Vilcahuara, Pq. Chicama-Pucalá, Pq. Argentina, Pq. Chépén y Pq. José Santos Chocano
	Tulipán africano	<i>Spathodea campanulata</i>	50		
	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolius</i>	50		
	Grevillea	<i>Grevillea robusta</i>	50		
2021	Jacarandá	<i>Jacaranda mimosifalia</i>	120	400	Instalación: Malecón Bertolotto (área recreativa), Pq. Paul Harris, Pq. Quiñones, Malecón Av. Costanera (cdra. 6 y 8), Pq. Pedro Planas, Pq. Miroquesada, Pq. César Vallejo, Calle Padre Urraca (cdra. 2 y 3), Cale Dean Saavedra (cdra. 1),
	Huaranhuay	<i>Tecoma stans</i>	119		
	Fresno	<i>Fraxinus excelsior</i>	60		
2021	Casuarina	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	5	400	Calle Padre Guatemala (cdra. 3), Pq. Tungasuca y Calle Eugenio La Torre
	Molle costeño	<i>Schinus terebinthifolius</i>	36		Instalación: Malecón Bertolotto (área recreativa), Pq. Paul Harris y Pq. Quiñones
	Grevillea	<i>Grevillea robusta</i>	60		

3.1.6 Nivel de beneficio obtenido por el centro laboral

- A pesar del bajo presupuesto, el escaso personal y el tiempo limitado con el que contaba la SPJ, se logró ejecutar el inventario forestal urbano, el cual fue solicitado por la MML.
- Gracias a la visión adquirida durante mi desempeño profesional como coordinador general, se logró la capacitación del personal de la SPJ en el uso de herramientas digitales para mejorar el manejo y gestión del arbolado urbano, mediante cursos y talleres dictados por profesionales internacionales, los que eran arboristas certificados y miembros de la International Society of Arboriculture (ISA).
- Se lograron obtener indicadores de servicios ecosistémicos que están ayudando a la toma de decisiones, ahorrando recursos y reinvirtiéndolos para mejorar la gestión ambiental del arbolado urbano, en beneficio de la gestión municipal, del medio ambiente y de los vecinos de San Miguel.

3.1.7 Análisis de contribución en términos de competencias y habilidades adquiridas

- Los conocimientos y competencia adquiridas durante mi formación profesional, así como la experiencia ganada a través de mi desempeño laboral, contribuyeron en las decisiones tomadas para ejecutar exitosamente las actividades y cumplir con las metas planteadas en mi posición como coordinador general.
- En mi desempeño profesional fueron trascendentes los conocimientos adquiridos en cursos como fisiología vegetal, edafología, aprovechamiento forestal, medición forestal, diseño de áreas verdes y arboricultura urbana, entre otros; lo que me permitieron aplicar con base teórica y técnica las acciones propuestas.
- Como profesional se adquirió experiencia y conocimientos en el manejo de áreas verdes, gestión del arbolado urbano, trámites documentarios públicos, mejorar los protocolos de seguridad en el trabajo, coordinar actividades simultáneas, manejo de recursos limitados y la supervisión de cuadrillas conformadas por más de dos centenares de personas.

IV. CONCLUSIONES

1. En relación a los indicadores ecosistémicos evaluados de salud más relevantes se obtuvo 9,4 m² de cobertura de dosel arbóreo por habitante y 0,14 árboles por habitante, valores que se encuentran por debajo de otras ciudades del mundo y por lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud; asimismo, los indicadores de gestión ambiental señalan que el ozono (O₃) fue el contaminante más removido, capturando 0,348 Kg/árbol/año; sin embargo, el de mayor importancia ambiental y económico fue el de PM_{2.5} equivalente a 7,40 S/ / árbol, a pesar de haber mostrado una tasa de remoción menor (0,018 Kg/árbol/año).
2. El inventario forestal urbano al 100% del distrito reportó 22 123 individuos arbóreos en el distrito, siendo las especies más abundantes *Ficus benjamina*, *Schinus terebinthifolius*, *Delonix regia*, *Washingtonia robusta*, *Euphorbia* (*E. ingens* y *E. láctea*), *Schinus molle*, *Dypsis lutescens*, *Spathodea campanulata*, *Yucca Elephantipes* e *Hibiscus tiliaceus*, los mismos que pueden explicar de mejor manera la remoción de contaminantes del aire, así como la captura y almacenamiento de carbono, debido a que muchas de estas especies tienen algunas de las características deseables para tales servicios ambientales.
3. En relación a los servicios ecosistémicos se obtuvo 446,16 t/año de carbono secuestrado, 11 204,70 t de carbono almacenado y 12 223,59 Kg/Km²/año de contaminantes del aire removidos por el arbolado urbano; sin embargo, estos resultados deben ser evaluados en función a la superficie de cobertura del dosel arbóreo, el número de árboles evaluados, las especies presentes y a los factores propias de cada lugar en el que se realiza el estudio.
4. A partir de la interpretación de los resultados obtenidos por los indicadores de servicios ecosistémicos se logró proponer planes de trabajo y actividades pertinentes con el objetivo de gestionar las áreas verdes con fines ambientales, tales como el

convenio de cooperación con SERPAR en el programa “Árboles de Lima” para diversificar la selección y elevar la cantidad de las especies forestales en la arborización del distrito, con la finalidad de mejorar estos indicadores; tales propuestas y estrategias representan instrumentos de línea base para crear futuros planes de acción.

V. RECOMENDACIONES

- Se recomienda ejecutar un segundo proyecto, el cual puede ser realizando un trabajo más completo y complejo como el que se realiza con i-Tree Eco y obtener resultados aún más detallados que confirmen los datos generados por i-Tree Canopy.
- Formar un equipo multidisciplinario y darles una capacitación especial que ayude a ejecutar proyectos usando i-Tree Canopy o i-Tree Eco u otras herramientas útiles como sistemas de información geográfica (SIG) que sirvan como elementos complementarios a dichos estudios.
- Se recomienda considerar este proyecto como un estudio preliminar de línea base que sirva para monitorear futuras investigaciones, como, por ejemplo, el estudio de las relaciones entre la cobertura del dosel del arbolado urbano y los precios de las viviendas, fenómenos naturales, entre otros factores.
- Establecer un plan operativo anual de trabajo, con objetivos para incrementar la cobertura del dosel de arbolado urbano en superficies desnudas o en superficies impermeables, lo que podrá mejorar la calidad de la salud pública y de la gestión ambiental.
- Seguir incrementando y diversificando la arborización en el distrito, con la finalidad de mejorar cada vez más los indicadores de servicios ecosistémicos del distrito.
- Preparar una estrategia integral específica para árboles de propiedad pública y otra para árboles de propiedad privada, lo cual debe ser gestionado en conjunto con los especialistas arboristas del municipio y los vecinos del distrito.

- En distritos o lugares más extensos en superficie se recomienda zonificar y realizar la toma de puntos con i-Tree Canopy por cada zona, de manera independiente, y obtener resultados que nos ayuden a comparar los servicios ecosistémicos en cada una de ellas.
- En el futuro se recomienda incluir los árboles ubicados en predios privados del distrito, debido a que estos no fueron considerados en este inventario forestal urbano.
- Se recomienda que la familia de herramientas i-Tree se homologue con los datos de Perú, para que después sea aplicado en todos los 42 distritos de Lima, así como en otras ciudades del país; tal y como se viene realizando en todas las grandes megaciudades del mundo.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, H; Ibrahim M. (octubre, 2003). ¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles? *Agroforestería en las Américas*, 10(39-40). https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6950/Como_monitorear_el_secuestro.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anjos, M., Lopes, A., y Alves, E. (2018). Uso de modelos CAL3QHC e i-Tree Canopy en evaluación de calidad del aire en Aracaju: estimaciones de la concentración de PM10 en el proceso de Tráfico pesado de automóviles. *Geosp - Espaço y Tempo*, 22(3), 707-728. <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/139515>
- Aránguez, E., Ordóñez, J. M., Serrano, J., Aragonés, M., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A. y Galán, I. (marzo, 1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Rev. Esp. Salud Pública*, 73(2), 123-132. https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arroyave Maya, M. del P., Posada, M. I., Nowak, D. J. y Hoehn, R. E. (2018). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, 22(1), 5–16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>
- Benedetti, G. M., Duval, V. S. y Campo, A. M. (agosto, 2016). Propuesta para el análisis de cobertura del arbolado urbano. Caso de estudio: Pigüé, provincia de Buenos Aires. *Proyección Revista*, 10, 244-258. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/9187/2016-20-12.pdf
- Berrío Ríos, J. C. (2016). *Estimación del valor de no uso del árbol urbano en el valle de Aburrá*. [Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental. Universidad EIA. Ingeniería Ambiental. Envigado, Colombia]. Repositorio Institucional de la Universidad EIA. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/1949>

