



APROPIACIÓN SOCIAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN TERRITORIOS URBANOS, EXPERIENCIAS PARTICIPATIVAS EN BOGOTÁ D.C.

Rodríguez-Angarita, T. E.¹
Mora-Nieto, D.V.²
Jiménez-Fajardo, J. A³

¹ Investigador, Jardín Botánico José Celestino Mutis.

² Investigador, Jardín Botánico José Celestino Mutis.

³ Investigador Jardín Botánico José Celestino Mutis.

RESUMEN

La calidad del aire constituye una de las problemáticas socioambientales más relevantes en Bogotá D.C., especialmente en sectores priorizados como las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), donde la actividad industrial y la limitada cobertura vegetal incrementan la exposición a contaminantes atmosféricos. En este contexto, la apropiación social del conocimiento emerge como una estrategia clave para fortalecer la comprensión ambiental, la participación ciudadana y la corresponsabilidad territorial frente a la contaminación del aire. El presente estudio sistematiza una experiencia participativa desarrollada en el barrio Madelena, orientada al co-diseño de una estrategia de involucramiento comunitario basada en el uso de líquenes como bioindicadores de calidad del aire en la zona ZUMA. La investigación se desarrolló mediante un enfoque cualitativo de Investigación-Acción-Participativa, articulado con herramientas de Design Thinking, educación ambiental y ciencia ciudadana. Participaron estudiantes del Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) del Instituto INELPRES, con acompañamiento técnico y pedagógico del Jardín Botánico de Bogotá. El proceso incluyó diagnóstico participativo mediante cartografía social, árboles de sensaciones y recorridos territoriales, así como sesiones formativas sobre ecología de líquenes y monitoreo piloto comunitario en puntos estratégicos del barrio. Los resultados evidenciaron avances significativos en las dimensiones Saber-Hacer-Cuidar, expresados en el fortalecimiento del conocimiento ecológico, el desarrollo de habilidades para el monitoreo ambiental y el incremento de actitudes de corresponsabilidad territorial. El Índice de Apropiación del Monitoreo de la Calidad del Aire mediante Líquenes alcanzó un 85,5 %, reflejando un alto nivel de apropiación social del conocimiento. Asimismo, el proceso promovió empoderamiento juvenil y propuestas comunitarias orientadas al cuidado ambiental, consolidando un modelo replicable de educación ambiental situada y gestión territorial participativa.

Palabras clave: Calidad del aire; Ciencia ciudadana; Apropiación Social del Conocimiento

ABSTRACT

Air quality represents one of the most significant socio-environmental challenges in Bogotá D.C., particularly in priority sectors such as the Urban Zones for Better Air (ZUMA), where industrial activity and limited vegetation cover increase population exposure to atmospheric pollutants. In this context, the social appropriation of knowledge emerges as a strategic approach to strengthen environmental understanding, citizen participation, and territorial co-responsibility in addressing air pollution. This study systematizes a participatory experience developed in the Madelena neighborhood, aimed at co-designing a community engagement strategy based on the use of lichens as bioindicators of air quality within the ZUMA area. The research followed a qualitative Participatory Action Research (PAR) approach, articulated with Design Thinking, environmental education, and citizen science methodologies. Participants included students from the Environmental School Project (PRAE) at INELPRES Institute, with technical and pedagogical support from the Bogotá Botanical Garden. The process involved participatory diagnosis through social mapping, sensory trees, and territorial walks, followed by theoretical and practical training on lichen ecology and their use as bioindicators, and the implementation of a pilot community monitoring process at strategic locations in the neighborhood. Results revealed significant progress in the Know-Do-Care dimensions, reflected in strengthened ecological knowledge, acquisition of technical skills for participatory environmental monitoring, and increased attitudes of territorial co-responsibility. The Lichen-Based Air Quality Monitoring Appropriation Index reached 85.5%, indicating a high level of social appropriation of knowledge. Furthermore, the experience promoted youth empowerment and community-led environmental initiatives, demonstrating that participatory air quality monitoring supported by bioindicators contributes to environmental democratization, situated environmental education, and sustainable territorial management in vulnerable urban contexts.

Keywords: Air Quality; Citizen Science; Social Appropriation of Knowledge.

INTRODUCCIÓN

En el contexto de la crisis ambiental urbana, la calidad del aire se ha consolidado como uno de los principales retos socioambientales en las ciudades latinoamericanas, debido a su impacto directo sobre la salud pública, los ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades. En ciudades como Bogotá, caracterizadas por procesos acelerados de urbanización, alta densidad poblacional y dinámicas intensivas de transporte e industria, la contaminación atmosférica se manifiesta de manera diferenciada en el territorio, afectando con mayor intensidad a sectores vulnerables como la localidad de Ciudad Bolívar. En este escenario, el barrio Madelena, reconocido como parte de las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), se configura como un espacio crítico para el desarrollo de estrategias innovadoras que permitan comprender, monitorear y transformar las condiciones ambientales desde un enfoque territorial y participativo .

Frente a esta problemática, la educación ambiental y la participación ciudadana emergen como herramientas fundamentales para la construcción de respuestas colectivas que trasciendan los enfoques tradicionales centrados exclusivamente en la medición técnica de la calidad del aire. En este sentido, la incorporación de metodologías participativas permite no solo generar información ambiental contextualizada, sino también fortalecer procesos de apropiación social del conocimiento, en los cuales la comunidad se reconoce como protagonista en la interpretación y gestión de su entorno (MinCiencias, 2021). Bajo esta perspectiva, el uso de bioindicadores como los líquenes adquiere especial relevancia, dado que estos organismos permiten evidenciar de manera accesible las condiciones atmosféricas del territorio, facilitando procesos de ciencia ciudadana y aprendizaje situado.

En este marco, el presente artículo tiene como objeto analizar la implementación de una estrategia participativa para el monitoreo de la calidad del aire a través de líquenes en el barrio Madelena, desarrollada con estudiantes del Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) de la institución educativa INELPRES, en articulación con el Jardín Botánico de Bogotá. La propuesta se fundamenta en la integración de la Investigación-Acción Participativa (IAP), la Apropiación Social del Conocimiento (ASC) y la ciencia ciudadana, promoviendo la construcción colectiva de saberes a partir del diálogo entre conocimiento científico y experiencias comunitarias .

Desde una perspectiva metodológica, el proceso incorpora herramientas del Design Thinking, permitiendo estructurar fases de diagnóstico, formulación, implementación y evaluación que facilitan la comprensión de las problemáticas territoriales y la generación de soluciones contextualizadas. En este sentido, el enfoque de “sentipensar”, desarrollado por Orlando Fals Borda, se constituye en un eje articulador que integra dimensiones cognitivas, emocionales y territoriales, posibilitando que los participantes no solo comprendan la calidad del aire desde una perspectiva técnica, sino que también construyan vínculos afectivos y éticos con su entorno.

El desarrollo de esta estrategia permitió reconocer la calidad del aire no como un fenómeno abstracto, sino como una realidad vivida que se expresa en elementos cotidianos del territorio, como los olores, la presencia de residuos, la cobertura vegetal y la diversidad de organismos bioindicadores. A través del monitoreo participativo con líquenes, los estudiantes fortalecieron sus capacidades científicas, desarrollaron habilidades de observación y análisis, y generaron propuestas orientadas a la mejora de las condiciones ambientales del sector, consolidando su rol como agentes activos en la transformación socioambiental del territorio .

Este estudio se inscribe en la necesidad de promover enfoques integrales de gestión ambiental urbana que articulen conocimiento científico, educación ambiental y participación ciudadana, reconociendo que la sostenibilidad de las ciudades depende en gran medida de la capacidad de las comunidades para comprender, apropiarse y cuidar los sistemas ecológicos que

sustentan la vida. En este sentido, la experiencia desarrollada en el barrio Madelena se presenta como un modelo replicable que contribuye al fortalecimiento de la gobernanza ambiental y a la democratización del conocimiento en contextos urbanos complejos.

METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló desde un enfoque mixto con predominio cualitativo, orientado a analizar la implementación de una estrategia participativa para el monitoreo de la calidad del aire mediante líquenes en el barrio Madelena, localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. La elección de un enfoque mixto se justifica porque la experiencia integró información cualitativa relacionada con percepciones territoriales, emociones, narrativas, aprendizajes, participación y propuestas comunitarias, junto con información cuantitativa derivada del registro de líquenes, el cálculo del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) y la construcción del Índice de Apropiación del Monitoreo de Calidad del Aire mediante Líquenes (IAM-L).

No obstante, el estudio tuvo un predominio cualitativo, dado que su propósito principal no fue realizar inferencias estadísticas ni establecer relaciones causales, sino comprender cómo los estudiantes del Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) del Instituto INELPRES construyeron conocimientos, habilidades y actitudes de corresponsabilidad ambiental a partir de una experiencia situada de ciencia ciudadana. En este sentido, los datos cuantitativos cumplieron una función descriptiva, complementaria e integradora, al permitir sintetizar los avances del proceso y contrastar las evidencias cualitativas.

Por tanto, el diseño se define como mixto incrustado con predominio cualitativo. El componente cualitativo estructuró la investigación mediante la Investigación-Acción Participativa – IAP–, la apropiación social del conocimiento y el Design Thinking; mientras que el componente cuantitativo se incorporó dentro de la fase de evaluación para estimar indicadores de monitoreo ambiental y apropiación del conocimiento.

La propuesta metodológica se fundamentó en la articulación entre IAP, Design Thinking, educación ambiental y ciencia ciudadana. La IAP permitió reconocer a los participantes como sujetos activos en la interpretación y transformación de su territorio. El Design Thinking aportó una ruta para empatizar con las problemáticas locales, definir retos, idear alternativas, prototipar soluciones y evaluar aprendizajes. La ciencia ciudadana posibilitó que estudiantes no expertos participaran en prácticas de observación, registro e interpretación de información ambiental mediante el uso de líquenes como bioindicadores.

Tipo y alcance de la investigación

La investigación fue de tipo descriptivo-analítico. Fue descriptiva porque documentó las fases, actividades, instrumentos, actores y productos generados durante el proceso participativo. Fue analítica porque interpretó los efectos de la estrategia en tres dimensiones de apropiación: Saber, Hacer y Cuidar.

