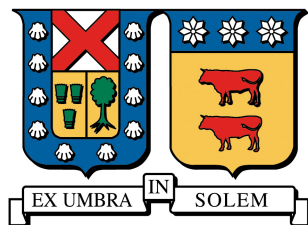


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAÍSO – CHILE



DISEÑO DE HERRAMIENTAS PARA EL
LEVANTAMIENTO DE LÍNEAS BASE DE EMISIONES DE
CO₂ EQUIVALENTE EN DISTINTOS TIPOS DE
COMERCIO ALIMENTARIO

BENJAMÍN ANDRÉS QUIROZ ARANGUIZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL TELEMÁTICO

PROFESOR GUÍA
LUIS ADRIÁN LIZAMA PÉREZ

PROFESOR CORREFERENTE
NICOLÁS SEBASTIÁN GÁLVEZ RAMÍREZ

ENERO 2026



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: Diseño de herramientas para el levantamiento de líneas base de emisiones de CO2 equivalente en distintos tipos de comercio alimentario

Nombre del candidato(a): Benjamín Andrés Quiroz Aranguiz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Telemática

Campus: San Joaquín Departamento: Departamento de Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Adrián Lizama Pérez, 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 (marcar una opción)

☒ 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 (marcar una opción):

☐ 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: 14/01/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-01-26

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.

Agradecimientos

El presente trabajo de memoria representa el cierre de una etapa extensa y exigente a nivel académico, pero también profundamente significativa a nivel personal. En este punto de la vida, me sitúo a una altura de mira completamente diferente a la de hace siete años, cuando entraba por la puerta de la universidad sin objetivos claros, guiado únicamente por la idea de seguir un camino. Hoy comprendo que entrar por esa puerta fue la decisión acertada, ya que aquí encontré pasión, desafíos, amistades y libertad. Este trabajo es el resultado de un recorrido largo, no siempre claro ni continuo, en el que en múltiples ocasiones el final parecía borroso y distante. De esta manera, la memoria refleja no solo parte de los aprendizajes y la forma de pensar adquiridos, sino también la perseverancia necesaria para avanzar y concluir una etapa fundamental de formación.

Agradezco profundamente a mi familia por el apoyo constante e incondicional a lo largo de todo este proceso. En particular, a mis padres y hermanos, por su confianza, comprensión y respaldo permanente. Asimismo, agradezco especialmente a mi tía, quien me brindó la posibilidad de vivir con ella y estar más cerca de la universidad, facilitando de manera significativa mi estadía en la universidad. Mamá, papá y tía, muchas gracias por todo.

De igual manera, agradezco sinceramente a todas las personas que conocí y me acompañaron durante este camino. Hoy, puedo decir que termino esta etapa y que me llevo conmigo una mochila llena de recuerdos y amistades, amistades que resultaron ser mucho más profundas de lo que alguna vez imaginé. Gracias por hacer mas llevadera y significativa esta historia.

Finalmente, reconozco con orgullo el esfuerzo personal invertido en este recorrido. La culminación de esta memoria no solo representa el cumplimiento de un requisito académico, sino también la consolidación de un proceso de crecimiento personal que sienta las bases para una nueva etapa y una nueva historia.

Dedicatoria

*Para mis padres, con mucho cariño.
Hoy me siento presente, emotivo y tranquilo,
Todo esto es por ustedes.*

Resumen

La línea base de emisiones de CO₂ equivalente constituye un insumo fundamental para evaluar el impacto ambiental de los sistemas alimentarios y orientar estrategias de mitigación. Al proporcionar un punto de referencia cuantitativo, permite comparar escenarios “antes y después” de una intervención, facilitando el monitoreo de avances y la identificación de oportunidades de mejora en procesos críticos como el transporte, la refrigeración y la gestión de residuos.

En el marco del proyecto Food Territories San Antonio, una iniciativa colaborativa entre universidades de Chile y el Reino Unido financiada por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID), el cálculo de la línea base de emisiones de CO₂ equivalente se realiza mediante una planilla Excel basada en factores de emisión genéricos y datos ingresados manualmente. Si bien este enfoque resulta funcional en etapas exploratorias, presenta limitaciones relevantes en términos de trazabilidad, reproducibilidad, escalabilidad y capacidad de análisis territorial, lo que restringe su uso para la evaluación sistemática de escenarios y la toma de decisiones informadas. Estas limitaciones reducen el valor metodológico y analítico de la línea base, dificultando la validación de resultados, la comparación consistente entre alternativas y la identificación de dinámicas espaciales propias del sistema alimentario local.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es desarrollar una plataforma web que replique fielmente la lógica de la calculadora Excel de Food Territories y la extienda mediante un enfoque sistemático, reproducible y territorialmente explícito. La plataforma implementa un motor de cálculo reproducible con auditoría completa de insumos y resultados, permite la definición de proyectos y múltiples escenarios de análisis, incorpora la modelación del territorio a partir de capas de Sistemas de Información Geográfica y tipologías de comercio, y asegura la validación y versionado consistente de los parámetros de emisión.

Como resultado, la plataforma habilita un análisis más robusto de la línea base de emisiones, integrando desgloses por categoría y tipología, visualizaciones interactivas y reportes exportables, además de umbrales configurables para apoyar la evaluación de cumplimiento de metas y la interpretación de resultados. Dentro de este desarrollo colaborativo, la presente memoria se centra específicamente en el diseño e implementación del motor de cálculo de emisiones, la arquitectura e implementación del backend y la integración funcional de la interfaz de la plataforma web, constituyendo la principal contribución técnica del autor. En su conjunto, el trabajo aporta una mejora metodológica respecto al uso exclusivo de Excel, al transformar un cálculo exploratorio en un proceso trazable, validable y apto para la simulación y comparación de escenarios a escala territorial.

Abstract

The baseline of CO₂ equivalent emissions constitutes a fundamental input for assessing the environmental impact of food systems and for guiding mitigation strategies. By providing a quantitative reference point, it enables the comparison of “before and after” scenarios following an intervention, facilitating the monitoring of progress and the identification of improvement opportunities in critical processes such as transportation, refrigeration, and waste management.

Within the framework of the Food Territories San Antonio project, a collaborative initiative between universities in Chile and the United Kingdom funded by the Chilean National Agency for Research and Development (ANID), the calculation of the CO₂ equivalent emissions baseline is currently performed using an Excel spreadsheet based on generic emission factors and manually entered data. Although this approach is functional during exploratory stages, it presents significant limitations in terms of traceability, reproducibility, scalability, and territorial analysis capacity, which restrict its use for systematic scenario evaluation and informed decision-making. These limitations reduce the methodological and analytical value of the baseline, hindering result validation, consistent comparison between alternatives, and the identification of spatial dynamics specific to the local food system.

In this context, the objective of this work is to develop a web-based platform that faithfully replicates the logic of the Food Territories Excel calculator and extends it through a systematic, reproducible, and territorially explicit approach. The platform implements a reproducible calculation engine with full auditability of inputs and results, allows the definition of projects and multiple analysis scenarios, incorporates territorial modeling based on Geographic Information System (GIS) layers and commercial typologies, and ensures consistent validation and versioning of emission parameters.

As a result, the platform enables a more robust analysis of the emissions baseline by integrating category- and typology-based breakdowns, interactive visualizations, and exportable reports, as well as configurable thresholds to support compliance assessment and result interpretation. Within this collaborative development, the present thesis focuses specifically on the design and implementation of the emissions calculation engine, the architecture and implementation of the backend, and the functional integration of the web platform interface, constituting the author’s main technical contribution. Overall, this work provides a methodological improvement over the exclusive use of Excel by transforming an exploratory calculation into a traceable, verifiable process suitable for territorial-scale scenario simulation and comparison.

Glosario

A continuación se presentan definiciones breves de los principales términos técnicos utilizados en este documento. Su propósito es facilitar la lectura a personas no especializadas en Sistemas de Información Geográfica, desarrollo de software o análisis ambiental.

SIG (Sistema de Información Geográfica): Conjunto de herramientas y métodos

que permiten capturar, almacenar, analizar y visualizar datos georreferenciados asociados a ubicaciones en el territorio.

GIS (Geographic Information System): Término equivalente a SIG, utilizado comúnmente en literatura técnica en inglés.

CO₂e (Dióxido de carbono equivalente): Unidad que expresa el impacto de distintos gases de efecto invernadero en una medida común basada en su potencial de calentamiento global.

Factor de emisión: Coeficiente que relaciona una actividad (por ejemplo, consumo eléctrico o transporte) con la cantidad de emisiones generadas.

LCA (Life Cycle Assessment): Metodología de Análisis de Ciclo de Vida que evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas de un producto o proceso.

Capa geoespacial: Archivo que contiene información vectorial con representación geográfica (puntos, líneas o polígonos), utilizado para análisis territoriales.

Proyección cartográfica (CRS): Sistema de referencia que define cómo se representan las coordenadas de la superficie terrestre en un plano bidimensional.

PostGIS: Extensión espacial del sistema gestor de bases de datos PostgreSQL, que permite realizar consultas y análisis geográficos de alta complejidad.

GeoJSON / Shapefile / GeoPackage: Formatos estándar para almacenar y transferir información geoespacial.

Mapa de calor (Heatmap): Visualización que representa valores de intensidad mediante colores continuos para identificar zonas de mayor concentración.

API REST: Estilo de arquitectura para exponer servicios web mediante operaciones estándar (GET, POST, PUT, DELETE), facilitando la comunicación entre frontend y backend.

Backend: Conjunto de servicios que ejecutan la lógica del sistema, procesan datos, realizan cálculos y administran la base de datos.

Frontend: Interfaz visual que permite la interacción directa con el usuario y consume servicios expuestos desde el backend.

Docker: Plataforma que permite empaquetar aplicaciones y sus dependencias en contenedores portables, garantizando entornos reproducibles.

Contenerización: Proceso mediante el cual un sistema se empaqueta en contenedores para facilitar su despliegue y replicación.

JWT (JSON Web Token): Mecanismo utilizado para autenticar usuarios mediante un token seguro que viaja entre cliente y servidor.

Trazabilidad: Capacidad de reconstruir las condiciones exactas bajo las cuales se ejecutó un cálculo, incluyendo capas utilizadas, parámetros, fechas y resultados.

Threshold (Umbral): Valor límite predefinido que se utiliza para evaluar si una variable, proceso o condición alcanza, supera o se mantiene dentro de un rango determinado, permitiendo identificar estados críticos o tomar decisiones basadas en criterios cuantitativos.

WeightedLocation: Estructura utilizada por Google Maps para representar puntos ponderados en mapas de calor.

Directions API / Servicio de rutas: Herramienta que permite calcular rutas de transporte considerando la red vial real.

Despliegue (*Deployment*): Proceso mediante el cual una aplicación se instala y ejecuta en un entorno operativo, ya sea en local o en la nube.

Dashboard: Vista interactiva que presenta información resumida mediante gráficos, tablas e indicadores visuales.

Alembic: Herramienta para gestionar migraciones de base de datos en entornos SQLAlchemy, permitiendo versionar cambios en el esquema y mantener consistencia entre entornos de desarrollo y producción.

ORM (Object-Relational Mapping): Técnica que permite mapear clases y objetos de un lenguaje de programación a tablas y registros de una base de datos relacional, facilitando la interacción sin escribir consultas SQL manuales.

UUID (Universally Unique Identifier): Identificador único estandarizado utilizado ampliamente para entidades en sistemas distribuidos. En este proyecto se emplea para identificar usuarios, proyectos, escenarios y capas de manera inequívoca.

Índice general

Resumen	4
Índice de figuras	10
Índice de tablas	11
1. Introducción	1
1.1. Problema resolver	2
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos	3
1.3. Acercamiento a la solución	4
1.4. Estructura de la memoria	5
2. Formalización del Problema	7
2.1. Estado del Arte y de la Técnica	7
2.2. Marco teórico	9
2.2.1. Emisiones de CO ₂ e, factores y unidades	9
2.2.2. Cálculo por categorías y nociones LCA	10
2.2.3. Fundamentos SIG (capas, proyecciones, PostGIS)	11
2.2.4. Trazabilidad y reproducibilidad en sistemas de cálculo ambiental	11
3. Contexto y diseño de la Solución	13
3.1. Requisitos del Sistema	13
3.1.1. Requisitos Funcionales	14
3.1.2. Requisitos No Funcionales	15
3.1.3. Supuestos operativos del sistema	16
3.2. Metodología y Arquitectura del Sistema	16

3.2.1. Alcance del sistema	16
3.2.2. Arquitectura de alto nivel	17
3.2.3. Modo de operación del sistema	18
3.2.4. Componentes del sistema	18
3.2.5. Motor de cálculo y equivalencia con Excel	20
3.2.6. Seguridad y autenticación	21
3.2.7. Stack Tecnológico	21
3.2.8. Lógica geoespacial avanzada: mapas de calor, rutas y análisis territorial	22
3.2.9. Responsabilidad del autor en la implementación del sistema	24
4. Implementación y Resultados del Sistema	25
4.1. Flujo e Interfaces Usuarías	25
4.1.1. Vista de Inicio de Sesión	26
4.1.2. Vista de Crear Sesión	27
4.1.3. Vista de Proyectos	28
4.1.4. Vista de Crear Proyecto	29
4.1.5. Vista inicial de proyecto	30
4.1.6. Vista inicial de escenario	31
4.1.7. Modal de Selección de Parámetros de Cálculo	32
4.1.8. Interfaz de Carga y Selección de Capas	33
4.1.9. Vista Previa Al Cálculo	34
4.1.10. Visualización y Exportación de Resultados	35
4.2. Resultados del Sistema	36
4.2.1. Validación técnica: equivalencia con la calculadora Excel	36
4.2.2. Análisis comparativo: valor agregado respecto a la planilla Excel	37
4.2.3. Caso de uso: evaluación de emisiones para un proyecto comercial en Tejas Verdes	40
5. Conclusiones	48
5.1. Conclusión	48
5.2. Discusión y Trabajo Futuro	50
5.2.1. Discusión	50
5.2.2. Trabajo Futuro	52

Índice de figuras

3.1. Diagrama de contexto del sistema.	17
3.2. Diagrama de arquitectura de la aplicación.	17
4.1. Vista de inicio de sesión del sistema	26
4.2. Vista de crear sesión	27
4.3. Vista de proyectos guardados asociados al usuario	28
4.4. Vista de Crear Proyecto	29
4.5. Vista inicial de proyecto	30
4.6. Vista inicial de escenario	31
4.7. Modal de selección de parámetros por tipo de establecimiento	32
4.8. Interfaz de selección y visualización de capas geoespaciales	33
4.9. Vista Previa Al Cálculo	34
4.10. Resultados de cálculo mostrados en mapa y tabla con opción de exportación	35
4.11. Resultados agregados por tipología en la planilla Excel original.	38
4.12. Resultados agregados por categoría en la planilla Excel original.	38
4.13. Resumen general de emisiones generado por la plataforma web.	38
4.14. Desglose de emisiones por categoría y tipología en la plataforma web.	39
4.15. Desglose de emisiones por categoría y tipología en la plataforma web.	39
4.16. Vista territorial del escenario en Tejas Verdes.	41
4.17. Resumen general del cálculo de emisiones para el escenario evaluado.	42
4.18. Distribución de emisiones por categoría y tipología.	43
4.19. Estado del umbral definido para el escenario.	45
4.20. Sugerencias automáticas de optimización para reducir emisiones.	45
4.21. Reporte PDF generado para el escenario evaluado.	46

Índice de tablas

4.1. Validación Excel vs Plataforma — Totales por tipología.	36
4.2. Ejemplo de desglose por categoría — Fixture “Supermercado”.	37

Capítulo 1

Introducción

La estimación de emisiones de CO₂ equivalente asociadas a los sistemas alimentarios urbanos constituye un componente fundamental para comprender su impacto ambiental y orientar estrategias de mitigación. Contar con una referencia cuantitativa confiable permite evaluar la magnitud de las emisiones generadas por distintas actividades, visualizar su distribución territorial y analizar cómo estas varían bajo diferentes condiciones o intervenciones.

En el caso de la ciudad de San Antonio, en el marco del proyecto Food Territories, el cálculo de esta línea base ha sido desarrollado tradicionalmente mediante una planilla Excel que integra factores de emisión genéricos junto con datos suministrados manualmente. Aunque esta herramienta ha permitido avanzar en etapas exploratorias del proyecto, presenta limitaciones inherentes a su estructura: dificultades para mantener trazabilidad, escasa reproducibilidad entre versiones, dependencia del ingreso manual de datos y una baja capacidad para incorporar información georreferenciada o representar particularidades territoriales.