Cabudivo C. K. (2017). Secuestro de CO₂ y producción de oxígeno en árboles urbanos de la Av. Abelardo Quiñones - Distrito San Juan Bautista, Loreto – Perú, 2016. [Tesis de Ingeniero en Ecología de Bosques Tropicales. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ciencias Forestales. Iquitos, Perú]. Repositorio Institucional Digital de la UNAP. https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/4694/Kelvin_Tesis_Titulo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

City of Woodland. (2018). *Urban Tree Canopy Assessment Woodland, California*.
<https://www.cityofwoodland.org/DocumentCenter/View/2711/Woodland-Urban-Tree-Canopy-Assessment>

Codina, R. A., Llera, J., Fioretti, S. B., Verd, P., Pérez, P. V., Carrieri, S. A., Ureta, N. M. y Manzano E. R. (abril, 2002). Captación de polvo atmosférico por especies ornamentales. *Rev. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo*. 34(2), 73-79. https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/2851/codinaagrarias2-34-02.pdf

Domínguez A. Y. (2016). *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO₂ vehicular en Tijuana, B.C.* [Tesis de Maestría en Administración Integral del Ambiente. El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, México]. Repositorio Institucional. <https://www.colef.mx/posgrado/wp-content/uploads/2016/12/TESIS-Dom%C3%ADnguez-Madrid-Ana-Yurendy.pdf>

Edgar, C. B., Nowak, D. J., Majewsky, M. A. & Lister, T. W. (2021). Strategic national urban forest inventory for the United States. *Journal of Forestry*, 119(1), 86–95. https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/jrnl/2021/nrs_2021_edgar_001.pdf

Establecimiento Público Ambiental (EPA), Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. (2013). *Línea base de caracterización y diagnóstico del estado de la vegetación urbana distrito de Cartagena*. <https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/ecosistemas/vegetacion/linea-base-caracterizacion-y-diagnostico-de-la-vegetacion-urbana/>

- EPA (United States Environmental Protection Agency). (2017). *Criteria air pollutants*.
<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>
- FAO. (2016a). *Beneficios de los árboles urbanos*. Infografía. <http://www.fao.org/resources/infographics/infographics-details/es/c/411598/>
- FAO. (2016b). Directrices para la silvicultura urbana y periurbana. *Estudio FAO: Montes*, (178). <https://www.fao.org/3/i6210s/i6210s.pdf>
- Ferriol, M., Muñoz, S., López, C. y Merle, H. y Garmendia, A. (2014). Capacidad de retención de polvo contaminante de distintas especies de árboles ornamentales en la ciudad de Valencia. En: *XVI Congreso Nacional de Arboricultura*, 1-9. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/98592/110-214-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hwang, W. H. (2015). *Investigating the impact of urban tree planting strategies for shade and residential energy conservation*. [Thesis Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA]. https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/75168/Hwang_W_D_2015.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2018). Compendio Estadístico Provincia de Lima 2018. Sistema estadístico nacional. (27, 29). https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1655/libro.pdf
- i-Tree Canopy (2011). *Technical notes and methodology*. <https://www.itreetools.org/support/resources-overview/i-tree-international>
- López, A. R. y Zamudio C. E. (2004). *Análisis del arbolado urbano público en la ciudad de Linares, N. L. (1995-1999)*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. https://www.isahispana.com/portals/0/docs/treecare/analisis_del_arbolado.pdf

Miller, R. W., Hauer, R. J. & Werner L. P. (2015). *Forestry: Planning and managing urban greenspaces*. Third edition. University of Wisconsin.

Mills, G., Anjos, M. & Brennan, M. (2015) The green ‘signature’ of Irish cities: An examination of the ecosystem services provided by trees using i-Tree Canopy software’. *Irish Geography*, 48(2), 62-77. file:///C:/Users/Usuario/Downloads/625-2305-1-PB.pdf

Ministerio de Salud, Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). (2011). Estudio de saturación Lima Metropolitana y Callao, 2011. http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/Estudio%20de%20Saturacion%202012.pdf

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2020). *El precio al carbono como instrumento de descarbonización en el contexto nacional. Precio al carbono: Situación y perspectivas internacionales*. Proyecto para la Implementación de las metas climáticas del Perú. https://www.congreso.gob.pe/Docs/comisiones2020/CE_Cambio_Climatico_-2020-2021/files/foros_documentos/20_10_06_precio_al_carbono_minam.pdf

Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA). (2014). *Informe final de consultoría “recopilación de información de indicadores de servicios ecosistémicos a nivel nacional e internacional”*. Consultor: Fundación Centro de los Bosques Nativos FORECOS.

Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). (2015). *Guía metodológica para la definición, seguimiento y uso de indicadores de desempeño de los programas presupuestales*. https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publ/ppr/guia_seguimiento_pp.pdf

Municipalidad Distrital de San Miguel (MDSM). (s.f.). *Misión y visión*. <https://www.munisanmiguel.gob.pe/municipalidad-de-san-miguel/mision-y-vision/>

Municipalidad Distrital de San Miguel (MDSM), Gerencia de Planeamiento y Presupuesto. (2020). *Ordenanza Municipal N°403. Reglamento de Organización y Funciones (ROF)*. http://www.munisanmiguel.gob.pe/Transparencia/archivos/ordenanza/ORDE_20200310_403.pdf

- Municipalidad Distrital de San Miguel (MDSM). (2021). *Organigrama. Reglamento de organización y funciones*. https://www.munisanmiguel.gob.pe/Transparencia/archivos/gerencia_planeamiento_presupuesto/2021/ORGAN_2021_001.pdf
- Municipalidad Metropolitana de Lima (MML). (2014). *Ordenanza N°1852: Ordenanza para la conservación y gestión de áreas verdes en la provincia de Lima*. <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/793d8fbb0c8e70f5.pdf>
- Nahuelhual, L., Latorra, P. y Barrena, J. (2016). *Indicadores de servicios ecosistémicos*. Ministerio del Medioambiente, Chile. Technical Report. <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/INDICADORESDESERVICIOSECOSISTMICOS1.pdf>
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E. & Lapoint, E. (2013a). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229-236. <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/NatCarbon2013.pdf>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A. & Hoehn, R. (2013b). *Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects*. <file:///C:/Users/Usuario/Downloads/ModeledPM2.5removalbytreesintenu.S.citiesandassociatedhealth.pdf>
- Nowak, D. & Crane, D. (2000). The urban forest effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions', in Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century. En: *Proc. IUFRO Conference*. 714-720. USA. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/18420>
- Parmehr, E. G., Amati, M., Taylor, E. J. & Livesley, S. J. (2016). Estimation of urban tree canopy cover using random point sampling and remote sensing methods. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 160-171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.011>

- Parque de las Leyendas (19 de octubre 2020). *Botánica*.
<https://leyendas.gob.pe/botanica/jardin-botanico/>
- Presidencia del Consejo de Ministros. (2001). *Decreto Supremo N°074-2001-PCM: Reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental del aire*.
 file:///C:/Users/Usuario/Downloads/1516.pdf
- Priego, C. (2002). *Beneficios del arbolado urbano*.
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano.pdf>
- Reyes Avilés, I., Gutiérrez Chaparro, J. J. (2010). Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la ciudad de Toluca. *Quivera*, 12(1), 96-102. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40113202009.pdf>
- Rivas Torres, D. (2012). *Beneficios de los árboles urbanos*. <https://docplayer.es/422836-Beneficios-de-los-arboles-urbanos.html>
- Rogers, K. & Jaluzot, A. (2015). *Oxford i-Tree canopy cover assessment*. Treeconomics. Oxford City Council. Oxford, U.K.
<https://www.urbantreecover.org/wp-content/uploads/2015/08/Oxford-Canopy-Report.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). *Introducción a los servicios ambientales*. México.
 file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Introduccionalos servicios ambientales.pdf
- Schwab, J. (2009). *Planning the urban forest: ecology, economy, and community development*.
https://planning-org-uploaded-media.s3.amazonaws.com/legacy_resources/research/forestry/pdf/555.pdf
- Tejada, V. C., Rivera, V. J. (2018). Inventario del arbolado urbano del Parque de las Leyendas-FBB. Patronato del Parque de las Leyendas – Felipe Benavides Barreda PATPAL-FBB.

