



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica en Chile

Título al que opta: Ingeniería en Control y Gestión Ambiental

Nombre Alumno: Krishna Inostroza Luna

Profesor Guía: Valeria Palma

Año: 2025



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica en Chile

Nombre del candidato(a): Krishna Inostroza Luna

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Gestión y Control Ambiental

Campus: Concepción ; Departamento: Química y Medio ambiente

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Valeria Palma Onetto, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 08-03-2026

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08-03-2026

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, por su sacrificio, enseñanzas y apoyo incondicional. Gracias por inculcarme valores, perseverancia y el deseo constante de superación.

A mi pareja y amigos, por acompañarme y alentarme en cada etapa de este proceso.

Y a mí, por no rendirme, por la constancia, el esfuerzo y la fortaleza demostrada para superar cada obstáculo y llegar hasta aquí.



RESUMEN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales en Chile, debido al aumento de actividades industriales, agrícolas y urbanas, las cuales generan efectos negativos tanto en la salud humana como en los ecosistemas. En este contexto, los insectos han adquirido relevancia como bioindicadores ambientales, dado que su alta sensibilidad a los cambios ambientales permite evaluar de manera indirecta la calidad del aire y la presencia de contaminantes.

El presente trabajo analiza el uso de insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica mediante una revisión bibliográfica de estudios científicos publicados entre los años 2020 y 2025, considerando fuentes nacionales e internacionales. Se abordan los principales contaminantes atmosféricos, tales como material particulado (PM10 y PM2,5), óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, así como su impacto sobre la fisiología, comportamiento y diversidad de distintos grupos de insectos.

Se identifican como principales organismos bioindicadores a insectos de los órdenes Hymenoptera, Lepidoptera, Coleoptera, Diptera y Odonata, destacando especialmente a las abejas por su capacidad de bioacumulación y su amplio rango de forrajeo. Asimismo, se describen las metodologías más utilizadas para su estudio, incluyendo técnicas de muestreo entomológico, análisis químicos y evaluaciones de diversidad biológica.

Finalmente, se evalúa la aplicabilidad de los insectos bioindicadores en la gestión ambiental, considerando el marco normativo chileno, como la Ley 19.300, el SEIA y los Planes de Descontaminación Atmosférica, así como lineamientos internacionales promovidos por la OMS y otros organismos. El estudio concluye que los insectos constituyen una herramienta complementaria eficaz para el monitoreo de la calidad del aire, con alto potencial de implementación en Chile, contribuyendo a una gestión ambiental más integral y sustentable.



Índice de Materias

DEDICATORIA	3
RESUMEN	1
ÍNDICE DE FIGURAS	4
SIGLA Y SIMBOLOGÍA	4
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
JUSTIFICACIÓN	5
Alcance:	8
Limitaciones:	8
METODOLOGÍA	9
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	12
1.1 Contaminación atmosférica	12
1.2. Contaminantes primarios y secundarios	13
1.3 Bioindicadores ambientales	14
1.4 Insectos como bioindicadores	15
CAPÍTULO 2. INSECTOS BIOINDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	17
2.1. Fundamento ecológico de los bioindicadores	17
2.2. Principales órdenes de insectos utilizados en monitoreo atmosférico	17
Hymenoptera (Abejas y avispas)	18
Lepidoptera (Mariposas y Polillas)	19
Diptera (Moscas)	19
Coleóptera (Escarabajos)	20
2.3 Metodologías empleadas	22
2.4. Evidencia empírica del uso de insectos como bioindicadores	24



CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA LA INCORPORACIÓN DE INSECTOS COMO BIOINDICADORES EN PROGRAMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL	25
3.1. Fundamentación técnica del monitoreo biológico complementario	25
3.2. Objetivo del programa piloto.....	25
3.3 Diseño del programa de monitoreo	26
3.3.1 Selección de áreas de estudio	26
3.3.2 Grupos de insectos seleccionados	26
3.4. Variables a evaluar	26
3.4.1 Variables biológicas	27
3.4.2 Variables ambientales complementarias	27
3.5. Metodología de muestreo	27
3.6. Estimación de costos del programa piloto	28
3.9. Integración normativa y aplicabilidad institucional.....	29
CAPITULO 4. DISCUSIÓN	32
Conclusión.....	34



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama PRISMA del proceso de identificación y selección de estudios.

Figura 2-1 Abeja (Apidae)

Figura 2-2 Mariposa (Nymphalidae)

Figura 2-3 Sirfido (Syrphidae)

Figura 2-4 Escarabajo (Carabidae)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Principales diferencias entre contaminantes primarios y secundarios y sus efectos sobre insectos

Tabla 2-1. Ventajas y desventajas comparativas por grupo de insecto

Tabla 2-2. Diferencias entre bioindicadores directos e indirectos en insectos

Tabla 2-3. Principales efectos de la contaminación atmosférica sobre insectos

Tabla 3-1 Presupuesto anual estimado para el programa piloto de monitoreo ambiental mediante insectos bioindicadores

SIGLA Y SIMBOLOGÍA



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

PM_{2,5}: Material particulado fino (diámetro $\leq 2,5 \mu\text{m}$)

MP₁₀: Material Particulado 10 micras.

NO₂: Dióxido de nitrógeno

SO₂: Dióxido de azufre

O₃: Ozono troposférico

OMS: Organización Mundial de la Salud

Pb: Plomo

Cd: Cadmio

Zn: Zinc



INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales factores de presión ambiental a nivel global, generando impactos no sólo sobre la salud humana, sino también sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas (Organización Mundial de la Salud, 2021). En Chile, el material particulado fino (MP_{2,5}) y el material particulado grueso (MP₁₀) se encuentran regulados mediante normas primarias de calidad ambiental establecidas en el Decreto Supremo N°12/2011 y el Decreto Supremo N°59/1998 del Ministerio del Medio Ambiente y del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, respectivamente (Ministerio del Medio Ambiente, 2011; Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998). Si bien estos instrumentos están orientados prioritariamente a la protección de la salud de la población, la evidencia científica ha demostrado que la exposición crónica a contaminantes atmosféricos también produce alteraciones ecológicas significativas, incluyendo cambios en la estructura de comunidades biológicas y procesos ecosistémicos esenciales (Zvereva & Kozlov, 2010).

Chile posee características ambientales particularmente sensibles frente a procesos de degradación atmosférica. El país presenta altos niveles de endemismo y ecosistemas únicos, tales como el bosque templado lluvioso del sur y el ecosistema mediterráneo de la zona central, reconocido por su alto valor de conservación (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). La alteración sostenida de la calidad del aire puede afectar indirectamente estos sistemas mediante deposición de contaminantes sobre suelos y vegetación, generando bioacumulación y interrupciones tróficas.