El estudio no tuvo como propósito producir una medición oficial o concluyente de la calidad del aire en Madelena, sino sistematizar una experiencia pedagógica y participativa que permitiera fortalecer capacidades locales para comprender, monitorear y actuar frente a las problemáticas atmosféricas del territorio. En consecuencia, los resultados del IPA y del IAM-L deben interpretarse como indicadores pedagógicos y comunitarios, no como mediciones ambientales oficiales.

Contexto del estudio

La investigación se desarrolló en el barrio Madelena, localidad de Ciudad Bolívar, Bogotá D.C., territorio reconocido dentro de las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA). El documento identifica este sector como un área con presiones ambientales asociadas al alto flujo vehicular, actividades

comerciales e industriales cercanas, deficiencia de cobertura vegetal, presencia de residuos, olores ofensivos y afectaciones en la ronda del río Tunjuelo.

El escenario educativo fue el Instituto INELPRES, específicamente con estudiantes vinculados al Proyecto Ambiental Escolar (PRAE). El proceso contó con el acompañamiento técnico y pedagógico del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, especialmente en las fases de formación, selección de puntos, socialización metodológica y monitoreo piloto.

Participantes y muestra

La población de referencia estuvo conformada por estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES, docentes acompañantes, profesionales del Jardín Botánico de Bogotá y actores comunitarios del barrio Madelena interesados en procesos de monitoreo ambiental participativo.

La muestra fue seleccionada mediante muestreo intencional, considerando la vinculación directa de los participantes con el PRAE, su relación cotidiana con el entorno escolar y barrial de Madelena, y su participación en las fases de diagnóstico, formulación, implementación y evaluación.

La muestra directa registrada estuvo conformada por 23 estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES y 1 docente acompañante, para un total de 24 actores directos. Como actores indirectos se consideraron habitantes del barrio Madelena que podrían vincularse o interesarse en el proceso de identificación de la calidad del aire.

En términos sociodemográficos, los participantes directos correspondieron a población escolar vinculada al PRAE de una institución educativa urbana de la localidad de Ciudad Bolívar. El documento disponible caracteriza a los participantes por nombre, rol y pertenencia institucional; sin embargo, no reporta variables como edad, grado escolar, género, estrato socioeconómico o lugar exacto de residencia. Por esta razón, dichas variables no deben ser inferidas ni inventadas. Para fortalecer la versión final del artículo, se recomienda incorporar esta información a partir de listados de asistencia o registros institucionales, siempre protegiendo la identidad de los estudiantes.

Fases metodológicas

El proceso se organizó en cuatro fases: diagnóstico participativo, formulación y co-creación, implementación del monitoreo, y evaluación-sistematización.

Tabla 1

Fases metodológicas de la investigación

Fase	Correspondencia metodológica	Propósito	Técnicas e instrumentos
Diagnóstico participativo	IAP: lectura situada del territorio / Design Thinking: empatizar	Reconocer percepciones, emociones, problemáticas y zonas críticas asociadas a la calidad del aire	Cartografía social, árbol de sensaciones, recorrido territorial, observación participante
Formulación y co-creación	IAP: reflexión colectiva / Design Thinking: definir e idear	Priorizar problemas y formular una estrategia participativa de monitoreo con líquenes	Priorización de problemáticas, pregunta de diseño, lluvia de ideas, reto de innovación
Implementación	IAP: acción transformadora / Design Thinking: prototipar	Aplicar la estrategia de monitoreo participativo mediante líquenes	Capacitación, identificación de morfologías líquénicas, selección de árboles, malla 50 × 20 cm, formatos de registro

Evaluación y sistematización	IAP: reflexión sobre la acción / Design Thinking: evaluar	Valorar aprendizajes, capacidades técnicas y corresponsabilidad ambiental	IAM-L, IPA, bitácoras, entrevistas grupales, encuestas semiestructuradas, registros audiovisuales
------------------------------	---	---	---

Fase 1. Diagnóstico participativo

La fase diagnóstica tuvo como propósito reconocer las relaciones socioambientales que los estudiantes establecían con el barrio Madelena, especialmente con el área colindante a la ronda del río Tunjuelo. Para ello se aplicaron herramientas de cartografía social, árbol de sensaciones y recorridos territoriales.

La cartografía social permitió identificar lugares representativos, espacios de encuentro, zonas de riesgo, áreas deterioradas y puntos críticos asociados a residuos, malos olores y baja cobertura vegetal. El árbol de sensaciones permitió reconocer la dimensión emocional del territorio, relacionando lugares específicos con emociones como alegría, tristeza, ira, desagrado y temor.

Esta fase permitió establecer que la calidad del aire era percibida inicialmente como una experiencia territorial vivida a través de malos olores, presencia de residuos, deterioro del paisaje y afectaciones en el entorno escolar. A partir de esta lectura situada se identificó la necesidad de contar con una herramienta accesible para comprender la calidad ambiental del territorio.

Fase 2. Formulación y co-creación

En la segunda fase se organizaron y priorizaron las problemáticas identificadas durante el diagnóstico. Los estudiantes clasificaron las situaciones en tres dimensiones: problemáticas ambientales, problemáticas sociales y culturales, y problemáticas estructurales. Entre los principales aspectos priorizados se encontraron la presencia de residuos en el río y su ronda, el mal manejo de residuos, la poca conciencia ambiental y la falta de cobertura vegetal.

A partir de este ejercicio se formuló la siguiente pregunta de diseño:

¿Cómo podríamos co-crear una estrategia participativa que permita a la comunidad identificar la calidad del aire del barrio Madelena a través de la observación de organismos presentes en la naturaleza?

Como respuesta a este reto, se definió el uso de líquenes como bioindicadores de calidad del aire, debido a su sensibilidad frente a contaminantes atmosféricos y a su potencial pedagógico para procesos de ciencia ciudadana. La fase de co-creación permitió articular el saber científico del Jardín Botánico de Bogotá con las percepciones, preguntas y propuestas de los estudiantes, fortaleciendo una lógica de co-producción del conocimiento.

Fase 3. Implementación del monitoreo participativo

La fase de implementación incluyó sesiones formativas y prácticas sobre líquenes, calidad del aire y bioindicación. En una primera sesión, los estudiantes participaron en una capacitación teórico-práctica en el Jardín Botánico de Bogotá, donde se abordó la importancia ecológica de los líquenes y su relación con la calidad del aire.

Posteriormente, en el Instituto INELPRES se desarrolló una sesión de refuerzo sobre liquenización, talo y morfologías liquénicas, incluyendo líquenes crustáceos, filamentosos, escumulosos, gelatinosos, foliosos y fruticosos. Esta formación permitió que los estudiantes comprendieran los líquenes no solo como indicadores de contaminación, sino también como organismos relevantes dentro de los ecosistemas urbanos.

La selección de puntos de monitoreo se realizó en árboles ubicados en el área cercana al colegio, considerando criterios de seguridad, accesibilidad, exposición al sol, estado de la corteza y

presencia de líquenes. Esta decisión respondió tanto a criterios técnicos como a condiciones institucionales de protección de los estudiantes.

El monitoreo se desarrolló mediante una malla de registro de 50 × 20 cm, dividida en cuadros, aplicada sobre la superficie del tronco de los árboles seleccionados. En cada punto se diligenciaron formatos estandarizados con información sobre coordenadas, especie arbórea, tipo de líquenes observados y datos necesarios para el análisis posterior mediante el Índice de Pureza Atmosférica (IPA).

Durante el monitoreo piloto se identificaron líquenes foliosos como *Flavopunctelia flaventior* y *Candelaria concolor*, así como líquenes escumulosos como *Normandina* sp. Esta información constituyó una base preliminar para el análisis descriptivo de la calidad ambiental del sector y para el fortalecimiento de habilidades escolares de observación, clasificación, registro y análisis.

Fase 4. Evaluación y sistematización

La evaluación se desarrolló desde un enfoque mixto, participativo y formativo. Su propósito fue valorar el grado de apropiación del conocimiento generado por los estudiantes, sin reducir el proceso a una calificación de éxito o fracaso. La evaluación integró tres componentes: formativo, procesual y reflexivo. El componente formativo permitió hacer seguimiento al aprendizaje durante las fases metodológicas; el componente procesual analizó la participación y apropiación; y el componente reflexivo interpretó los aprendizajes, emociones y adopción de saberes por parte de los participantes.

La evaluación se organizó en tres dimensiones: Saber, Hacer y Cuidar.

Tabla 2

Proceso de evaluación por dimensiones del Saber, Hacer y Cuidar

Dimensión	Definición	Evidencias
Saber	Comprensión ecológica, atmosférica y territorial sobre líquenes, bioindicación y calidad del aire	Reconocimiento de morfologías, función bioindicadora, relación entre contaminación, salud y territorio
Hacer	Aplicación práctica de la metodología de monitoreo	Uso de la malla, diligenciamiento de formatos, identificación de líquenes, participación en monitoreo
Cuidar	Corresponsabilidad ambiental y acciones de conservación territorial	Propuestas de mitigación, campañas, sensibilización, cuidado del río Tunjuelo y del entorno escolar

Técnicas e instrumentos de recolección de información

La investigación utilizó técnicas e instrumentos cualitativos, cuantitativos y mixtos.

Tabla 3

Técnicas e instrumentos de recolección de información de la investigación

Instrumento	Propósito	Tipo de información
Cartografía social	Identificar lugares representativos, zonas críticas y percepciones territoriales	Cualitativa
Árbol de sensaciones	Reconocer emociones y relaciones afectivas con el territorio	Cualitativa
Observación participante	Registrar comportamientos, interacciones y participación en cada sesión	Cualitativa
Bitácora individual o de campo	Recoger reflexiones, aprendizajes y emociones	Cualitativa

Entrevista grupal	Evaluar apropiación colectiva y percepción del aprendizaje	Cualitativa
Encuesta semiestructurada	Obtener percepciones y datos de valoración del proceso	Mixta
Registro audiovisual y fotográfico	Documentar evidencias de participación y actividades pedagógicas	Documental
Formato de registro de líquenes	Registrar presencia, tipo y frecuencia de líquenes	Cuantitativa
Malla 50 × 20 cm	Estandarizar la observación de líquenes en campo	Cuantitativa
Matriz de seguimiento DT/IAP	Verificar avances en empatía, ideación, implementación y evaluación	Cualitativa-procesual

El anexo metodológico ya contempla instrumentos como ficha de observación participante, encuesta semiestructurada, bitácora individual, entrevista grupal, matriz de seguimiento del Design Thinking y registro audiovisual/fotográfico.