US Forest Service (USFS). (2018). *I-Tree Eco, manual de usuario*.
https://www.itreetools.org/documents/196/EcoV6_UsersManual.es.pdf

US Forest Service (USFS). (4 agosto de 2020). *Introducción a i-Tree Canopy (webinar)* [video]. Youtube https://www.youtube.com/watch?v=4Rw3O6Vih2s&ab_channel=ForestServiceIP-LACC

Vanegas Casas, K. S. y Martínez Sánchez, K. (2021). Evaluación de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la localidad de Fontibón mediante i-Tree. [Proyecto de grado de Ingeniero Forestal. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales]. Repositorio Institucional. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/26463/VanegasCasasKarenSayuriMartinezSanchezKatherine2021.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

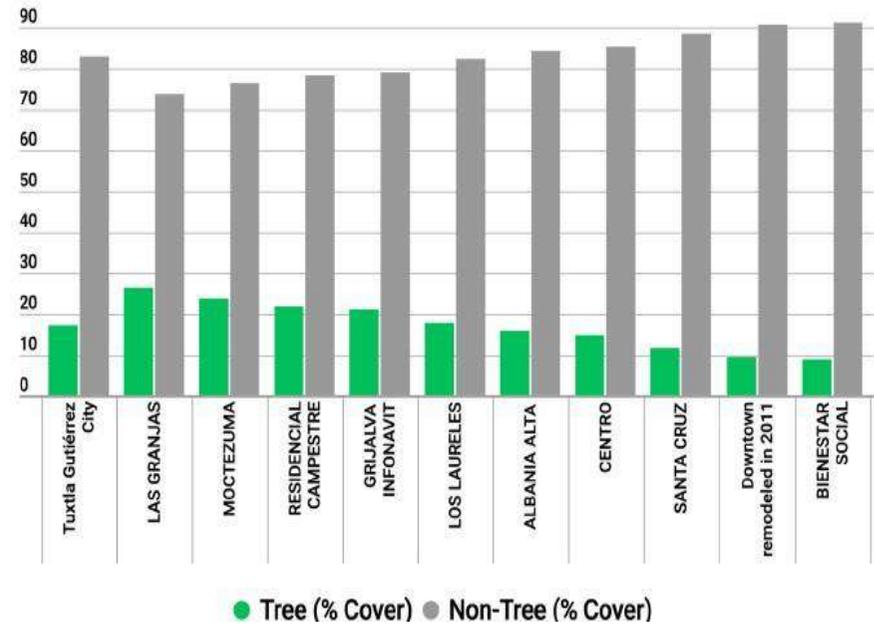
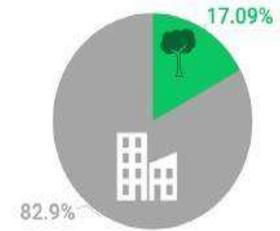
VII. ANEXOS

Anexo 1: Porcentajes de coberturas en ciudad de Tuxtla Gutiérrez usando i-Tree Canopy.

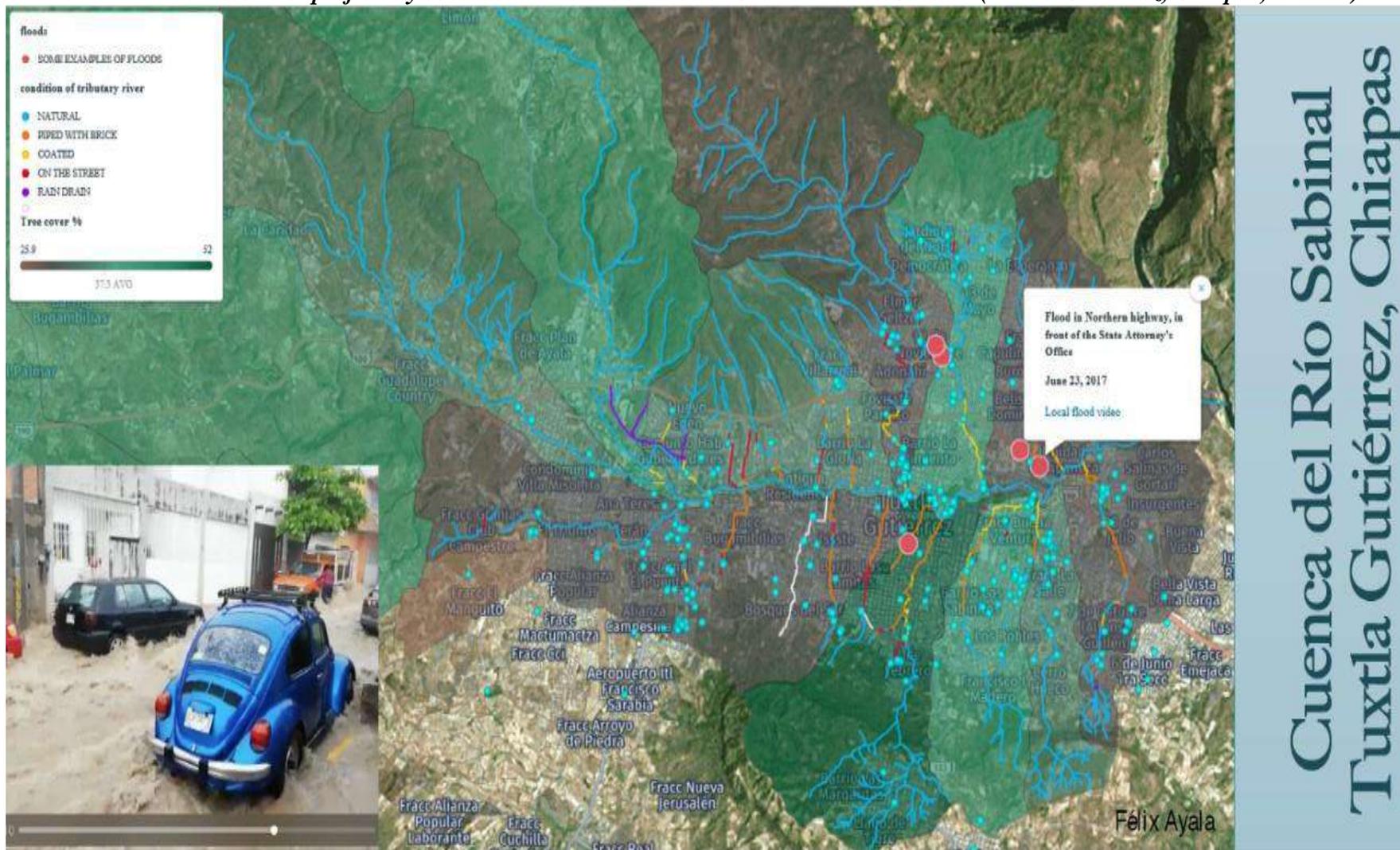
Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas



Fuente: US Forest Service-International Programs (Webinar Programa México, 2020).



Anexo 2: Inundaciones en superficies y % de cobertura arbórea en la Cuenca del río Sabinal (Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México).



Fuente: US Forest Service-International Programs (webinar programa México, 2020).

Anexo 3: Pantalla de inicio de la herramienta i-Tree canopy.