Estas restricciones afectan directamente la calidad del análisis, ya que reducen la capacidad de identificar patrones espaciales, realizar comparaciones sistemáticas entre escenarios y capturar dinámicas logísticas propias del sistema alimentario local. En consecuencia, el problema central que aborda este trabajo es la ausencia de una metodología automatizada, reproducible y territorialmente explícita que permita estimar la línea base de emisiones de CO₂ equivalente de forma consistente y validable, superando las limitaciones inherentes al uso exclusivo de planillas Excel.

Con este propósito, el presente trabajo plantea el desarrollo de una herramienta digital basada

en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que reemplace el enfoque manual actual por un sistema reproducible, parametrizable y orientado a la toma de decisiones. La plataforma integra información territorial, parámetros de emisión específicos y un motor de cálculo verificable, con el fin de mejorar la estimación de emisiones y habilitar el análisis de distintos escenarios a escala urbana.

En este contexto, las principales contribuciones de esta memoria son: (i) la formalización y validación de la lógica de cálculo de emisiones originalmente implementada en una planilla Excel, mediante un motor reproducible y verificable; (ii) la incorporación de la dimensión territorial al cálculo de la línea base, a través del uso de capas SIG y tipologías de comercio; (iii) la habilitación de un enfoque sistemático de simulación de escenarios, con parámetros versionados y trazables; y (iv) la implementación de estas capacidades en una plataforma web funcional, orientada al análisis y comunicación de resultados para la toma de decisiones a escala urbana.

Cabe señalar que, si bien el sistema desarrollado forma parte de un trabajo multidisciplinario realizado por un equipo de tres integrantes, esta memoria se enfoca en los componentes técnicos directamente abordados por el autor, particularmente el desarrollo del backend, el motor de cálculo reproducible y la implementación de la interfaz gráfica de la aplicación web, manteniendo una coordinación permanente con el resto del equipo en las decisiones de diseño, integración y brindando constante apoyo para los problemas que se presentaron durante todo el proceso.

1.1. Problema resolver

El proyecto Food Territories San Antonio carece actualmente de una metodología precisa, automatizada y territorializada para calcular la línea base de emisiones de CO_2 equivalente asociadas al ciclo de vida de los alimentos comercializados en la ciudad. Este cálculo se realiza mediante herramientas manuales en una planilla Excel, basada en factores de emisión genéricos y valores estáticos, sin integración de datos georreferenciados ni adaptación a las particularidades del sistema alimentario local.

Este enfoque presenta diversas limitaciones técnicas, metodológicas y operativas:

- **Escasa Trazabilidad:** dificultad para identificar con claridad el origen y el uso de los datos a lo largo del proceso de cálculo.
- **Baja reproducibilidad:** cada actualización requiere intervención manual y reestructuración de fórmulas, lo que incrementa el riesgo de errores y dificulta la comparación consistente entre escenarios.
- **Capacidad analítica limitada:** el modelo actual no permite realizar simulaciones sistemáticas,

evaluar estrategias de mitigación ni analizar resultados diferenciados según zonas o tipos de comercio.

Frente a estas deficiencias, se identifica como problema principal la ausencia de una metodología de cálculo geoespacial, automatizada y reproducible que permita construir una línea base de emisiones de CO_2 equivalente más confiable, contextualizada y adaptativa. Superar esta limitación resulta clave para evaluar el impacto ambiental real del sistema alimentario urbano y habilitar procesos de análisis y toma de decisiones con un fundamento técnico sólido.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Mejorar la metodología utilizada para obtener la línea base de emisiones de CO_2 equivalente en los distintos tipos de comercios alimentarios del proyecto Food Territories San Antonio, mediante el desarrollo de un motor de cálculo común basado en Sistemas de Información Geográfica que facilite la visualización, la comparación de escenarios y la toma de decisiones. El cumplimiento de este objetivo general se evalúa de manera transversal a lo largo de las Secciones 9, 11, 12 y 13 del informe.

1.2.2. Objetivos Específicos

- OE1. Diagnosticar la herramienta actual y definir requisitos técnicos mínimos:** Caracterizar la herramienta existente utilizada en Food Territories San Antonio, identificando sus supuestos, parámetros y limitaciones mediante entrevistas al equipo y análisis documental. A partir de ello, establecer el conjunto mínimo de datos espaciales y alfanuméricos requeridos para una estimación precisa y territorializada de la línea base de emisiones de CO_2 equivalente (Este objetivo se desarrolla principalmente en las Secciones 8 y 9, donde se presentan los requisitos del sistema y su traducción en decisiones metodológicas y arquitectónicas).
- OE2. Diseñar una metodología GIS-LCA reproducible, trazable y validable:** Desarrollar una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y análisis de ciclo de vida (LCA), integrando capas georreferenciadas, factores de emisión específicos y reglas de agregación. Esta metodología debe ser reproducible, trazable y validable frente al modelo actual en Excel, mediante diagramas de proceso, criterios de validación y documentación estandarizada de insumos y resultados (Este objetivo se aborda en las Secciones 7 y 9, donde se define el marco GIS-LCA).

adoptado y se describe su implementación metodológica, así como en la Sección 11.1 mediante la validación frente a la herramienta Excel).

- OE3. **Incrementar la trazabilidad de los resultados obtenidos:** Diseñar e implementar mecanismos que aseguren la trazabilidad completa de los resultados generados por el sistema, desde la carga de datos hasta la obtención de salidas finales. Esto incluye el registro automático de tipologías, parámetros de cálculo asociados, configuraciones del usuario y, en caso de existir, resultados intermedios, permitiendo reconstruir cada ejecución del modelo (Este objetivo se desarrolla en las Secciones 8, 9 y 11, mediante el diseño de mecanismos de persistencia, versionado de parámetros y auditoría de ejecuciones del motor de cálculo).
- OE4. **Validar y comparar el sistema frente a la metodología actual:** Validar el sistema completo mediante un caso piloto en el territorio de San Antonio, cuantificando mejoras en tiempo de procesamiento, calidad de visualización y precisión de resultados. Incluir pruebas de usabilidad con usuarios finales y comparación directa con la planilla Excel utilizada actualmente (Este objetivo se aborda en la Sección 11, donde se valida el sistema frente a la metodología Excel mediante equivalencia numérica y un caso piloto. La comparación explícita entre escenarios se identifica como una línea de trabajo futuro).
- OE5. **Generar visualizaciones que faciliten el análisis:** Diseñar e implementar herramientas de visualización que representen de forma clara y comprensible los resultados obtenidos. Estas visualizaciones deben permitir identificar concentraciones de emisiones y diferentes métricas asociadas mediante mapas temáticos, gráficos y tablas. Asimismo, incorporar opciones de exportación que favorezcan el análisis técnico y la comunicación efectiva de los resultados con actores externos no especializados (Este objetivo se desarrolla en las Secciones 10 y 11, mediante la generación de visualizaciones, dashboards y reportes exportables, quedando la integración completa de resultados geoespaciales como extensión futura).

1.3. Acercamiento a la solución

Para abordar las limitaciones identificadas, el presente proyecto propone el desarrollo de una herramienta digital basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), orientada a modelar de forma automatizada y territorialmente explícita la línea base de emisiones de CO_2 equivalente asociadas a la cadena de distribución alimentaria urbana. Este enfoque busca reemplazar el esquema manual existente por una metodología reproducible, parametrizable y verificable.

La solución se sustenta en la integración de datos espaciales reales como tipologías de comercio,

condiciones logísticas, rutas de transporte y localización de puntos críticos, junto con factores de emisión específicos y un motor de cálculo estructurado. Esta combinación permite estimar con mayor precisión las emisiones generadas en ciertas etapas del ciclo de vida de los alimentos, incluyendo transporte, almacenamiento y gestión de residuos, incorporando explícitamente la dimensión territorial del sistema.

Desde el punto de vista metodológico, la herramienta se implementa sobre una arquitectura de software modular que integra un motor de cálculo reproducible, una base de datos estructurada y componentes SIG para el manejo de información georreferenciada. Esta arquitectura permite definir proyectos y escenarios independientes, versionar parámetros de entrada y asegurar la trazabilidad completa de los resultados obtenidos.

Adicionalmente, se desarrolla una interfaz web accesible y parametrizable, orientada a facilitar el uso del sistema por parte de investigadores, estudiantes y actores del sistema alimentario local. Esta capa de interacción permite ejecutar escenarios, visualizar resultados y exportar información de manera consistente, fortaleciendo la toma de decisiones informada basada en evidencia territorial.

Finalmente, la metodología propuesta se concibe como replicable y adaptable a otros contextos urbanos, permitiendo su aplicación futura en distintos territorios y contribuyendo al desarrollo de herramientas estandarizadas para el análisis ambiental de sistemas alimentarios urbanos.

1.4. Estructura de la memoria

La presente memoria se organiza en seis capítulos, los cuales abordan de manera progresiva el contexto, la formulación del problema, el desarrollo de la solución propuesta y la evaluación de los resultados obtenidos.

El Capítulo 1 introduce el contexto general en el que se enmarca el proyecto Food Territories San Antonio, describiendo la problemática asociada a los sistemas alimentarios territoriales, la motivación del trabajo y los objetivos que orientan el desarrollo de esta memoria.

El Capítulo 2 corresponde a la formalización del problema, donde se presenta el estado del arte y de la técnica, junto con el marco teórico que sustenta la estimación territorial de emisiones de CO₂ equivalente. En este capítulo se revisan los principales enfoques metodológicos relacionados con el Análisis de Ciclo de Vida, los factores de emisión y el uso de Sistemas de Información Geográfica, estableciendo el marco conceptual del trabajo.

El Capítulo 3 aborda el contexto, diseño e implementación de la solución propuesta. En él se describen los requisitos del sistema, la metodología adoptada, la arquitectura de la plataforma, el motor de cálculo de emisiones y las principales decisiones técnicas que permiten asegurar trazabilidad, reproducibilidad y equivalencia con la herramienta original en Excel.

El Capítulo 4 presenta la implementación y los resultados del sistema desarrollado. Se incluyen la descripción del flujo de uso de la plataforma, la validación técnica mediante equivalencia numérica con la planilla Excel, y la aplicación del sistema a un caso de uso representativo en el territorio de San Antonio, destacando el valor agregado de la herramienta para el análisis y la toma de decisiones.

Finalmente, el Capítulo 5 expone las conclusiones generales del trabajo, identificando los principales aportes de la memoria, las limitaciones actuales del sistema y las líneas de trabajo futuro que permitirían fortalecer y extender la solución desarrollada.

Capítulo 2

Formalización del Problema

En el siguiente capítulo se establece el marco formal del problema abordado en esta memoria. Se presenta el estado del arte y de la técnica, contextualizando el trabajo respecto de herramientas y enfoques existentes para la estimación de emisiones en sistemas alimentarios. Asimismo, se introduce el marco teórico que integra conceptos de Análisis de Ciclo de Vida y Sistemas de Información Geográfica, estableciendo las bases conceptuales necesarias para el desarrollo de la metodología y la plataforma implementada.

2.1. Estado del Arte y de la Técnica

El cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en sistemas alimentarios ha sido abordado tradicionalmente mediante herramientas basadas en hojas de cálculo, tales como *Cool Farm Tool* [1] y *GHG Protocol Excel* [2]. Estas herramientas estructuran el cálculo a partir de factores de emisión promedio y supuestos simplificados sobre consumos y distancias, lo que facilita su uso en etapas exploratorias y por usuarios no especializados. Sin embargo, desde una perspectiva metodológica presentan limitaciones relevantes:

1. baja adaptabilidad a contextos territoriales específicos, especialmente en sistemas urbanos heterogéneos;
2. escasa integración de información geoespacial, lo que impide representar explícitamente la distribución espacial de actividades, flujos logísticos y fuentes de emisión.

Desde el enfoque del Análisis de Ciclo de Vida (LCA), organismos internacionales han establecido

marcos metodológicos estandarizados para la cuantificación de impactos ambientales. Las normas ISO 14040 y ISO 14044 definen los principios, alcance y requisitos para estudios LCA, enfatizando la necesidad de consistencia metodológica, trazabilidad y transparencia en los inventarios [3], [4]. De forma complementaria, las guías del IPCC proporcionan factores de emisión y metodologías de referencia ampliamente utilizadas para inventarios de GEI a nivel nacional y sectorial [5], [6]. No obstante, estos marcos normativos no especifican mecanismos operativos para integrar explícitamente la dimensión territorial ni para implementar flujos de cálculo automatizados orientados a la simulación de escenarios locales.

En el ámbito académico, diversos trabajos han destacado la importancia de incorporar variables territoriales y socioeconómicas en la estimación de emisiones asociadas a sistemas alimentarios y de residuos. En el contexto chileno, Valenzuela-Levi et al. muestran cómo la localización de infraestructuras y la concentración del mercado en la valorización de residuos inciden directamente en las emisiones del transporte y tratamiento [7]. De manera similar, Muñoz-Soto et al. evidencian que eventos disruptivos, como la pandemia por COVID-19, modifican sustancialmente los patrones de generación de residuos, reforzando la necesidad de modelos dinámicos y actualizables [8]. Araya-Córdova et al. proponen enfoques de asignación eficiente de recursos municipales considerando desigualdades socioeconómicas, lo que subraya la relevancia de integrar información territorial y social en modelos ambientales [9].

Desde una perspectiva técnica, la literatura identifica avances relevantes en la integración entre Sistemas de Información Geográfica y Análisis de Ciclo de Vida (GIS-LCA). Este enfoque permite construir inventarios ambientalmente explícitos en el espacio, incorporando redes viales reales, localización de actividades y patrones territoriales de consumo. Diversos autores destacan que la integración GIS-LCA mejora significativamente la representación de flujos logísticos y la precisión espacial de los resultados ambientales [10], [11]. Herramientas como *QNEAT3* y motores de enrutamiento como *OSRM* o *pgRouting* han sido utilizadas para estimar distancias optimizadas sobre redes reales, superando los supuestos lineales de los modelos tradicionales [12], [13].

Paralelamente, se han desarrollado plataformas y librerías orientadas a la automatización y reproducibilidad de cálculos LCA, como *Brightway2* y *openLCA*, que permiten estructurar inventarios, versionar datos y ejecutar cálculos de forma programática [14], [15]. Estos enfoques facilitan la transparencia y reproducibilidad de los resultados, pero suelen requerir conocimientos técnicos avanzados y no siempre se integran en herramientas accesibles para actores territoriales o municipales.

A pesar de estos avances, persiste la ausencia de una metodología operativa que combine de manera integrada:

1. datos espaciales de alta resolución,

2. factores de emisión adaptables al contexto local,
3. automatización reproducible con trazabilidad completa,
4. y una interfaz accesible para usuarios no especializados.

Este vacío metodológico es el que aborda el presente proyecto, mediante el desarrollo de una herramienta automatizada basada en SIG que integra un motor de cálculo reproducible, gestión de proyectos y escenarios, y persistencia estructurada de parámetros y resultados. La propuesta permite estimar de forma precisa la línea base de emisiones de CO₂ equivalente en comercios alimentarios urbanos, con aplicación inicial en la ciudad de San Antonio, Chile.

2.2. Marco teórico

El desarrollo de una herramienta orientada a la estimación territorial de emisiones de CO₂ equivalente que cumpla con los objetivos definidos en la sección 6, requiere un marco conceptual que integre fundamentos del cálculo ambiental con principios de análisis espacial. En particular, este trabajo se apoya en nociones aplicadas del Análisis de Ciclo de Vida (LCA), el uso de factores de emisión estandarizados y la incorporación explícita de información georreferenciada mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). El presente marco teórico introduce los conceptos esenciales que sustentan la metodología implementada, delimitando además su alcance y supuestos.

2.2.1. Emisiones de CO₂e, factores y unidades

El dióxido de carbono equivalente (CO₂e) es una unidad estandarizada utilizada para expresar el impacto climático de distintos Gases de Efecto Invernadero (GEI) en una magnitud comparable. Cada gas posee un *Potencial de Calentamiento Global* (GWP), que permite convertir sus emisiones a una referencia común basada en el efecto relativo respecto al CO₂.

En aplicaciones urbanas y de sistemas alimentarios, las emisiones se estiman generalmente mediante la relación:

$$E = A \times F,$$

donde A representa la *actividad* asociada al proceso (por ejemplo, consumo energético, volumen de agua, masa transportada o distancia recorrida) y F corresponde al *factor de emisión* específico. Estos

factores se expresan en unidades como $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$, $\text{kg CO}_2\text{e/t}\cdot\text{km}$ o $\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$, dependiendo del tipo de actividad modelada.