Construcción y validación del IAM-L

Para valorar la apropiación social del conocimiento se utilizó el Índice de Apropiación del Monitoreo de Calidad del Aire mediante Líquenes (IAM-L). Este índice integra tres dimensiones: Saber, Hacer y Cuidar. Su propósito fue medir no solo aprendizajes conceptuales, sino también cambios en prácticas, habilidades técnicas y actitudes de corresponsabilidad ambiental.

La estructura del índice se definió con ponderaciones diferenciadas:

Tabla 4

Estructura del índice IAM-L

Dimensión	Ponderación	Justificación
Hacer	40 %	Es la dimensión central del monitoreo, pues implica aplicación práctica de la metodología, manejo de instrumentos y registro en campo
Saber	35 %	Es necesaria para comprender los líquenes como bioindicadores e interpretar su relación con la calidad del aire
Cuidar	25 %	Valora la corresponsabilidad ambiental, aunque depende de acciones puntuales y de continuidad comunitaria

Los subindicadores definidos fueron los siguientes:

Tabla 5

Definición de subindicadores de impacto

Dimensión	Subindicadores
Saber	Identifica al menos 6 tipos o morfologías de líquenes; explica su función como bioindicadores; comprende el significado del IPA; reconoce impactos de contaminantes atmosféricos
Hacer	Aplica correctamente la metodología de muestreo; diligencia el formato estandarizado; participa en al menos un monitoreo y en análisis comparado
Cuidar	Propone acciones de mitigación; participa en jornadas de sensibilización; expresa actitudes de corresponsabilidad frente a las problemáticas del río Tunjuelo

La fórmula del índice fue:

$$IAM - L = (Saber \times 0.35) + (Hacer \times 0.40) + (Cuidar \times 0.25)$$

Según las evidencias del proceso, los valores fueron:

Dimensión	Valor
-----------	-------

Saber	80 %
Hacer	100 %
Cuidar	70 %

Por tanto:

$$IAM - L = (80 \times 0.35) + (100 \times 0.40) + (70 \times 0.25)$$

$$IAM - L = 28 + 40 + 17.5 = 85.5\%$$

El resultado del IAM-L fue de 85,5 %, interpretado como un nivel alto de apropiación. La escala de interpretación fue: bajo, entre 0 % y 39 %; medio, entre 40 % y 69 %; y alto, igual o superior al 70 %.

Para evitar inconsistencias metodológicas, se recomienda unificar los criterios del documento: donde se menciona “identificación de ≥ 10 especies”, debería ajustarse a “identificación de ≥ 6 tipos o morfologías líquénicas”, dado que el proceso formativo trabajó principalmente seis morfologías: crustáceos, filamentosos, escuamulosos, gelatinosos, foliosos y fruticosos.

Validación del IAM-L

La validación del IAM-L se desarrolló mediante tres procedimientos.

Primero, se realizó una validación de contenido, verificando que las dimensiones Saber, Hacer y Cuidar correspondieran con los objetivos del proceso: co-crear una estrategia participativa, realizar un monitoreo piloto y socializar los resultados.

Segundo, se realizó una validación metodológica, contrastando los subindicadores con las actividades efectivamente desarrolladas: sesiones formativas, uso de la malla de monitoreo, diligenciamiento de formatos, identificación de líquenes y formulación de propuestas ambientales.

Tercero, se aplicó una validación por triangulación, comparando los resultados del IAM-L con evidencias cualitativas provenientes de observación participante, bitácoras, entrevistas grupales, registros audiovisuales y productos de co-creación. De esta manera, el índice no se interpretó como un dato aislado, sino como un indicador integrador del proceso de apropiación social del conocimiento.

Procedimiento de análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo tuvo un carácter descriptivo y complementario. Se desarrolló a partir de los registros de campo obtenidos durante el monitoreo piloto con líquenes.

El procedimiento incluyó cinco pasos:

- **Organización de registros de campo:** se consolidó la información de los formatos de monitoreo, incluyendo punto de observación, árbol monitoreado, presencia de líquenes, morfología observada, frecuencia y observaciones ambientales.
- **Clasificación morfológica:** los líquenes se organizaron según las morfologías trabajadas durante la formación: crustáceos, filamentosos, escuamulosos, gelatinosos, foliosos y fruticosos.
- **Estimación de frecuencia o cobertura:** se revisó la presencia de líquenes en la malla de 50 × 20 cm, registrando la cantidad de cuadros ocupados o la presencia relativa por tipo de líquen.
- **Cálculo descriptivo del IPA:** el Índice de Pureza Atmosférica se asumió como un indicador comparativo entre puntos de monitoreo. Para efectos del proceso pedagógico, el IPA se calculó a partir de la presencia, frecuencia y sensibilidad relativa de las morfologías o especies identificadas.
- La fórmula operativa desarrollada es:

$$IPA_j = \sum (V_i \times F_{ij})$$

Donde:

- IPA_j = Índice de Pureza Atmosférica del punto de monitoreo j .
- V_i = valor de sensibilidad asignado al tipo de líquen i .
- F_{ij} = frecuencia o cobertura relativa del tipo de líquen i en el punto j .

Para el contexto pedagógico, se empleo la siguiente escala:

Tipo de líquen	Valor de sensibilidad sugerido
Crustáceo	1
Escuamuloso	2
Folioso	3
Fruticoso	4

- **Integración con el IAM-L:** los resultados del monitoreo, junto con las evidencias de participación y aprendizaje, se integraron al cálculo del IAM-L, especialmente en las dimensiones Hacer y Saber.

Es importante aclarar que el IPA se utilizó como herramienta pedagógica y comparativa, no como medición oficial de calidad del aire. Para establecer conclusiones ambientales robustas sería necesario ampliar el número de puntos, realizar monitoreos periódicos y complementar la bioindicación con mediciones fisicoquímicas de contaminantes atmosféricos. Esta precisión también aparece como advertencia en el artículo, donde se indica que el IAM-L mide el proceso formativo y participativo, no una evaluación definitiva de la calidad del aire en Madelena.

Procedimiento de análisis cualitativo

El análisis cualitativo se realizó mediante categorización temática. En primer lugar, se organizó el corpus de información compuesto por cartografías sociales, árboles de sensaciones, bitácoras, observaciones, entrevistas grupales, registros fotográficos y audiovisuales.

En segundo lugar, se realizó una lectura inicial de los materiales para identificar expresiones recurrentes, emociones, aprendizajes, problemáticas ambientales, propuestas y transformaciones en la relación de los estudiantes con el territorio.

En tercer lugar, se construyeron categorías deductivas e inductivas. Las categorías deductivas surgieron del marco metodológico del estudio: apropiación social del conocimiento, ciencia ciudadana, participación, Saber, Hacer y Cuidar. Las categorías inductivas emergieron de las voces y producciones de los estudiantes: malos olores, residuos, río Tunjuelo, árboles, miedo, tristeza, desagrado, esperanza, monitoreo, líquenes y cuidado. En donde, los hallazgos fueron interpretados a la luz de la IAP, la educación ambiental situada, el Design Thinking, la ciencia ciudadana y la apropiación social del conocimiento.

Triangulación metodológica

La triangulación se desarrolló como un procedimiento sistemático de contraste entre fuentes, técnicas, fases y tipos de datos. No se limitó a declarar el uso de múltiples instrumentos, sino que permitió verificar la consistencia entre lo que los estudiantes expresaron, hicieron, registraron y propusieron durante el proceso.

Se aplicaron cuatro tipos de triangulación:

Tabla 6

Tipos de triangulación aplicadas en la investigación

Tipo de triangulación	Procedimiento
Triangulación de técnicas	Se contrastaron cartografía social, árbol de sensaciones, observación participante, bitácoras, entrevistas, encuestas, registros audiovisuales y formatos de monitoreo
Triangulación de fuentes	Se compararon evidencias provenientes de estudiantes, docente PRAE, profesionales del Jardín Botánico y registros del proceso

Triangulación de fases	Se revisó la coherencia entre diagnóstico, formulación, implementación y evaluación
Triangulación cualitativa-cuantitativa	Se contrastaron narrativas, percepciones y observaciones con el IPA y el IAM-L

La triangulación permitió contrastar, por ejemplo, las percepciones iniciales sobre malos olores y deterioro del río Tunjuelo con las evidencias del monitoreo con líquenes; los aprendizajes declarados por los estudiantes con su capacidad para usar la malla de registro; y las propuestas de cuidado con los resultados de la dimensión Cuidar del IAM-L. El artículo ya señala que la triangulación integró observación participante, encuestas, bitácoras, entrevistas grupales, registros audiovisuales y datos del monitoreo para contrastar aprendizajes declarados con prácticas observadas en campo. Para dar mayor rigor, se empleó una matriz de triangulación como la siguiente:

Tabla 7

Matriz de triangulación de data

Hallazgo	Evidencia cualitativa	Evidencia cuantitativa	Interpretación integrada
Reconocimiento de líquenes bioindicadores	Relatos, entrevistas, bitácoras	Puntaje Saber	Apropiación conceptual
Aplicación de la metodología de monitoreo	Observación en campo, fotografías	Puntaje Hacer, uso de malla, formatos	Apropiación procedimental
Corresponsabilidad ambiental	Propuestas de campañas, reforestación y vigilancia	Puntaje Cuidar	Apropiación ética y territorial
Lectura crítica del territorio	Cartografía social, árbol de sensaciones	IPA por punto de monitoreo	Integración entre percepción territorial y bioindicación

Criterios de rigor metodológico

Para fortalecer la calidad del estudio se consideraron criterios de credibilidad, confiabilidad, confirmabilidad y transferibilidad.

La credibilidad se fortaleció mediante la participación directa de los estudiantes en todas las fases, la observación en campo y la contrastación de evidencias cualitativas y cuantitativas.

La confiabilidad se garantizó mediante el uso de instrumentos definidos, formatos estandarizados de monitoreo, matriz de seguimiento metodológico y criterios explícitos para el cálculo del IAM-L.

La confirmabilidad se apoyó en evidencias documentales, registros fotográficos, bitácoras, formatos de campo y productos de co-creación.