 **i-Tree Canopy** v7.0 [Hogar](#) [Proyecto](#) [Menú](#) [i-Tree](#) Realimentación ▾

¡Bienvenido a i-Tree Canopy! v7.0

Estime la cobertura y los beneficios de los árboles para un área determinada con un proceso de muestreo aleatorio que le permite clasificar fácilmente los tipos de cobertura del suelo.

- Seleccione entre los límites geográficos existentes, dibuje sus propios límites de área de proyecto en Google Maps o cargue un archivo de forma ESRI.
- Puede usar múltiples límites no superpuestos al mismo tiempo.
- i-Tree Canopy genera aleatoriamente puntos de muestra y hace zoom a cada uno para que pueda elegir de su lista predefinida de tipos de cobertura para ese lugar.
- Con i-Tree Canopy, revise las fotografías aéreas de Google Maps en puntos aleatorios para realizar una evaluación de cobertura dentro de un área de proyecto definida.
- Se sugieren 500-1000 puntos de encuesta; cuantos más puntos complete, mejor será su estimación de cobertura para su área de estudio.
- Si se estima la cobertura arbórea, también se pueden estimar los beneficios del árbol.
- Aprenda cómo funciona i-Tree Canopy.
- Recursos de aprendizaje en video



...you select the land cover at those locations.

Id	Cover Class
501	Tree/Shrub
+	Grass/Herbaceous
	Tree/Shrub
	Impervious Buildings
	Impervious Road
	Impervious Other
	Water
	Soil/Bare Ground



Canopy

[Empezar](#)

El uso de esta herramienta indica la aceptación del BULA

i-Tree y sus socios no respaldan ningún navegador web específico, pero se ha probado que i-Tree Canopy funciona bien con las versiones modernas de Chrome, Firefox, Edge y Safari. Utilice el formulario de comentarios para informar problemas.

Advertencia: i-Tree Canopy puede requerir muchos datos. No se recomienda su uso en planes medidos que cobren en función de la cantidad cargada.



Anexo 4: Establecimiento manual de límites, vista satelital

Paso 1 de configuración 3: use el mapa y las herramientas proporcionadas para definir el área que desea encuestar. La opción más fácil es seleccionar un límite preexistente, pero puede dibujar sus propias áreas directamente en el mapa, o cargar en uno o más archivos de forma.



próximo



El uso de esta herramienta indica la aceptación del EULA.

Anexo 5: Establecimiento manual de límites, vista de mapa

The screenshot displays the i-Tree Canopy v7.0 web application. At the top, there is a navigation bar with the i-Tree logo, the text "i-Tree Canopy v7.0", and menu items: "Hogar", "Proyecto", "Menú", and "i-Tree". On the right side of the navigation bar, there is a dropdown menu labeled "Realimentación".

Below the navigation bar, a text box provides instructions for "Paso 1 de configuración 3": "use el mapa y las herramientas proporcionadas para definir el área que desea encuestar. La opción más fácil es seleccionar un límite preexistente, pero puede dibujar sus propias áreas directamente en el mapa, o cargar en uno o más archivos de forma."

The main area of the screenshot is a map of Lima, Peru, showing various districts such as Callao, LA COLONIAL, Cercado de Lima, Breña, La Victoria, BALCONCILLO, San Luis, San Borja, San Isidro, and Magdalena del Mar. A red-shaded area is visible in the San Miguel district, indicating a manually defined boundary. The map includes a search bar in the top left, a zoom control in the bottom left, and a "Google" logo.

On the right side of the map, there is a sidebar with several interactive elements:

- A close button (X) and a text box: "¿Sólo curioso? Sumérgete directamente en el modo de encuesta con un proyecto existente."
- A button: "Lanzar nuestro proyecto de ejemplo"
- A text box: "¿Listo para inspeccionar tu propia área? Use estas funciones para mapear los límites de su proyecto."
- A button: "Límites de los Estados Unidos +"
- A button: "Cargar límite de archivo de forma"
- A button: "Dibujar límite"
- A text box: "Trabajar con límites del mapa"
- Buttons: "Seleccione" and "Eliminar"
- A text box: "¿Puedes combinar múltiples límites?"

At the bottom right of the map, there is a "próximo" button. The footer of the map shows "Datos de mapas © 2020 Términos de uso Notificar un problema de Maps".

Anexo 6: Creación de cobertura de suelos.

i-Tree Canopy
v7.0

Home
Project ▾
Menu ▾
i-Tree

Feedback ▾

Configuration step 2 of 3: On this page, please configure the land cover classes you wish to survey. The default is Tree and Non-Tree, but you may add other classes such as water, impervious, grassland, etc., as well as different types of tree cover, such as deciduous and evergreen.

Save
Load
Tree / Non-Tree
Basic Land Cover

Cover Classes				
Cover Class	Description	Abbreviation	Tree Cover?	Color
ÁRBOL	ÁRBOLES Y ARBUSTOS	A	Yes	#488105
PASTO/HERBÁCEA	SUPERFICIES CON PASTO Y HERBÁCEAS	P	No	#88E956
IMPERMEABLE	SUPERFICIES IMPERMEABLES	IMP	No	#444444
AGUA	CUERPOS DE AGUA	AG	No	#4A90E2
DESNUDO	SUELOS DESNUDOS	D	No	#000000
ARENA	OTRAS (ARENA)	ARE	No	#9B9B9B

+
✎
🗑

Next

Anexo 7: Configuración de zonas, moneda local y de unidades de medida

i-Tree Canopy v1.6 Home Project Menu i-Tree Feedback

Configuration step 3 of 3: Use this page to assign appropriate tree benefit valuations to each land cover class that denotes tree canopy cover.

Save Load

Available Locations <input checked="" type="checkbox"/> United States of America	Selected Locations <ul style="list-style-type: none"> United States of America <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> All <input type="radio"/> Rural <input checked="" type="radio"/> Urban 	Currency Code PEN	Measurement Units Metric
--	---	--------------------------------	---------------------------------------

Air Pollution Hydrological Carbon

Air Pollution Benefits			
Abbreviation	Description	Removal Rate (g/m ² /yr)	Monetary Value (\$/t/yr)
CO	Carbon Monoxide removed annually		0.127 \$5,207.37
NO2	Nitrogen Dioxide removed annually		0.700 \$1,706.26
O3	Ozone removed annually		5.404 \$10,144.65
PM10*	Particulate Matter greater than 2.5 microns and less than 10 microns removed annually		1.534 \$24,478.44
PM2.5	Particulate Matter less than 2.5 microns removed annually		0.276 \$415,727.39
SO2	Sulfur Dioxide removed annually		0.344 \$522.68

* Currency is in PEN. Metric Units: g = grams, t = metric ton, m = meters



Next

Anexo 8: Ejemplo de encuesta y toma de datos

The image displays the i-Tree Canopy Survey web application interface. It features a map view on the left and a data table on the right. A red crosshair is visible on the map, indicating a survey point. The data table lists various land cover categories and their corresponding coordinates. An 'Options' dialog box is shown at the bottom right, allowing users to configure report settings.

id	Cover Class	Latitude	Longitude
1	Impervious Other	41.74094	-72.65320
2	Impervious Road	41.74315	-72.66277
3	Tree/Shrub	41.70941	-72.60937
4	Grass/Herbaceous	41.78738	-72.69409
5	Tree/Shrub	41.73479	-72.67216
6	Impervious Other	41.78046	-72.66089
7	Tree/Shrub	41.79791	-72.71115
8	Tree/Shrub	41.74369	-72.66156
9	Grass/Herbaceous	41.80402	-72.71483
10	Grass/Herbaceous	41.79908	-72.65136