El uso de factores de emisión adecuados y coherentes es fundamental para garantizar la comparabilidad de resultados. Asimismo, la consistencia en las unidades y la correcta conversión de magnitudes permiten integrar emisiones provenientes de distintas tipologías comerciales y categorías de actividad. Este enfoque es consistente con las metodologías empleadas en inventarios de gases de efecto invernadero, donde las emisiones se calculan como el producto entre una magnitud de actividad y un factor representativo [5], [6]. En este contexto, la trazabilidad de los factores utilizados y su correcta documentación resultan críticas para asegurar reproducibilidad y transparencia.

2.2.2. Cálculo por categorías y nociones LCA

El cálculo por categorías se inspira en la lógica del *Life Cycle Assessment* (LCA), una metodología ampliamente utilizada para cuantificar impactos ambientales considerando distintas etapas de un producto o sistema. Un LCA normativo completo, según las normas ISO 14040 y 14044, abarca desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, incluyendo múltiples categorías de impacto y procedimientos de evaluación detallados.

En el contexto de sistemas alimentarios urbanos, y particularmente para fines de planificación territorial y análisis exploratorio, resulta habitual adoptar un enfoque LCA aplicado y acotado. En este trabajo, el alcance del análisis se limita a aquellas etapas con mayor incidencia directa en las emisiones operacionales de los comercios, tales como:

- consumo eléctrico y térmico,
- refrigeración y climatización,
- transporte de abastecimiento y retiro de residuos,
- uso de agua y saneamiento,
- gestión de residuos sólidos.

La herramienta desarrollada estructura el cálculo en once categorías de emisión coherentes con la metodología del proyecto Food Territories. Esta organización permite descomponer el total de emisiones en aportes por proceso, facilitando la interpretación de resultados, la comparación entre tipologías comerciales y la evaluación de distintos escenarios.

Es importante destacar que el sistema no implementa un LCA normativo completo ni considera impactos indirectos aguas arriba (por ejemplo, producción de insumos) o aguas abajo (uso final del

consumidor). Sin embargo, la separación explícita de categorías, la definición clara de supuestos y la trazabilidad de parámetros se alinean con principios fundamentales del enfoque LCA, particularmente en términos de transparencia, coherencia interna y reproducibilidad [3], [4]. Esta aproximación permite utilizar los resultados como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones y a la identificación de focos de mitigación a escala urbana.

2.2.3. Fundamentos SIG (capas, proyecciones, PostGIS)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar datos ambientales y de actividad con su localización espacial, habilitando análisis territoriales que no pueden abordarse mediante herramientas puramente tabulares. En un entorno SIG, la información se organiza en capas geoespaciales compuestas por entidades vectoriales (puntos, líneas o polígonos) con atributos asociados.

Un elemento crítico en el análisis espacial es el *Sistema de Referencia de Coordenadas* (CRS), que define cómo se proyecta la superficie terrestre sobre un plano. La coexistencia de capas con diferentes CRS puede generar errores métricos y desplazamientos espaciales, por lo que la validación y homogeneización de proyecciones constituye un paso esencial en cualquier metodología geoespacial.

En este proyecto se utiliza PostgreSQL con la extensión PostGIS como motor geoespacial. PostGIS incorpora tipos de datos geométricos, índices espaciales y un conjunto amplio de funciones para realizar operaciones como cálculos de distancia, intersecciones, buffers y consultas espaciales eficientes. Estas capacidades permiten modelar territorialmente la línea base de emisiones, integrar redes viales y establecimientos, y generar visualizaciones temáticas como mapas de calor. Los fundamentos conceptuales y técnicos del análisis SIG empleados se alinean con la literatura clásica en sistemas de información geográfica [16], [17].

2.2.4. Trazabilidad y reproducibilidad en sistemas de cálculo ambiental

En herramientas orientadas a la estimación de emisiones, la trazabilidad constituye un requisito central para garantizar confianza, validación y auditoría de resultados. Un sistema reproducible debe permitir:

- versionar parámetros y factores de emisión,
- registrar cada ejecución del cálculo,
- conservar las capas geoespaciales utilizadas,
- almacenar metadatos relevantes (fecha, usuario, versión del sistema),

- reconstruir resultados pasados de forma independiente al estado actual del sistema.

Estos principios forman parte de las buenas prácticas en modelación ambiental computacional y resultan esenciales para la comparación de escenarios, la evaluación de políticas y la validación metodológica. El sistema desarrollado en este trabajo incorpora estos criterios mediante el control de versiones de parámetros, persistencia estructurada de resultados y mecanismos de auditoría completa de insumos y salidas, reforzando así la robustez metodológica de la estimación de emisiones.

Capítulo 3

Contexto y diseño de la Solución

El presente capítulo describe de manera integrada el contexto y diseño técnico de la solución desarrollada en esta memoria, mostrando cómo los conceptos del marco teórico y la formalización del problema se traducen en una plataforma operativa para la estimación, análisis y comparación de emisiones de CO₂ equivalente a escala territorial. En primer lugar, se definen los requisitos del sistema que delimitan su alcance, funcionalidades y supuestos de operación, asegurando equivalencia metodológica con la herramienta original en Excel, así como trazabilidad y reproducibilidad de los cálculos. Posteriormente, se presenta la metodología adoptada y la arquitectura del sistema, detallando sus componentes, flujos de información y decisiones de diseño, con especial énfasis en el motor de cálculo y la integración de capacidades geoespaciales que permiten materializar los objetivos planteados.

3.1. Requisitos del Sistema

Los conceptos presentados en el marco teórico se traducen operativamente en los requisitos del sistema que se detallan a continuación. La presente sección establece los requisitos que guiaron el diseño y la implementación del sistema, distinguiendo entre requisitos funcionales y no funcionales. La definición de estos requisitos se realizó priorizando la equivalencia metodológica con la planilla Excel original, la trazabilidad de los cálculos, la capacidad de análisis territorial y la reproducibilidad de resultados. En este sentido, los requisitos no solo responden a consideraciones técnicas, sino también a supuestos operativos asociados al uso del sistema como herramienta de apoyo a la toma de decisiones y a la evaluación comparativa de escenarios.

3.1.1. Requisitos Funcionales

Los requisitos funcionales se consideran prioritarios en la medida en que permiten replicar y extender el flujo de cálculo actualmente implementado en Excel. En particular, la capacidad de ingresar datos georreferenciados, parametrizar escenarios, generar una línea base territorial y exportar resultados trazables resulta esencial para superar las limitaciones de un enfoque manual y habilitar análisis sistemáticos y comparables.

RF1. Entrada de datos. El sistema debe permitir la carga de capas georreferenciadas mediante arrastre o carga directa de archivos. Se debe validar el formato, el sistema de referencia espacial (CRS) y la estructura de atributos antes de permitir su uso en los cálculos.

RF2. Parámetros configurables. El usuario debe poder acceder a una vista o diálogo denominado *Modificar Parámetros*, a través del cual pueda ajustar valores de transporte, refrigeración, residuos y mezcla energética para cada una de las cinco tipologías comerciales. Los cambios deben aplicarse inmediatamente dentro de la sesión activa.

RF3. Generación de línea base de CO_2 . El sistema debe generar una capa que represente la línea base de emisiones de CO_2 equivalente, integrando:

- la localización de comercios,
- la red vial, y
- los factores de emisión correspondientes a cada actividad.

El cálculo debe considerar las emisiones provenientes del transporte, la refrigeración y la generación de residuos.

RF4. Visualización y análisis de resultados. El sistema debe permitir:

- visualizar resultados mediante un mapa de calor (*heatmap*),
- mostrar métricas agregadas por transecta y tipología mediante tablas interactivas,
- cargar automáticamente las capas base y centrar el mapa en la región de estudio.

RF5. Simulación de escenarios. El usuario debe poder modificar parámetros, añadir o eliminar comercios y ejecutar nuevamente el cálculo con los datos actualizados. El sistema debe comparar los resultados del escenario con la línea base, tanto en valores absolutos como porcentuales.

RF6. Exportación de resultados. El sistema debe permitir exportar:

- una imagen PNG de la vista actual,

- capas en formato GeoJSON o GeoTIFF con los resultados obtenidos,
- un archivo CSV o TXT con el resumen de emisiones.

Todos los archivos exportados deben incluir metadatos relevantes (fecha, parámetros utilizados, comercios considerados, versión del motor de cálculo) y registrarse en un archivo de auditoría en formato JSON.

RF7. Trazabilidad y reproducibilidad. Cada resultado debe ser completamente trazable. El sistema debe permitir reconstruir el cálculo realizado, registrando los parámetros utilizados, las capas procesadas y la fecha de ejecución, tanto en los archivos exportados como en el backend.

3.1.2. Requisitos No Funcionales

- RNF1. Interfaz de usuario intuitiva y accesible.** Tanto el plugin como la aplicación web deben seguir principios de usabilidad, incorporando validación visual de errores y asistencia progresiva para usuarios no expertos. La versión web debe funcionar sin necesidad de instalación y ser compatible con navegadores modernos en Windows, macOS y Linux.
- RNF2. Eficiencia de recursos.** El sistema —considerando plugin y contenedor web— debe operar de forma fluida en equipos con al menos 8 GB de RAM y procesadores de gama media, evitando configuraciones adicionales o el uso de credenciales especiales.
- RNF3. Modularidad y mantenibilidad del código.** El código del plugin y del backend debe presentar una estructura modular y documentada, de manera que sea posible extenderlo a otros territorios o a distintos tipos de contaminantes. El backend debe organizarse en servicios modulares que faciliten su mantenimiento y escalabilidad.
- RNF4. Trazabilidad y metadatos.** Cada resultado generado debe incluir metadatos integrados —fecha de cálculo, parámetros utilizados, usuario y versión del sistema— con el fin de asegurar su trazabilidad y permitir auditorías futuras.
- RNF5. Generación automática de logs.** El sistema debe registrar de manera automática eventos relevantes y errores en archivos de log almacenados localmente, con el propósito de facilitar procesos de soporte técnico y la mejora continua.
- RNF6. Contenerización.** La aplicación web debe ejecutarse a partir de un único contenedor Docker que integre frontend, backend y base de datos, sin requerir pasos adicionales de instalación o configuración.

3.1.3. Supuestos operativos del sistema

La definición de los requisitos anteriores se sustenta en un conjunto de supuestos operativos que delimitan el alcance y el uso esperado del sistema:

- El sistema está orientado a usuarios con conocimientos básicos en análisis territorial o ambiental, pero no necesariamente expertos en SIG o programación.
- Los datos de entrada —capas geospaciales y parámetros— se asumen como provistos por el usuario o por fuentes externas confiables, sin validación semántica del contenido más allá de su estructura y consistencia espacial.
- Los factores de emisión y parámetros utilizados se consideran constantes dentro de cada escenario, permitiendo comparaciones relativas entre alternativas, pero no reemplazando inventarios oficiales de GEI.
- El sistema está diseñado para análisis exploratorios y comparativos a escala urbana, no para cálculos normativos o reportes regulatorios oficiales.
- La precisión de los resultados depende directamente de la calidad y resolución de los datos ingresados, asumiéndose que estos representan adecuadamente las condiciones del territorio analizado.

3.2. Metodología y Arquitectura del Sistema

A continuación se describe la arquitectura general del sistema, sus componentes, interacciones y el conjunto de tecnologías empleadas para su implementación.

3.2.1. Alcance del sistema

- *Cobertura territorial:* San Antonio urbano y corredores logísticos principales.
- *Datos de prueba:* capas comunas, vialidad, puerto/mercados, flujos O-D sintéticos verosímiles y factores de emisión genéricos (por tipo de vehículo).
- *Usuarios meta:* analistas LCA/territorio, planificadores municipales y equipo académico.

Nivel de madurez: validación en entorno controlado, con datos acotados y flujo *end-to-end* operativo.

3.2.2. Arquitectura de alto nivel

Diagrama de Contexto

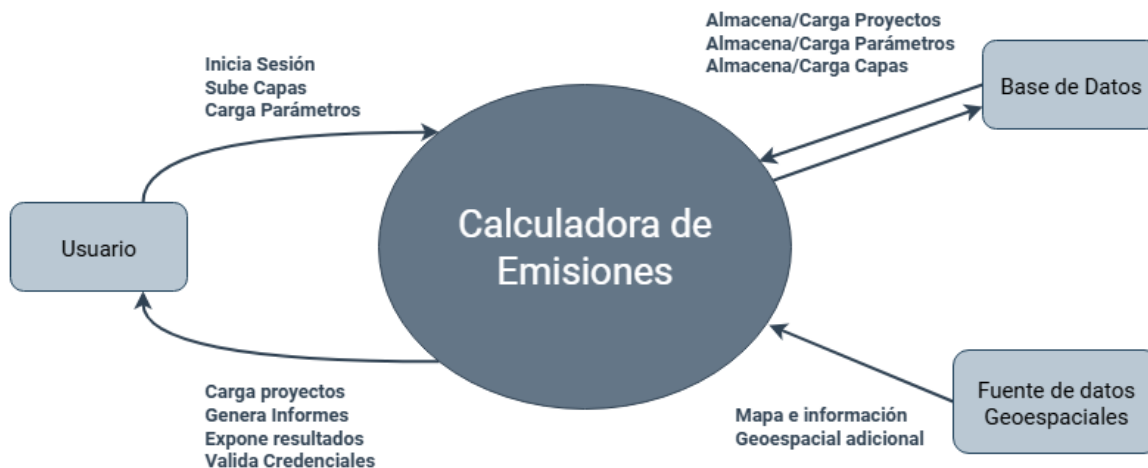


Figura 3.1: Diagrama de contexto del sistema.

Diagrama de Arquitectura

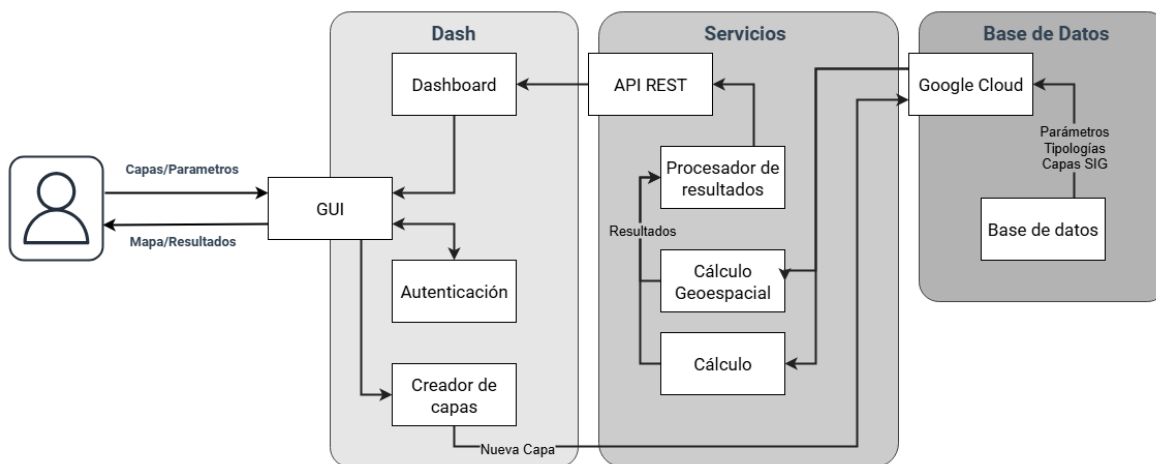


Figura 3.2: Diagrama de arquitectura de la aplicación.

3.2.3. Modo de operación del sistema

El sistema opera exclusivamente en modo *online*, utilizando PostgreSQL con extensión PostGIS como motor de almacenamiento persistente y ejecutando todas las operaciones geoespaciales y de cálculo a través del backend. La arquitectura incorpora un conjunto de repositorios especializados que abstraen la interacción con la base de datos, permitiendo mantener una separación clara entre la lógica de negocio, la persistencia y los servicios expuestos por la API. [18], [17]

Esta organización facilita la mantenibilidad del sistema, ya que cada componente —repositorios, servicios, modelos y controladores— cumple una responsabilidad específica dentro de la arquitectura.

Desde una perspectiva metodológica, esta decisión arquitectónica resulta clave para la trazabilidad del sistema, ya que garantiza que todos los cálculos se ejecuten bajo un único motor versionado y con acceso controlado a los datos persistidos. Al centralizar la lógica de cálculo y las operaciones geoespaciales en el backend, se evita la ejecución local no controlada y se asegura que cada resultado pueda ser reconstruido a partir de los mismos insumos, parámetros y versiones del sistema.

3.2.4. Componentes del sistema

Interfaz de usuario (GUI)

La interfaz gráfica constituye el punto de interacción principal. Permite crear proyectos, escenarios, cargar capas y parámetros de cálculo, ejecutar procesos y visualizar resultados. El módulo de autenticación controla el acceso mediante credenciales seguras, y el creador de capas habilita la generación de nuevas capas SIG a partir de datos personalizados o resultados del motor de cálculo.