La transferibilidad se favoreció mediante la descripción detallada del contexto, los participantes, las fases, los instrumentos y los criterios de análisis, lo cual permite adaptar la estrategia a otros contextos escolares o comunitarios de Bogotá.

RESULTADOS

Fase 1: Diagnóstico participativo

La fase de diagnóstico participativo constituyó el punto de partida para comprender las relaciones socioambientales que los estudiantes del Proyecto Ambiental Escolar –PRAE– del Instituto INELPRES establecen con el barrio Madelena, especialmente con el área colindante a la ronda del río Tunjuelo. Esta fase permitió reconocer que la calidad del aire no se experimenta únicamente como una variable técnica o instrumental, sino como una condición territorial vivida a través de olores, residuos, baja cobertura vegetal, inseguridad, deterioro del espacio público y emociones asociadas al malestar ambiental. En ese sentido, el diagnóstico se asumió como un proceso de lectura situada del territorio, coherente con la Investigación-Acción Participativa, en la medida en que los sujetos participantes no fueron observados como informantes pasivos, sino como actores capaces de interpretar, problematizar y proyectar transformaciones sobre su propio entorno (Fals Borda, 2008).

Desde esta perspectiva, la aplicación de herramientas como la cartografía social, el árbol de sensaciones y emociones, la observación participante y el registro de percepciones territoriales permitió identificar problemáticas ambientales, vínculos afectivos y dinámicas socioecológicas presentes en el sector. El documento metodológico del proceso señala que esta primera fase se orientó al reconocimiento inicial del territorio mediante herramientas participativas, identificando problemas como la contaminación del aire, la mala disposición de residuos, la baja cobertura vegetal y la necesidad de contar con instrumentos accesibles para evaluar la calidad ambiental del entorno. Este resultado es consistente con los enfoques de investigación participativa, donde el diagnóstico no se reduce a una recolección de información, sino que se convierte en un ejercicio de construcción colectiva de sentido, reflexión crítica y activación comunitaria (Kemmis & McTaggart, 2005).

La cartografía social permitió que los estudiantes representaran los lugares significativos del barrio y del entorno escolar, diferenciando espacios de encuentro, recreación, tránsito, riesgo y afectación ambiental. Entre los lugares reconocidos se destacaron el Instituto INELPRES, las canchas colindantes, la pista de patinaje, la cancha de voleibol, algunos comercios cercanos y la ronda del río Tunjuelo. Esta representación espacial evidenció que el territorio no es percibido únicamente como un escenario físico, sino como una construcción social atravesada por prácticas cotidianas, memorias, emociones y relaciones comunitarias. En este sentido, el uso de cartografía social resultó pertinente porque permitió visibilizar saberes locales y formas de apropiación territorial que generalmente no emergen en diagnósticos técnicos convencionales, lo cual coincide con los aportes de Red CIMAS (2019), al reconocer las metodologías participativas como herramientas para la transformación social desde la experiencia de los actores.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la identificación del río Tunjuelo como un eje crítico de afectación ambiental y emocional. Los estudiantes asociaron este espacio con tristeza, ira y desagrado, debido a la presencia de residuos sólidos, olores ofensivos y deterioro visible de la ronda. A diferencia de otros espacios como la institución educativa o las canchas, vinculados con alegría, convivencia y práctica deportiva, el río fue representado como un lugar ambientalmente degradado, pero con potencial de recuperación. Esta lectura evidencia que la percepción ambiental de los estudiantes integra dimensiones cognitivas y afectivas, lo cual se relaciona con el enfoque de “sentipensar” del territorio, en tanto el conocimiento ambiental se construye desde la articulación entre razón, emoción, experiencia y acción colectiva (Robayo Corredor, 2021).

El árbol de sensaciones y emociones permitió profundizar en esta lectura afectiva del territorio. En las raíces, los estudiantes ubicaron experiencias pasadas asociadas a un paisaje desordenado, con residuos, malos olores y sensaciones de repulsión o tristeza. En el tronco, correspondiente al presente, reconocieron algunas mejoras, especialmente por la presencia de árboles; sin embargo, señalaron que persisten problemas relacionados con el mal manejo de residuos, excrementos de animales y olores provenientes del río. En las ramas y hojas, asociadas al futuro deseado, expresaron propuestas como aumentar el arbolado, instalar canecas, realizar jornadas de limpieza y promover mayor

conciencia ambiental en la comunidad. El documento de sistematización del proceso confirma que estas herramientas permitieron identificar problemáticas críticas, percepciones comunitarias y zonas de afectación asociadas a olores ofensivos, residuos y contaminación del aire.

Estos resultados muestran que la fase diagnóstica no solo permitió reconocer problemas ambientales, sino también comprender cómo estos afectan la vida cotidiana, el bienestar emocional y la relación de los estudiantes con el espacio público. La calidad del aire fue inicialmente interpretada desde indicadores sensibles de la experiencia diaria, principalmente el olor, la presencia de residuos y el deterioro del paisaje. Sin embargo, también emergió una limitación importante: aunque los participantes reconocían que el aire del sector podía estar afectado, no contaban con herramientas comunitarias para evaluarlo de manera más objetiva. Esta situación abrió la posibilidad de orientar el proceso hacia el uso de bioindicadores, particularmente líquenes, como una estrategia pedagógica, accesible y situada para el monitoreo ambiental participativo. Esta transición se relaciona con la apropiación social del conocimiento, entendida como un proceso que promueve el diálogo entre saberes, la participación activa y la construcción colectiva de capacidades para comprender y transformar realidades territoriales (Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, 2021).

Otro resultado significativo fue la relación establecida por los estudiantes entre deterioro ambiental y prácticas sociales. La mala disposición de residuos, la falta de conciencia ambiental, la ausencia de canecas, el descuido de la ronda del río y la baja apropiación comunitaria fueron identificados como factores que inciden directamente en el deterioro del entorno. De igual manera, surgieron preocupaciones relacionadas con la inseguridad en los alrededores del colegio, asociadas a la presencia de personas consumidoras de sustancias psicoactivas, lo que evidencia que la problemática ambiental no puede comprenderse de manera aislada, sino articulada a condiciones sociales, culturales y estructurales del territorio. Esta mirada coincide con los enfoques contemporáneos de evaluación participativa, los cuales reconocen que los problemas territoriales son complejos, multicausales y requieren procesos interpretativos que integren diferentes voces y perspectivas (Guba & Lincoln, 1989).

La cobertura vegetal apareció como un elemento central dentro de las expectativas de transformación territorial. Los estudiantes relacionaron la presencia de árboles con la mejora del paisaje, la reducción de olores y la posibilidad de contar con un entorno más saludable y agradable. Esta percepción evidencia una comprensión inicial de los servicios ecosistémicos urbanos, especialmente aquellos asociados con regulación ambiental, bienestar y calidad de vida. En este punto, el diagnóstico permitió conectar el conocimiento ecológico local con referentes de sostenibilidad urbana, en tanto los ecosistemas urbanos proveen beneficios sociales, culturales y ambientales que inciden directamente en el bienestar de las comunidades (Martín-López et al., 2012).

Asimismo, la experiencia permitió reconocer que el barrio Madelena se inscribe en un contexto urbano con presiones ambientales relevantes, al hacer parte de una Zona Urbana por un Mejor Aire (ZUMA), lo que refuerza la pertinencia de implementar estrategias participativas para comprender y monitorear la calidad del aire. En el documento base se señala que Madelena enfrenta desafíos asociados al alto flujo vehicular, actividades comerciales e industriales cercanas y deficiencia en cobertura arbórea, condiciones que favorecen la acumulación de contaminantes atmosféricos y justifican el desarrollo de acciones comunitarias de seguimiento ambiental. Esta condición territorial dialoga con los planteamientos de ONU-Hábitat (2020), según los cuales los procesos de urbanización deben ser abordados desde enfoques integrales que articulen sostenibilidad, participación ciudadana y justicia territorial.

En términos de resultados de apropiación social del conocimiento, esta fase permitió pasar de percepciones dispersas de malestar ambiental a una lectura organizada de las problemáticas del territorio. Los estudiantes lograron identificar zonas críticas, asociar emociones con lugares

específicos, reconocer prácticas que afectan la calidad ambiental y proyectar alternativas de mejora. Este tránsito es relevante porque muestra que la apropiación no ocurre únicamente cuando la comunidad recibe información científica, sino cuando dicha información se conecta con sus experiencias, preguntas, preocupaciones y posibilidades de acción. Bajo esta lógica, el diagnóstico participativo se consolidó como un escenario pedagógico y político, en el que los jóvenes comenzaron a posicionarse como intérpretes activos de su realidad socioambiental.

Como resultado general de la fase, se consolidaron cuatro núcleos problemáticos que orientaron las fases posteriores del proceso: la contaminación y deterioro de la ronda del río Tunjuelo; la mala disposición de residuos sólidos en el entorno escolar y comunitario; la percepción de afectación de la calidad del aire expresada principalmente en malos olores; y la baja cobertura vegetal como factor asociado al deterioro del paisaje y del bienestar ambiental. Estos hallazgos permitieron avanzar hacia la formulación de una estrategia de monitoreo participativo mediante líquenes, articulando el saber escolar, la experiencia territorial y el acompañamiento técnico del Jardín Botánico de Bogotá. Así, la Fase 1 sentó las bases metodológicas y comunitarias para transformar una preocupación ambiental cotidiana en una pregunta colectiva de conocimiento, acción y cuidado del territorio.

Fase 2: Formulación y co-creación

La segunda fase del proceso correspondió a la formulación y co-creación de la estrategia participativa, momento en el cual los hallazgos del diagnóstico fueron organizados, priorizados y traducidos en una ruta de acción colectiva orientada al monitoreo comunitario de la calidad del aire. Esta fase permitió pasar de la identificación inicial de problemáticas territoriales a la construcción de un reto común, en el que los estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES, con el acompañamiento del Jardín Botánico de Bogotá, transformaron sus percepciones sobre residuos, malos olores, deterioro de la ronda del río Tunjuelo y baja cobertura vegetal en una pregunta de diseño ambiental. En términos metodológicos, esta transición resulta coherente con el Design Thinking, entendido como un enfoque centrado en las personas que permite abordar problemas complejos mediante procesos de empatía, definición, ideación, prototipado y prueba (Brown, 2009).