Desde el punto de vista productivo, la relevancia del problema adquiere una dimensión estratégica. El sector silvoagropecuario representa un componente significativo de la economía nacional y constituye uno de los principales rubros exportadores del país (Banco Central de Chile, última edición disponible). La productividad agrícola depende en gran medida de servicios ecosistémicos como la polinización, proceso en el cual los insectos



cumplen un rol fundamental. Investigaciones recientes han demostrado que la diversidad de polinizadores genera beneficios directos en el rendimiento agrícola, pudiendo superar los efectos negativos asociados a determinadas plagas (Katumo et al., 2022; Leach & Kaplan, 2022).

En este contexto, el Servicio Agrícola y Ganadero mantiene estrictos estándares de control sanitario y fitosanitario, con el fin de resguardar la calidad de las exportaciones agrícolas y prevenir riesgos biológicos que puedan afectar los mercados internacionales. Cualquier alteración significativa en la biodiversidad funcional, incluyendo polinizadores, puede generar impactos indirectos sobre la cadena productiva y la seguridad alimentaria.

A nivel regional, la problemática adquiere especial relevancia en la Región del Biobío, donde diversas comunas han sido declaradas zonas latentes o saturadas por material particulado, activándose Planes de Descontaminación Atmosférica bajo la supervisión del Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio del Medio Ambiente, actualización vigente). No obstante, el monitoreo oficial se basa principalmente en estaciones instrumentales automáticas, cuyo objetivo es verificar el cumplimiento de normas primarias. Estos sistemas, si bien presentan alta precisión analítica, no necesariamente reflejan los efectos biológicos acumulativos que la contaminación atmosférica genera sobre los ecosistemas.

En este escenario, el uso de insectos como bioindicadores atmosféricos emerge como una herramienta complementaria de alto valor técnico. Los insectos presentan características biológicas que los convierten en organismos sensibles frente a alteraciones ambientales: alta diversidad, ciclos de vida relativamente cortos, amplia distribución geográfica y capacidad de bioacumulación de metales pesados y otros contaminantes presentes en material particulado (Zvereva & Kozlov, 2010; Goretti et al., 2020). Diversos estudios han demostrado que órdenes como Hymenoptera, Lepidoptera y Diptera pueden evidenciar cambios en abundancia, diversidad y parámetros fisiológicos asociados a exposición crónica a contaminantes atmosféricos.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

En consecuencia, el presente trabajo analiza el uso de insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica en Chile, evaluando su aplicabilidad técnica dentro del marco normativo nacional y proponiendo lineamientos para su eventual incorporación en programas de gestión ambiental.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar el uso de insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica mediante una revisión bibliográfica, identificando los principales grupos de insectos utilizados, los contaminantes asociados y la aplicabilidad de estos estudios en la gestión y control ambiental.

Objetivos específicos

1. Identificar los principales contaminantes atmosféricos monitoreados mediante insectos.
2. Clasificar los órdenes y especies de insectos más utilizados como bioindicadores y las metodologías empleadas en su estudio.
3. Evaluar la aplicabilidad de los insectos bioindicadores en programas de gestión ambiental, considerando normativas nacionales e internacionales.
4. Proponer lineamientos y recomendaciones para incorporar estos bioindicadores en planes de monitoreo de calidad del aire en Chile.



JUSTIFICACIÓN

La evaluación de la calidad del aire en Chile se realiza principalmente mediante estaciones automáticas de monitoreo continuo, las cuales permiten medir concentraciones de material particulado (MP2,5 y MP10), gases criterio y variables meteorológicas. Estos sistemas cumplen un rol fundamental en la verificación del cumplimiento normativo; sin embargo, presentan limitaciones tanto económicas como ecológicas.

Desde el punto de vista financiero, la instalación de una estación automática de monitoreo de calidad del aire implica costos elevados asociados a adquisición de equipamiento, infraestructura, calibración, mantención y operación técnica especializada. De acuerdo con antecedentes técnicos de programas de monitoreo ambiental en Latinoamérica, el costo de implementación de una estación automática puede oscilar entre USD 150.000 y USD 300.000, mientras que los costos anuales de operación y mantención pueden superar los USD 20.000–40.000, dependiendo del número de contaminantes medidos y del nivel de automatización. A ello se suman gastos en calibraciones periódicas, reposición de filtros, certificaciones y personal profesional calificado.

En contraste, los métodos biológicos basados en bioindicadores permiten evaluar efectos acumulativos de la contaminación mediante costos operacionales significativamente menores, especialmente cuando se diseñan protocolos estandarizados de muestreo y análisis. Si bien no reemplazan la medición instrumental exigida por normativa, pueden constituir herramientas complementarias que optimicen la gestión ambiental territorial, particularmente en zonas donde no existen estaciones fijas o donde la cobertura espacial es limitada.

Desde una perspectiva ecológica, el monitoreo exclusivamente instrumental presenta otra limitación relevante: no evalúa directamente el impacto biológico de los contaminantes. Las concentraciones medidas permiten verificar cumplimiento normativo, pero no necesariamente reflejan alteraciones en biodiversidad, bioacumulación o efectos subletales en organismos. En este contexto, la incorporación de insectos como bioindicadores permite



integrar información fisicoquímica con respuestas biológicas observables, fortaleciendo el enfoque ecosistémico de la gestión ambiental.

La relevancia de esta aproximación se intensifica considerando la estructura productiva del país. El sector silvoagropecuario constituye un componente significativo del Producto Interno Bruto y de las exportaciones nacionales (Banco Central de Chile, última edición disponible). La productividad agrícola depende en gran medida del servicio ecosistémico de polinización, el cual es realizado mayoritariamente por insectos nativos y silvestres.

Investigaciones recientes han demostrado que la diversidad de polinizadores genera beneficios directos en el rendimiento agrícola, contribuyendo tanto a la estabilidad productiva como a la calidad de los cultivos (Katumo et al., 2022). De manera particularmente relevante, Leach y Kaplan (2022) evidenciaron que, en cultivos de sandía, la contribución de abejas silvestres al rendimiento fue más significativa que el daño ocasionado por ciertos escarabajos fitófagos, lo que sugiere que la priorización de estrategias de conservación de polinizadores puede resultar económicamente más eficiente que el control intensivo de plagas.

No obstante, a pesar de esta evidencia, el uso extensivo de plaguicidas continúa siendo una práctica común en diversos sistemas agrícolas. Muchos de estos compuestos presentan toxicidad no sólo para plagas objetivo, sino también para polinizadores, fauna acuática y salud humana. La exposición combinada a contaminantes atmosféricos y agroquímicos puede generar efectos sinérgicos que disminuyen la resiliencia de comunidades de insectos, afectando indirectamente la productividad agrícola y la estabilidad ecológica.

En Chile, el Servicio Agrícola y Ganadero mantiene un rol estratégico en la regulación fitosanitaria y en la protección de la biodiversidad funcional asociada a la producción agrícola. La eventual incorporación de herramientas complementarias de monitoreo biológico podría fortalecer la toma de decisiones preventivas, especialmente en territorios con alta presión ambiental.



