

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		1 de 100

**PLANES DE MITIGACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PARA EL SECTOR
AGRÍCOLA COLOMBIANO APOYADO EN PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA**

JOSÉ ADRIÁN ALVARADO IMBACHI

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA DE SISTEMAS

POPAYÁN

2024

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		2 de 100

**PLANES DE MITIGACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PARA EL SECTOR
AGRÍCOLA COLOMBIANO APOYADO EN PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA**

JOSÉ ADRIÁN ALVARADO IMBACHI

Proyecto de Grado para optar al Título de
INGENIERO DE SISTEMAS

PhD. ÁNGELA MARÍA RODRÍGUEZ VIVAS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA UNICOMFACAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA DE SISTEMAS

POPAYÁN

2024

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		3 de 100

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		4 de 100

Dedicatoria

A mi madre y padrinos, por su incondicional apoyo y amor, quienes me enseñaron la importancia del esfuerzo y la dedicación.

A mis profesores y mentores, por su guía y paciencia a lo largo de mi formación académica.

A todos aquellos que, de alguna manera, han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. Este logro es también de ustedes.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		5 de 100

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido a la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, agradezco a mi madre y a mis padrinos por su amor incondicional, apoyo constante y por ser mi fuente de inspiración en todo momento.

A mis profesores y mentores, especialmente Ángela María Rodríguez Vivas por su valiosa guía, consejos y por compartir su vasto conocimiento, lo cual ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros, por su camaradería, apoyo emocional y por compartir conmigo los retos y alegrías de esta etapa académica.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una forma u otra, han contribuido a mi crecimiento personal y profesional. Este logro es el resultado de sus esfuerzos y dedicación.

Gracias a todos.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		6 de 100

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Formulación del problema.....	12
1.2 Justificación.....	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Productos alcanzados	16
1.5 Organización del Documento	17
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1 Marco conceptual	20
2.2 Marco Teórico	24
2.3 Trabajos Relacionados.....	29
2.3.1 <i>Estimación Huella de Carbono Generada por Actividades Agrícolas</i>	29
2.3.2 <i>Estimación y Mitigación Huella de Carbono Generada por Actividades Agrícolas</i> ...	33
CAPÍTULO 3. MODELO DE EMISIONES GEI PARA ACTIVIDADES AGRÍCOLAS	38
3.1 Metodología	39
3.2 Modelo del Sistema.....	42
3.2.1 <i>Grafo de estados</i>	44
CAPÍTULO 4. PLANES DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO GENERADOS CON PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA.....	48
4.1 Dominio del problema de Planificación Automática en PDDL 1.2	49
4.2 Dominio del problema de Planificación Automática en PDDL 2.1	51
CAPÍTULO 5. Evaluación	60
5.1 Instancia del Problema.....	60
5.1.1 <i>PDDL 1.2</i>	60
5.1.2 <i>PDDL 2.1</i>	62
5.2 Diagrama de flujo PDDL.....	64
5.3 Ambiente de Pruebas.....	69
5.4 Métricas.....	71

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		7 de 100

5.5	Resultados	72
5.6	Ventajas y desventajas de Planificación Automática	81
CAPÍTULO 6. Conclusiones y Trabajos Futuros		84
6.1	Implicaciones del trabajo en el contexto Social Local, Regional e Internacional	86
Bibliografía		89
Anexos		95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1	Funcionamiento de un Planificador de IA.....	22
Figura 2.1.2	Grafo no dirigido.....	23
Figura 2.1.3	Grafo dirigido.....	23
Figura 2.2.1	Espacio de Estados.....	26
Figura 2.2.2	Camino de Nodos Consecutivos	27
Figura 3.1.1	Procedimiento para la Construcción del Modelo STE y el Dominio PDDL.....	40
Figura 3.2.1	Estados de las emisiones de GEI en un cultivo en Colombia	42
Figura 3.2.2	Plan de mitigación de HC calculado por AP	43
Figura 3.2.3	AP aplicado a la mitigación de HC en actividades agrícolas	44
Figura 3.2.4	Grafo de estados Versión PDDL 1.2	45
Figura 3.2.5	Grafo de estados Versión PDDL 2.1	45
Figura 5.2.1	Diagrama de Flujo Parte A	65
Figura 5.2.2	Diagrama de Flujo Parte B	66
Figura 5.3.1	Entorno de pruebas.....	71

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		8 de 100

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.3.1 Mitigación de Emisiones de GEI en sector agrícola	35
Tabla 2.3.2 Acciones de mitigación de Emisiones de GEI en sector agrícola	36
Tabla 5.2.1 Plan de pruebas	67
Tabla 5.6.1 Ventajas y desventajas de AP	81

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 5.5.1 Tiempo de Planificación (ms) vs Objetos	74
Gráfica 5.5.2 Longitud del Plan vs Objetos	75
Gráfica 5.5.3 Costo vs Objetivo	77
Gráfica 5.5.4 Costo vs Objetos.....	79

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Datos de las pruebas	95
Anexo B. Resultados de ejecución del planificador ENHSP	98