- **Dashboard:** indicadores y resultados de emisiones de forma resumida e interactiva.
- **Autenticación:** flujo de inicio de sesión seguro (mediante JSON Web Token).
- **Creador de capas:** generación de capas o escenarios para análisis territorial.

Servicios (Backend / API REST)

Los servicios conforman el núcleo funcional y median la comunicación entre la GUI y la base de datos. El API REST (FastAPI) expone endpoints para consulta, procesamiento y almacenamiento.[19]

- **API REST:** gestiona solicitudes de cálculo, consulta de capas y entrega de resultados.
- **Procesador de resultados:** integra y formatea las salidas del motor.

- **Cálculo geoespacial:** operaciones SIG soportadas por PostGIS e integración del *stack* PyData-GIS.
- **Cálculo:** estimaciones numéricas y agregación por categorías y tipologías.

El backend incorpora repositorios especializados que encapsulan el acceso a datos mediante SQLAlchemy y PostGIS. Cada repositorio implementa operaciones CRUD para entidades como proyectos, escenarios, capas y parámetros. Sobre estos repositorios operan los servicios de negocio, responsables de coordinar el flujo de información entre la API REST, las validaciones de datos y el motor de cálculo. Esta separación en capas cumple un rol metodológico fundamental en términos de trazabilidad y reproducibilidad del cálculo ambiental. Al encapsular el acceso a datos en repositorios y centralizar la lógica de negocio en servicios específicos, el sistema permite identificar con precisión qué parámetros, capas y factores de emisión intervienen en cada ejecución. Asimismo, esta arquitectura facilita registrar, versionar y auditar cada corrida del motor de cálculo, estableciendo una correspondencia directa entre decisiones metodológicas (supuestos, parámetros y categorías) y los resultados obtenidos.

Base de datos (Google Cloud / PostGIS)

La base de datos es desplegada en Google Cloud SQL, donde se almacenan parámetros, tipologías, capas SIG y resultados del sistema. Este servicio administrado permite ejecutar PostgreSQL de forma confiable y escalable, facilitando la operación continua del sistema y su despliegue en entornos productivos [20].

PostgreSQL, junto con la extensión PostGIS, soporta operaciones espaciales avanzadas y consultas geográficas eficientes, permitiendo manejar geometrías, calcular distancias, realizar intersecciones y ejecutar análisis territoriales directamente a nivel de base de datos [18], [17].

Adicionalmente, se mantienen vistas materializadas para el acceso eficiente a indicadores agregados y resultados intermedios, reduciendo tiempos de respuesta y asegurando consistencia en la visualización de resultados.

Flujo de información

El usuario interactúa con la GUI para generar acciones como la creación de escenarios, carga de capas y parámetros. Las solicitudes viajan por el API hacia los módulos de cálculo; los resultados persisten y se devuelven en formato de respuesta.

3.2.5. Motor de cálculo y equivalencia con Excel

El motor replica las fórmulas canónicas de la planilla Excel (11 categorías) bajo la forma $E_i = A_i \times F_i$ y $E_{\text{total}} = \sum_i E_i$, con redondeo controlado al final. La equivalencia se valida mediante *fixtures* con tolerancia $\leq 0,01$ kg CO₂e/año, manteniendo factores y unidades del Excel. Desde el punto de vista metodológico, la implementación del motor como un componente independiente y determinístico permite asegurar que, para un mismo conjunto de insumos y parámetros, el sistema produzca siempre los mismos resultados. Esta propiedad es central para la trazabilidad del proceso y para la validación cruzada con la herramienta Excel, ya que permite aislar errores, comparar ejecuciones y auditar el impacto de modificaciones en los factores de emisión o en las entradas del sistema.[5], [6]

Categorías del motor de cálculo

El motor de cálculo implementado en este proyecto replica de manera exacta las once categorías definidas en la planilla Excel de Food Territories. Cada categoría corresponde a una actividad o flujo relevante dentro del funcionamiento de los comercios alimentarios, y su valor se expresa mediante factores de emisión específicos previamente validados.[3], [4] Las categorías incluidas en la versión actual del sistema son:

1. **Camiones o camionetas de abastecimiento:** emisiones asociadas al transporte de productos hacia el establecimiento.
2. **Aire acondicionado (kWh):** consumo energético destinado a climatización y refrigeración.
3. **Electricidad (kWh):** consumo eléctrico total del establecimiento, independiente del uso.
4. **Procesamiento de residuos en relleno sanitario (ton):** disposición final de residuos no reciclables.
5. **Estacionamiento:** emisiones generadas por la actividad de vehículos que acceden al establecimiento.
6. **Calefacción:** consumo energético asociado a calefacción interior.
7. **Gas (kg):** consumo de combustibles gaseosos utilizados en procesos internos.
8. **Agua (m³):** emisiones derivadas del uso de agua potable y su tratamiento.
9. **Transporte de residuos a reciclaje (ton·km):** traslado de materiales reciclables hacia centros de acopio.

10. **Transporte de residuos a relleno (ton-km):** traslado de residuos no reciclables hacia disposición final.
11. **Procesamiento de residuos reciclaje cartones (ton):** emisiones asociadas al tratamiento de materiales reciclables.

Estas categorías reflejan con precisión el modelo original de la herramienta en Excel, permitiendo mantener equivalencia numérica entre ambos sistemas y garantizar que las estimaciones de emisiones conserven la misma estructura conceptual utilizada en Food Territories.

3.2.6. Seguridad y autenticación

La aplicación implementa un sistema de autenticación basado en *JSON Web Tokens* (JWT), mediante el cual los usuarios obtienen un token al iniciar sesión y deben incluirlo en cada solicitud para acceder a los recursos protegidos de la API. Este mecanismo permite controlar el acceso a funcionalidades como la gestión de proyectos, la carga de capas y la ejecución del motor de cálculo. [21]

Asimismo, se configura *CORS* para restringir el acceso a la API únicamente desde orígenes autorizados, fortaleciendo la comunicación entre frontend y backend y reduciendo riesgos asociados a solicitudes externas no confiables.

3.2.7. Stack Tecnológico

La selección del *stack* se realizó con un enfoque modular para escalabilidad y mantenibilidad.

Frontend (cliente)

React 19 + TypeScript + Vite + Tailwind CSS.

Backend

Python 3.11 + FastAPI (Uvicorn) con SQLAlchemy/GeoAlchemy2 para interacción con PostgreSQL/PostGIS.

Base de datos

PostgreSQL como motor relacional y extensión PostGIS para manejo geoespacial.

Infraestructura / Hosting

Despliegue mediante Docker, con contenedores separados para frontend y backend, orquestados con Docker Compose.

Integraciones / APIs

Google Maps ([@react-google-maps/api](https://react-google-maps/api)); ECharts y Recharts para visualización; Proj4 y `shpjs` para proyecciones/lectura de *shapefiles*; GDAL, Fiona, Shapely y GeoPandas para procesamiento geoespacial en backend; ReportLab para reportes PDF.

DevOps / CI/CD

Husky y *Git hooks* para validación de *commits* (Conventional Commits). Monorepo con *scripts* unificados para provisión de entornos y configuración de base de datos, favoreciendo integración continua.

Las tecnologías seleccionadas cuentan con documentación técnica consolidada y un ecosistema maduro, lo que facilita mantenibilidad y evolución del sistema. En particular, el backend se apoya en FastAPI para la construcción de servicios HTTP [19], mientras que el frontend utiliza React para la construcción de interfaces web reactivas [22]. Asimismo, la persistencia se implementa sobre PostgreSQL y capacidades espaciales mediante PostGIS [18], [17].

3.2.8. Lógica geoespacial avanzada: mapas de calor, rutas y análisis territorial

Además de las capacidades SIG básicas integradas en el motor de cálculo, la plataforma incorpora un conjunto de funciones geoespaciales avanzadas que permiten realizar análisis territoriales más completos y directamente orientados a la toma de decisiones. Estas funciones se articulan en torno a la vista de mapa del proyecto, donde convergen capas vectoriales, puntos digitizados y datos derivados del procesamiento interno.

En primer lugar, el sistema genera mapas de calor a partir de tres fuentes simultáneas:

1. Las capas geoespaciales cargadas por el usuario.
2. Los marcadores agregados manualmente en el mapa.
3. Los puntos digitizados mediante la herramienta integrada.

Cada característica es examinada buscando atributos numéricos relevantes, priorizando nombres como *co2*, *emission* o *contamination*. Si existe coincidencia, el valor se interpreta como peso para el mapa de calor; en caso contrario, se utiliza cualquier número positivo como alternativa razonable. Con ello se construyen objetos **WeightedLocation**, que alimentan el SDK de Google Maps y permiten representar espacialmente la intensidad relativa de las emisiones o aportes derivados de las distintas capas.[23]

Posteriormente, la plataforma calcula rutas de transporte mediante el servicio *Directions* de Google Maps. Para cada origen definido, el sistema evalúa automáticamente la exposición de la ruta frente a los puntos del mapa de calor, generando un índice continuo de “contaminación” que pondera la distancia al hotspot más cercano y penaliza levemente las rutas más extensas. Cada ruta se divide en segmentos y se colorea interpolando entre verde y rojo según su nivel de exposición, lo que facilita identificar trayectos críticos o zonas del territorio donde la presencia de emisiones es más significativa.[24]

Un aspecto relevante del diseño es que los resultados asociados al mapa de calor, los resúmenes de rutas y los hotspots se almacenan de manera persistente dentro del estado del proyecto. Esto permite que distintas vistas (mapa, panel lateral y resultados) puedan reconstruir las visualizaciones sin necesidad de recalcular, asegurando consistencia entre sesiones y reduciendo tiempos de procesamiento. Este mecanismo reactivo mejora la trazabilidad del análisis espacial, ya que todos los resultados se derivan de un mismo conjunto de datos persistidos y versionados.

Finalmente, la integración entre capas SIG, puntos digitizados, rutas evaluadas y desgloses territoriales habilita un flujo de análisis geoespacial enriquecido, que supera ampliamente las capacidades del Excel original. La herramienta permite identificar zonas críticas, evaluar de manera territorializada los impactos logísticos y comunicar hallazgos mediante visualizaciones claras, lo que constituye uno de los aportes metodológicos más relevantes del sistema.

3.2.9. Responsabilidad del autor en la implementación del sistema

La implementación de la plataforma fue desarrollada de manera colaborativa por un equipo de tres integrantes, cada uno con responsabilidades complementarias dentro del proyecto. En este contexto, el autor de esta memoria asumió un rol central en el desarrollo de la aplicación web y en la construcción del motor operativo, siempre dentro de un proceso compartido de revisión, apoyo mutuo y toma conjunta de decisiones técnicas. Las tareas que se detallan a continuación consolidaron las principales responsabilidades del autor, pero no fueron ejecutadas de manera aislada, sino con intercambio constante de criterios y validaciones con el resto del equipo:

- el diseño e implementación del backend en FastAPI, incluyendo repositorios, servicios, modelos de datos y la lógica interna del motor de cálculo;
- la definición del esquema relacional en PostgreSQL, junto con la creación de migraciones y *seeds* para asegurar consistencia entre entornos;
- el desarrollo de la interfaz web en React/TypeScript, abarcando los módulos de autenticación, gestión de proyectos, administración de escenarios y visualización de resultados;
- la integración funcional entre el frontend, el backend y la base de datos, habilitando un flujo operativo de cálculo de extremo a extremo.

Las funcionalidades asociadas a la visualización y manipulación de capas SIG en el frontend, así como el diseño del esquema geoespacial en PostGIS, fueron desarrolladas por otros integrantes del equipo. De este modo, las contribuciones del autor se concentraron en los componentes centrales del sistema —motor de cálculo, backend, persistencia relacional y vistas principales de la aplicación web— siempre en coordinación activa con los demás miembros del grupo.

Asimismo, el trabajo se desarrolló bajo un esquema de colaboración permanente: se realizaron revisiones cruzadas, discusiones arquitectónicas y sesiones de resolución conjunta de problemas, lo que permitió mejorar la calidad del software y asegurar la coherencia de la plataforma. Esta dinámica de cooperación fue clave para consolidar un producto final estable y alineado con los objetivos del proyecto.

En conjunto, la arquitectura propuesta no responde únicamente a criterios de implementación técnica, sino que constituye un soporte metodológico para garantizar trazabilidad, reproducibilidad y transparencia en el cálculo de emisiones. Cada componente del sistema desde la persistencia de parámetros hasta la ejecución del motor y la visualización de resultados, ha sido diseñado para permitir la reconstrucción completa de los escenarios evaluados, alineando las decisiones de diseño del software con los objetivos analíticos del proyecto.

Capítulo 4

Implementación y Resultados del Sistema

Este capítulo presenta la implementación operativa de la plataforma y los principales resultados obtenidos a partir de su aplicación. Inicialmente, se describe el flujo de interacción del usuario y las interfaces gráficas que estructuran el uso del sistema, desde el ingreso hasta la visualización y exportación de resultados. Luego, se reportan los resultados del sistema, incluyendo la validación técnica frente a la herramienta Excel original, el análisis del valor agregado de la plataforma y la aplicación a un caso de uso representativo. En conjunto, este capítulo evidencia la funcionalidad del sistema y su aporte metodológico en términos de trazabilidad, reproducibilidad y análisis territorial.

4.1. Flujo e Interfaces Usuarías

Esta sección describe las principales vistas gráficas de usuario (GUI) del sistema *Calculadora de Emisiones*. Cada interfaz ha sido diseñada para facilitar el flujo de trabajo del usuario, desde el ingreso al sistema hasta la visualización y exportación de resultados.

4.1.1. Vista de Inicio de Sesión

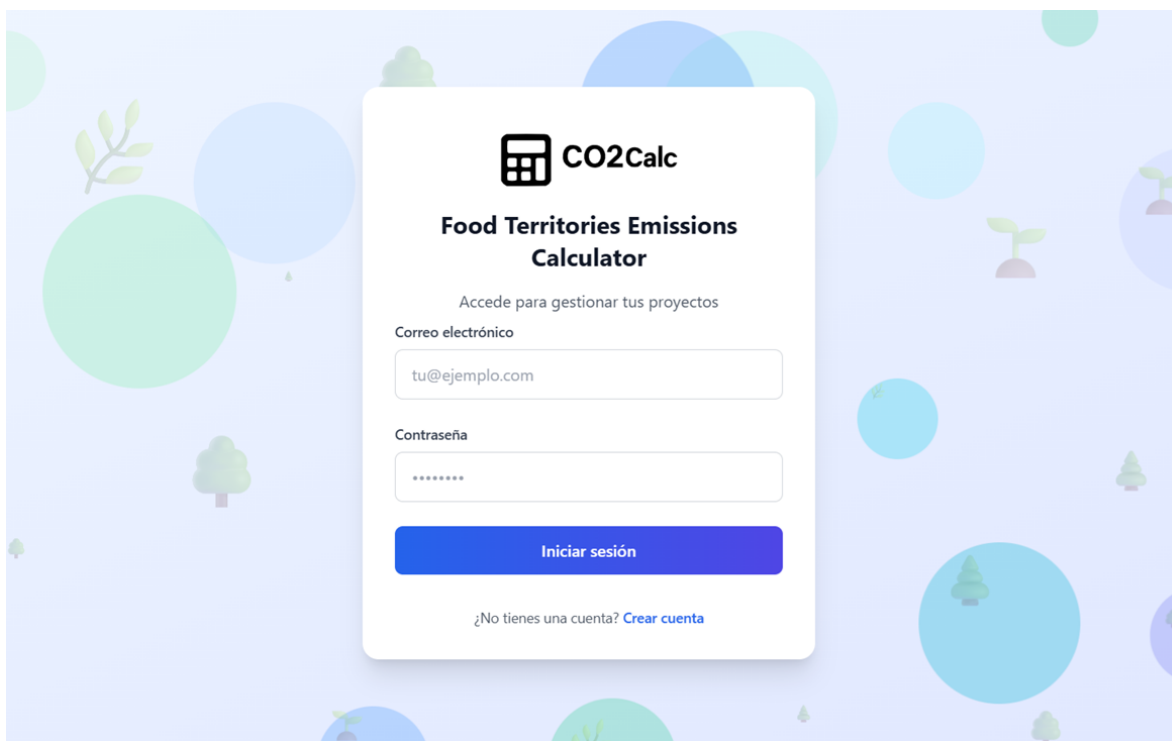


Figura 4.1: Vista de inicio de sesión del sistema

La pantalla de inicio de sesión es la puerta de entrada al sistema. Solicita las credenciales del usuario (correo electrónico y contraseña) y proporciona una opción para crear una cuenta. Su diseño simple y centrado asegura una experiencia clara y directa para el acceso.