A partir de los resultados de la fase diagnóstica, se desarrolló un ejercicio de análisis y priorización de problemáticas, mediante el cual los estudiantes clasificaron las situaciones identificadas en tres grandes categorías: problemáticas ambientales, problemáticas sociales y culturales, y problemáticas estructurales. En la dimensión ambiental, los participantes señalaron la presencia de residuos en el río y su ronda, la mala disposición de residuos sólidos y la posible disposición de sustancias químicas. En la dimensión social y cultural, identificaron la poca conciencia ambiental, el bajo cuidado del entorno y prácticas cotidianas que contribuyen al deterioro del espacio público. En la dimensión estructural, apareció principalmente la falta de cobertura vegetal como una condición que limita la calidad ambiental del sector. Esta clasificación permitió organizar los hallazgos del diagnóstico y reconocer que la calidad del aire se relaciona con un conjunto de factores socioecológicos, no únicamente con la presencia de contaminantes atmosféricos.

El principal resultado de esta fase fue la transformación de las percepciones territoriales en un problema de intervención colectiva. La priorización permitió reconocer que los malos olores, la presencia de residuos y la falta de vegetación no eran situaciones aisladas, sino manifestaciones de una problemática urbana más amplia relacionada con la gestión ambiental del territorio. Desde esta perspectiva, el proceso se acercó a la noción de “problemas complejos” o wicked problems, en tanto las problemáticas ambientales urbanas no tienen una causa única ni una solución lineal, sino que requieren acuerdos colectivos, interpretación situada y construcción progresiva de alternativas (Rittel & Webber, 1973). En este caso, los estudiantes no solo identificaron problemas, sino que participaron en su reformulación como oportunidades de innovación social y ambiental.

Durante la plenaria de priorización, los estudiantes propusieron diferentes alternativas de acción frente a las problemáticas identificadas. Entre ellas se destacaron las campañas de cero residuos lideradas por estudiantes del INELPRES, la recolección de residuos orgánicos para producir abono natural y fortalecer huertas urbanas, la articulación con la Junta de Acción Comunal para desarrollar jornadas de plantación de árboles y la difusión de formas en que la naturaleza puede informar sobre la calidad del aire. Estas propuestas evidencian un tránsito importante: los participantes dejaron de comprender el problema ambiental únicamente desde la queja o la afectación cotidiana, y comenzaron a formular posibles rutas de acción desde sus capacidades escolares y comunitarias.

En este punto, la co-creación se consolidó como un resultado central de la fase. La estrategia no fue definida exclusivamente desde el saber técnico institucional, sino a partir del diálogo entre las preocupaciones estudiantiles, las posibilidades del territorio y la orientación pedagógica del Jardín Botánico de Bogotá. Esta dinámica se relaciona con los enfoques de diseño participativo, en los cuales los usuarios o comunidades no son considerados únicamente destinatarios de una intervención, sino actores capaces de imaginar, ajustar y validar soluciones pertinentes para su contexto (Sanders & Stappers, 2008). En consecuencia, la formulación de la estrategia se convirtió en un proceso de construcción compartida, donde el conocimiento técnico sobre bioindicación se articuló con la experiencia cotidiana de los estudiantes frente a la calidad ambiental del barrio.

El ejercicio de formulación derivó en una pregunta de diseño que orientó el proceso: “¿Cómo podríamos cocrear una estrategia participativa que permita a la comunidad identificar la calidad del aire del barrio Madelena a través de la observación de organismos presentes en la naturaleza?”. Esta pregunta permitió delimitar el problema de intervención y, al mismo tiempo, abrir una ruta metodológica centrada en el reconocimiento de bioindicadores. De manera complementaria, se definió como reto de innovación la creación de una estrategia participativa de monitoreo en el área colindante al colegio, basada en la observación de elementos naturales que permitieran identificar y comprender la calidad del aire. Este resultado fue fundamental porque permitió convertir el diagnóstico en una ruta operativa, con sentido pedagógico, ambiental y comunitario.

La lluvia de ideas fortaleció la dimensión creativa del proceso. Los estudiantes plantearon propuestas como una ruta de estímulo del sentido del olfato para sensibilizar sobre la calidad del aire, ferias de recolección de residuos, jornadas de plantación y campañas con carteles en espacios de alta circulación para informar sobre las afectaciones en salud asociadas a la mala calidad del aire. Estas ideas muestran que la comunidad estudiantil vinculó la problemática atmosférica con experiencias corporales, prácticas de cuidado, comunicación ambiental y acción colectiva. En términos de innovación pública y comunitaria, este resultado es relevante porque evidencia que la co-creación permite generar alternativas más pertinentes cuando parte de la experiencia de quienes habitan y recorren cotidianamente el territorio (Bovaird, 2007).

A partir de estas ideas, el acompañamiento técnico del Jardín Botánico permitió introducir el uso de líquenes como organismos bioindicadores de la calidad del aire. Este momento fue decisivo dentro de la fase, porque ofreció una herramienta concreta para responder a una necesidad expresada por los estudiantes: contar con una forma más objetiva y accesible de comprender la calidad ambiental del barrio. El documento de sistematización señala que, frente a la pregunta por un elemento natural que permitiera evidenciar la calidad del aire, se propuso el uso de líquenes, organismos que pueden actuar como bioindicadores y que resultaban pertinentes para un monitoreo participativo en Madelena. Desde la literatura especializada, los líquenes han sido ampliamente reconocidos como organismos sensibles a los contaminantes atmosféricos, debido a su dependencia directa de la atmósfera para el intercambio de agua y nutrientes, lo que los convierte en indicadores útiles para el seguimiento ambiental (Nash, 2008).

La definición de los líquenes como eje de la estrategia permitió articular educación ambiental, ciencia ciudadana y apropiación social del conocimiento. La ciencia ciudadana se comprende como una forma de participación pública en procesos científicos, en la cual personas no expertas contribuyen a la observación, registro, análisis o interpretación de fenómenos ambientales (Haklay, 2013). En este caso, los estudiantes asumieron el rol de monitores ambientales juveniles en formación, capaces de observar organismos presentes en su entorno y relacionarlos con una problemática urbana concreta: la calidad del aire. Así, la fase de formulación no solo definió una estrategia, sino que abrió una posibilidad pedagógica para democratizar el conocimiento atmosférico desde el contexto escolar.

Otro resultado importante fue la construcción de un plan de trabajo por fases, que organizó las actividades posteriores del proceso. En este plan se incluyeron acciones como el árbol de empatía, la priorización de problemas, la definición de la pregunta de diseño, la lluvia de ideas, la capacitación en identificación de líquenes, el refuerzo conceptual, la socialización del formato de registro, la selección de puntos de monitoreo, el primer monitoreo y la socialización del proceso. Esta organización permitió traducir la co-creación en una ruta metodológica concreta, con tiempos, actividades y responsabilidades, aspecto fundamental para garantizar continuidad entre la reflexión participativa y la implementación técnica.

Desde el punto de vista de los resultados de apropiación, la Fase 2 permitió evidenciar tres avances. Primero, los estudiantes lograron priorizar problemas ambientales desde una lectura relacional del territorio, comprendiendo que residuos, olores, vegetación y calidad del aire hacen parte de una misma trama socioambiental. Segundo, participaron en la construcción de una pregunta de diseño y un reto de innovación, lo que fortaleció su capacidad de formular problemas ambientales de manera propositiva. Tercero, aceptaron y apropiaron la idea de utilizar líquenes como bioindicadores, integrando el saber científico a una preocupación territorial previamente identificada. Este tránsito evidencia que la co-creación favoreció la apropiación del conocimiento al conectar la experiencia local con una herramienta de monitoreo ambiental comprensible, observable y aplicable.

Ahora bien, la Fase 2 consolidó el paso del diagnóstico a la acción planificada. La formulación y co-creación permitieron que las problemáticas identificadas en la fase anterior fueran organizadas en categorías, priorizadas colectivamente y transformadas en una estrategia participativa de monitoreo de calidad del aire mediante líquenes. Este resultado fue clave para el desarrollo del artículo, pues muestra que la apropiación social del conocimiento no ocurre únicamente en la fase de implementación, sino desde el momento en que la comunidad participa en la definición del problema, en la construcción de preguntas y en la selección de alternativas metodológicas. Así, el proceso fortaleció la agencia juvenil, promovió la corresponsabilidad ambiental y sentó las bases para la implementación de una experiencia de ciencia ciudadana situada en el barrio Madelena.

Fase 3. Implementación

La tercera fase correspondió a la implementación de la estrategia participativa para el monitoreo de la calidad del aire mediante líquenes en el barrio Madelena. A diferencia de las fases anteriores, centradas en el reconocimiento del territorio y la formulación colectiva del reto, esta etapa permitió materializar la propuesta en acciones formativas, ejercicios prácticos de observación, selección de puntos de monitoreo y aplicación de instrumentos de registro. En términos de resultados, la implementación representó el tránsito del diagnóstico y la co-creación hacia una experiencia concreta de ciencia ciudadana escolar, en la que los estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES comenzaron a asumir un rol activo como monitores ambientales juveniles.

La fase inició con una capacitación teórico-práctica desarrollada en el Jardín Botánico de Bogotá, con apoyo de la Subdirección Científica. En este espacio, los estudiantes recibieron una orientación sobre la importancia ecológica de los líquenes, sus formas de crecimiento y su relación

con la calidad del aire. Posteriormente, realizaron una práctica de identificación in situ en un área cercana al monocultivo de palma de cera, lo que permitió pasar de una explicación conceptual a una experiencia directa de observación. Este primer momento fue relevante porque acercó a los participantes al reconocimiento de organismos que, aunque hacen parte del paisaje urbano, suelen pasar inadvertidos en la vida cotidiana. El anexo del proceso señala que durante esta sesión se explicó que una mayor diversidad de líquenes suele asociarse con mejores condiciones de calidad del aire, y que los estudiantes aplicaron lo aprendido en una práctica de campo.

Desde el punto de vista pedagógico, este resultado evidencia la importancia del aprendizaje experiencial en los procesos de educación ambiental. La comprensión de los líquenes como bioindicadores no se produjo únicamente mediante transmisión de información, sino a través de la observación, la exploración y la interacción con el entorno. Este tipo de aprendizaje situado permite que los participantes relacionen los conceptos científicos con experiencias concretas, fortaleciendo la comprensión y la apropiación del conocimiento ambiental (Kolb, 1984). En este caso, la experiencia en el Jardín Botánico funcionó como un escenario de mediación entre el conocimiento especializado y la lectura comunitaria del territorio.