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		9 de 100

Resumen

Las innumerables aplicaciones de la Inteligencia Artificial (IA) están revolucionando el mundo, como la toma de decisiones en organizaciones, las interacciones sociales, la educación, el turismo, las finanzas y la gestión agrícola, entre muchos otros. En particular, la agricultura ha experimentado importantes beneficios gracias a los algoritmos de IA, combinados con el Internet de las Cosas (IoT), en todas sus etapas (planificación y preparación, siembra, mantenimiento del cultivo, cosecha, postcosecha, y comercialización). Estos algoritmos pueden proporcionar información detallada sobre la salud de los cultivos, detectar enfermedades o plagas de manera temprana y recomendar el momento óptimo para la siembra o la cosecha. En este aspecto, el control de la Huella de Carbono (HC) generada por actividades agrícolas juega un papel crucial. Aunque las aplicaciones de la IA para transformar la agricultura son vastas, no existe un estudio enfocado en cómo aprovechar estas técnicas para mitigar la huella de carbono de las actividades agrícolas. Este proyecto realiza un estudio detallado del estado del arte en relación a cómo se está apostando al control de la huella de carbono en el mencionado contexto. A partir de dicho estudio, se ha generado un modelo basado en el Sistema de Transición de Estados, que permite aplicar la técnica de Inteligencia Artificial conocida como Planificación Automática para crear automáticamente planes de mitigación de huella de carbono en el entorno agrícola. Los resultados son prometedores, demostrando la escalabilidad de esta propuesta a nuevas líneas de productos.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		10 de 100

Abstract

The countless applications of Artificial Intelligence (AI) are revolutionizing the world, such as decision-making in organizations, social interactions, education, tourism, finance, and agricultural management, among many others. In particular, agriculture has experienced significant benefits thanks to AI algorithms, combined with the Internet of Things (IoT), in all its stages (planning and preparation, planting, crop maintenance, harvesting, post-harvest, and marketing). These algorithms can provide detailed information about crop health, detect diseases or pests early, and recommend the optimal time for planting or harvesting. In this regard, controlling the carbon footprint generated by agricultural activities plays a crucial role. Although the applications of AI to transform agriculture are vast, there is no focused study on how to leverage these techniques to mitigate the carbon footprint of agricultural activities. This project conducts a detailed study of the state of the art concerning the efforts to control the carbon footprint in the mentioned context. Based on this study, a model has been generated using the State Transition System, which allows applying the AI technique known as Automated Planning to automatically create carbon footprint mitigation plans in the agricultural environment. The results are promising, demonstrating the scalability of this proposal to new product lines.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		11 de 100

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos ambientales y sociales de nuestro tiempo, con consecuencias significativas para la estabilidad de los ecosistemas, la seguridad alimentaria y el bienestar humano. En respuesta a esta emergencia global, la comunidad internacional ha intensificado esfuerzos para mitigar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y promover prácticas sostenibles en todos los sectores económicos (FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2023).

En este contexto, el sector agrícola juega un papel crucial, dado que es tanto una fuente significativa de emisiones de GEI como un sector especialmente vulnerable a los impactos del cambio climático. Para abordar estos desafíos, se requieren estrategias integrales que permitan reducir las emisiones de GEI, aumentando así la resiliencia climática y promoviendo la sostenibilidad en la producción agrícola.

El presente proyecto de grado se enfoca en la gestión de las emisiones de GEI en el sector agrícola colombiano, con el objetivo de contribuir a los esfuerzos nacionales para alcanzar la neutralidad de carbono y promover la resiliencia frente al cambio climático (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Enmarcado en las políticas nacionales, incluyendo el CONPES 4069 y la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), el proyecto busca aprovechar técnicas de Inteligencia Artificial (IA) para fortalecer la gestión ambiental, mejorar la toma de decisiones y facilitar la transición hacia una economía baja en carbono promoviendo prácticas agrícolas sostenibles.

A través de la investigación aplicada y la colaboración con diversos actores del sector agrícola, se espera generar conocimiento y soluciones innovadoras que

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		12 de 100

contribuyan a la construcción de un futuro más sostenible y resiliente para Colombia y la región.

1.1 Formulación del problema

El sector agrícola es uno de los ejes económicos que mueve a Colombia, siendo la principal fuente de ingresos del territorio rural (DVA Go Further, 2023) (Junguito Bonnet, Caballero Argáez, Perfetti del Corral, López Enciso, & Leibovich Goldenberg, 2022). Según el Banco de la República, los principales productos en la economía del país están: las oleaginosas, el café, el algodón, el cacao, la caña de azúcar, el banano, el arroz, el maíz, la papa y las flores (Vargas Gaitán, 2016); todos estos productos agrícolas en niveles de producción intensivos con demandas estrictas en tiempo, al abundante consumo de agua, fertilizantes, electricidad y al incremento de residuos. Consecuentemente, las actividades para su producción incrementan la huella de carbono, entendida como la medida del impacto de todos los GEI en el medio ambiente producidos por nuestras actividades (individuales, colectivas, eventuales y de los productos), siendo el principal el Dióxido de Carbono (CO₂).