4.1.2. Vista de Crear Sesión

Food Territories Emissions Calculator
Cálculo de Emisiones CO₂

Crear cuenta
Únete a Food Territories Emissions Calculator

Nombre completo

Mínimo 2 caracteres, máximo 255. Solo letras, espacios, guiones y apostrofes.

Correo electrónico

Ingresa un email válido (ejemplo: usuario@dominio.com)

Contraseña

Requisitos de la contraseña:

- Mínimo 8 caracteres
- Al menos una letra minúscula (a-z)
- Al menos una letra mayúscula (A-Z)
- Al menos un número (0-9)
- Al menos un carácter especial (!@#\$%^&*()_~?<.>)

Confirmar contraseña

Debe coincidir exactamente con la contraseña ingresada arriba.

Crear cuenta

¿Ya tienes una cuenta? [Iniciar sesión](#)

Figura 4.2: Vista de crear sesión

Esta vista permite a nuevos usuarios registrarse en la plataforma creando una cuenta personal. Para ello, se solicitan datos básicos como nombre, correo electrónico y contraseña, además de realizar validaciones de formato y coincidencia de credenciales. Su propósito es habilitar un acceso seguro y personalizado a los proyectos, escenarios y configuraciones de cálculo asociados a cada usuario.

4.1.3. Vista de Proyectos

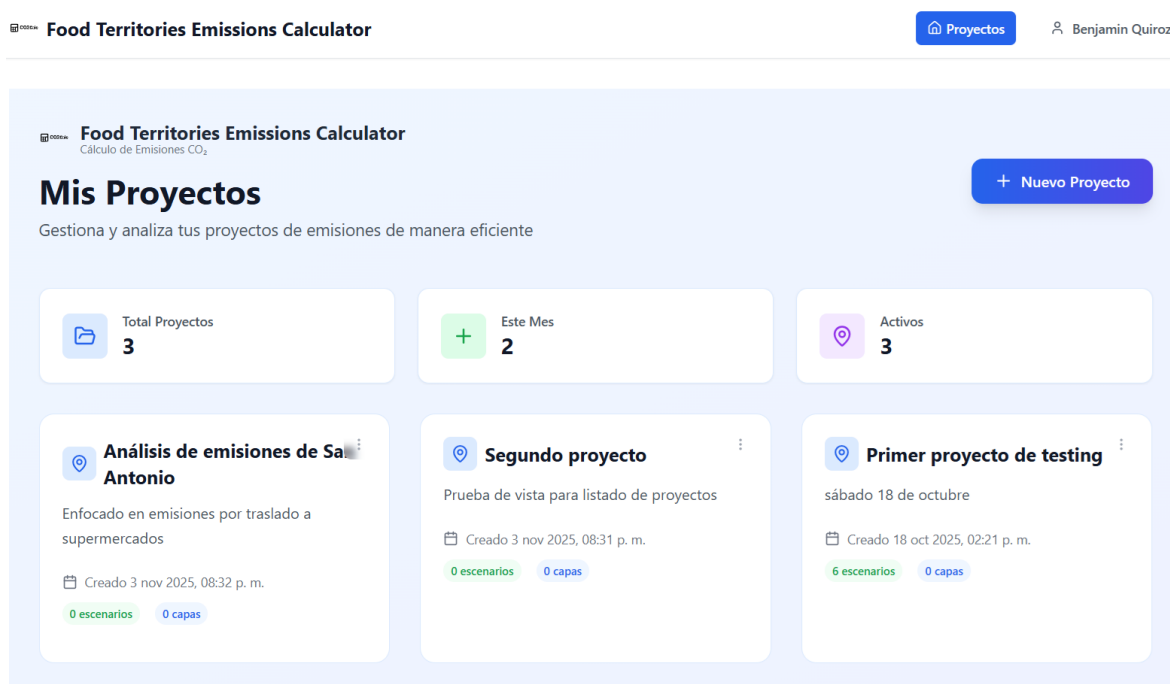


Figura 4.3: Vista de proyectos guardados asociados al usuario

Esta vista permite al usuario gestionar sus proyectos: crear, eliminar e ingresar a la vista interna de cada proyecto. Todos los proyectos muestran información clave, como la fecha de creación, la descripción del proyecto y la cantidad de escenarios y capas cargadas.

4.1.4. Vista de Crear Proyecto

← **Nuevo Proyecto**
Crea un nuevo proyecto para analizar emisiones

Nombre del Proyecto *

Ej: Análisis de Emisiones San Antonio

Descripción

Describe el propósito y alcance del proyecto...

Cancelar **Crear Proyecto**

Figura 4.4: Vista de Crear Proyecto

Vista para crear un proyecto, se solicita el nombre y la descripción del proyecto, siendo el campo de descripción opcional.

4.1.5. Vista inicial de proyecto

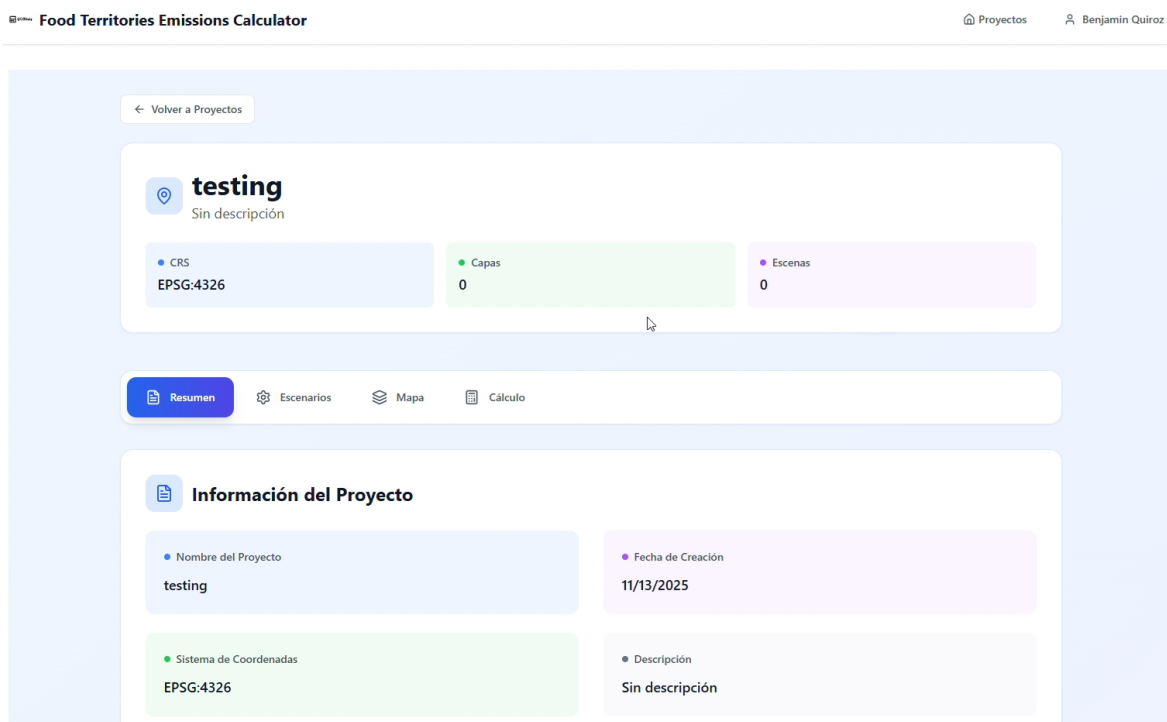


Figura 4.5: Vista inicial de proyecto

Una vez creado un proyecto, esta vista presenta un panel inicial con las principales acciones disponibles: crear escenarios, cargar capas geoespaciales y acceder al mapa del proyecto. Además, permite revisar información general como el sistema de referencia espacial (CRS) y la cantidad de capas y escenarios creados.

4.1.6. Vista inicial de escenario

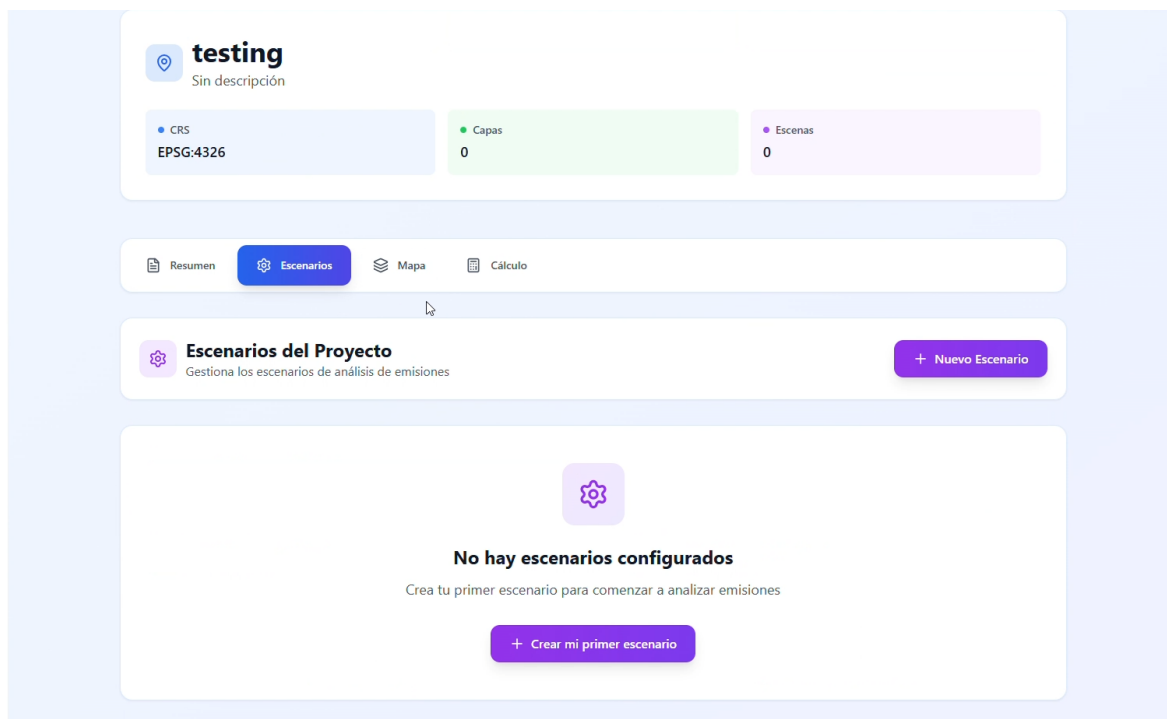


Figura 4.6: Vista inicial de escenario

Esta vista muestra el estado inicial de la sección de escenarios. Desde aquí, el usuario puede acceder al flujo de creación de escenarios, que constituye el punto de partida para el análisis de emisiones, al permitir crear las instancias de tipologías de comercio junto con sus parámetros de emisiones.

4.1.7. Modal de Selección de Parámetros de Cálculo

Editar Escenario
Solo puedes editar los valores de las tipologías y parámetros existentes

Información del Escenario

Nombre del escenario *
esneceario con multiples parametros e instancias

Descripción

Umbral de Emisiones (kg CO₂e/año)
2600000

Define el límite máximo de emisiones para este escenario (opcional)

Tipologías del Escenario

Almacen Tipología 2

Cantidad de Instancias
1

Parámetros de la Tipología

Camiones o camionetas de abastecimiento
50 visits/año

Electricidad (kWh)
20000 kWh/año

Figura 4.7: Modal de selección de parámetros por tipo de establecimiento

En este modal, el usuario puede ajustar manualmente los parámetros que se utilizarán en el cálculo de emisiones por cada tipo de establecimiento. Estos parámetros incluyen electricidad, calefacción, uso de agua, transporte, residuos, entre otros.

4.1.8. Interfaz de Carga y Selección de Capas

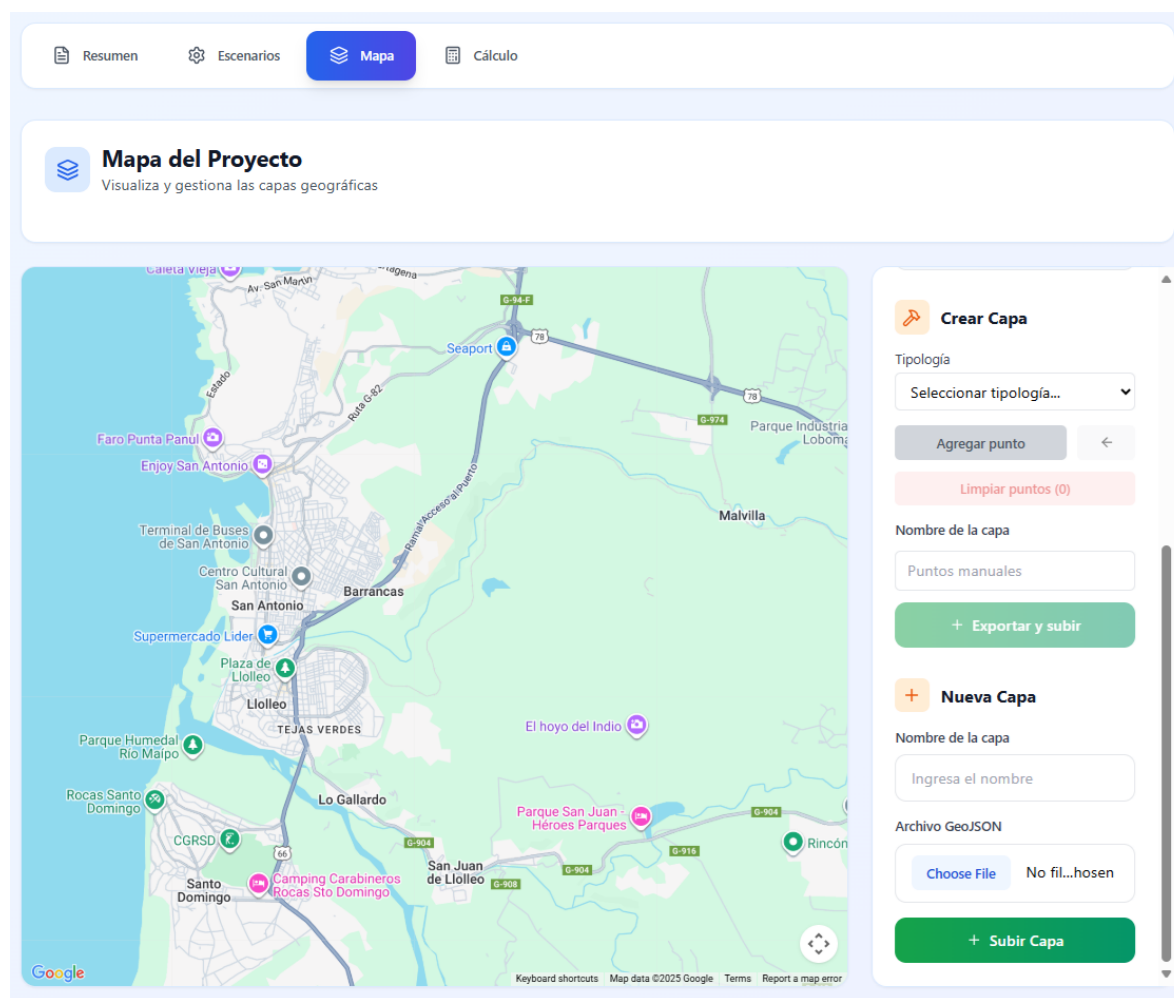


Figura 4.8: Interfaz de selección y visualización de capas geoespaciales

Esta vista permite al usuario seleccionar las capas necesarias para el análisis: establecimientos alimentarios, distribuidores y red de calles. El sistema permite importar nuevas capas, verlas en el visor geográfico y activar/desactivar su visualización.

4.1.9. Vista Previa Al Cálculo

2. Seleccionar Escenario

Escenario de Análisis *

testing

Usa los parámetros y tipologías configurados en el escenario seleccionado.

3. Resumen y Ejecución

• Configuración del Cálculo

Método: Escenario existente

Escenario: testing

• Parámetros del Escenario

Supermercado Cantidad: 1

Electricidad: 1000000 kWh/año

Aire Acondicionado: 500000 kWh/año

Abastecimiento: 5000 visits/año

Minimarket Cantidad: 1

Aire Acondicionado: 30000 kWh/año

Electricidad: 100000 kWh/año

Abastecimiento: 200 visits/año

Cancelar Iniciar Cálculo de Emisiones

Figura 4.9: Vista Previa Al Cálculo

En esta vista el sistema muestra un resumen consolidado de los parámetros definidos para cada tipología incluida en el escenario. El usuario puede verificar valores como electricidad, aire acondicionado, visitas de abastecimiento y cualquier otro parámetro relevante antes de ejecutar el motor de cálculo. Esta etapa actúa como un mecanismo de validación previa, disminuyendo la probabilidad de errores y permitiendo confirmar que la información ingresada corresponde al escenario que se desea analizar.