A nivel regional, la Región del Biobío presenta antecedentes de episodios críticos asociados a material particulado, activándose Planes de Descontaminación Atmosférica bajo la coordinación del Ministerio del Medio Ambiente. En este escenario, la implementación de programas piloto de bioindicación permitiría generar información adicional respecto de impactos ecológicos locales, complementando los datos instrumentales existentes.

Desde la perspectiva de la Ingeniería en Control y Gestión Ambiental, la propuesta se justifica en tres dimensiones fundamentales:

- Dimensión técnica: Integración de variables biológicas como indicadores complementarios de desempeño ambiental.
- Dimensión económica: Potencial reducción de costos en monitoreo exploratorio o en ampliación de cobertura territorial.
- Dimensión ecosistémica: Evaluación directa de efectos acumulativos sobre biodiversidad funcional.

En consecuencia, el estudio y propuesta de utilización de insectos como bioindicadores atmosféricos se justifica tanto por su fundamento científico como por su pertinencia técnica y económica en el contexto nacional, especialmente considerando la relevancia estratégica del sector agrícola y la necesidad de fortalecer herramientas de gestión ambiental con enfoque preventivo.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Alcance:

El trabajo se enfoca en comunidades rurales y semiurbanas de la Región del Biobío, especialmente aquellas vinculadas a la actividad agrícola, donde los insectos tienen una alta interacción con el entorno natural y productivo. La metodología y conclusiones pueden ser aplicables a otras regiones del país, adaptándose según las condiciones ambientales y los tipos de contaminantes presentes.

Limitaciones:

- La disponibilidad de datos biológicos puede variar según la estación del año.
- Los resultados dependen de la correcta identificación de especies indicadoras.
- El estudio no considera de forma directa otros contaminantes no atmosféricos (como suelos o aguas).
- El tiempo de observación puede restringir la comparación estacional o anual.



METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante una revisión bibliográfica sistemática, siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). El objetivo fue identificar, analizar y sintetizar evidencia científica relacionada con el uso de insectos como bioindicadores de contaminación atmosférica.

Fuentes de información:

La búsqueda se realizó en bases de datos académicas internacionales: Scopus, ScienceDirect, Web of Science y Google Scholar, además de fuentes nacionales como repositorios del Ministerio del Medio Ambiente, Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y la Universidad de Chile.

El período considerado correspondió a publicaciones entre los años 2020 y 2025.

Estrategia de búsqueda:

Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés y español, tales como:

- “insects” AND “air pollution”
- “bioindicadores” AND “atmospheric contamination”
- “heavy metals” AND “insects”
- “MP2.5” OR “PM10” AND “biomonitoring”

Criterios de inclusión:

Se incluyeron estudios que cumplieron con los siguientes criterios:

- Artículos científicos revisados por pares.
- Estudios publicados entre 2020 y 2025.
- Investigaciones realizadas en contextos urbanos o rurales.
- Estudios que analizaran insectos como herramientas de detección o monitoreo de contaminantes atmosféricos.
- Investigaciones que reportaran datos empíricos o revisiones sistemáticas.

Criterios de exclusión:

Se excluyeron:



- Artículos no revisados por pares.
- Blogs, documentos divulgativos o fuentes sin respaldo científico.
- Estudios enfocados exclusivamente en contaminación del agua o suelo sin relación atmosférica.
- Investigaciones que no analizaran insectos como bioindicadores.
- Artículos duplicados entre bases de datos.

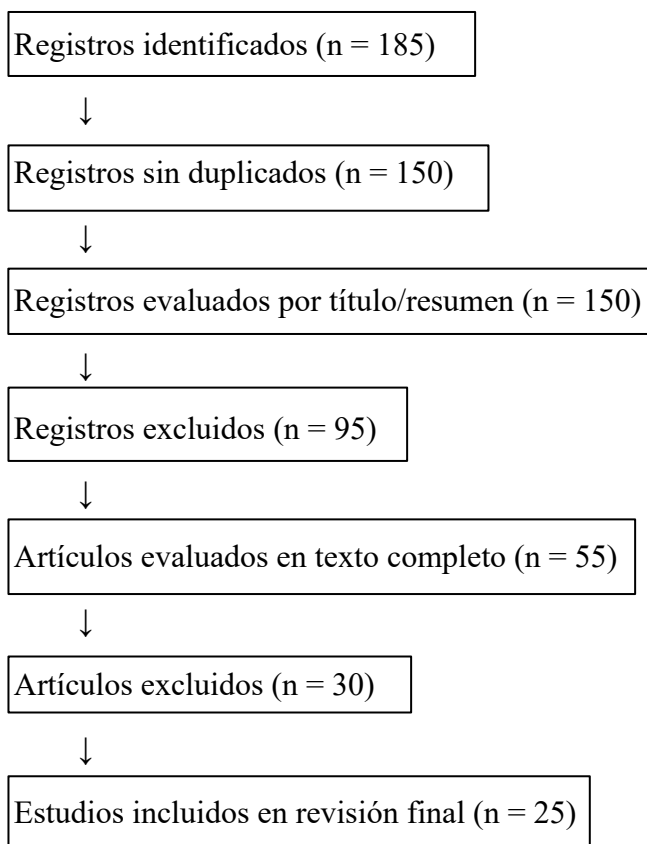


Figura 1. Diagrama PRISMA del proceso de identificación y selección de estudios.



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Extracción y análisis de datos:

La información fue sistematizada en matrices comparativas que incluyeron:

- Orden o familia del insecto.
- Tipo de contaminante estudiado.
- Indicador biológico empleado (bioacumulación, mortalidad, cambios conductuales, estructura comunitaria).
- Contexto geográfico.
- Método de análisis utilizado.

Posteriormente, se realizó una síntesis interpretativa y un análisis comparativo entre la evidencia científica y el grado de implementación en políticas públicas ambientales.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales factores de presión ambiental a escala global, afectando tanto la salud humana como la integridad de los ecosistemas. Si bien las políticas públicas han priorizado históricamente la reducción de riesgos sanitarios, la evidencia científica demuestra que los contaminantes atmosféricos generan efectos ecológicos acumulativos que alteran procesos biológicos fundamentales (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022).

El material particulado fino (MP_{2,5}) y grueso (MP₁₀) posee la capacidad de transportar metales pesados y otros compuestos tóxicos, los cuales pueden depositarse sobre suelos, vegetación y cuerpos de agua, afectando cadenas tróficas y procesos de polinización. En Chile, estos contaminantes se encuentran regulados mediante el Decreto Supremo N°59/1998 y el Decreto Supremo N°12/2011, orientados principalmente a la protección de la salud humana (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 1998; Ministerio del Medio Ambiente, 2011). No obstante, dichos instrumentos no incorporan explícitamente indicadores ecológicos en su evaluación.