Particularmente, las actividades agrícolas contribuyen con el 13,5% de las emisiones de GEI a nivel mundial (Andrade, Segura, & Varona, 2015). Por tal motivo, la determinación y reducción de la huella de carbono en este sector se ha convertido en una prioridad para los gobiernos de las naciones. Estimar la huella de carbono de un producto agrícola implica trazar el límite del análisis, seleccionar metodologías de cuantificación, escoger datos aceptables, y factores de emisión apropiados (Arandias Puche, López, Soto Urdaneta, Ramos Sánchez, & Castillo De León, 2022).

En Colombia, ciertos estudios han estimado la huella de carbono de las actividades asociadas a la producción de arroz (González Meneses, Méndez Velásquez, & Izquierdo Bautista, 2014), caña de azúcar (Andrade, Segura, &

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		13 de 100

Varona, 2015), flores (Gutiérrez Fernández & Montoya, 2014), y silvicultura (López Mesa, Piedrahíta, & Castellanos Garzón, 2022) recopilando datos de las actividades emisoras de CO₂ (entre otros GEI) de la cadena de producción y distribución del cultivo a partir de estudios de campo, cuestionarios y entrevistas, en un determinado sitio geográfico del país. Sin embargo, estos estudios carecen de escalabilidad toda vez que, al realizarse de forma manual, la recopilación de datos está sesgada a un producto particular. Esto anula la posibilidad de replicar o adaptar el proceso de medición de la huella de carbono hacia otras líneas de producción agrícola. Así mismo, los planes de mitigación de emisiones de GEI propuestos son estáticos y limitados.

Ante el reto, hay estudios reportados dentro y fuera de nuestro país que establecen que la IA puede apoyar la reducción en la emisión de GEI a través del monitoreo y el seguimiento de los efectos generados en el cambio climático por el uso desmedido de energía (Wolf, y otros, 2022), hasta la implementación de mejores maneras de compartir información con los consumidores. En este sentido, es latente la necesidad de transformar los procesos de estimación y generación de planes de mitigación de GEI en el sector agrícola colombiano apoyándolos en tecnologías de IA.

La explotación de la rama de la IA conocida como Planificación Automática (AP, por sus siglas en inglés) permitiría diagnosticar las emisiones, lo cual, no sólo se enfoca en medir la huella de carbono, sino en clasificar las fuentes de emisión y su proyección en el tiempo para poder ser adaptados a diferentes contextos y con ello generar planes de acción y mitigación pertinentes en las diferentes líneas de producción agrícola.

Teniendo en cuenta este contexto, la pregunta planteada en la presente investigación es: ¿Cómo aprovechar técnicas de IA para apoyar el cálculo de

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		14 de 100

planes de mitigación de huella de carbono generada por actividades agrícolas en Colombia?

1.2 Justificación

Para evitar una interferencia peligrosa en el sistema global por emisiones de GEI, la humanidad está apostando a la mitigación del cambio climático. Se busca estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera, proporcionando tiempo suficiente para la adaptación de los ecosistemas al cambio climático. Los GEI, generados en gran parte por el uso excesivo de energía, combustibles fósiles, fertilizantes y agroquímicos en actividades agrícolas, representan una de las principales amenazas para la estabilidad climática global (Echeverri, 2006). Es esencial implementar medidas efectivas para reducir estas emisiones y mitigar sus impactos en el medio ambiente y la sociedad.

A nivel internacional, diversas iniciativas están siendo impulsadas para incentivar la disminución de la huella de carbono y promover prácticas sostenibles (Directorate-General for Environment, 2021). La Comisión Europea ha desarrollado una metodología para el cálculo de la huella de carbono que facilita la medición y comparación de las emisiones de diferentes actividades (Catalá Goyanes, 2014). En el Reino Unido, se están proponiendo medidas para reducir y compensar las emisiones de GEI de una actividad, producto, servicio, lo que fomenta la responsabilidad corporativa y la adopción de prácticas más sostenibles. En América Latina, países como Brasil están avanzando significativamente hacia la creación de mercados de carbono, que permiten la compensación de emisiones a través de proyectos de reducción y captura de carbono. En Colombia el gobierno está negociando los impactos y el soporte de gastos potencialmente generados por la implementación de las medidas proyectadas en Europa y los Estados Unidos (Núñez Monroy & Núñez Palacios, 2012).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		15 de 100

En este contexto, el proyecto de grado desarrollado está enfocado a la investigación aplicada para la gestión de las emisiones de GEI en el sector agrícola colombiano, motivado principalmente por el objetivo nacional de alcanzar carbono neutro, que resulte en la resiliencia climática (Gobierno de Colombia, 2021). Se pretende aportar a estrategias nacionales como el CONPES 4069: Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONPES, 2021), y Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC) (Mendieta, 2011), en las cuales se resalta el uso de las TIC como medio para la consolidación de territorios sostenibles, adaptados y resilientes.