4.1.10. Visualización y Exportación de Resultados

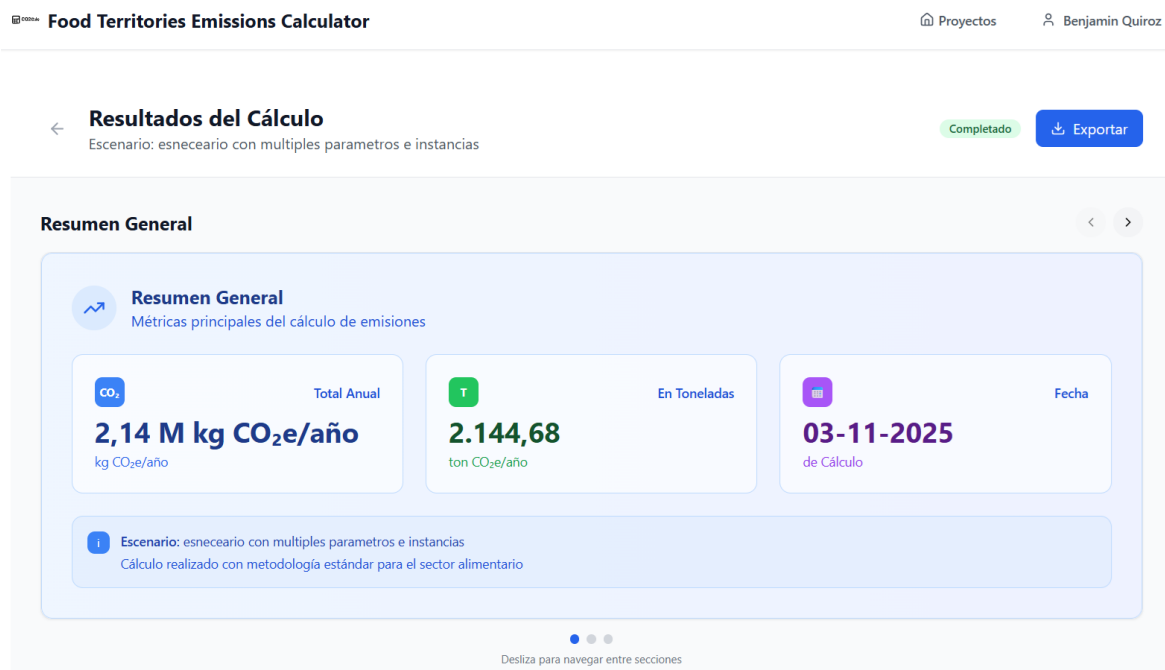


Figura 4.10: Resultados de cálculo mostrados en mapa y tabla con opción de exportación

Tras completar el cálculo, el sistema muestra los resultados mediante gráficos y tablas interactivas. El usuario puede descargar los resultados del cálculo de emisiones en formato PDF.

4.2. Resultados del Sistema

Sobre la base de la metodología y arquitectura descritas en la Sección 9, los resultados presentados a continuación permiten evaluar el cumplimiento de los Objetivos Específicos OE2, OE3, OE4 y OE5 definidos en la Sección 6, mediante la validación técnica del sistema y la aplicación a un caso de uso representativo.

Este apartado presenta los resultados obtenidos por la plataforma web en términos de: (i) fidelidad numérica respecto a la planilla Excel original, (ii) evaluación de escenarios representativos, (iii) visualizaciones y exportación, (iv) métricas de desempeño del motor de cálculo, y (v) mecanismos de trazabilidad.

4.2.1. Validación técnica: equivalencia con la calculadora Excel

Con el fin de garantizar que la migración desde Excel se realizó de forma correcta, se desarrolló un sistema automático de validación que compara los resultados del motor de cálculo con los obtenidos en la planilla original para un conjunto de casos de prueba estandarizados. Cada caso contiene datos de entrada representativos de una tipología comercial y el valor esperado de emisiones anuales calculado directamente en Excel.

El sistema ejecuta los once cálculos canónicos de cada tipología, suma los resultados y compara el total con el valor esperado. Se considera que un cálculo es consistente cuando la diferencia absoluta es menor a la tolerancia definida de 0,01 kg CO₂e/año, equivalente a la precisión numérica utilizada en la planilla.

La plataforma obtuvo una **tasa de éxito del 100 %** para las 5 tipologías validadas (supermercado, minimarket, almacén, feria libre y puestos en calle).

Tabla 4.1: Validación Excel vs Plataforma — Totales por tipología.

Tipología	Excel (kg/año)	App (kg/año)	Diferencia
Supermercado	2.393.255,418	2.393.255,418	0,000
Minimarket	126.947,928	126.947,928	0,000
Almacén	27.975,142	27.975,142	0,000
Feria libre	13.732,956	13.732,956	0,000
Puestos calle	6.732,986	6.732,986	0.000

Además del total, el sistema permite comparar el desglose por categoría para cada tipología. Como ejemplo, la Tabla 4.2 muestra el resultado del fixture “supermercado”, donde cada categoría

presenta equivalencia exacta con la planilla.

Tabla 4.2: Ejemplo de desglose por categoría — Fixture “Supermercado”.

Categoría	App (kg/año)	Excel (kg/año)
Abastecimiento	1 633,248	1 633,248
Aire acondicionado (kWh)	250.000,000	250.000,000
Electricidad (kWh)	242.100,000	242.100,000
Residuos a relleno (ton)	128.734,655	128.734,655
Transporte relleno (t·km)	12.064,194	12.064,194
Reciclaje cartón (ton)	6.660,953	6.660,953
Reciclaje cartón (t·km)	16.828,398	16.828,398
Calefacción	25.000,000	25.000,000
Agua (m ³)	17.700,000	17.700,000
Gas (kg)	20.479,200	20.479,200
Estacionamiento	50.949,000	50.949,000

La coincidencia absoluta en todas las categorías y tipologías validadas confirma que el motor de cálculo reproduce fielmente las fórmulas del Excel, cumpliendo con el objetivo de equivalencia funcional.

Estos resultados corresponden a una validación técnica del sistema y tienen por objetivo demostrar la correcta implementación del motor de cálculo y su equivalencia numérica con la herramienta original en Excel. En consecuencia, esta etapa no evalúa escenarios reales ni políticas específicas, sino que establece una base de confianza para la interpretación de los análisis aplicados que se presentan a continuación.

4.2.2. Análisis comparativo: valor agregado respecto a la planilla Excel

La validación técnica presentada en la subsección anterior confirma que el motor de cálculo implementado reproduce de manera exacta los resultados obtenidos mediante la planilla Excel utilizada en el proyecto Food Territories. No obstante, más allá de esta equivalencia numérica, la plataforma desarrollada introduce capacidades analíticas que no se encontraban disponibles en el enfoque previo, y que constituyen una ganancia metodológica relevante.

En la herramienta Excel original, los resultados se presentan principalmente como totales agregados por tipología comercial, lo que limita la interpretación analítica del sistema. Si bien la planilla permite acceder a un desglose de emisiones por categoría para una tipología específica, este se obtiene mediante la inspección manual de múltiples celdas, rangos y fórmulas, requiriendo interpretar factores de emisión, unidades y supuestos de manera fragmentada. Esta información no se encuentra integrada en una vista consolidada ni asociada a mecanismos de trazabilidad, versionado o visualización comparativa, lo que dificulta identificar de forma inmediata las categorías dominantes, comparar aportes relativos o

comunicar resultados de manera clara. Las Figuras 4.11 y 4.12 ilustran este enfoque, donde el análisis se restringe a tablas estáticas y lecturas manuales, sin apoyo gráfico ni diferenciación territorial.

	A	B	C
1	Tipología comercio	Nº	Total emisiones totales (kg CO ₂ e anuales)
2	Supermercados	1	2,393,255.4
3	Minimarkets	1	126,947.93
4	Almacén de Barrio	1	27,975.14
5	Puestos Ferias Libres	1	13,732.96
6	Puestos en calles	1	6,732.99
7	TOTAL		2,568,644

Figura 4.11: Resultados agregados por tipología en la planilla Excel original.

A	B	C	D	E	F	G
Categoría	Rango o valor	"Mejor" escenario	Categoría	Factor de emisión	Unidad factor de emisión	emisiones
Camiones o camionetas de abastecimiento	5.000 a 10.000	5000	Camión	0.11862	kgCO ₂ e/t-km	1.622.721.60
Aire acondicionado (vitrin)	500.000 a 2.000.000	500000	Sistemas de climatización integrados HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado)	0.5	kg CO ₂ /kWh	250.000.00
Electricidad (kWh)	1.000.000 a 5.000.000	1000000	Factor de emisión del Sistema eléctrico Nacional 2023 (SEN)	0.2421	kgCO ₂ e/kWh	242.100.00
Procesamiento de residuos relleno (ton)	259			497.045	kg CO ₂ e/ton	128.734.66
Estacionamiento	100.000 a 500.000	100000	Vehículo particular	0.16983	kgCO ₂ e/km	50.949.00
Calefacción	50.000 a 200.000	50000	Sistemas de climatización integrados HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado)	0.5	kg CO ₂ /kWh	25.000.00
Gas (kg)	10.000 a 50.000	10000	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	1.59	tCO ₂ e/m3	20.479.20
Agua (m3)	100.000 a 500.000	100000	Suministro de agua	0.177	kg CO ₂ e	17.700.00
Transporte de residuos reciclaje cartones (ton/km)	32865			0.51228	kgCO ₂ e/t-km	16.836.06
Transporte de residuos relleno (ton/km)	23569			0.51228	kgCO ₂ e/t-km	12.073.93
Procesamiento de residuos reciclaje cartones (ton)	313		Residuos orgánicos de comida y bebida - Relleno sanitario	21.281	kgCO ₂ e/t	6.660.95
TOTAL EMISIONES ANUALES (CO ₂ e)						2.393.255.42

Figura 4.12: Resultados agregados por categoría en la planilla Excel original.

En contraste, la plataforma web permite estructurar los resultados en distintos niveles de análisis de forma automática y consistente. La Figura 4.13 muestra el resumen general del cálculo, donde se integran el total anual de emisiones, su conversión a toneladas, la fecha de ejecución y el escenario evaluado. Esta información se genera de forma reproducible y queda asociada al escenario, permitiendo su auditoría y reconstrucción posterior.

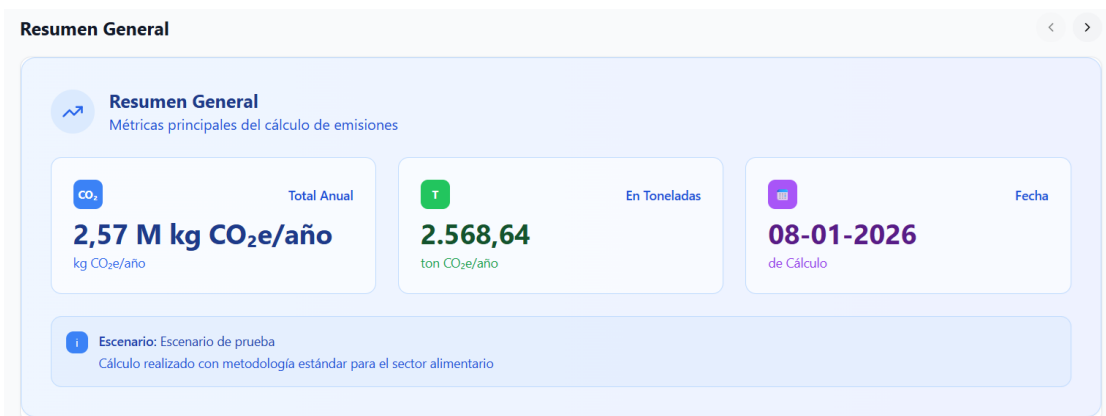


Figura 4.13: Resumen general de emisiones generado por la plataforma web.

Adicionalmente, la plataforma entrega desgloses automáticos por categoría y por tipología, acompañados de visualizaciones gráficas y tablas porcentuales (Figuras 4.14 y 4.15). Esta representación permite identificar de manera inmediata las fuentes dominantes de emisión y su peso relativo dentro del total, facilitando lecturas analíticas que no eran accesibles mediante el uso exclusivo de Excel. Por ejemplo, es posible observar la concentración de emisiones en determinadas categorías energéticas o la fuerte asimetría entre tipologías comerciales, aspectos clave para la priorización de medidas de mitigación.

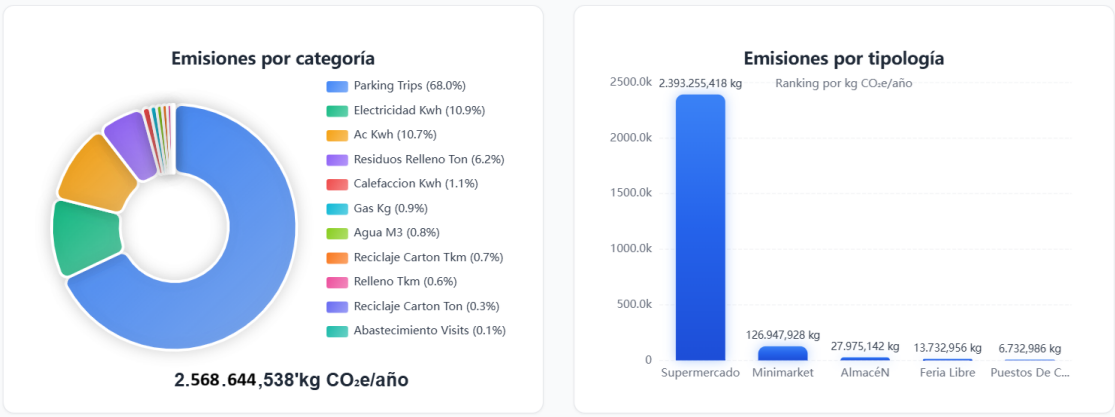


Figura 4.14: Desglose de emisiones por categoría y tipología en la plataforma web.

Emisiones por Categoría			Emisiones por Tipología		
Desglose detallado de emisiones			Distribución por tipo de establecimiento		
CATEGORÍA	EMISIONES	%	TIPOLOGÍA	EMISIONES	%
Parking Trips	1.698.622,68 kg CO ₂ e/año	66.1%	Supermercado	2.393.255,42 kg CO ₂ e/año	93.2%
Electricidad Kwh	271.394,10 kg CO ₂ e/año	10.6%	Minimarket	126.947,93 kg CO ₂ e/año	4.9%
Ac Kwh	267.500,00 kg CO ₂ e/año	10.4%	Almacén	27.975,14 kg CO ₂ e/año	1.1%
Residuos Relleno Ton	154.033,65 kg CO ₂ e/año	6.0%	Feria Libre	13.732,96 kg CO ₂ e/año	0.5%
Calefaccion Kwh	26.250,00 kg CO ₂ e/año	1.0%	Puestos De Calle	6.732,99 kg CO ₂ e/año	0.3%
Gas Kg	21.520,80 kg CO ₂ e/año	0.8%			
Agua M3	18.779,70 kg CO ₂ e/año	0.7%			
Reciclaje Carton Tkm	16.828,38 kg CO ₂ e/año	0.7%			
Relleno Tkm	14.445,27 kg CO ₂ e/año	0.6%			
Reciclaje Carton Ton	6.662,95 kg CO ₂ e/año	0.3%			
Abastecimiento Visits	2.067,00 kg CO ₂ e/año	0.1%			

Figura 4.15: Desglose de emisiones por categoría y tipología en la plataforma web.

En síntesis, mientras que la planilla Excel permite obtener valores numéricos de referencia, la plataforma desarrollada habilita un análisis estructurado, trazable y visualmente asistido de los resultados, incorporando capacidades de comparación, auditoría y comunicación que fortalecen significativamente el valor analítico de la línea base de emisiones.

4.2.3. Caso de uso: evaluación de emisiones para un proyecto comercial en Tejas Verdes

Con el fin de ilustrar el uso práctico de la plataforma y demostrar su capacidad para apoyar el análisis de decisiones territoriales, se desarrolló un escenario hipotético asociado a la instalación de dos nuevos comercios —un supermercado y un minimarket— en el sector de Tejas Verdes, en la comuna de San Antonio. Este caso responde a una situación plausible en la que una empresa constructora requiere estimar el impacto ambiental de futuros establecimientos en un área considerada subatendida, pero sujeta a políticas públicas locales que establecen un límite máximo de emisiones de **2,2 millones de kg CO₂e/año**.