Desde una perspectiva ecosistémica, la exposición crónica a contaminantes atmosféricos puede provocar reducción en biodiversidad, alteración de ciclos biogeoquímicos y modificación de interacciones entre especies. El ozono troposférico, por ejemplo, presenta un alto poder oxidante que afecta tejidos vegetales, reduciendo productividad primaria y alterando disponibilidad de recursos para insectos herbívoros y polinizadores (World Health Organization [WHO], 2021).

Asimismo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático ha reconocido la interacción entre contaminación atmosférica y procesos climáticos globales, señalando que ciertos contaminantes contribuyen a forzamientos radiativos que intensifican



desequilibrios ambientales (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 1992). Este contexto refuerza la necesidad de integrar enfoques ecológicos en la evaluación de la calidad del aire.

1.2. Contaminantes primarios y secundarios

Los contaminantes atmosféricos se clasifican en primarios y secundarios según su origen y transformación en la atmósfera. Esta diferenciación resulta fundamental para comprender sus mecanismos de impacto sobre organismos terrestres.

Los contaminantes primarios son emitidos directamente desde fuentes industriales, vehiculares o procesos de combustión. Entre ellos destacan el material particulado, los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre. La deposición de partículas contaminadas sobre superficies biológicas facilita la incorporación de metales pesados en tejidos de insectos, generando bioacumulación y estrés oxidativo (Migula et al., 2013; Zvereva & Kozlov, 2010).

En contraste, los contaminantes secundarios se forman mediante reacciones fotoquímicas en la atmósfera. El ozono troposférico constituye uno de los principales ejemplos y ha sido asociado a alteraciones en compuestos orgánicos volátiles emitidos por plantas, modificando señales químicas esenciales para la interacción planta-polinizador (McFrederick et al., 2008).

Diversos estudios experimentales han demostrado que la exposición subletal a estos contaminantes puede afectar la orientación, eficiencia de forrajeo y capacidad reproductiva de polinizadores (Thimmegowda et al., 2020). Por tanto, los impactos no se limitan a efectos directos, sino que incluyen disrupciones ecológicas complejas.

Tabla 1-1 Principales diferencias entre contaminantes primarios y secundarios y sus efectos sobre insectos



Tipo de contaminante	Origen	Ejemplos relevantes	Principales efectos ambientales	Efectos documentados en insectos
Primarios	Emitidos directamente desde fuentes antropogénicas o naturales	MP2,5, MP10, NO _x , SO ₂ , CO	Deterioro de calidad del aire, deposición de partículas, transporte de metales pesados	Bioacumulación de metales, estrés oxidativo, alteraciones enzimáticas, disminución reproductiva, cambios en abundancia y diversidad
Secundarios	Formados por reacciones químicas en la atmósfera	Ozono troposférico (O ₃), compuestos fotoquímicos	Incremento de capacidad oxidante atmosférica, alteración química del entorno	Interferencia en señales químicas florales, alteración de comportamiento de forrajeo y comunicación planta-polinizador

Descripción: La tabla resume las características generales de los contaminantes primarios y secundarios, destacando sus mecanismos de formación y los principales efectos documentados sobre insectos, con énfasis en procesos fisiológicos y ecológicos.

Nota. Elaboración propia con base en evidencia científica internacional (WHO, 2021; UNEP, 2022; Zvereva & Kozlov, 2010).

1.3 Bioindicadores ambientales

Los bioindicadores ambientales corresponden a organismos o comunidades biológicas cuya presencia, abundancia, condición fisiológica o cambios en su estructura poblacional permiten inferir alteraciones en el ambiente. A diferencia de los métodos exclusivamente fisicoquímicos, los bioindicadores integran efectos acumulativos y reflejan impactos ecológicos reales en el tiempo (Markert, 2003).



La literatura científica ha señalado que los bioindicadores permiten detectar procesos de contaminación crónica que pueden no ser evidentes mediante mediciones puntuales, especialmente en ecosistemas urbanos e industriales (United Nations Environment Programme [UNEP], 2022). En este contexto, su aplicación resulta particularmente relevante para evaluar efectos subletales y bioacumulativos derivados de la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos (Zvereva & Kozlov, 2010).

1.4 Insectos como bioindicadores

Los insectos representan uno de los grupos biológicos más utilizados en estudios de biomonitoreo atmosférico debido a su alta diversidad, sensibilidad ambiental y rápida respuesta a perturbaciones. Su ciclo de vida relativamente corto permite detectar cambios en escalas temporales reducidas, mientras que su amplia distribución facilita comparaciones espaciales.

Las abejas han sido empleadas como biomonitores de metales pesados en ambientes urbanos e industriales, evidenciando acumulación en tejidos y productos derivados (Goretti et al., 2020; Skorbiłowicz et al., 2018). Este enfoque corresponde a bioindicación directa, ya que implica análisis químico de muestras biológicas.

Por otra parte, estudios meta-analíticos han demostrado que la diversidad y abundancia de artrópodos disminuyen en ambientes con alta carga contaminante, evidenciando su utilidad como bioindicadores indirectos (Zvereva & Kozlov, 2010). Asimismo, la exposición a contaminantes puede generar efectos subletales que afectan comportamiento, inmunocompetencia y éxito reproductivo (Thimmegowda et al., 2020).

Sin embargo, el uso de insectos como bioindicadores presenta limitaciones. Factores climáticos, disponibilidad de hábitat y presión antrópica adicional pueden influir en sus poblaciones, dificultando la atribución exclusiva de cambios a contaminación atmosférica. Por ello, su aplicación debe complementarse con mediciones fisicoquímicas y análisis estadísticos robustos.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

En síntesis, la evidencia científica respalda que los insectos constituyen herramientas válidas para integrar efectos fisiológicos y ecológicos derivados de la contaminación atmosférica, aportando una dimensión biológica que amplía la comprensión del impacto ambiental más allá del cumplimiento normativo.



CAPÍTULO 2. INSECTOS BIOINDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

2.1. Fundamento ecológico de los bioindicadores

Los bioindicadores corresponden a organismos o comunidades biológicas cuya presencia, ausencia, abundancia o condición fisiológica permite inferir el estado ambiental de un ecosistema. En el caso de la contaminación atmosférica, los insectos han demostrado ser particularmente útiles debido a su sensibilidad frente a cambios ambientales, su diversidad taxonómica y su rápida respuesta a perturbaciones (Zvereva & Kozlov, 2010).

A diferencia de los métodos instrumentales que cuantifican concentraciones instantáneas de contaminantes, los bioindicadores permiten evaluar efectos acumulativos y subletales derivados de exposiciones prolongadas. Este enfoque resulta relevante en contextos donde la contaminación puede generar impactos crónicos sobre comunidades biológicas sin necesariamente sobrepasar límites normativos en todos los periodos de medición.

Los insectos presentan características que favorecen su utilización en monitoreo ambiental: alta tasa reproductiva, ciclos de vida relativamente cortos, distribución amplia y facilidad de muestreo. Además, muchas especies poseen contacto directo con superficies vegetales y partículas atmosféricas, lo que facilita procesos de bioacumulación de metales pesados y otros contaminantes presentes en el material particulado (Goretti et al., 2020).