Options

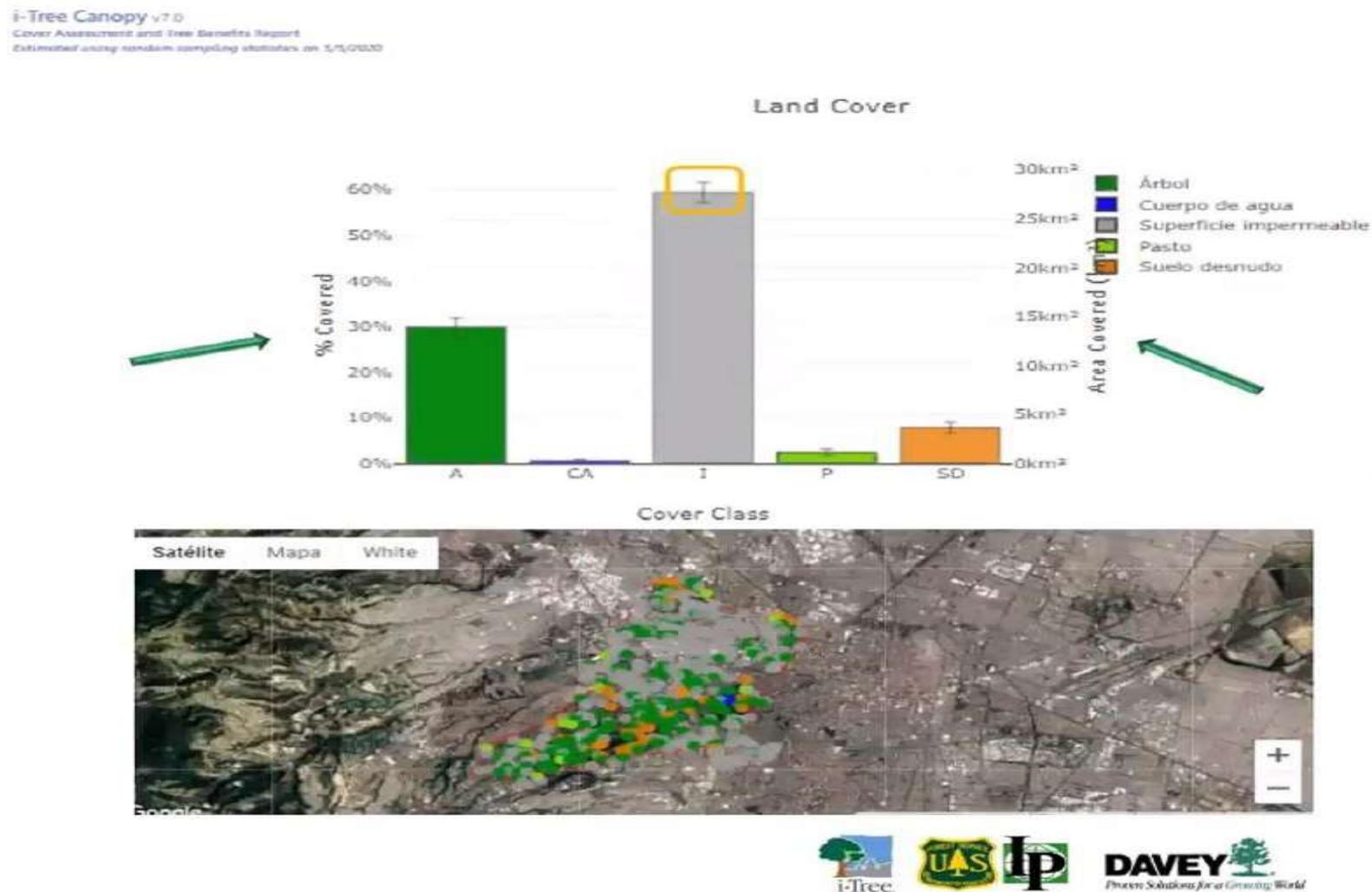
Report By: Percentage Area English

Display:

- H - Grass/Herbaceous
- T - Tree/Shrub
- IB - Impervious Buildings
- IR - Impervious Road
- IO - Impervious Other
- W - Water
- S - Soil/Bare Ground

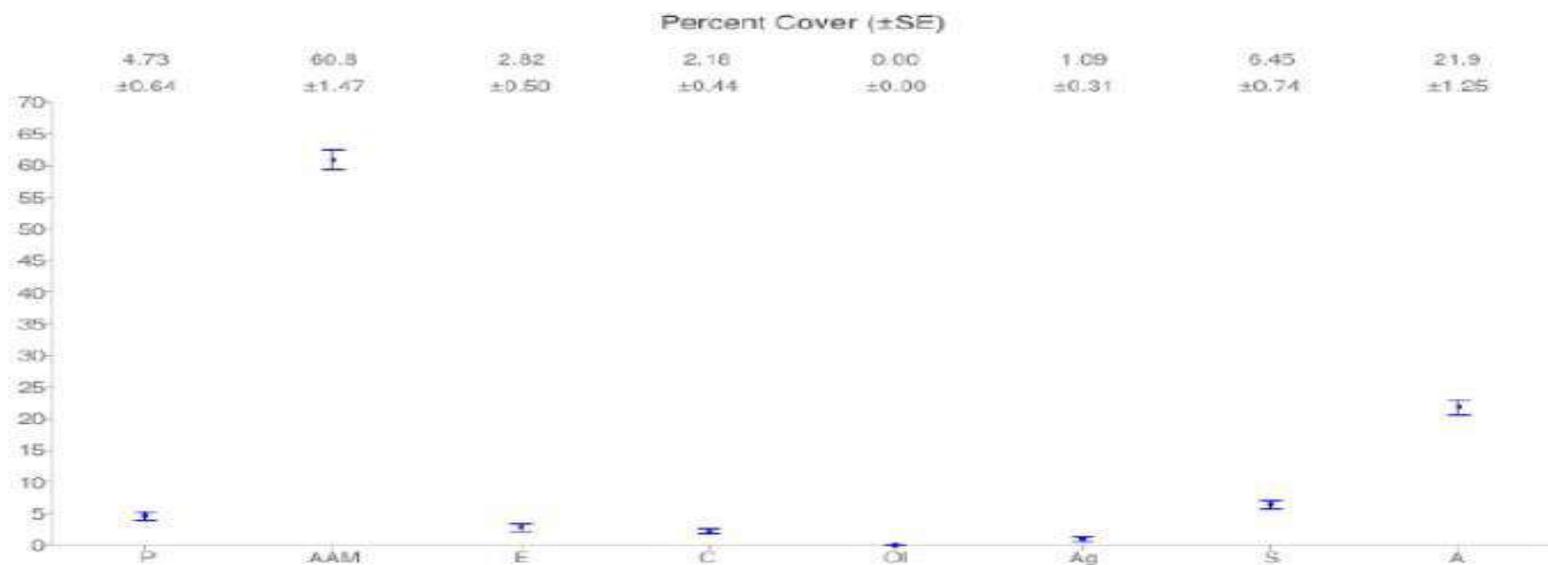
Fuente: US Forest Service, México program (2018)

Anexo 9: Ejemplo de reporte de resultados: Gráfico de columnas e imagen satelital



Fuente: US Forest Service, México program (2018).

Anexo 10: Ejemplo de reporte de resultados: Gráfico de columnas y cuadro de coberturas



Cover Class	Description	Abbr.	Points	% Cover
Pasto/Herbaceas	Pasto o maleza	P	52	4.73 ±0.64
Árboles/Arbustos/Matorrales	Todas las superficies con arbolado	AAM	669	60.8 ±1.47
Eficiaciones	Toda construcción de edificios, casas, etc.	E	31	2.82 ±0.50
Caminos	Carreteras, calles, banquetas, caminos	C	24	2.18 ±0.44
Otros Impermeables	Rocas, grava, etc.	OI	0	0.00 ±0.00
Agua	Cuerpos o corrientes de agua	Ag	12	1.09 ±0.31
Suelo	Suelos con o sin erosión	S	71	6.45 ±0.74
Agricultura	Con cultivos o destinadas a ello	A	241	21.9 ±1.25



Fuente: US Forest Service, México program (2018).