1.3 Objetivos

Objetivo General

Crear planes de mitigación de huella de carbono para el sector agrícola de Colombia a partir de la estimación de sus emisiones de GEI, apoyados en la técnica Planificación Automática.

Objetivos Específicos

- Modelar matemáticamente las emisiones de GEI en cadenas productivas del sector agrícola colombiano mediante la parametrización de los factores influyentes.
- Aplicar la técnica de Planificación Automática para crear planes de mitigación de huella de carbono en una línea de productos agrícolas a partir del modelo generado.
- Evaluar el sistema de generación de planes en términos de escalabilidad (comportamiento frente al aumento de parámetros) y adaptabilidad a nuevas líneas de productos (es decir, flexibilidad frente a la modificación de parámetros).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		16 de 100

1.4 Productos alcanzados

I. Ponencia “SISTEMA PARAMETRIZADO PARA LA GESTIÓN DE ACTIVIDADES DE EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SECTORES AGRÍCOLAS DE COLOMBIA”

II Congreso Internacional Sóphic, “Ciencia para el Futuro e Integración de las Regiones” (con Memorias)

17 de agosto de 2023.

II. Póster “CREACIÓN DE PLANES DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO EN EL SECTOR AGRÍCOLA COLOMBIANO APOYADO EN PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA”

XII Congreso CIIMA – UnicomfacaUCA.

21 de septiembre de 2023.

III. Working Paper “PLANES DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA COLOMBIANO APOYADO EN PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA”

Sociedad de Doctores e Investigadores de Colombia - SOPHIC
(DOI: 10.5281/zenodo.10558265)

07 de diciembre de 2023

IV. Registro de Software “PDDL FOR CARBON FOOTPRINT MITIGATION PLANS”

Dirección Nacional de Derechos de Autor – DNDA Colombia (En Trámite / 1-2024-64430)

11 de junio de 2024 (Radicado)

V. Ponencia “CÁLCULO DE PLANES DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO PARA EL SECTOR AGRÍCOLA COLOMBIANO APOYADO EN PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA”

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		17 de 100

I Congreso de Medio Ambiente, Sostenibilidad y Desarrollo Agrícola – SoPhIC (A realizarse entre el 21 y 23 de agosto de 2024.)

En preparación. Envío de Resumen: 18 de julio de 2024

VI. Artículo “Exploiting AI-planning to calculate mitigation plans of CarbonFootprint generated by Agricultural Activities”

Journal Experts Systems with Applications (Q1)

En proceso. Fecha estimada de envío: julio de 2024

1.5 Organización del Documento

En el Capítulo 2 se presenta la conceptualización de dos áreas de intersección del proyecto: Huella de Carbono y Planificación Automática. La Huella de Carbono evalúa el impacto ambiental de sistemas de producción, mientras que la Planificación Automática se enfoca en resolver problemas mediante la automatización de secuencias de acciones. Se exploran conceptos fundamentales en ambas áreas, desde la definición de la Huella de Carbono y los gases de efecto invernadero hasta las metodologías de cálculo y estándares internacionales relevantes. Además, se discute la Planificación Automática, desde la conceptualización de problemas hasta la representación gráfica de estados y la evolución del lenguaje PDDL. Ambas áreas convergen en su importancia para abordar desafíos ambientales y tecnológicos contemporáneos. El capítulo incluye también trabajos relacionados que estiman la Huella de Carbono en actividades agrícolas y proponen estrategias de mitigación, proporcionando un análisis detallado de los cultivos, enfoques utilizados, fuentes de emisión identificadas y acciones de mitigación propuestas.

En el Capítulo 3 se explica la generación del modelo de emisiones de GEI en actividades agrícolas. Se establecen niveles de emisión del 1 al 10, representando diferentes magnitudes de impacto ambiental. Se propone un Sistema de Transición de Estados para evaluar y cuantificar estas emisiones. El

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		18 de 100

modelo identifica un estado inicial con altas emisiones de GEI y busca estrategias para alcanzar un estado objetivo con menores emisiones, utilizando acciones de mitigación específicas. El proceso para llegar a los códigos PDDL (Planning Domain Definition Language) implica análisis del dominio y requisitos, identificación de acciones y estados, definición del modelo de transición de estados y codificación en lenguaje PDDL. Se presentan grafos de estados y versiones preliminares en PDDL, mostrando la formulación y resolución del problema de mitigación de la huella de carbono agrícola.

En el Capítulo 4 se explora la generación práctica de planes de mitigación de huella de carbono mediante técnicas de planificación automática y el uso de los lenguajes PDDL 1.2 y PDDL 2.1. Cada versión de PDDL ofrece herramientas específicas para abordar las complejidades del problema. Se presentan dominios del problema detallados para ambas versiones, incluyendo tipos, predicados y acciones, con ejemplos como Incorporar_abono_organico y Sembrar_arboles. Estos códigos ilustran cómo traducir acciones y condiciones previas para la mitigación de la huella de carbono en cultivos agrícolas, demostrando la flexibilidad y precisión de PDDL. Los dominios completos del problema están disponibles para su consulta en GitHub (Alvarado Imbachi, 2024).