2.2. Principales órdenes de insectos utilizados en monitoreo atmosférico

Diversos órdenes de insectos han sido estudiados como bioindicadores de contaminación atmosférica. Entre los más utilizados se encuentran Hymenoptera, Lepidoptera, Coleoptera y Diptera, debido a su relevancia ecológica y sensibilidad diferencial frente a contaminantes.



Hymenoptera (Abejas y avispas)

El orden Hymenoptera, particularmente las abejas, es uno de los grupos más utilizados en bioindicación atmosférica. Las abejas melíferas (*Apis mellifera*) y diversas especies de abejas silvestres poseen características favorables para monitoreo: amplio rango de forrajeo, contacto constante con superficies vegetales y capacidad de acumular metales pesados y contaminantes orgánicos en polen, cera y tejidos corporales.

Goretti et al. (2020) realizaron una revisión sistemática donde concluyen que las abejas pueden acumular metales como plomo, cadmio y zinc, permitiendo evaluar deposición atmosférica en entornos urbanos e industriales. Además, se ha observado que la diversidad de abejas silvestres se reduce en ambientes con mayor presión contaminante, lo cual puede afectar directamente el servicio de polinización (Katumo et al., 2022).

Desde una perspectiva productiva, Leach y Kaplan (2022) demostraron que la contribución de abejas silvestres al rendimiento agrícola puede ser más relevante que el daño ocasionado por ciertas plagas, lo que refuerza su importancia como indicadores funcionales dentro de sistemas agroecosistémicos.

Figura 2-1



Abeja (*Apidae*): Indicadora de metales pesados y plaguicidas.



Lepidoptera (Mariposas y Polillas)

Las mariposas han sido ampliamente utilizadas como bioindicadores debido a su sensibilidad a cambios en calidad del hábitat y disponibilidad de plantas hospederas. La contaminación atmosférica puede afectar tanto la supervivencia larval como la abundancia de adultos, especialmente en zonas urbanas con alta carga de material particulado y ozono troposférico.

Estudios europeos han evidenciado disminución de diversidad de Lepidoptera en proximidad a corredores industriales, asociándose a deposición de contaminantes sobre vegetación (Zvereva & Kozlov, 2010). Su principal ventaja radica en su facilidad de identificación visual y aceptación pública en programas de ciencia ciudadana; sin embargo, presentan mayor variabilidad interanual comparado con otros grupos.

Figura 2-2



Mariposa (Nymphalidae): Sensible a cambios de hábitat y contaminación.

Diptera (Moscas)

Las moscas, especialmente los sírfidos (familia Syrphidae), cumplen funciones relevantes como polinizadores y presentan alta sensibilidad a cambios ambientales. La variación en abundancia y composición específica de comunidades de dípteros ha sido utilizada como



indicador indirecto de perturbación ambiental, incluyendo degradación de hábitat y presión antrópica (McGeoch, 1998; Zvereva & Kozlov, 2010).

Además, algunos estudios han demostrado que la estructura de comunidades de sírfidos responde a gradientes de urbanización y calidad ambiental, lo que refuerza su potencial como grupo indicador en programas de monitoreo biológico (Bates et al., 2011). Su ciclo de vida relativamente corto permite detectar respuestas rápidas frente a cambios en condiciones ambientales.

Figura 2-3



Sírfido (Syrphidae): Polinizador y sensible a la contaminación.

Coleóptera (Escarabajos)

Los escarabajos, particularmente aquellos asociados a suelo y vegetación, pueden reflejar cambios en la composición comunitaria relacionados con la deposición de contaminantes atmosféricos. Diversos estudios han evidenciado que ciertos grupos de coleópteros presentan sensibilidad frente a metales pesados acumulados en suelo y vegetación, así como frente a alteraciones microclimáticas derivadas de procesos de contaminación industrial y urbana (Rainio & Niemelä, 2003; Zvereva & Kozlov, 2010).



Si bien su uso en monitoreo atmosférico es menos frecuente que en estudios de calidad de suelo, los cambios en riqueza, abundancia y estructura trófica de comunidades de escarabajos han sido utilizados como indicadores de perturbación ambiental en gradientes de contaminación (Koivula, 2011). Estos antecedentes sugieren que el orden Coleoptera posee potencial como herramienta complementaria en evaluaciones ecosistémicas integradas.

Figura 2-4



Escarabajo (Carabidae): Bioindicador de acumulación en suelos.

Tabla 2-1

Ventajas y desventajas comparativas por grupo de insecto

Orden	Ejemplo de grupo	Ventajas	Desventajas
Hymenoptera	Abejas (Apidae)	Alta capacidad de bioacumulación; fácil muestreo; relevancia económica	Sensibles a pesticidas; posible variabilidad estacional



Lepidoptera	Mariposas	Sensibles a cambios ambientales; indicadores de diversidad	Requieren identificación taxonómica especializada
Coleoptera	Escarabajos	Reflejan cambios en estructura comunitaria	Menor evidencia específica en contaminación atmosférica
Diptera	Sírfidos	Indicadores de perturbación; rol polinizador	Ciclos cortos pueden generar alta variabilidad temporal

Nota. Los efectos descritos fueron reportados en estudios experimentales y metaanálisis sobre artrópodos expuestos a contaminación atmosférica (Zvereva & Kozlov, 2010; United Nations Environment Programme [UNEP], 2022).

2.3 Metodologías empleadas

Las metodologías se dividen en:

a) Enfoque directo:

Análisis químico de tejidos mediante espectrometría o técnicas de laboratorio para determinar bioacumulación.

b) Enfoque indirecto:

Evaluación de riqueza, abundancia y estructura comunitaria en gradientes de contaminación.

Ambos enfoques han demostrado ser complementarios y permiten integrar información ecológica y toxicológica (Chowdhury et al., 2023).

Tabla 2-2.

Diferencias entre bioindicadores directos e indirectos en insectos

Característica	Bioindicador directo	Bioindicador indirecto
Tipo de análisis	Químico (tejidos)	Ecológico (población/comunidad)



Medición	Concentración interna de contaminantes	Presencia, ausencia o abundancia
Nivel de evidencia	Fisiológico	Ecológico
Ejemplo	Bioacumulación de metales pesados	Disminución de diversidad de polinizadores

Nota. La tabla resume los enfoques metodológicos utilizados en biomonitoreo con insectos (Zvereva & Kozlov, 2010; WHO, 2021).

2.3. Daños provocados por la contaminación atmosférica en insectos

La exposición prolongada a contaminantes atmosféricos generó múltiples efectos adversos en insectos, tanto a nivel fisiológico como poblacional. Se documentaron procesos de estrés oxidativo, alteraciones en desarrollo larval, reducción en fecundidad y cambios en comportamiento alimentario (Zvereva & Kozlov, 2010).