Un segundo resultado de la implementación fue el fortalecimiento conceptual sobre la biología y morfología de los líquenes. En la sesión de refuerzo realizada en el Colegio INELPRES, se abordaron aspectos como la liquenización, el talo y las principales formas morfológicas: crustáceos, filamentosos, escumulosos, gelatinosos, foliosos y fruticosos. Además, se destacaron funciones ecológicas como la formación de suelos, la fijación de nitrógeno, la retención de humedad, la protección contra la erosión y su papel como refugio o alimento para diversos organismos. Esta profundización permitió que los estudiantes ampliaran su comprensión de los líquenes, no solo como indicadores de contaminación, sino como organismos con funciones relevantes dentro de los ecosistemas urbanos. El documento registra que la sesión enfatizó la relación entre diversidad de líquenes y condiciones atmosféricas, así como su uso en procesos de monitoreo ambiental.

Este avance resulta significativo porque muestra que la estrategia no redujo los líquenes a un instrumento técnico de medición, sino que permitió reconocerlos como parte de la biodiversidad urbana. Desde la ecología urbana, la biodiversidad presente en las ciudades cumple un papel fundamental en la construcción de vínculos entre las personas y los sistemas vivos que sostienen el bienestar ambiental (Müller et al., 2010). En este sentido, la formación sobre líquenes amplió la mirada de los estudiantes frente a la naturaleza urbana, al permitirles identificar organismos pequeños, sensibles y ecológicamente relevantes dentro de su propio entorno.

La implementación también incluyó la socialización del formato de registro de líquenes con la docente coordinadora del PRAE, Cristin Mora, y la definición de un diario de campo como instrumento complementario. Este acuerdo permitió integrar el registro técnico con la dimensión narrativa y reflexiva del proceso, favoreciendo que los estudiantes no solo consignaran datos sobre presencia, tipo o ubicación de líquenes, sino también percepciones, aprendizajes y observaciones derivadas de la experiencia. El anexo señala que, durante la reunión virtual entre la docente y la profesional territorial del Jardín Botánico, se presentó el formato de registro y se acordó complementar el proceso con un diario de campo para recoger percepciones y aprendizajes del monitoreo participativo.

Este resultado es relevante porque fortalece la dimensión metodológica de la experiencia. El uso combinado de formatos estandarizados y diarios de campo permite integrar información cuantitativa y cualitativa, aspecto clave en procesos de investigación participativa y educación ambiental. Los registros técnicos favorecen la sistematicidad de la observación, mientras que las bitácoras permiten documentar interpretaciones, emociones, dudas y aprendizajes de los participantes. Desde la perspectiva del aprendizaje situado, el conocimiento se construye en relación con prácticas sociales concretas, comunidades de participación y contextos de aplicación (Lave &

Wenger, 1991). En consecuencia, el diario de campo no opera únicamente como instrumento de recolección, sino como herramienta formativa para fortalecer la reflexión ambiental.

Otro resultado central fue la selección de puntos de monitoreo en el área cercana al Colegio INELPRES. Esta decisión respondió tanto a criterios técnicos como a condiciones de seguridad y viabilidad institucional. La profesional del Jardín Botánico y la docente coordinadora del PRAE seleccionaron árboles ubicados en el entorno circundante a la institución, atendiendo la orientación de la rectoría de evitar la exposición de los estudiantes a riesgos en zonas más alejadas. Este resultado muestra que la implementación de una estrategia participativa no depende solo del diseño metodológico, sino también de la lectura situada de las condiciones del territorio, la protección de los participantes y la adaptación del proceso a las posibilidades reales de la comunidad educativa.

La selección de árboles constituyó, además, un momento importante de traducción metodológica, porque permitió convertir el barrio en un espacio de observación científica escolar. Los árboles dejaron de ser vistos únicamente como elementos paisajísticos y pasaron a entenderse como sustratos para el análisis de bioindicadores. Esta transformación de la mirada es uno de los efectos más relevantes de la estrategia, pues promueve una alfabetización ambiental basada en la observación de relaciones ecológicas presentes en el entorno inmediato. En esta línea, la educación ambiental orientada a la acción busca que los sujetos desarrollen capacidades para interpretar problemas ambientales y participar en su transformación desde contextos concretos (Jensen & Schnack, 1997).

La socialización de la metodología con los estudiantes consolidó el componente técnico de la implementación. Durante esta sesión se explicó paso a paso el procedimiento para el monitoreo participativo: selección de árboles adecuados, considerando exposición al sol y estado de la corteza; uso de una malla de registro de 50 × 20 cm dividida en cuadros; diligenciamiento de formatos con datos como coordenadas, especie arbórea y tipo de líquenes observados; y análisis posterior mediante el Índice de Pureza Atmosférica (IPA). Este momento dejó establecidas las bases para que los estudiantes aplicaran la metodología de manera activa y comprendieran el valor de los líquenes como aliados en la lectura de la calidad ambiental del territorio.

Desde una perspectiva metodológica, la aplicación de una malla estandarizada permitió introducir criterios de observación sistemática en el proceso formativo. Este tipo de instrumento resulta fundamental para evitar que el monitoreo se reduzca a una observación espontánea, pues organiza la mirada, delimita el área de registro y favorece la comparación de resultados entre puntos. En estudios de biomonitoreo, los líquenes han sido utilizados como organismos sensibles para evaluar impactos atmosféricos, debido a que absorben agua y nutrientes directamente del ambiente y responden a cambios en la concentración de contaminantes (Conti & Cecchetti, 2001). Por ello, su uso en contextos escolares y comunitarios permite acercar a los participantes a métodos accesibles de evaluación ambiental.

Durante la implementación, la estrategia también fue socializada con otros actores educativos de la ciudad, específicamente con estudiantes del Gimnasio Kaiporé de Suba, vinculados a proyectos STEM. Esta actividad permitió ampliar la experiencia más allá del territorio inicial de Madelena y presentar el monitoreo con líquenes como una estrategia replicable en otros contextos escolares. En la jornada se abordaron temas como el origen simbiótico de los líquenes, sus formas de reproducción, su diversidad morfológica y su sensibilidad frente a contaminantes como dióxido de azufre y material particulado. El documento registra que esta socialización permitió mostrar cómo la iniciativa desarrollada con el Colegio INELPRES fortaleció capacidades técnicas y científicas, promoviendo el conocimiento ambiental local y el interés por la conservación.

Este resultado es importante porque evidencia que la implementación no solo tuvo efectos en el grupo participante inicial, sino que generó condiciones para la transferencia metodológica de la

experiencia. La socialización con otros actores educativos fortaleció el carácter demostrativo del proceso y permitió presentar el monitoreo participativo como una herramienta adaptable a diferentes territorios urbanos. En el marco de la ciencia ciudadana, la replicabilidad de las metodologías es clave para ampliar la participación social en la producción de datos ambientales, siempre que los instrumentos sean comprensibles, contextualizados y pedagógicamente apropiados (Bonney et al., 2009).

En cuanto al monitoreo piloto, la fase permitió aplicar en campo la metodología construida previamente. Los estudiantes participaron en el registro de líquenes mediante la malla estandarizada, la observación de morfologías y el diligenciamiento de formatos. De acuerdo con el documento metodológico del artículo, durante esta fase se desarrollaron actividades de capacitación teórica, identificación de morfologías líquénicas, selección de puntos, aplicación de la malla de registro de 50 × 20 cm, registro de datos en campo e identificación de especies como *Flavopunctelia flaventior*, *Candelaria concolor* y *Normandina* sp. Este resultado permitió generar información base para el análisis de la calidad del aire en el sector y, al mismo tiempo, fortalecer habilidades científicas escolares asociadas a la observación, clasificación, registro y análisis.

La identificación de especies y morfologías líquénicas produjo un doble resultado. Por una parte, aportó información ambiental preliminar sobre el territorio, al reconocer la presencia de organismos bioindicadores en árboles del entorno escolar. Por otra, consolidó un aprendizaje procedimental en los estudiantes, quienes pasaron de conocer los líquenes de manera conceptual a identificarlos en campo y relacionarlos con la calidad del aire. Esta dimensión procedimental es central en procesos de alfabetización científica, dado que el aprendizaje de la ciencia no se limita a comprender conceptos, sino que implica desarrollar prácticas como observar, preguntar, registrar, comparar e interpretar evidencias (Chinn & Malhotra, 2002).

En términos de apropiación social del conocimiento, la Fase 3 evidenció avances claros en la dimensión del “hacer”. Los estudiantes no solo recibieron información sobre calidad del aire, sino que aplicaron una metodología concreta para observarla desde su propio territorio. Esta apropiación práctica se expresó en la capacidad de reconocer árboles aptos para el monitoreo, utilizar una malla de registro, diferenciar morfologías de líquenes, diligenciar formatos y comprender la utilidad del Índice de Pureza Atmosférica. Así, la implementación permitió que el conocimiento científico se tradujera en una práctica comunitaria y escolar situada, fortaleciendo la agencia juvenil frente al cuidado ambiental.

De igual manera, la fase fortaleció la dimensión del “saber”, al ampliar la comprensión de los estudiantes sobre la relación entre biodiversidad, contaminación atmosférica y salud ambiental. La calidad del aire dejó de ser interpretada únicamente desde los malos olores percibidos en la ronda del río Tunjuelo y comenzó a ser comprendida a partir de organismos sensibles presentes en el entorno. Esta transformación resulta relevante porque permite pasar de una percepción subjetiva del problema a una lectura más compleja, apoyada en evidencias biológicas y registros sistemáticos. En consecuencia, el proceso no anuló las percepciones iniciales de los estudiantes, sino que las complementó con herramientas de observación ambiental.

En este sentido, la implementación fortaleció la dimensión del “cuidar”, dado que los estudiantes comenzaron a formular propuestas orientadas a mejorar las condiciones ambientales del sector. El resumen del documento señala que, a partir del proceso, los participantes fortalecieron sus capacidades como monitores ambientales juveniles, adquirieron habilidades en muestreo, registro y análisis de datos, y formularon propuestas como campañas de reforestación, vigilancia comunitaria y estrategias de educación ambiental. Esto evidencia que la implementación no se limitó al levantamiento de información, sino que promovió una disposición ética y práctica hacia la corresponsabilidad territorial.