En el capítulo 5 se presenta la evaluación de la propuesta. Se describe la estructura de una instancia de problema en PDDL, detallando el encabezado para nombrar la instancia, su correspondiente dominio del problema y los objetos. También se especifican los estados iniciales, los objetivos del problema y el entorno de pruebas utilizado, destacando herramientas específicas como ENHSP para la planificación. Se presentan los resultados del plan de mitigación generado por ENHSP para las instancias especificadas, mostrando acciones para reducir las emisiones de los cultivos a niveles deseados. Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del proceso incluyen el tiempo de planificación, la longitud de la

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		19 de 100

planificación y el costo. Los resultados obtenidos a partir de diversas combinaciones de objetos y acciones se interpretan para proporcionar una visión clara sobre la eficiencia y efectividad de los enfoques de planificación automatizada aplicados.

En el capítulo 6 de este documento se ofrecen conclusiones basadas en los hallazgos obtenidos durante la investigación y se identifican áreas para futuras investigaciones y desarrollo, brindando una visión hacia adelante sobre posibles mejoras y aplicaciones adicionales.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		20 de 100

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

La Huella de Carbono es un indicador esencial para evaluar el impacto ambiental de sistemas de producción, abarcando actividades desde la obtención de materias primas hasta la gestión de residuos. Por otro lado, la Planificación Automática se centra en resolver problemas mediante el diseño de secuencias de acciones automatizadas. Este capítulo presenta un recorrido detallado por conceptos clave en ambas áreas, desde la definición de la Huella de Carbono y los gases de efecto invernadero hasta las metodologías de cálculo y estándares internacionales relevantes. Además, se explora la Planificación Automática, desde la conceptualización de problemas hasta la representación gráfica de estados y la evolución del lenguaje PDDL. Ambas áreas convergen en su relevancia para abordar desafíos ambientales y tecnológicos contemporáneos.

2.1 Marco conceptual

Huella de Carbono

Se define Huella de Carbono como un medio útil para estimar el impacto de un sistema de producción en el cambio climático. Este indicador ambiental es la suma de las emisiones de GEI causadas directa o indirectamente por un individuo, organización, evento o producto durante su ciclo de vida. A su vez, GEI se define como un fenómeno por el cual ciertos gases, como el CO₂, retienen parte de la energía emitida por el suelo tras haber sido calentado por la radiación solar (Romero-Gámez & Suárez-Rey, 2014) (Andrade, Campo, & Segura, 2014) (Parliamentary Office of Science and Technology POSTNOTE, 2006).

La huella de carbono de productos o servicios se obtiene mediante la medición de las emisiones de GEI que se generan en la cadena de producción, desde la obtención de materias primas hasta el tratamiento de residuos, pasando por la manufacturación y el transporte. A través de su análisis, las organizaciones

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		21 de 100

pueden reducir los niveles de contaminación mediante un cálculo estandarizado de emisiones que tienen lugar durante los procesos productivos (Asociación Española para la Calidad., s.f.). En el sector agrícola las emisiones de GEI, HC, son generadas principalmente por fertilizantes, agroquímicos y combustibles (Arandias Puche, López, Soto Urdaneta, Ramos Sánchez, & Castillo De León, 2022).

Planificación Automática

AP es una rama de la IA que explora cómo utilizar técnicas autónomas para resolver problemas de planificación y programación (Ghallab, Nau, Traverso, Automated Planning and Acting, 2016). Un *problema de AP* es aquel en el que existe un estado inicial (situación del mundo real), que deseamos convertir en un estado objetivo o deseado mediante la aplicación de un *plan*. Un *plan* en AP es un conjunto ordenado de posibles acciones calculadas automáticamente por un *planificador de IA* (Ordoñez, Caicedo, Villota, Rodríguez-Vivas, & Fonseca, 2022). La Figura 2.1.1 representa el concepto de un *problema de AP* donde el *dominio del problema de AP* (Σ) generaliza el *problema*, y la *instancia del problema AP* describe una situación particular de tal *dominio del problema de AP* (Σ) a través de su estado inicial (S_o) y objetivo (S_g).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		22 de 100