Este escenario no constituye una validación técnica del sistema, sino un caso de uso ilustrativo que permite analizar la interpretación de resultados, la evaluación de umbrales y la identificación de oportunidades de mitigación bajo un contexto realista de planificación urbana y regulatoria.

Para realizar el análisis, se creó un nuevo escenario en la plataforma y se configuraron los parámetros correspondientes a cada tipología comercial. Estos valores representan las principales fuentes de emisiones anuales: visitas de abastecimiento, consumo eléctrico y climatización.

Parámetros utilizados en el escenario:

Supermercado

- Camiones de abastecimiento: 5 000 visitas/año
- Aire acondicionado: 500 000 kWh/año
- Electricidad: 1 000 000 kWh/año

Minimarket

- Camiones de abastecimiento: 200 visitas/año
- Aire acondicionado: 30 000 kWh/año
- Electricidad: 100 000 kWh/año

Adicionalmente, se definió un umbral global de **2,2M kg CO₂e/año**, utilizado para evaluar si el escenario cumple con la política ambiental vigente.

Visualización territorial

La Figura 4.16 muestra el mapa del proyecto, donde es posible visualizar la selección de la ubicación geoespacial de las dos instancias de comercio a simular.

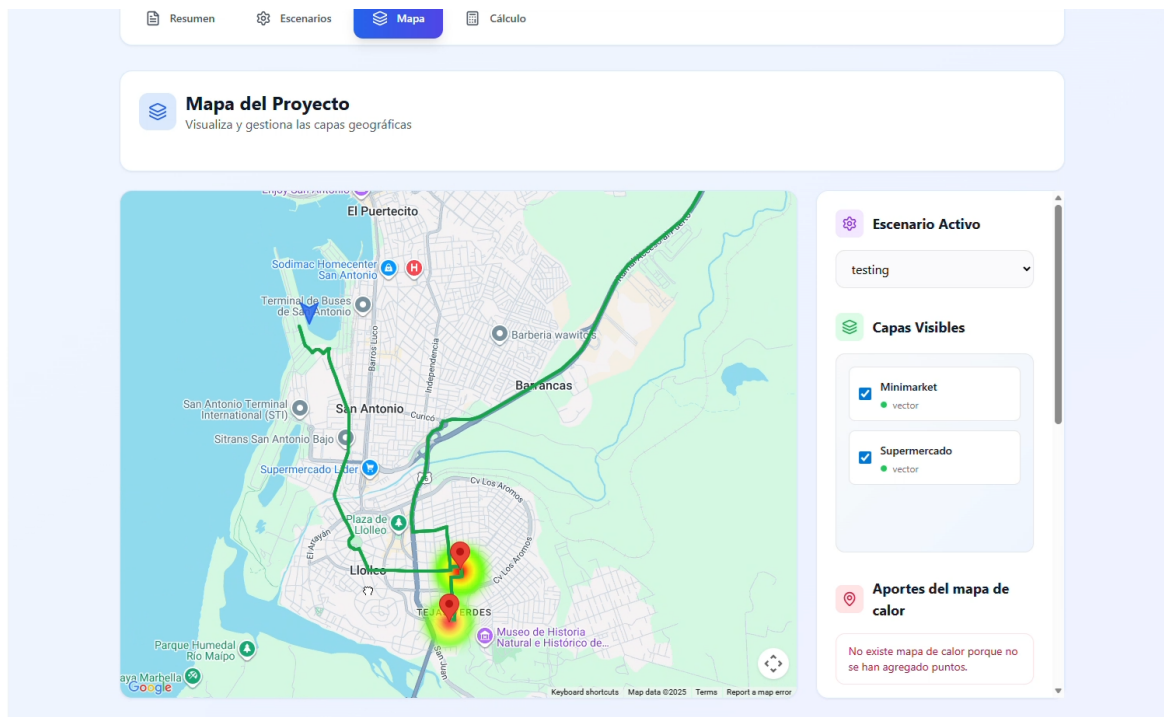


Figura 4.16: Vista territorial del escenario en Tejas Verdes.

Resumen general del cálculo

La Figura 4.17 muestra el resumen generado por la plataforma tras ejecutar el escenario. El total estimado de emisiones asciende a **2,22M kg CO₂e/año**, resultado de la agregación por tipología y categoría.

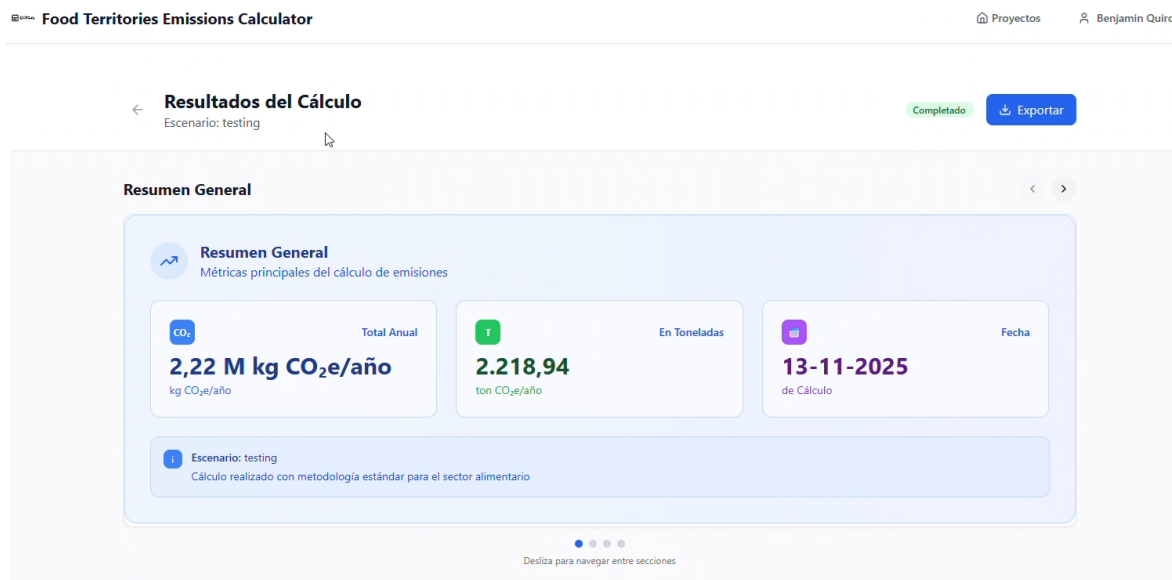


Figura 4.17: Resumen general del cálculo de emisiones para el escenario evaluado.

Desde una perspectiva analítica, este resultado indica que la incorporación conjunta de ambos establecimientos conduce a un nivel de emisiones que supera marginalmente el límite regulatorio definido. Si bien la diferencia absoluta es relativamente pequeña en términos porcentuales, el hecho de exceder el umbral implica que el proyecto, en su configuración inicial, no cumple con la política ambiental vigente, lo que podría traducirse en restricciones normativas o la necesidad de ajustes en la etapa de diseño.

Este resultado ilustra la utilidad del sistema para detectar situaciones de incumplimiento temprano, permitiendo evaluar alternativas de mitigación antes de la materialización del proyecto, y evitando decisiones basadas únicamente en estimaciones agregadas o no territorializadas.

Distribución por categorías y tipologías

El sistema también entrega gráficos que desglosan el aporte de cada actividad y tipo de comercio al total del escenario (Figura 4.18). En este caso, las mayores emisiones se concentran en el supermercado, mientras que las categorías dominantes corresponden a abastecimiento, electricidad y aire acondicionado.

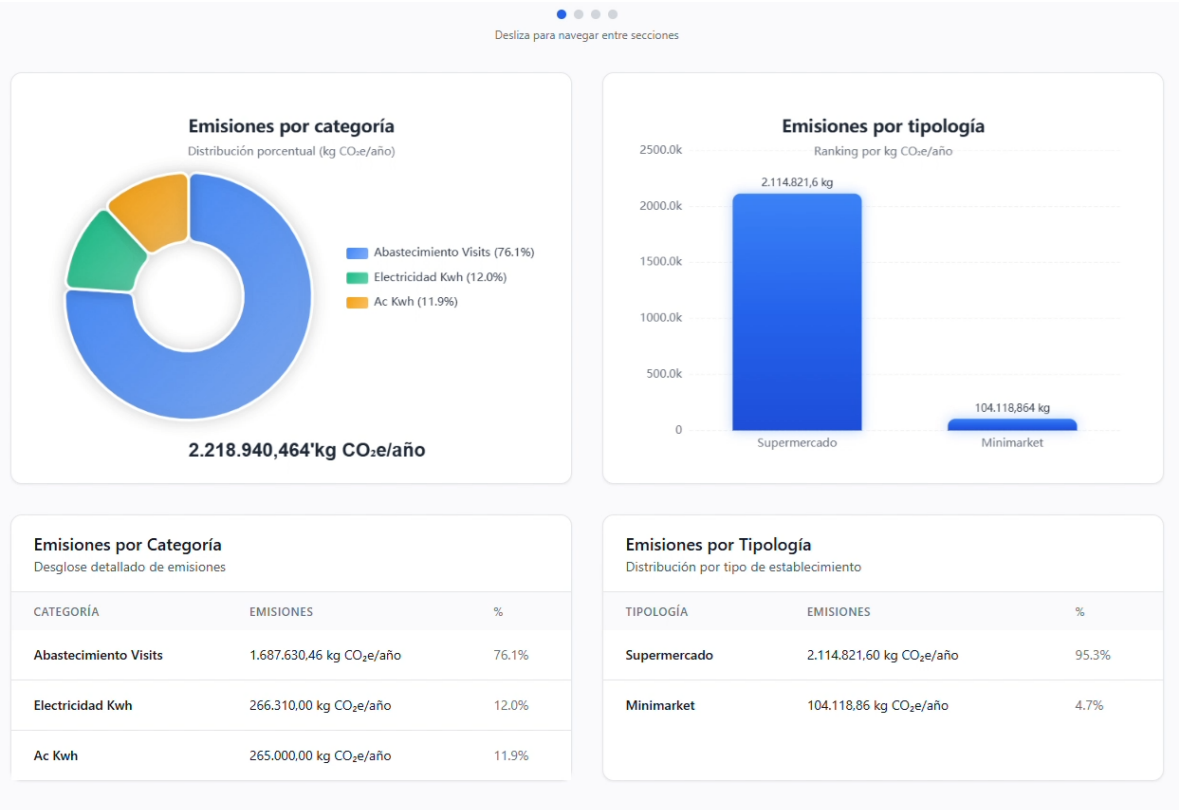


Figura 4.18: Distribución de emisiones por categoría y tipología.

El predominio del supermercado en el total de emisiones se explica tanto por su mayor escala operativa como por la intensidad de consumo energético asociada a climatización y electricidad. En particular, las categorías de abastecimiento y consumo eléctrico concentran una fracción significativa del total, lo que sugiere que las estrategias de mitigación más efectivas deberían focalizarse en la optimización logística y la eficiencia energética de este tipo de establecimientos.

En contraste, el minimarket presenta un aporte proporcionalmente menor, lo que evidencia que, para proyectos de menor escala, las políticas de mitigación pueden requerir enfoques diferenciados, evitando soluciones homogéneas que no reflejen la diversidad de impactos entre tipologías comerciales.

Desde una lectura integrada de los resultados, el escenario de Tejas Verdes evidencia un patrón

claro de concentración de emisiones tanto por tipología como por categoría. En términos de tipologías, el supermercado domina ampliamente el total anual de emisiones, superando el 90% del aporte agregado, lo que confirma que las decisiones asociadas a establecimientos de gran escala tienen un peso desproporcionado en la huella total del sistema. Esta asimetría no resulta evidente al observar únicamente valores agregados en Excel, pero se vuelve explícita al analizar los desgloses porcentuales y visuales entregados por la plataforma.

A nivel de categorías, el análisis muestra que las emisiones se concentran principalmente en el transporte de abastecimiento y en el consumo energético (electricidad y climatización), lo que sugiere que los mayores márgenes de mitigación no se encuentran en categorías residuales, sino en procesos estructurales del modelo logístico y energético. En particular, la fuerte incidencia del abastecimiento pone de manifiesto la relevancia de la localización territorial de los establecimientos y de la frecuencia de viajes, aspecto que adquiere mayor significado al estar vinculado explícitamente a la posición geográfica definida en el mapa.

En este contexto, el caso de uso no solo permite verificar el cumplimiento o incumplimiento de un umbral regulatorio, sino que también entrega información estratégica sobre dónde intervenir. El ejercicio evidencia que ajustes relativamente acotados en parámetros críticos como la optimización de rutas, la reducción marginal de visitas de abastecimiento o mejoras en eficiencia energética, pueden ser suficientes para revertir una situación de incumplimiento, sin necesidad de rediseñar completamente el proyecto. Esta capacidad de identificar patrones dominantes y orientar decisiones de mitigación constituye uno de los principales aportes analíticos del sistema desarrollado.

Evaluación del umbral de emisiones

Dado que el escenario excede el umbral establecido, la plataforma indica la magnitud del sobrepaso y su porcentaje relativo (Figura 4.19). En este caso, las emisiones superan el límite por aproximadamente **18 940 kg CO₂e/año**, equivalentes al **0,9 %** del umbral.

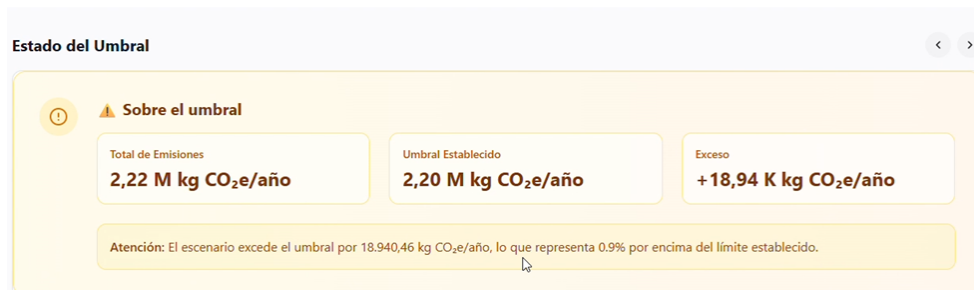


Figura 4.19: Estado del umbral definido para el escenario.

Aunque el porcentaje de excedencia es reducido, su identificación resulta clave desde el punto de vista normativo, ya que en contextos regulatorios reales el cumplimiento suele evaluarse de forma binaria. En este sentido, el sistema permite cuantificar no solo la magnitud del incumplimiento, sino también su proximidad al límite permitido, lo que habilita decisiones informadas orientadas a ajustes marginales en lugar de rediseños estructurales del proyecto.

Configuraciones sugeridas para mitigación

La plataforma genera automáticamente sugerencias de parámetros que permitirían reducir las emisiones totales (Figura 4.20). Estas recomendaciones se basan en la sensibilidad del cálculo respecto a cada parámetro, indicando tanto el valor sugerido como el potencial de reducción asociado.



Figura 4.20: Sugerencias automáticas de optimización para reducir emisiones.

Las sugerencias generadas por la plataforma evidencian que pequeñas modificaciones en parámetros clave —como la reducción del consumo eléctrico o la optimización de la frecuencia de abastecimiento— pueden ser suficientes para alcanzar el cumplimiento del umbral definido. Este resultado refuerza el valor del sistema como herramienta exploratoria, capaz de orientar decisiones de diseño y operación sin requerir recalcular manualmente múltiples combinaciones de parámetros.

Asimismo, la generación automática de recomendaciones permite priorizar acciones con mayor impacto relativo, facilitando un enfoque incremental de mitigación alineado con restricciones técnicas y económicas reales.

Exportación del informe en PDF

Finalmente, la plataforma permite exportar un informe formal del escenario (Figura 4.21), el cual incluye: (i) métricas principales, (ii) distribución por tipología, (iii) tablas detalladas por categoría y (iv) equivalencias cuantitativas para facilitar interpretación.