Anexo 11: Ejemplo de reporte de resultados: Cuadro de beneficios

Abbr.	Benefit Description	Value (MXN)	±SE	Amount	±SE
CO	Carbon Monoxide removed annually	144,743.59 MXN	±0.00	81.15 t	±0.00
NO2	Nitrogen Dioxide removed annually	249,194.45 MXN	±0.00	442.49 t	±0.00
O3	Ozone removed annually	12,977,544.58 MXN	±0.00	4.41 kt	±0.00
PM2.5	Particulate Matter less than 2.5 microns removed annually	26,828,962.23 MXN	±0.00	214.14 t	±0.00
SO2	Sulfur Dioxide removed annually	43,554.10 MXN	±0.00	278.85 t	±0.00
PM10*	Particulate Matter greater than 2.5 microns and less than 10 microns removed annually	9,421,363.35 MXN	±0.00	1.48 kt	±0.00
CO2seq	Carbon Dioxide sequestered annually in trees	665,576,421.13 MXN	±0.00	897.34 kt	±0.00
CO2stor	Carbon Dioxide stored in trees (Note: this benefit is not an annual rate)	16,781,254,968.67 MXN	±0.00	22.62 Mt	±0.00

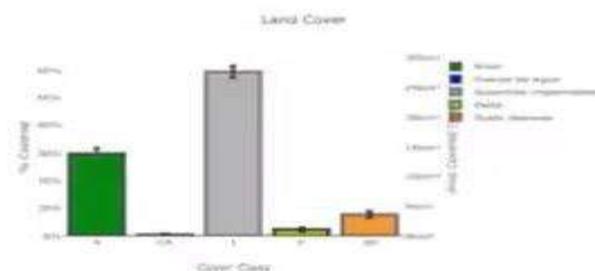
Fuente: US Forest Service, México program (2018).

Anexo 12: Reporte de resultados (gráfico de columnas y cuadros de coberturas)

i-Tree Canopy v7.0

Cover Assessment and Tree Benefits Report

Estimated using random sampling statistics on 5/5/2020



Abbr.	Cover Class	Description
A	Árbol	Árbol
CA	Cuerpo de agua	Agua
I	Superficie impermeable	Impermeable
P	Pasto	Pasto
SD	Suelo desnudo	Suelo desnudo
Total		

Points	% Cover ± SE	Area (km ²) ± SE
149	29.80 ± 2.05	13.90 ± 0.95
3	0.60 ± 0.35	0.28 ± 0.16
297	59.40 ± 2.20	27.70 ± 1.02
12	2.40 ± 0.68	1.12 ± 0.32
39	7.80 ± 1.20	3.64 ± 0.56
500	100.00	46.64

Fuente: US Forest Service, programa México (2020).



Anexo 13: Reporte de resultados (cuadro de beneficios estimados de remoción de contaminantes)

i-Tree Canopy v7.0

Cover Assessment and Tree Benefits Report

Estimated using random sampling statistics on 5/5/2020



Tree Benefit Estimates: Air Pollution (Metric units)

Abbr.	Description	Amount (t)	±SE	Value (MXN)	±SE
CO	Carbon Monoxide removed annually	1.76	±0.12	\$62,215	±4,270
NO2	Nitrogen Dioxide removed annually	9.72	±0.67	\$112,617	±7,730
O3	Ozone removed annually	75.10	±5.15	\$5,172,234	±355,021
PM10*	Particulate Matter greater than 2.5 microns and less than 10 microns removed annually	21.31	±1.46	\$3,542,167	±243,133
PM2.5	Particulate Matter less than 2.5 microns removed annually	3.84	±0.26	\$10,828,115	±743,239
SO2	Sulfur Dioxide removed annually	4.78	±0.33	\$16,959	±1,164
Total		116.51	±8.00	\$19,734,307	±1,354,557

Currency is in MXN. Standard errors of removal and benefit amounts are based on standard errors of sampled and classified points. Air Pollution Estimates are based on these values in t/km²/yr @ \$/t/yr: CO 0.127 @ \$35,353.23 | NO2 0.700 @ \$11,583.90 | O3 5.404 @ \$68,872.82 | PM10* 1.534 @ \$166,186.00 | PM2.5 0.276 @ \$2,822,404.68 | SO2 0.344 @ \$3,548.49 (Metric units: t = tonnes, metric tons, km² = square kilometers)



Fuente: US Forest Service, programa México (2020).

Anexo 14: Punto número 15 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v1.0 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

View Results Report

Add New Point

ID: 15

Cover Class: ARBOL

Latitude: -12.093341782025524

Longitude: -77.08073969976277

Save Save & Create New

Save your Project

Save Save often - don't lose your data!

Logos: Google, DAVEY, Arbor Day Foundation, ISA, Casey Trees

Anexo 15: Punto número 682 de la encuesta de puntos

Cover Class	% Covered	Area Covered (km²)
ÁRBOL	~15%	~10
ARBOL	~5%	~5
ARBOL	~15%	~10
ARBOL	~60%	~40
ARBOL	~15%	~10

View Results [Report](#)

Add New Point

ID: 682

Cover Class: ÁRBOL

Latitude: -12.07759773550933

Longitude: -17.09679725796871

[Save](#) [Save & Create New](#)

Save your Project

[Save](#) Save often - don't lose your data!



Anexo 16: Punto número 685 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v1.2 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

Map Labels: Cto. de Pájaros, Cto. de Pájaros, Cto. de Pájaros

Bar Chart Data:

Cover Class	% Covered	Area Covered (km²)
ARBOL	~15%	~0.015
OTRO	~10%	~0.010
OTRO	~10%	~0.010
OTRO	~65%	~0.065

View Results Report

Add New Point

ID: RES

Cover Class: ARBOL

Latitude: +13.081434032279617

Longitude: -77.10881321980073

Save Save & Create New

Save your Project

Save Save often - don't lose your data!

Logos: Google, DAVEY, Arbor Day Foundation, SWLD, ISA, Casey Trees

Anexo 17: Punto número 837 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v3.0 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

Cover Class	% Covered	Area Covered (km²)
ÁRBOL	~15%	~1000
GRAMA	~2%	~100
OTRO	~15%	~1000
IMPERMEABLE	~70%	~5000
AGUA	~0%	~0

View Results [Report](#)

Add New Point

ID: 837

Cover Class: ÁRBOL

Latitude: -12.08065430487305

Longitude: -77.10600627130054

[Save](#) [Save & Create New](#)

Save your Project

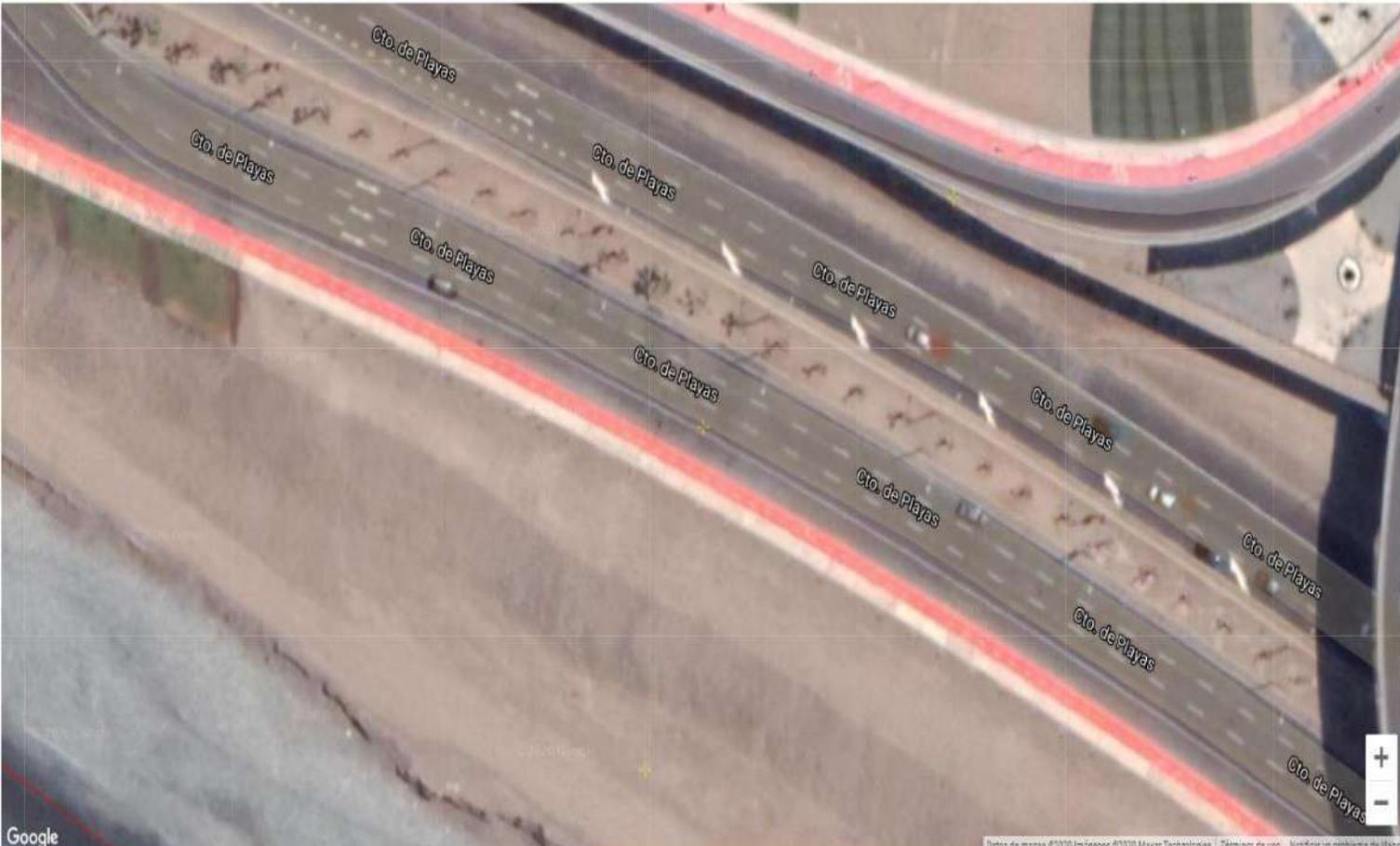
[Save](#) Save often - don't lose your data!