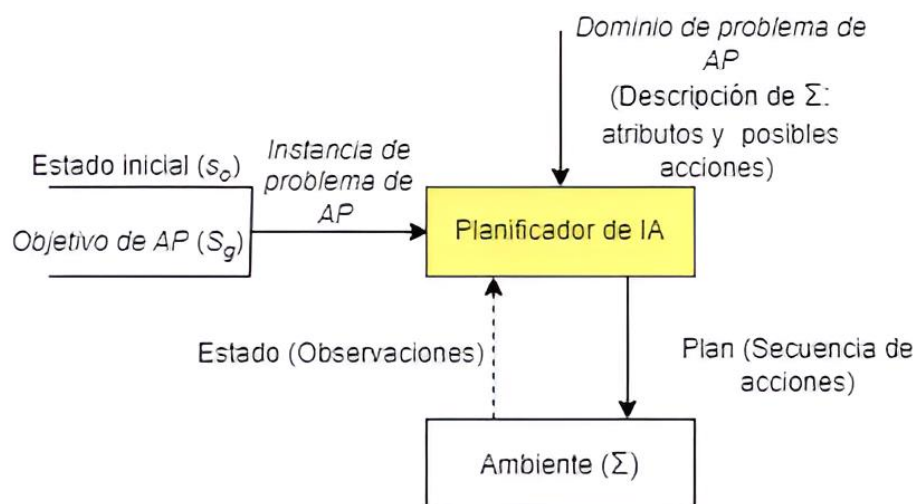


Figura 2.1.1 Funcionamiento de un Planificador de IA

Fuente: (Rodríguez-Vivas, Caicedo Rendon, Ordoñez, Campos, & Casilimas, 2023)

Grafo

Un grafo es una colección de vértices - *también llamados nodos* - y aristas – *también llamadas arcos* - que unen estos vértices. Formalmente, un grafo es una pareja de conjuntos $G = (V, A)$, donde V es el conjunto de vértices, y A es el conjunto de aristas. Este último es un conjunto de pares de la forma (u, v) tal que $u, v \in V$. En teoría de grafos, la forma de las aristas no es relevante, solo importa a qué vértices están unidas, la posición de los vértices tampoco importa (Anonymus, 2006).

Gráficamente, los vértices se representan por pequeños círculos o puntos sobre un plano, y las aristas por líneas o flechas, con el objetivo de unir los vértices. Las aristas pueden ser dirigidas o no. La Figura 2.1.2 representa un grafo no dirigido con 6 nodos y 7 aristas que unen dichos nodos. La Figura 2.1.3 representa el mismo grafo, pero con aristas dirigidas que representan situaciones del mundo real como por ejemplo el sentido de una vía vehicular.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		23 de 100

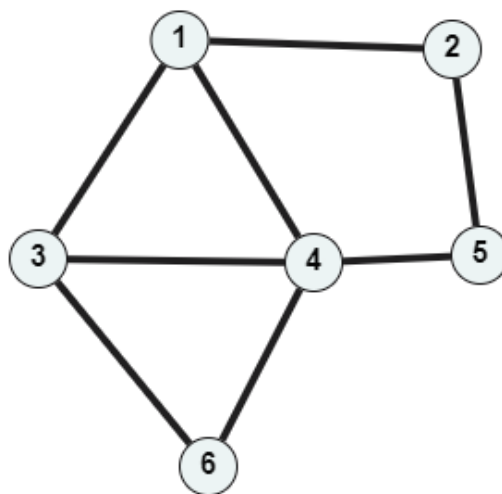


Figura 2.1.2 Grafo no dirigido

Nota: Elaboración propia

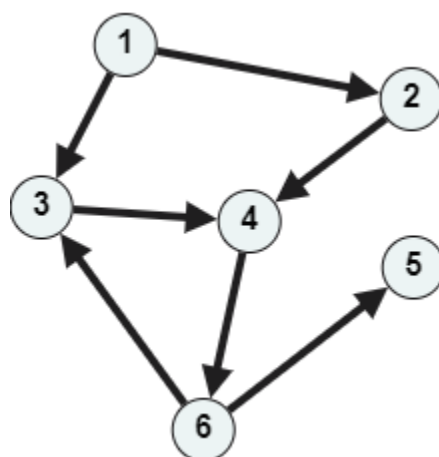


Figura 2.1.3 Grafo dirigido

Nota: Elaboración propia

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		24 de 100

2.2 Marco Teórico

Medida de la HC

Según (CARBON NEUTRAL +, 2022), existen distintos tipos de GEI, entre los que se encuentran en mayor proporción en la atmósfera: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄) y Óxido nitroso (N₂O). La estructura química de cada uno de estos gases hace que puedan absorber más o menos calor del sol. Esta capacidad de absorber calor del sol se denomina potencial de calentamiento global (PCG). Como forma de medición estandarizada, la HC se mide en gramos de dióxido de carbono equivalentes (gCO₂ eq) donde g: gramos, CO₂: dióxido de carbono, eq: equivalente(s). Esta unidad permite cuantificar el impacto ambiental de todos los GEI en un único indicador. Los gramos de CO₂ equivalente se calculan de la siguiente forma:

$$gCO_2eq = (gCO_2) * PCG(CO_2) + (gCH_4) * PCG(CH_4) + (gN_2O) * PCG(N_2O)$$

Otra forma de calcular HC según su clasificación de Alcances es:

- Alcance 1 - Emisiones directas.
- Alcance 2 - Emisiones indirectas.
- Alcance 3 - Emisiones indirectas fuera de los límites de la empresa.
- $gCO_2eq = Fe * A$
- gCO_2eq – Huella de Carbono
- Fe – Factor de emisión
- A – Actividad

Metodologías de HC y certificación:

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		25 de 100

Las fórmulas y factores de emisión anteriormente mencionados parten de un conjunto de normas, esquemas, sistemas y metodologías de cálculo de HC. La mayoría utiliza como base de cálculo los lineamientos y fórmulas desarrolladas por el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). Los siguientes estándares constituyen las principales metodologías de cálculo de HC:

- a. GHG Protocol (World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development, 1998).
- b. ISO 14.064/67 (ISO - International Organization for Standardization, 2006).
- c. PAS 2050/2060 (British Standards Institution (BSI), Carbon Trust y Defra (Department for Environment Food and Rural Affairs), 2010).