Además, la acumulación de material particulado en superficies vegetales afectó la disponibilidad de recursos alimenticios y redujo la eficiencia de polinización, impactando indirectamente la dinámica ecosistémica (World Health Organization [WHO], 2021).

Tabla 2-3.

Principales efectos de la contaminación atmosférica sobre insectos

Tipo de contaminante	Efecto fisiológico	Impacto ecológico
Metales pesados	Bioacumulación y estrés oxidativo	Reducción poblacional
Material particulado	Alteraciones respiratorias y dérmicas	Disminución de actividad
Gases reactivos (NO ₂ , O ₃)	Daño tisular	Alteración de interacciones tróficas



Nota. Los efectos descritos fueron reportados en estudios experimentales y metaanálisis sobre artrópodos expuestos a contaminación atmosférica (Zvereva & Kozlov, 2010; UNEP, 2022).

2.4. Evidencia empírica del uso de insectos como bioindicadores

La literatura científica reporta múltiples casos de aplicación práctica de insectos en evaluación ambiental. Goretti et al. (2020) realizaron una revisión sistemática donde concluyeron que las abejas son herramientas eficaces para el monitoreo de metales pesados y pesticidas en ambientes urbanos y agrícolas, debido a su radio de forrajeo y facilidad de muestreo.

Zvereva y Kozlov (2010), mediante un metaanálisis de respuestas de artrópodos terrestres a contaminación atmosférica, evidenciaron patrones consistentes de reducción de abundancia y diversidad en ambientes con altas concentraciones de contaminantes industriales.

En el ámbito agrícola, Leach y Kaplan (2022) demostraron que la contribución de abejas silvestres al rendimiento productivo puede superar el impacto negativo de determinadas plagas, lo que refuerza la necesidad de monitorear y proteger comunidades de insectos benéficos frente a presiones ambientales.

Estos antecedentes evidencian que los insectos no sólo permiten detectar contaminación, sino que también actúan como indicadores funcionales del estado de servicios ecosistémicos.



CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA LA INCORPORACIÓN DE INSECTOS COMO BIOINDICADORES EN PROGRAMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

3.1. Fundamentación técnica del monitoreo biológico complementario

La presente propuesta no pretende reemplazar el sistema oficial de monitoreo instrumental administrado por el Ministerio del Medio Ambiente, sino complementarlo mediante la incorporación de indicadores biológicos que permitan evaluar efectos acumulativos de la contaminación atmosférica sobre la biodiversidad funcional.

El monitoreo de la calidad del aire en Chile se basa principalmente en estaciones automáticas que miden concentraciones de contaminantes regulados, como material particulado MP2,5 y MP10, en el marco de las normas primarias de calidad ambiental establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente. Sin embargo, dichos sistemas permiten cuantificar concentraciones atmosféricas, pero no necesariamente reflejan los efectos biológicos acumulativos sobre organismos vivos.

Diversos estudios han demostrado que los artrópodos terrestres presentan respuestas detectables frente a gradientes de contaminación atmosférica, manifestadas en cambios de abundancia, diversidad y bioacumulación de metales pesados (Zvereva & Kozlov, 2010). En este contexto, la incorporación de insectos bioindicadores constituye una herramienta complementaria que permite evaluar impacto ecológico, fortaleciendo la gestión ambiental preventiva.

3.2. Objetivo del programa piloto

Diseñar un protocolo técnico estandarizado para implementar un programa piloto de monitoreo ambiental basado en insectos bioindicadores en zonas urbanas e industriales de la Región del Biobío, integrando variables biológicas y fisicoquímicas.



3.3 Diseño del programa de monitoreo

3.3.1 Selección de áreas de estudio

Se propone un diseño estratificado considerando:

- Zona urbana con alta densidad poblacional
- Zona industrial con emisiones registradas
- Zona periurbana
- Zona rural de referencia (control ecológico)

Los puntos deberán ubicarse, cuando sea posible, próximos a estaciones de monitoreo instrumental para permitir análisis comparativo.

3.3.2 Grupos de insectos seleccionados

Se recomienda priorizar:

- Abejas silvestres (familia Apidae)
- Sírfidos (familia Syrphidae)
- Escarabajos epígeos (familia Carabidae)

La selección se fundamenta en su sensibilidad ambiental, relevancia ecológica y respaldo científico (Zvereva & Kozlov, 2010; Goretti et al., 2020; Rainio & Niemelä, 2003).

3.4. Variables a evaluar

Se propone una selección estratificada de puntos de muestreo:

- Zona urbana con alta densidad poblacional
- Zona industrial
- Zona periurbana de transición
- Zona rural de referencia (control)



Cada sitio deberá georreferenciarse y ubicarse, en la medida de lo posible, cercano a estaciones automáticas existentes para permitir comparación de datos.

3.4.1 Variables biológicas

- Riqueza específica
- Abundancia relativa
- Índice de diversidad de Shannon
- Presencia de anomalías morfológicas
- Concentración de Pb, Cd y Zn en tejido

La medición de metales en tejido permite evaluar exposición crónica acumulativa (Goretti et al., 2020).

3.4.2 Variables ambientales complementarias

- Concentración de MP2,5 y MP10
- Temperatura
- Humedad relativa
- Dirección y velocidad del viento

Estos datos pueden obtenerse de estaciones oficiales o sensores de apoyo.

3.5. Metodología de muestreo

Se propone una frecuencia trimestral durante el primer año para capturar variabilidad estacional.

Técnicas sugeridas:

- Trampas pitfall para Carabidae
- Redes entomológicas para Apidae y Syrphidae
- Trampas cromáticas estandarizadas



- Recolección dirigida en transectos fijos

Las muestras destinadas a análisis químico deberán enviarse a laboratorio acreditado, empleando espectrometría de absorción atómica o ICP-MS.

Los datos obtenidos podrán analizarse mediante índices de diversidad (Shannon), análisis comparativo de abundancia entre sitios y correlación con variables ambientales como concentración de material particulado.

3.6. Estimación de costos del programa piloto

El monitoreo instrumental presenta altos costos de instalación y mantención. De acuerdo con informes técnicos internacionales, una estación automática puede costar entre USD 150.000 y 300.000, con costos operacionales anuales relevantes (Banco Mundial, 2016; Organización Mundial de la Salud, 2021).

Se propone el siguiente presupuesto estimado para un programa piloto en cuatro sitios:

Tabla 3-1

Presupuesto anual estimado para el programa piloto de monitoreo ambiental mediante insectos bioindicadores

Ítem	Costo anual estimado (USD)
Equipamiento de muestreo	5.000
Análisis de metales (laboratorio)	12.000
Profesional especialista (media jornada)	18.000
Logística y transporte	5.000
Total estimado	40.000

Este costo permitiría generar información ecológica complementaria a menor inversión estructural.