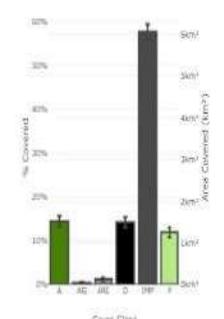


Anexo 18 Punto número 838 de la encuesta de puntos

 i-Tree Canopy 4.2.0 [Home](#) [Project](#) [Menu](#) [i-Tree](#)
[Feedback](#)

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the **+** button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.





Cover Class	Area Covered (km²)
A	~12
AG	~2
AR	~15
D	~10
SF	~55
F	~10

View Results
[Report](#)

Add New Point

ID:

Cover Class:

Latitude:

Longitude:

Save your Project

Save often - don't lose your data!



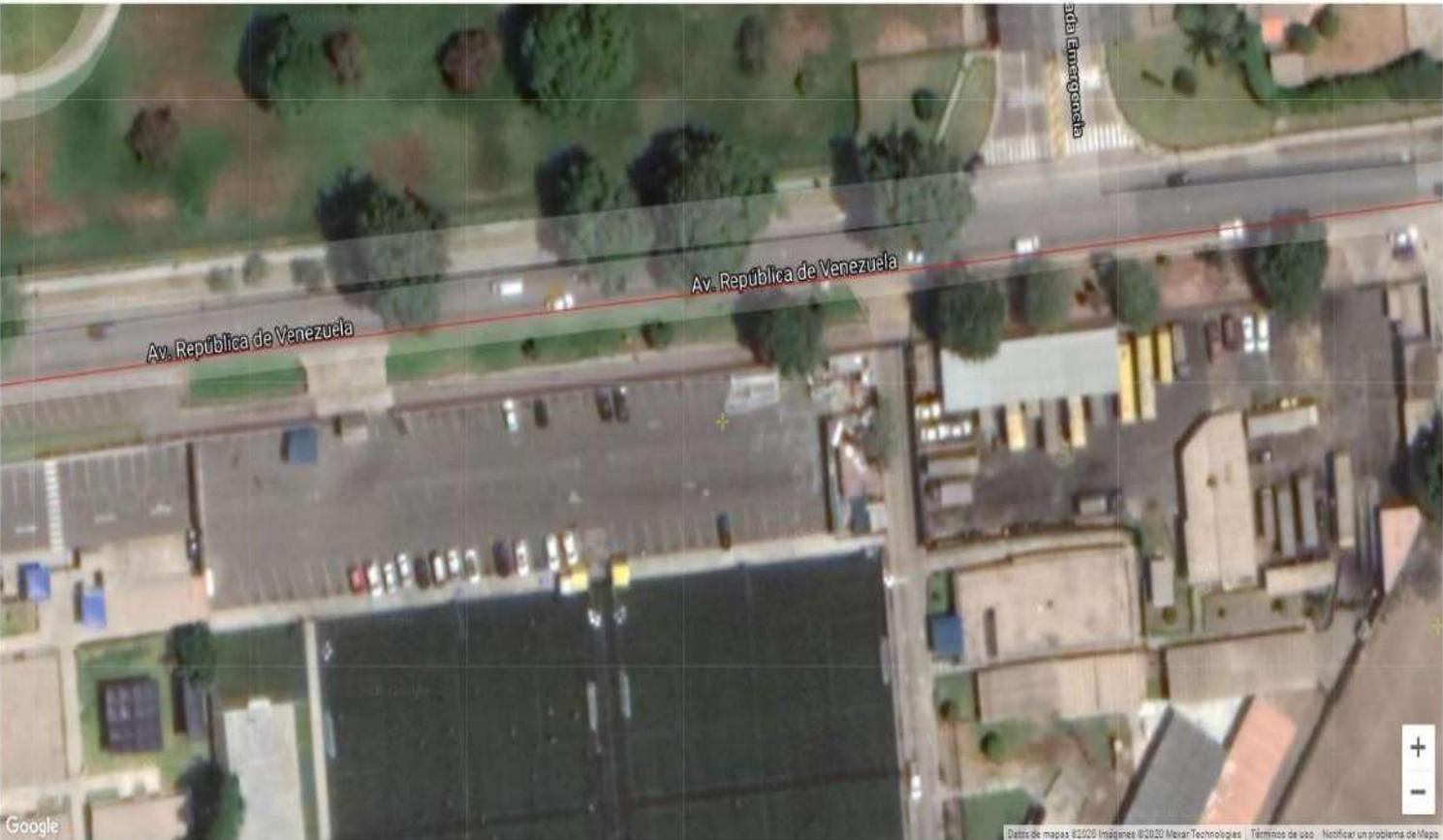





Anexo 19: Punto número 949 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v7.8 Home Project Menu i-Tree Feedback

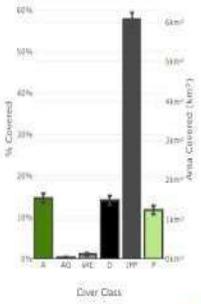
Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.



Av. República de Venezuela

Av. República de Venezuela

Av. República de Venezuela



Cover Class	% Covered	Area Covered (km²)
A	15%	15
AD	5%	5
WE	10%	10
U	15%	15
LP	75%	75
F	15%	15

View Results Report

Add New Point

ID: 949

Cover Class: ÁRBOL

Latitude: -12.061883572108207

Longitude: -77.08894360162527

Save Save & Create New

Save your Project

Save Save often - don't lose your data!