Modelo de Planificación Automática

Un *problema* de AP se define como un STE (Ghallab, Nau, & Traverso, Automated Planning and Acting, 2016). En este sentido, el *dominio de problema* AP modela el entorno como $\Sigma = (S, A, \gamma)$, donde S, A y γ denotan el conjunto finito de estados $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$, el conjunto finito de acciones $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ y la función de transición de estado $\gamma : S \times A \rightarrow 2^S$. Así, una *instancia de problema* AP se define formalmente como (Σ, s_0, S_g) , donde $s_0 \in S$ es el estado inicial y $S_g \subset S$ es el estado objetivo o conjunto de estados objetivo (también denominado objetivo de AP). Un planificador de IA como Dino (Piotrowski, Fox, Long, Magazzeni, & Mercurio, 2016) o ENHSP (Scala, Haslum, & Thiébaux, 2016), calcula una secuencia acciones $[a_x, a_y, \dots, a_p]$, tales que $a_x, a_y, \dots, a_p \in A$, que se pueden aplicar al dominio dando como resultado transiciones de estados $[s_0, s_x, \dots, s_p]$ tal que $s_p \in S_g$. La secuencia de acciones $[a_x, a_y, \dots, a_p]$ es el *plan* (Ghallab, Nau, & Traverso, Automated Planning and Acting, 2016) (Nau, 2007) (Russell, Norvig, & Davis, 2009). El lenguaje utilizado para representar en la

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		26 de 100

práctica dominios de problemas AP e instancias de problemas AP es PDDL (Planning Domain Definition Language) (Ghallab, y otros, 1998).

Grafo de Estados en Planificación Automática

Un problema de planificación puede ser descrito como un problema de búsqueda en grafos que inicia en el estado inicial y, aplicando una por unas acciones disponibles, se genera una transición de estados hasta llegar al estado objetivo. En AP esto se conoce como búsqueda en el espacio de estados (Guzmán & Jaime, 2003).

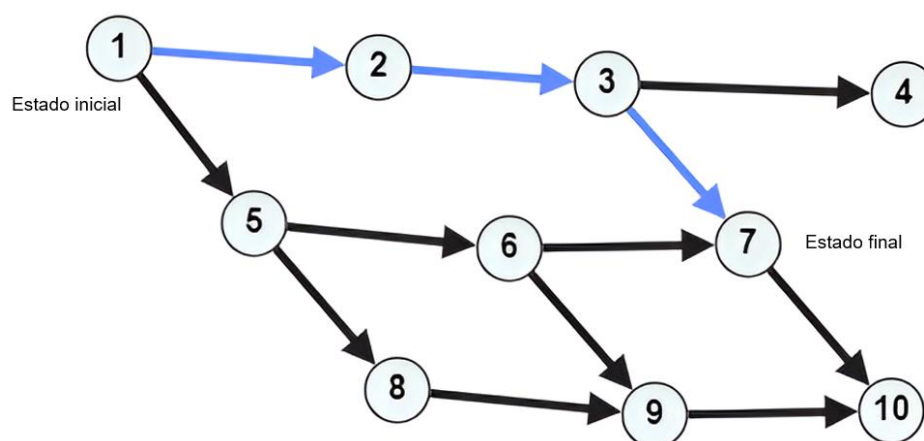


Figura 2.2.1 Espacio de Estados

Nota: Elaboración propia

Como lo muestra la Figura 2.2.1, en el espacio de estados de AP, o *grafo de estados*, cada vértice representa una situación particular del dominio, y cada arista que une dos vértices representa la aplicación de una acción. De este modo, el camino hasta el estado objetivo constituye el plan de acción para resolver el problema. Los planes obtenidos como resultado de una búsqueda en un espacio de estados son ordenados, en el sentido de que dos acciones se encuentran

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		27 de 100

ordenadas entre sí formando una única secuencia, como se muestra en la Figura 2.2.2.

Las aristas resaltadas con diferentes colores evidencian la existencia de múltiples trayectorias potenciales desde el Estado Inicial hasta el Estado Final. Entre estas opciones, el planificador seleccionará aquella que mejor se ajuste a las necesidades específicas.