3.7 Articulación institucional

La implementación podría desarrollarse mediante cooperación entre:

- Ministerio del Medio Ambiente
- Servicio Agrícola y Ganadero
- Universidades regionales

El SAG mantiene estrictos controles debido a la relevancia del sector agrícola para la economía nacional y la necesidad de proteger biodiversidad y exportaciones.

3.8. Limitaciones y estrategias de mitigación

Limitaciones:

- Variabilidad natural estacional
- Requerimiento de identificación taxonómica experta
- Influencia de factores externos (uso de suelo, pesticidas)

Medidas de mitigación:

- Sitios control
- Diseño estadístico robusto
- Capacitación técnica
- Integración con datos meteorológicos oficiales

3.9. Integración normativa y aplicabilidad institucional

La implementación de un programa de monitoreo basado en insectos bioindicadores debe enmarcarse dentro del sistema normativo ambiental vigente en Chile, particularmente en lo



establecido por la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que define la necesidad de prevenir el deterioro ambiental y proteger la diversidad biológica.

El monitoreo oficial de calidad del aire se encuentra regulado mediante normas primarias de calidad ambiental para material particulado, tales como el Decreto Supremo N°12/2011 que establece la norma para MP2,5 y el Decreto Supremo N°59/1998 para MP10, ambos dictados por el Ministerio del Medio Ambiente. Estas normativas establecen límites máximos permisibles y mecanismos de declaración de zonas saturadas o latentes.

No obstante, dichas normas se centran en concentraciones atmosféricas y no incorporan indicadores biológicos que permitan evaluar efectos ecosistémicos acumulativos. En este contexto, la incorporación de insectos bioindicadores no sustituye el monitoreo instrumental, sino que lo complementa bajo un enfoque de gestión ambiental integrada.

Desde el punto de vista institucional, el programa podría articularse mediante coordinación intersectorial entre:

- Ministerio del Medio Ambiente, como órgano rector en política ambiental.
- Servicio Agrícola y Ganadero, debido a su rol en protección fitosanitaria y biodiversidad asociada a la actividad agrícola.
- Gobiernos regionales y municipalidades, en el marco de planes de descontaminación atmosférica.
- Universidades y centros de investigación con capacidad analítica.

La integración normativa también se alinea con la Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030, la cual establece como objetivo estratégico la conservación y monitoreo de la diversidad biológica frente a presiones antrópicas.

Asimismo, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), administrado por el Servicio de Evaluación Ambiental, podría incorporar el uso de bioindicadores como



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

herramienta complementaria en líneas base y seguimiento ambiental de proyectos sometidos a evaluación, especialmente en sectores industriales o energéticos con potencial emisión de contaminantes atmosféricos.

En términos de aplicabilidad institucional, el protocolo propuesto permitiría:

- Generar información científica que complemente la declaración de zonas saturadas.
- Fortalecer planes de descontaminación con evidencia ecológica.
- Incorporar indicadores biológicos en informes ambientales regionales.
- Apoyar decisiones relacionadas con uso de plaguicidas y conservación de polinizadores.

De esta forma, la propuesta se inserta dentro del marco jurídico vigente, sin requerir modificaciones normativas estructurales, sino más bien mediante la ampliación metodológica de los instrumentos de gestión ya existentes.



CAPITULO 4. DISCUSIÓN

La evidencia científica internacional demuestra que el uso de insectos como bioindicadores ha generado ventajas significativas en la evaluación de impactos ambientales, particularmente en contextos donde el monitoreo instrumental resulta insuficiente para detectar efectos biológicos acumulativos. Estudios de metaanálisis han confirmado que los artrópodos terrestres presentan respuestas consistentes frente a gradientes de contaminación atmosférica, manifestadas en disminución de abundancia, alteraciones en la riqueza específica y acumulación de metales pesados (Zvereva & Kozlov, 2010).

En Europa, las abejas (familia Apidae) han sido utilizadas como bioindicadores de contaminación por metales pesados y compuestos orgánicos persistentes, permitiendo identificar focos de emisión no detectados inicialmente por monitoreo instrumental convencional (Goretti et al., 2020). Del mismo modo, los escarabajos de la familia Carabidae han sido empleados para evaluar perturbación ambiental en zonas industriales y urbanas, evidenciando cambios estructurales en comunidades asociadas a deposición atmosférica (Rainio & Niemelä, 2003). Estos casos muestran como principal ventaja la posibilidad de integrar exposición crónica y efectos ecológicos reales, más allá de la medición puntual de concentraciones atmosféricas.

En el contexto chileno, la incorporación de bioindicadores entomológicos podría resultar especialmente pertinente considerando tres factores estructurales: la alta biodiversidad del país, su carácter de economía agrícola exportadora y la creciente presión sobre ecosistemas urbanos e industriales.

Chile posee un alto nivel de endemismo debido a su aislamiento biogeográfico, lo que implica que alteraciones en comunidades de insectos pueden generar impactos irreversibles en biodiversidad funcional. Paralelamente, el sector silvoagropecuario representa un componente relevante del producto interno bruto nacional y de las exportaciones, lo que refuerza la necesidad de proteger polinizadores y servicios ecosistémicos asociados. Estudios



recientes han demostrado que la diversidad de polinizadores genera beneficios superiores a la reducción de daño por plagas en ciertos cultivos, evidenciando que la pérdida de biodiversidad puede tener impactos económicos directos (Leach & Kaplan, 2022; Katumo et al., 2022).

En este escenario, el uso de insectos bioindicadores permitiría:

- Detectar impactos subletales no visibles en mediciones físico-químicas.
- Evaluar efectos acumulativos en zonas agrícolas próximas a fuentes emisoras.
- Integrar biodiversidad en instrumentos de gestión ambiental.
- Generar líneas base ecológicas regionales.

Desde el punto de vista taxonómico, Chile presenta familias con alto potencial para monitoreo:

- Apidae (abejas nativas como géneros *Centris*, *Xylocopa* y *Colletes*).
- Syrphidae (sífidos presentes en agroecosistemas).
- Carabidae (escarabajos epígeos en zonas forestales y agrícolas).
- Formicidae (hormigas, sensibles a perturbación ambiental).

Estas familias están ampliamente distribuidas en el territorio nacional y cumplen funciones ecológicas clave, lo que las convierte en candidatas idóneas para programas piloto.

No obstante, la implementación de este enfoque presenta limitaciones. Entre ellas destacan la variabilidad estacional natural de poblaciones, la necesidad de identificación taxonómica especializada y la posible interferencia de variables como uso de plaguicidas o cambio de uso de suelo. Estas limitaciones pueden mitigarse mediante diseño experimental estratificado, inclusión de sitios control, capacitación técnica especializada e integración con datos meteorológicos y agrícolas.



En términos de proyección futura, se sugiere que investigaciones posteriores podrían incorporar:

- Análisis genéticos (biomarcadores de estrés).
- Evaluación de contaminantes emergentes.
- Modelos predictivos que integren variables climáticas y biológicas.
- Inclusión de bioindicadores en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental administrado por el Servicio de Evaluación Ambiental.