Fase 4. Evaluación y sistematización

La cuarta fase correspondió a la evaluación y sistematización de la estrategia participativa de monitoreo de la calidad del aire mediante líquenes en el barrio Madelena. Esta fase permitió interpretar los efectos pedagógicos, técnicos y comunitarios del proceso, integrando la información producida durante el diagnóstico, la formulación, la implementación y el monitoreo piloto. En este sentido, la evaluación no se asumió como un momento final de verificación externa, sino como un ejercicio reflexivo y participativo orientado a comprender los aprendizajes alcanzados, las capacidades fortalecidas y las transformaciones generadas en la relación de los estudiantes con su territorio. Esta perspectiva coincide con la evaluación para el aprendizaje y la innovación social, en la cual los procesos evaluativos permiten acompañar experiencias complejas, reconocer cambios emergentes y ajustar las acciones a partir de la reflexión situada (Patton, 2011).

Metodológicamente, la evaluación integró componentes cualitativos y cuantitativos, lo cual permitió analizar la experiencia desde diferentes fuentes de información. De acuerdo con el diseño metodológico del artículo, esta fase se organizó en torno a tres dimensiones principales: Saber, relacionada con el nivel de comprensión sobre líquenes y calidad del aire; Hacer, referida a la capacidad de aplicar la metodología de monitoreo; y Cuidar, asociada con la adopción de prácticas ambientales responsables. Para ello, se emplearon instrumentos como observación participante, encuestas semiestructuradas, bitácoras de campo, entrevistas grupales y registro audiovisual, integrados mediante triangulación metodológica. Esta combinación de técnicas permitió construir una lectura más completa del proceso, en concordancia con los enfoques mixtos de investigación, que buscan articular datos narrativos, observacionales y descriptivos para comprender fenómenos sociales y educativos complejos (Creswell & Plano Clark, 2018).

En la dimensión Saber, los resultados evidenciaron un avance significativo en la comprensión ecológica, atmosférica y territorial de los estudiantes. Antes de la implementación, la calidad del aire era interpretada principalmente desde percepciones sensibles, como el mal olor proveniente del río Tunjuelo, la presencia de residuos y el deterioro visual del entorno. Sin embargo, tras las sesiones formativas y el monitoreo piloto, los participantes lograron reconocer los líquenes como organismos bioindicadores, comprender el concepto de liquenización e identificar morfologías básicas como líquenes crustáceos, escumulosos, foliosos, filamentosos, gelatinosos y fruticosos. El documento de sistematización señala que los estudiantes comprendieron la asociación simbiótica entre hongos y algas o cianobacterias, así como la relación entre diversidad liquénica y condiciones atmosféricas en zonas urbanas críticas como las ZUMA.

Este resultado es relevante porque muestra una transición entre el conocimiento ambiental intuitivo y el conocimiento ecológico situado. Los estudiantes no abandonaron sus percepciones iniciales sobre olores, residuos y deterioro ambiental; por el contrario, las complementaron con explicaciones biológicas y atmosféricas que les permitieron comprender mejor la problemática del territorio. Desde la educación ambiental contemporánea, este tipo de aprendizaje es fundamental porque permite conectar la experiencia cotidiana con marcos interpretativos más amplios, favoreciendo una comprensión crítica de las relaciones entre ambiente, sociedad y salud (Sauvé, 2005). En consecuencia, la dimensión Saber no se redujo a la adquisición de conceptos, sino que permitió ampliar la capacidad de los participantes para interpretar el territorio desde una mirada ecológica y comunitaria.

En la dimensión Hacer, los resultados mostraron que los estudiantes adquirieron habilidades prácticas para participar en un proceso de monitoreo ambiental. La aplicación de la malla de registro de 50 × 20 cm, la observación de líquenes en árboles seleccionados, la comparación con material de referencia, el diligenciamiento de formatos y la identificación de especies constituyeron evidencias concretas de apropiación metodológica. El documento reporta que los estudiantes identificaron

especies foliosas como *Flavopunctelia flaventior* y *Candelaria concolor*, así como especies escuamulosas como *Normandina* sp., lo cual generó información base para el análisis posterior mediante el Índice de Pureza Atmosférica (IPA).

Este hallazgo permite afirmar que la estrategia fortaleció capacidades científicas escolares asociadas a la observación, clasificación, registro y análisis de información ambiental. En este punto, la sistematización evidenció que los estudiantes no solo participaron como receptores de una actividad educativa, sino como actores capaces de producir información sobre su entorno. Esta característica se relaciona con los enfoques de ciencia ciudadana, en los cuales la participación pública en procesos científicos puede fortalecer la alfabetización ambiental, la comprensión de problemas locales y la producción colaborativa de datos útiles para la toma de decisiones (Shirk et al., 2012). Así, la dimensión Hacer expresó una apropiación práctica del conocimiento, al convertir el aprendizaje sobre líquenes en una acción concreta de monitoreo territorial.

En la dimensión Cuidar, la evaluación permitió identificar cambios en las actitudes de corresponsabilidad ambiental de los estudiantes. La experiencia no solo fortaleció conocimientos y habilidades técnicas, sino que promovió una mayor disposición hacia el cuidado del entorno escolar y barrial. Los participantes formularon propuestas orientadas a mejorar las condiciones ambientales del sector, entre ellas campañas de cero residuos, jornadas de reforestación, articulación con la Junta de Acción Comunal, estrategias de divulgación comunitaria y vigilancia ambiental. El documento señala que el proceso favoreció el empoderamiento juvenil y la formulación de propuestas comunitarias dirigidas a la mejora ambiental del sector, como campañas de sensibilización, acciones de reforestación y fortalecimiento de la vigilancia comunitaria.

Este resultado evidencia que la apropiación social del conocimiento se manifestó en una transformación ética y política de la relación con el territorio. Los estudiantes comenzaron a reconocerse como sujetos con capacidad de observar, interpretar y actuar frente a las problemáticas ambientales de Madelena. En este sentido, la dimensión Cuidar se aproxima a los enfoques de aprendizaje social para la sostenibilidad, en los cuales el conocimiento se construye colectivamente y se orienta hacia cambios en las prácticas, responsabilidades y formas de participación comunitaria (Wals, 2012). Por tanto, el cuidado no apareció como una actitud abstracta, sino como una disposición concreta hacia la acción ambiental.

DISCUSIÓN

La sistematización de la experiencia permitió organizar los resultados bajo un marco interpretativo común: Saber-Hacer-Cuidar. Esta estructura facilitó comprender que la apropiación social del conocimiento no ocurre de manera lineal, sino como un proceso progresivo que integra comprensión conceptual, aplicación metodológica y corresponsabilidad territorial. En el caso del barrio Madelena, el Saber se expresó en la comprensión de los líquenes y de la calidad del aire; el Hacer, en la aplicación del monitoreo participativo; y el Cuidar, en la formulación de acciones para mejorar el entorno. Esta lectura resulta coherente con los enfoques transformadores de la educación para la sostenibilidad, que proponen superar la transmisión de contenidos para promover capacidades de acción, pensamiento crítico y participación en contextos reales (Sterling, 2010).

Uno de los principales resultados cuantitativos de la fase fue la construcción del Índice de Apropiación del Monitoreo de la Calidad del Aire mediante Líquenes –IAM-L–, el cual alcanzó un valor de 85,5 %, interpretado como un nivel alto de apropiación social del conocimiento. Este resultado sintetiza los avances obtenidos en las tres dimensiones evaluadas y permite afirmar que la estrategia logró consolidar aprendizajes significativos, habilidades técnicas y actitudes de corresponsabilidad ambiental en el grupo participante. No obstante, más que un valor numérico aislado, el IAM-L debe

comprenderse como un indicador integrador del proceso, en tanto articula evidencias cualitativas y cuantitativas sobre la manera como los estudiantes comprendieron, aplicaron y proyectaron el conocimiento adquirido.

La triangulación metodológica fue clave para dar solidez interpretativa a los resultados. La integración de observación participante, encuestas, bitácoras, entrevistas grupales, registros audiovisuales y datos del monitoreo permitió contrastar los aprendizajes declarados por los estudiantes con sus prácticas observadas en campo. De esta manera, la evaluación no dependió de una única fuente de información, sino de la convergencia entre diferentes evidencias. Este procedimiento es consistente con el análisis cualitativo riguroso, en el cual la triangulación contribuye a fortalecer la credibilidad, profundidad y consistencia de las interpretaciones construidas a partir de datos diversos (Flick, 2018).

Asimismo, la sistematización permitió identificar categorías emergentes relacionadas con la comprensión ambiental del territorio, la participación comunitaria, el reconocimiento de bioindicadores y la apropiación social del conocimiento. Estas categorías muestran que el proceso no solo generó información sobre líquenes y calidad del aire, sino que también fortaleció la lectura crítica del barrio como un territorio atravesado por problemáticas ambientales, relaciones sociales y posibilidades de acción colectiva. En este sentido, el análisis temático permitió organizar los datos en patrones de sentido que explican cómo los estudiantes interpretaron la experiencia, qué aprendizajes consideraron relevantes y qué acciones proyectaron hacia el futuro (Braun & Clarke, 2006).

Otro resultado importante de la fase fue la identificación del potencial de replicabilidad de la estrategia. La experiencia demostró que el monitoreo participativo mediante líquenes puede ser adaptado a otros contextos escolares y comunitarios de Bogotá, especialmente en sectores urbanos donde la calidad del aire constituye una preocupación ambiental prioritaria. El documento base señala que la estrategia constituye un modelo replicable de educación ambiental participativa, fortaleciendo la agencia juvenil y la democratización del conocimiento atmosférico en contextos urbanos vulnerables. Esta posibilidad de réplica depende de mantener tres condiciones centrales: una lectura participativa del territorio, una herramienta de monitoreo accesible y un proceso pedagógico que conecte ciencia, experiencia y acción.

En términos de resultados generales, la Fase 4 permitió demostrar que la estrategia de monitoreo participativo no solo produjo aprendizajes sobre líquenes, sino que fortaleció capacidades locales para comprender y actuar frente a la calidad del aire. Los estudiantes pasaron de percibir el problema ambiental desde el malestar cotidiano a construir una lectura más compleja, apoyada en evidencias biológicas, registros sistemáticos y propuestas de acción comunitaria. Esta transformación evidencia que la apropiación social del conocimiento se expresa cuando los sujetos logran relacionar el saber científico con su experiencia territorial y convertirlo en herramientas para la participación, la corresponsabilidad y el cuidado.