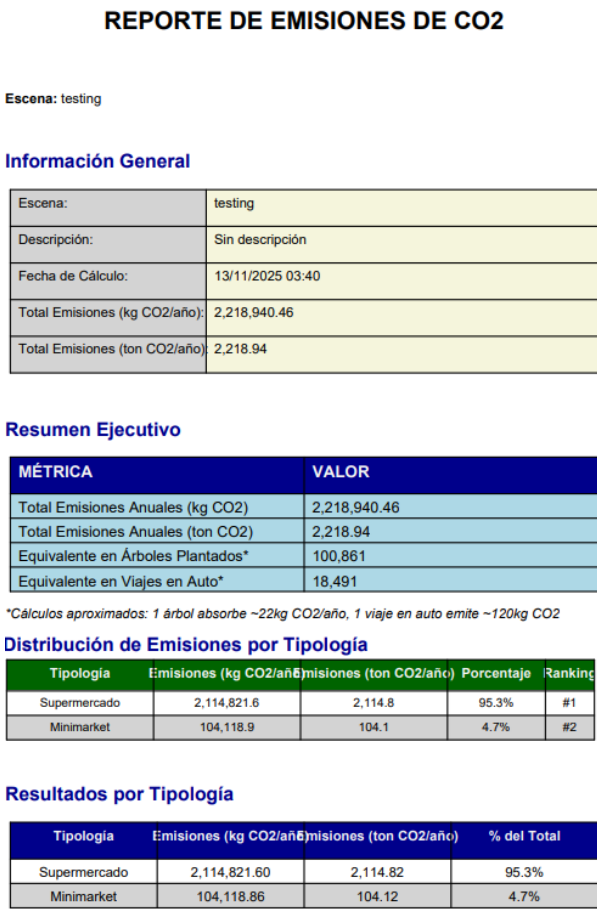


Figura 4.21: Reporte PDF generado para el escenario evaluado.

En conjunto, este caso de uso demuestra que la plataforma no solo replica el cálculo de emisiones, sino que lo transforma en un instrumento de apoyo a la toma de decisiones territoriales. La capacidad de evaluar escenarios bajo restricciones regulatorias, identificar focos críticos de emisión y explorar alternativas de mitigación de forma interactiva constituye un aporte sustantivo respecto al uso tradicional de planillas Excel.

De este modo, el sistema permite pasar desde una estimación estática de emisiones hacia un análisis dinámico, trazable y territorialmente explícito, alineado con los requerimientos de planificación urbana y evaluación ambiental en contextos reales.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusión

El presente trabajo desarrolló e implementó una plataforma web orientada a la estimación territorial de emisiones de CO₂ equivalente en sistemas de comercio alimentario urbano, en el marco del proyecto *PMM Food Territories*. El objetivo central consistió en trasladar de forma fiel la lógica de cálculo existente en la planilla Excel hacia una herramienta computacional más robusta, reproducible y territorialmente explícita, capaz de superar las limitaciones metodológicas del enfoque original.

Desde el punto de vista técnico, uno de los principales logros del proyecto es la validación de equivalencia numérica exacta entre el motor de cálculo implementado y la planilla Excel original. Las once categorías de emisión fueron formalizadas mediante expresiones canónicas del tipo $E_i = A_i \times F_i$, preservando factores de emisión, unidades y estructura conceptual. Esta equivalencia asegura continuidad metodológica y permite una transición confiable desde una herramienta exploratoria hacia un sistema computacional validado.

Más allá de la equivalencia, el principal aporte del trabajo radica en la transformación del cálculo de emisiones desde un proceso manual y estático hacia un sistema automatizado, trazable y orientado al análisis de escenarios. La arquitectura basada en PostgreSQL/PostGIS, FastAPI y React/TypeScript permitió incorporar prácticas propias del desarrollo de software científico y sistemas de apoyo a decisiones, tales como versionado de parámetros, auditoría completa de ejecuciones, persistencia estructurada de resultados y despliegue reproducible. Estas capacidades no solo mejoran la mantenibilidad del sistema, sino que fortalecen la transparencia y reproducibilidad del cálculo ambiental.

Desde una perspectiva académica, el principal aporte metodológico de esta memoria consiste en la formalización de un proceso de estimación de emisiones que integra principios de análisis de ciclo de vida (LCA), trazabilidad computacional y manifestación territorial dentro de un marco reproducible. El trabajo demuestra que es posible transformar herramientas exploratorias, comúnmente utilizadas en proyectos aplicados, en sistemas metodológicamente robustos, sin perder continuidad conceptual ni operativa. Este enfoque contribuye a cerrar la brecha entre metodologías ambientales y su implementación práctica en herramientas digitales verificables. En términos metodológicos, la integración de capacidades SIG constituye un avance sustantivo respecto al enfoque tabular tradicional. El uso de capas georreferenciadas, la vinculación de emisiones con unidades territoriales y la generación de visualizaciones espaciales permiten capturar dinámicas logísticas y patrones espaciales que no son observables en herramientas basadas exclusivamente en hojas de cálculo. De este modo, el sistema habilita un análisis territorial explícito de la línea base de emisiones, alineado con enfoques contemporáneos de evaluación ambiental aplicada.

Asimismo, la gestión de múltiples proyectos, escenarios y tipologías comerciales, junto con la evaluación frente a umbrales configurables, amplía el alcance analítico del cálculo. Estas funcionalidades permiten explorar alternativas de diseño y operación, identificar focos críticos de emisión y apoyar la toma de decisiones bajo restricciones regulatorias, como se evidenció en el caso de uso desarrollado para el sector de Tejas Verdes.

Finalmente, el proyecto consolida un marco sólido de trazabilidad y validación. Cada ejecución del sistema persiste insumos, parámetros, desgloses y resultados, posibilitando la reconstrucción histórica de cálculos y la auditoría completa del proceso. Este enfoque resulta especialmente relevante en contextos académicos y de planificación territorial, donde la reproducibilidad y la transparencia son condiciones fundamentales para la credibilidad de los resultados. De esta manera, los resultados obtenidos permiten dar cumplimiento al objetivo general y a los objetivos específicos OE1, OE2 y OE3. Los objetivos OE4 y OE5 se cumplen parcialmente, quedando sus extensiones asociadas a comparación explícita de escenarios e integración SIG completa abordadas como líneas de trabajo futuro.

En síntesis, esta memoria aporta una mejora metodológica y tecnológica concreta al proyecto Food Territories, al convertir un cálculo base sustentado en Excel en un sistema reproducible, territorialmente explícito y orientado al análisis de escenarios. Más allá del caso específico de San Antonio y del sector de Tejas Verdes, el enfoque desarrollado resulta aplicable a otros contextos de planificación urbana,

evaluación ambiental y análisis de sistemas alimentarios, donde se requiera combinar estimaciones de emisiones, trazabilidad de resultados y análisis territorial. De este modo, el trabajo sienta una base metodológica replicable para el desarrollo futuro de herramientas de evaluación ambiental aplicadas, tanto en contextos académicos como institucionales promoviendo la toma de decisiones informada sobre políticas públicas.

5.2. Discusión y Trabajo Futuro

5.2.1. Discusión

El desarrollo de la plataforma permitió confirmar que las decisiones técnicas adoptadas fueron adecuadas para alcanzar los objetivos principales del proyecto. El sistema se implementó de manera estable y coherente, evidenciando que la arquitectura definida —basada en un backend modular en FastAPI, una aplicación web en React/TypeScript y una base de datos PostgreSQL/PostGIS— resulta apropiada para el desarrollo de herramientas de cálculo ambiental con requerimientos de trazabilidad, reproducibilidad y extensibilidad.

A partir de los resultados obtenidos, es posible identificar una serie de hallazgos transversales que constituyen aportes relevantes del trabajo más allá de la validación técnica del sistema. En primer lugar, la implementación de un motor de cálculo centralizado y versionado permitió mejorar sustantivamente la trazabilidad del proceso de estimación de emisiones, asegurando que cada resultado pueda ser reconstruido a partir de un conjunto explícito de insumos, parámetros y supuestos. En segundo término, la plataforma habilita la auditoría completa de los cálculos, al formalizar la lógica originalmente contenida en una planilla Excel en un sistema reproducible y verificable. Finalmente, la incorporación de la dimensión territorial, en particular a través de la localización geográfica de las tipologías comerciales y el cálculo de distancias reales de transporte, modifica de manera significativa la interpretación de las emisiones, revelando patrones espaciales y asimetrías entre tipologías que no eran evidentes bajo un enfoque agregado. Estos hallazgos refuerzan el valor metodológico del sistema desarrollado y contextualizan los resultados presentados en las secciones anteriores.

Desde una perspectiva metodológica, uno de los principales aportes del trabajo es la migración exitosa de una herramienta base sustentada en Excel hacia un sistema computacional estructurado, validado y auditable. La equivalencia numérica exacta con la planilla original asegura continuidad

metodológica con el proyecto Food Territories, mientras que la formalización del cálculo en un motor reproducible permite superar limitaciones críticas del enfoque manual, tales como la dificultad de validar resultados, versionar parámetros y comparar escenarios de manera consistente.

La integración de componentes geoespaciales representó el mayor desafío técnico del proyecto. Si bien la plataforma incorpora información espacial en distintas etapas del flujo, permitiendo al usuario ubicar manualmente las tipologías comerciales en el mapa, generar mapas de calor y evaluar rutas, el alcance SIG efectivo en los resultados finales es acotado. En la versión actual, la principal contribución geoespacial al cálculo de emisiones corresponde a la determinación de la distancia recorrida en el transporte de abastecimiento, la cual deja de ser una constante y pasa a depender explícitamente de la ubicación geográfica definida por el usuario para cada tipología. Esto introduce una dependencia territorial directa en una de las categorías más relevantes del modelo.

No obstante, otras capacidades SIG implementadas, como la generación de mapas de calor, la visualización de rutas y la evaluación espacial de puntos de acceso, no se encuentran actualmente integradas en la vista de resultados ni persisten como parte del resultado final del escenario. Estas funcionalidades operan como herramientas de análisis exploratorio dentro de la vista de mapa de proyecto, pero no forman parte del conjunto de resultados consolidados del sistema. Esta separación limita el alcance analítico SIG en términos de trazabilidad de resultados y comparación entre escenarios.

De forma similar, si bien la plataforma permite definir múltiples escenarios por proyecto, actualmente no existe una funcionalidad explícita que permita comparar resultados entre escenarios de manera directa. La comparación es implícita y depende de la interpretación manual de los resultados por parte del usuario, lo que restringe el potencial analítico del sistema para evaluaciones sistemáticas de alternativas.

En cuanto a la visualización de resultados, la plataforma entrega desgloses claros por tipología y categoría, dashboards y reportes exportables. Sin embargo, la vista de resultados no incorpora actualmente la información espacial asociada al escenario, como la ubicación de las tipologías, los mapas de calor ni las rutas de transporte. Esto limita la integración entre análisis numérico y análisis territorial en la etapa final de interpretación.

Finalmente, en términos de desempeño y escalabilidad, la arquitectura demostró tiempos de respuesta adecuados para escenarios de tamaño medio. No obstante, el procesamiento de capas geoespaciales de gran tamaño puede generar riesgos de *timeouts* cuando la infraestructura disponible es limitada, lo que constituye una restricción relevante para un uso intensivo o institucional del sistema.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la plataforma cumple de manera sólida su rol como herramienta de cálculo y validación de emisiones, pero que su potencial geoespacial y comparativo se encuentra parcialmente explotado en la versión actual. Estas limitaciones no invalidan los resultados, pero delimitan claramente su alcance y abren líneas concretas de mejora. Las limitaciones identificadas en esta sección se relacionan directamente con el cumplimiento parcial de los objetivos OE4 y OE5, cuyas extensiones se desarrollan explícitamente en el apartado de trabajo futuro.

5.2.2. Trabajo Futuro

A partir del análisis crítico del sistema y de las limitaciones identificadas, se proponen las siguientes líneas de trabajo futuro, directamente vinculadas con los alcances actuales del proyecto.

Integración plena SIG en los resultados

Una mejora prioritaria consiste en integrar explícitamente la información geoespacial en la vista de resultados. Esto incluye:

- incorporar la ubicación de tipologías comerciales en la visualización final del escenario,
- persistir y mostrar mapas de calor y rutas de transporte como parte de los resultados,
- permitir exportar capas SIG directamente asociadas a los resultados de emisiones.

Esta integración permitiría cerrar el ciclo entre análisis territorial y resultados cuantitativos, fortaleciendo la interpretación espacial de las emisiones.

Comparación explícita entre escenarios

El desarrollo de herramientas que permitan comparar escenarios de forma directa representa una extensión natural del sistema. Esto podría incluir:

- comparadores visuales entre escenarios,
- indicadores de diferencia absoluta y relativa,
- análisis de sensibilidad respecto a parámetros clave.

Estas funcionalidades fortalecerían el uso del sistema como herramienta de evaluación de alternativas y apoyo a la toma de decisiones.

Profundización del modelamiento de parámetros

Actualmente, varios parámetros del modelo se definen como constantes. Futuras versiones podrían:

- permitir parametrizar características de flotas de transporte (peso, tipo de combustible),
- integrar variabilidad temporal en consumos energéticos.

Optimización de rendimiento y escalabilidad

El procesamiento de capas geospaciales constituye uno de los cuellos de botella más relevantes del sistema. Para un uso institucional o con grandes volúmenes de datos, sería deseable:

- implementar preprocesamiento y simplificación automática de capas SIG,
- optimizar índices espaciales en PostGIS,
- incorporar procesamiento asíncrono para operaciones intensivas.

Estas mejoras reducirían la probabilidad de timeouts y permitirían trabajar con data-sets más pesados sin incrementar significativamente los recursos.

Mejoras en experiencia de usuario

Si bien la interfaz cumple con los requerimientos funcionales, futuras iteraciones podrían:

- mejorar la retroalimentación visual durante procesos largos,
- incorporar indicadores de estado y progreso,
- estandarizar estilos y reforzar accesibilidad.

En este contexto, es importante distinguir con claridad entre los resultados efectivamente alcanzados por el sistema en su versión actual y los usos potenciales que la plataforma podría habilitar en el futuro. Los resultados presentados en esta memoria corresponden a una herramienta validada para el cálculo reproducible de emisiones, con integración territorial parcial y visualizaciones orientadas a la interpretación numérica de escenarios. En cambio, funcionalidades como la comparación directa entre escenarios, la integración plena de resultados geospaciales en la vista final y el uso del sistema como soporte operativo para la planificación territorial corresponden a extensiones naturales del sistema, pero no forman parte de los resultados consolidados del presente trabajo.

En conjunto, estas líneas de trabajo futuro reflejan un camino claro de evolución desde una herramienta validada a nivel académico hacia un sistema más integrado, escalable y orientado a usos profesionales o institucionales.

Bibliografía

- [1] Cool Farm Tool. *Cool Farm Tool (Official Website)*. 2025. URL: <https://coolfarmtool.org/>.
- [2] Greenhouse Gas Protocol. *GHG Protocol Calculation Tools*. 2023. URL: <https://ghgprotocol.org/calculation-tools>.
- [3] ISO 14040: *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization, 2006.
- [4] ISO 14044: *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. International Organization for Standardization, 2006.
- [5] IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>.
- [6] IPCC. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/>.
- [7] J. Valenzuela-Levi et al. “Concentración de mercado y valorización de residuos: implicancias en transporte y emisiones”. En: *Revista Chilena de Ingeniería Ambiental* 45 (2024).
- [8] R. Muñoz-Soto et al. “Dinámicas de residuos post-COVID y efectos sobre GEI en municipios chilenos”. En: *Revista de Gestión Ambiental* 37 (2023).
- [9] F. Araya-Córdova et al. “Asignación eficiente de recursos para reciclaje municipal con enfoque de equidad”. En: *Estudios Urbanos y Territoriales* 29.2 (2021), págs. 45-67.
- [10] Christopher Mutel. “Spatial differentiation in life cycle assessment: a review”. En: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (2017), págs. 180-191.
- [11] M. Maesano et al. “GIS-based approach for the estimation of transport emissions”. En: *Environmental Modelling & Software* (2012).
- [12] QGIS Project. *QNEAT3 Documentation*. 2024. URL: <https://www.qgis.org/>.

- [13] Open Source Routing Machine (OSRM). *Project Overview*. 2024. URL: <https://project-osrm.org/>.
- [14] Christopher Mutel. *Brightway2: An open source framework for Life Cycle Assessment*. 2017. URL: <https://brightway.dev>.
- [15] GreenDelta. *openLCA software*. 2023. URL: <https://www.openlca.org>.
- [16] Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire y David W. Rhind. *Geographic Information Science and Systems*. Wiley, 2015.
- [17] PostGIS Project. *PostGIS Documentation*. 2025. URL: <https://postgis.net/documentation/>.
- [18] PostgreSQL Global Development Group. *PostgreSQL Documentation*. 2025. URL: <https://www.postgresql.org/docs/>.
- [19] FastAPI. *FastAPI Documentation*. 2025. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/>.
- [20] Google Cloud. *Cloud SQL for PostgreSQL Documentation*. 2025. URL: <https://cloud.google.com/sql/docs/postgres>.
- [21] IETF. *JSON Web Token (JWT)*. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7519>. 2015.
- [22] React. *React Documentation*. 2025. URL: <https://react.dev/>.
- [23] Google. *Maps JavaScript API: Heatmap Layer*. 2025. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/heatmaplayer>.
- [24] Google. *Maps JavaScript API: Directions*. 2025. URL: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/directions>.