Asimismo, la articulación con el Ministerio del Medio Ambiente y el Servicio Agrícola y Ganadero permitiría integrar esta herramienta dentro de planes de descontaminación atmosférica y estrategias de conservación de polinizadores.

En síntesis, la incorporación de insectos bioindicadores en Chile no sólo constituye una herramienta científicamente validada, sino que representa una estrategia coherente con la realidad ecológica y económica del país. Su aplicación permitiría avanzar hacia un modelo de gestión ambiental más integral, preventivo y alineado con la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad del sector agrícola nacional.

Conclusión

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la aplicabilidad de los insectos como bioindicadores atmosféricos en el contexto de la gestión ambiental, considerando su relación con la normativa nacional e internacional vigente. A partir del análisis bibliográfico y normativo desarrollado, se logró demostrar que los insectos constituyen herramientas



biológicas sensibles, confiables y técnicamente viables para evaluar el estado de la calidad del aire.

En relación con el primer objetivo específico, se evidenció que diversas especies de insectos, especialmente polinizadores, presentan respuestas fisiológicas, conductuales y poblacionales frente a contaminantes atmosféricos como material particulado y metales pesados. Esta capacidad de bioacumulación y respuesta ecológica permite utilizarlos como indicadores complementarios a los sistemas de monitoreo físico-químico tradicionales, fortaleciendo la evaluación ambiental desde una perspectiva ecosistémica.

Respecto al segundo objetivo, se estableció que, en el marco de la normativa chilena — incluyendo la Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, los Decretos Supremos N° 12/2011 (MP2,5) y N° 59/1998 (MP10), así como el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. N° 40/2012)— no existe una obligación explícita de incorporar bioindicadores entomológicos en los programas oficiales de monitoreo. Sin embargo, el marco legal sí permite su integración como herramientas complementarias dentro de estudios de línea base, seguimiento ambiental y evaluación de impactos, lo que demuestra una oportunidad técnica aún no plenamente desarrollada.

En cuanto al análisis internacional, se identificó coherencia entre la evidencia científica y las directrices de organismos como la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, los cuales promueven enfoques integrales para la evaluación de la calidad del aire y la protección de la biodiversidad. Asimismo, los compromisos derivados de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático refuerzan la necesidad de incorporar indicadores biológicos en escenarios de cambio climático y presión antrópica creciente.

De manera crítica, se concluye que la principal brecha no radica en la falta de evidencia científica, sino en la escasa incorporación normativa y protocolización técnica del uso de insectos bioindicadores dentro de los instrumentos de gestión ambiental en Chile. Esto



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

representa una oportunidad de mejora en términos de innovación, eficiencia y fortalecimiento del enfoque ecosistémico en la toma de decisiones ambientales.

Finalmente, esta investigación aporta una base teórica y normativa que respalda la viabilidad de integrar insectos bioindicadores en programas formales de monitoreo ambiental, contribuyendo al desarrollo de estrategias más sustentables, integrales y alineadas con estándares internacionales. Se recomienda avanzar en futuras investigaciones aplicadas que permitan estandarizar metodologías y validar su implementación dentro del marco regulatorio nacional.



Bibliografía

Aizen, M. A., Smith-Ramírez, C., Morales, C. L., et al. (2018). Coordinated species importation policies are needed to reduce serious pollinator invasions. *Science*, 361(6402), 392–393. <https://doi.org/10.1126/science.aat2350>

Banco Central de Chile. (Última edición disponible). *Cuentas Nacionales de Chile: Producto Interno Bruto por actividad económica*. Santiago, Chile.

Banco Mundial. (2016). *Guidance for ambient air quality monitoring*. Washington DC.

Bates, A. J., Sadler, J. P., & Fairbrass, A. J. (2011). Changing bee and hoverfly pollinator assemblages along an urban–rural gradient. *PLoS ONE*, 6(8), e23459.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2024). *Ley N° 19.300 sobre bases generales del medio ambiente*. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Chowdhury, S., et al. (2023). Insects as bioindicators: A hidden gem for environmental contamination. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1146052. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1146052>

Congreso Nacional de Chile. (1994). *Ley N° 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente*.

Goretti, E., Pallottini, M., Rossi, R., La Porta, G., Gardi, T., Cenci Goga, B., et al. (2020). Honeybees as bioindicators of environmental pollution: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 18683–18700. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08365-5>

Goulson, D. (2010). *Bumblebees: Behaviour, ecology, and conservation*. Oxford University Press.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.



Katumo, D. M., Liang, H., Ochola, A. C., Lv, M., Wang, Q. F., & Yang, C. F. (2022). Pollinator diversity benefits natural and agricultural ecosystems, environmental health, and human welfare. *Plant Diversity*, 44(5), 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.04.001>

Klein, A.-M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., et al. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274(1608), 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Koivula, M. (2011). Useful model organisms, indicators, or both? Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) reflecting environmental conditions. *ZooKeys*, 100, 287–317.

Leach, A., & Kaplan, I. (2022). Prioritizing pollinators over pests: Wild bees are more important than beetle damage for watermelon yield. *Proceedings of the Royal Society B*, 289(1986), 20221305. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1305>

Markert, B. (2003). *Bioindicators & biomonitors: Principles, concepts and applications*. Elsevier.

McFrederick, Q. S., et al. (2008). Air pollution modifies floral scent trails. *Atmospheric Environment*, 42(10), 2336–2348.

McGeoch, M. A. (1998). The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. *Biological Reviews*, 73(2), 181–201.

Migula, P., et al. (2013). Insects as bioindicators of heavy metal pollution. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 973–983.

Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Decreto Supremo N°12 que establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2,5*. Diario Oficial de la República de Chile.

Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017–2030*. Gobierno de Chile.



Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Informe del estado del medio ambiente en Chile*.

Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (1998). *Decreto Supremo N°59 que establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10*. Diario Oficial de la República de Chile.

Organización Mundial de la Salud. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO Press.

Rainio, J., & Niemelä, J. (2003). Ground beetles (Coleoptera: Carabidae) as bioindicators. *Biodiversity and Conservation*, 12, 487–506.

Servicio de Evaluación Ambiental. (2012). *Decreto Supremo N°40/2012 que aprueba el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*. Gobierno de Chile.

Skorbiłowicz, M., et al. (2018). Bees as bioindicators of environmental pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*.

Thimmegowda, G. G., et al. (2020). Sublethal effects of air pollution on pollinators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34), 20653–20661. <https://doi.org/10.1073/pnas.2009074117>

United Nations Environment Programme. (2022). *Air pollution and nature: A global assessment*. UNEP.

United Nations Framework Convention on Climate Change. (1992). *United Nations framework convention on climate change*.

Zvereva, E. L., & Kozlov, M. V. (2010). Responses of terrestrial arthropods to air pollution: A meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2), 297–311. <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0138-0>