CONCLUSIONES

La experiencia desarrollada en el barrio Madelena permitió demostrar que la apropiación social del conocimiento sobre la calidad del aire se fortalece cuando la comunidad educativa participa activamente en la identificación, interpretación y transformación de las problemáticas de su propio territorio. El proceso no se limitó a transmitir información técnica sobre contaminación atmosférica, sino que generó una ruta participativa en la que los estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES reconocieron el aire como una dimensión ambiental cercana a su vida cotidiana, asociada a olores, residuos, cobertura vegetal, bienestar, salud y uso del espacio público. En este sentido, la estrategia confirmó que la educación ambiental situada adquiere mayor sentido cuando parte de las experiencias, emociones y percepciones de quienes habitan el territorio.

El diagnóstico participativo evidenció que los estudiantes poseen una lectura clara de las problemáticas ambientales del entorno escolar y barrial. A través de la cartografía social, el árbol de sensaciones y el reconocimiento de la ronda del río Tunjuelo, los participantes identificaron zonas críticas asociadas a residuos, malos olores, deterioro ambiental y baja apropiación comunitaria. Estos hallazgos permitieron comprender que la calidad del aire no es percibida únicamente como un indicador técnico, sino como una experiencia territorial que afecta la relación de los jóvenes con el ambiente urbano. Esta fase fue fundamental porque transformó percepciones dispersas en problemas colectivos susceptibles de ser abordados desde la investigación participativa y la acción comunitaria.

La fase de formulación y co-creación permitió convertir los hallazgos del diagnóstico en una pregunta de diseño y en un reto de innovación ambiental. La priorización de problemas, la lluvia de ideas y la definición del uso de líquenes como bioindicadores evidenciaron que la comunidad estudiantil no solo reconoce las afectaciones ambientales, sino que también puede participar en la construcción de alternativas metodológicas para comprenderlas. De esta manera, la estrategia logró articular el saber científico del Jardín Botánico de Bogotá con el saber escolar y territorial de los estudiantes, fortaleciendo una lógica de co-producción del conocimiento coherente con los principios de la Investigación-Acción Participativa y la Apropiación Social del Conocimiento.

La implementación del monitoreo participativo mediante líquenes mostró que estos organismos constituyen una herramienta pedagógica pertinente para acercar a los estudiantes a la comprensión de la calidad del aire. Las sesiones teóricas y prácticas permitieron reconocer morfologías líquénicas, comprender su función como bioindicadores y aplicar una malla de registro estandarizada en campo. Este proceso fortaleció habilidades científicas escolares como la observación, la clasificación, el registro y el análisis de información ambiental. En consecuencia, los estudiantes dejaron de ser receptores de contenidos ambientales para convertirse en monitores juveniles capaces de producir información básica sobre su entorno.

El análisis de los resultados bajo las dimensiones Saber-Hacer-Cuidar permitió evidenciar avances integrales en el proceso de apropiación. En la dimensión Saber, los estudiantes ampliaron su comprensión sobre líquenes, bioindicación y calidad del aire. En la dimensión Hacer, aplicaron instrumentos de monitoreo, identificaron morfologías y participaron en el registro de datos. En la dimensión Cuidar, formularon propuestas orientadas a mejorar el entorno, tales como campañas de sensibilización, acciones de reforestación, vigilancia comunitaria y estrategias de educación ambiental. Esta integración demuestra que la apropiación social del conocimiento no se reduce al aprendizaje conceptual, sino que implica capacidades prácticas y disposiciones éticas frente al cuidado del territorio.

El Índice de Apropiación del Monitoreo de la Calidad del Aire mediante Líquenes (IAM-L), con un resultado de 85,5 %, permitió reconocer un nivel alto de apropiación social del conocimiento en el grupo participante. Este resultado evidencia que la estrategia tuvo efectos positivos en el fortalecimiento del conocimiento ecológico local, la aplicación técnica del monitoreo y la corresponsabilidad ambiental. No obstante, este índice debe interpretarse como una medición del proceso formativo y participativo, no como una evaluación definitiva de la calidad del aire en Madelena. Para establecer tendencias atmosféricas más robustas, sería necesario ampliar el número de puntos, realizar monitoreos periódicos y complementar la bioindicación con mediciones fisicoquímicas.

La experiencia también permitió concluir que el monitoreo participativo con líquenes tiene un alto potencial de réplica en otros contextos escolares y comunitarios de Bogotá, especialmente en territorios urbanos donde la calidad del aire constituye una preocupación socioambiental prioritaria. Su valor radica en que utiliza organismos presentes en el entorno cotidiano, requiere instrumentos relativamente accesibles y favorece el diálogo entre ciencia ciudadana, educación ambiental y

participación comunitaria. En este sentido, la estrategia desarrollada en Madelena puede ser comprendida como un modelo pedagógico y metodológico adaptable a procesos de formación ambiental en instituciones educativas, organizaciones comunitarias y escenarios territoriales acompañados por entidades públicas.

Finalmente, el artículo permite afirmar que la apropiación social del conocimiento ambiental se fortalece cuando la ciencia se vincula con la vida cotidiana, el territorio y la acción colectiva. La estrategia desarrollada con los estudiantes del PRAE del Instituto INELPRES demostró que es posible democratizar el conocimiento sobre la calidad del aire a partir de metodologías participativas, bioindicadores y ejercicios de monitoreo comunitario. Así, el principal aporte del proceso no fue únicamente la identificación de líquenes o la aplicación de una metodología de registro, sino la transformación del rol de los estudiantes: de observadores de una problemática ambiental pasaron a ser actores capaces de comprender, monitorear y proponer acciones para el cuidado de su territorio.

REFERENCIAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2023). Decreto 492 de 2023 por el cual se establecen las Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA). Secretaría Jurídica Distrital.
- Andrade, G. I., Remolina, F., & Wiesner, D. (2011). Asuntos de la biodiversidad urbana en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Bovaird, T. (2007). Beyond engagement and participation: User and community coproduction of public services. *Public Administration Review*, 67(5), 846–860. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6210.2007.00773.x>
- Brown, T. (2009). *Change by design: How design thinking creates new alternatives for business and society*. Harper Business.
- Fals Borda, O. (1987). *La investigación acción participativa en convergencias disciplinarias*. Universidad Nacional de Colombia.
- Fals Borda, O. (2008). *La investigación-acción participativa: Política y epistemología*. Siglo del Hombre Editores.
- Guba, E. G., & Lincoln, Y. S. (1989). *Fourth generation evaluation*. Sage Publications.
- Haklay, M. (2013). Citizen science and volunteered geographic information: Overview and typology of participation. En D. Sui, S. Elwood, & M. Goodchild (Eds.), *Crowdsourcing geographic knowledge* (pp. 105–122). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4587-2_7
- Instituto de Montaña. (2018). *Metodologías participativas para la gestión del territorio*. Instituto de Montaña.
- Kemmis, S., & McTaggart, R. (2005). Participatory action research. En N. K. Denzin & Y. S. Lincoln (Eds.), *The Sage handbook of qualitative research* (pp. 559–603). Sage.
- Martín-López, B., González, J. A., & Vilardy, S. (2012). *Ciencias de la sostenibilidad: Guía docente*. Universidad del Magdalena.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Informe de gestión ambiental y participación ciudadana en Colombia*. Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). *Política pública de apropiación social del conocimiento en el marco de la ciencia, tecnología e innovación*. MinCiencias.
- Nalegach, M. (2020). El Acuerdo de Escazú y la democracia ambiental en América Latina. *Revista de Derecho Ambiental*, 14(2), 45–62.
- Nash, T. H. (2008). *Lichen biology* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- ONU-Hábitat. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. UN-Habitat.

- Patton, M. Q. (2011). *Developmental evaluation: Applying complexity concepts to enhance innovation and use*. Guilford Press.
- Red CIMAS. (2019). *Metodologías participativas para la transformación social*. Red CIMAS.
- Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a general theory of planning. *Policy Sciences*, 4, 155–169. <https://doi.org/10.1007/BF01405730>
- Robayo Corredor, J. (2021). Sentipensar el territorio: Aportes desde la educación ambiental. *Revista Colombiana de Educación Ambiental*, 12(1), 45–60.
- Sanders, E. B.-N., & Stappers, P. J. (2008). Co-creation and the new landscapes of design. *CoDesign*, 4(1), 5–18. <https://doi.org/10.1080/15710880701875068>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2022). *Informe de calidad del aire de Bogotá D.C.* Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, 59(11), 977–984. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9>
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, 86(2), 175–218. <https://doi.org/10.1002/sce.10001>
- Conti, M. E., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: Lichens as bioindicators of air pollution assessment: A review. *Environmental Pollution*, 114(3), 471–492. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00224-4)
- Jensen, B. B., & Schnack, K. (1997). The action competence approach in environmental education. *Environmental Education Research*, 3(2), 163–178. <https://doi.org/10.1080/1350462970030205>
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Prentice Hall.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: Legitimate peripheral participation*. Cambridge University Press.
- Müller, N., Werner, P., & Kelcey, J. G. (Eds.). (2010). *Urban biodiversity and design*. Wiley-Blackwell.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Sage.
- Flick, U. (2018). *An introduction to qualitative research* (6th ed.). Sage.
- Patton, M. Q. (2011). *Developmental evaluation: Applying complexity concepts to enhance innovation and use*. Guilford Press.
- Sauvé, L. (2005). Currents in environmental education: Mapping a complex and evolving pedagogical field. *Canadian Journal of Environmental Education*, 10(1), 11–37.
- Shirk, J. L., Ballard, H. L., Wilderman, C. C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B. V., Krasny, M. E., & Bonney, R. (2012). Public participation in scientific research: A framework for deliberate design. *Ecology and Society*, 17(2), Article 29. <https://doi.org/10.5751/ES-04705-170229>
- Sterling, S. (2010). Learning for resilience, or the resilient learner? Towards a necessary reconciliation in a paradigm of sustainable education. *Environmental Education Research*, 16(5–6), 511–528. <https://doi.org/10.1080/13504622.2010.505427>
- Wals, A. E. J. (2012). *Learning for sustainability in times of accelerating change*. Wageningen Academic Publishers.