Google

Datos de mapas ©2020 Imágenes ©2020 Maxar Technologies | Términos de uso - Notificar un problema de Mapa



DAVEY

Arbor Day Foundation

ISA

Casey Trees

Anexo 20: Punto número 1088 de la encuesta de puntos

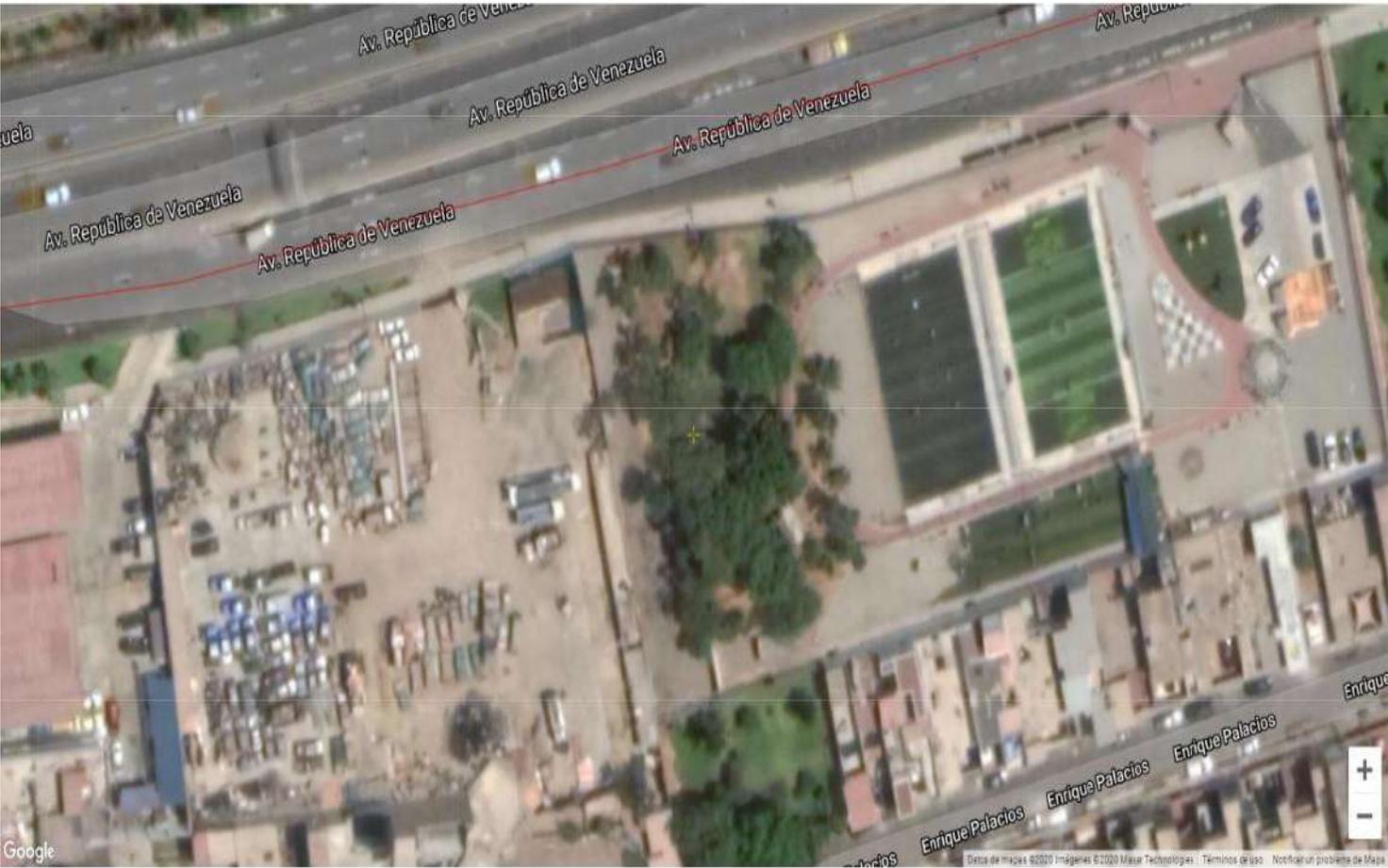


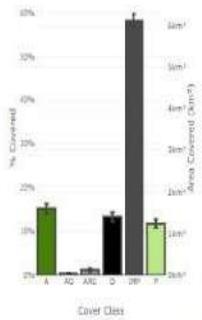
i-Tree Canopy v3.0

Home Project Menu i-Tree

Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the **+** button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.





Cover Class	No. Covered	Area Covered (km²)
A	15	0.5
AR	2	0.1
ARE	1	0.05
D	12	5.5
B	10	0.8

View Results Report

Add New Point

ID:

Cover Class: ÁRBOL

Latitude:

Longitude:

Save
Save & Create New

Save your Project

Save Save often - don't lose your data!








Anexo 21: Punto número 1612 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v2.6 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

The screenshot displays the i-Tree Canopy web application interface. The main area is a satellite map of a city block with a grid overlay. A survey point labeled '1612' is marked with a yellow crosshair. The map shows streets including Calle Miguel Grau, Jirón Arica, and Federico Galese. On the right side, there is a sidebar with a bar chart and a form to add a new point.

Bar Chart Data:

Cover Class	% Covered	Area Covered (m ²)
A	~18%	~1800
AD	~2%	~200
ARC	~15%	~1500
D	~55%	~5500
F	~10%	~1000

Add New Point Form:

- ID: 1612
- Cover Class: ÁRBOL
- Latitude: -12.09139032819361
- Longitude: -77.07952801218814
- Buttons: Save, Save & Create New

Save your Project: Save often - don't lose your data!



Anexo 22: Punto número 1630 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v1.1

[Home](#)
[Project](#)
[Menu](#)
[i-Tree](#)

[Feedback](#)

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the **+** button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

Cover Class	No. Covered (%)	Area Covered (km²)
A	~18%	~1.5
AD	~2%	~0.2
AR	~15%	~1.2
B	~58%	~4.8
F	~12%	~1.0

View Results
Report

Add New Point

ID

Cover Class

Latitude

Longitude

Save
Save & Create New

Save your Project

Save
Save often · don't lose your data!

Use of this tool indicates acceptance of the T.O.U.

Anexo 23: Punto número 1632 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v2.0 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

The screenshot displays the i-Tree Canopy interface. The main map shows a satellite view of a residential neighborhood with streets labeled 'Intisuyo' and 'Alfredo Novoa Cava'. A survey point '1632' is marked with a yellow crosshair. The sidebar on the right includes a 'View Results' section with a bar chart showing the percentage of land cover for different classes. Below the chart is a form to 'Add New Point' with fields for ID (1632), Cover Class (ÁRBOL), Latitude (-12.074711897507509), and Longitude (-77.08953849214598). At the bottom of the page, there are logos for various organizations including U.S., DAVEY, Arbor Day Foundation, SWA, ISA, and Casey Trees.

Cover Class	% Covered	Area Covered (Hectares)
ÁRBOL	~15%	~1.5
OTRO	~10%	~1.0

View Results [Report](#)

Add New Point

ID: 1632

Cover Class: **ÁRBOL**

Latitude: -12.074711897507509

Longitude: -77.08953849214598

[Save](#) [Save & Create New](#)

Save your Project

[Save](#) Save often - don't lose your data!

Logos: U.S., DAVEY, Arbor Day Foundation, SWA, ISA, Casey Trees

Anexo 24: Punto número 2483 de la encuesta de puntos

i-Tree Canopy v2.2 Home Project Menu i-Tree Feedback

Conduct your survey: Add survey points by clicking or tapping the + button below. With each point you add, the map will shift to a new, random location where you assess the land cover at the yellow crosshairs in the center of the map. The more points you survey, the lower your standard error, and the more precise your sampling will be. More points provide a better estimation of Land Cover across your study area.

The screenshot shows the i-Tree Canopy interface. The main map area displays a satellite view of a landscape with a red polygon boundary. A survey point labeled '2483' is marked with a yellow crosshair. The sidebar on the right contains a 'View Results' section with a 'Report' button and a bar chart showing the distribution of land cover classes. Below the chart is a form to 'Add New Point' with fields for ID, Cover Class, Latitude, and Longitude, and buttons for 'Save' and 'Save & Create New'. At the bottom of the sidebar is a 'Save your Project' section with a 'Save' button and the text 'Save often - don't lose your data!'. The footer of the page features logos for Google, DAVEY, Arbor Day Foundation, S.M.A. (Sociedad Mexicana de Arboricultura), ISA, and Casey Trees.

View Results Report

Add New Point

ID: 2483

Cover Class: ÁRBOL

Latitude: -12.089333462762319

Longitude: -77.11135504003407

Save Save & Create New

Save your Project

Save Save often - don't lose your data!

Google Datos de mapas © 2020 Imágenes © 2020 Maxar Technologies Términos de uso Notificar un problema de Mapa