La figura 2.2.2, representa un diagrama de estados y transiciones en el que cada nodo indica un estado específico, y las flechas de colores muestran las posibles transiciones entre estos estados. El nodo 1 es el "Estado inicial" y el nodo 10 es el "Estado final". Las flechas de distintos colores (azul, amarillo, rojo y negro) representan diferentes tipos de transiciones o caminos que se pueden tomar para pasar de un estado a otro. Por ejemplo, desde el estado 1, se puede transitar al estado 2 (flecha azul) o al estado 5 (flecha amarilla). A partir de ahí, hay múltiples rutas posibles para llegar al estado final, estado 10, lo que refleja diversas secuencias de acciones para llegar a un estado final.

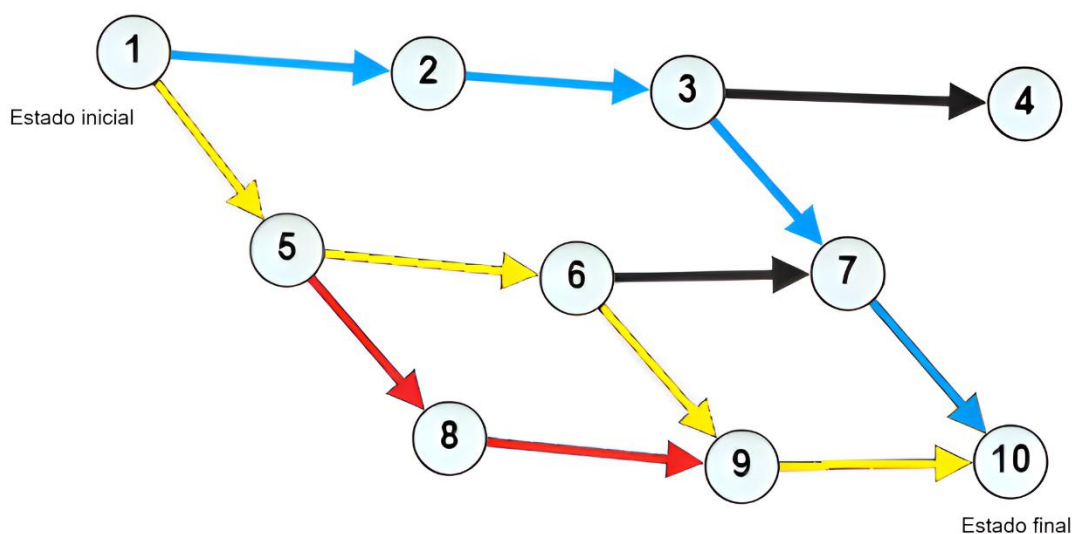


Figura 2.2.2 Camino de Nodos Consecutivos

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		28 de 100

Nota: Elaboración propia

PDDL

PDDL (*Planning Domain Definition Language*) es un lenguaje centrado en la acción que surgió en 1998 por Drew McDermott (McDermott D. M., 2000). Es una estandarización simple de sintaxis para expresar esta semántica familiar de acciones, utilizando condiciones previas y posteriores para describir la aplicabilidad y los efectos de las acciones. La sintaxis de PDDL está inspirada en Lisp basada en STRIPS (Fikes & Nilsson, 1971) y ADL (Pednault, 1987).

PDDL soporta dos tipos de ficheros: uno con la definición general del dominio del problema (domain) y otro con los elementos específicos de un problema concreto (problem-instance). Se entiende por dominio el conjunto de tipos de objetos que encontramos, los predicados o funciones, y las acciones posibles en el entorno del problema. La instancia de problema define los objetos concretos, el estado inicial (qué predicados son ciertos en el estado inicial), y el objetivo (los predicados que queremos que sean ciertos, y para los que necesitaremos realizar una serie de acciones). El resultado será una secuencia de acciones (expresadas en la misma nomenclatura PDDL, con parámetros instanciados) ordenada (algunas acciones pueden realizarse al mismo tiempo, al no existir conflicto entre ellas, o que pueden realizarse en un orden distinto) que al ser aplicadas trasladan al sistema del estado inicial al estado objetivo. En algunos casos no puede ser posible conseguir el objetivo, en ese caso el planificador debe indicarlo.

El lenguaje PDDL ha evolucionado para incorporar cambios que suelen coincidir con la celebración de competiciones de IPC (McDermott, 2000). Estos cambios se realizan con el fin de incluir opciones disponibles en distintos planificadores y adaptarse a los avances en los programas de planificación. Las versiones del lenguaje son:

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		29 de 100

- PDDL 1.2 (McDermott, y otros, 1998): Es la versión original, empleada en las competencias de 1998 y 2000. Establece la sintaxis y semántica del lenguaje.

- PDDL 2.1 (Fox & Long, 2003): Definida en la tercera competición de IPC de 2002. Esta versión introduce variables numéricas, métricas y acciones continuas o con duración en el tiempo. Suponen cambios importantes en la definición de problemas de planificación.

- PDDL 2.2 (Edelkamp & Hoffman, 2004): Definida en la cuarta competición IPC de 2004. Esta versión introduce predicados “derivados” (o calculados a partir de otros predicados). Se definen predicados que toman un determinado instante de tiempo, no necesariamente en el estado inicial.

- PDDL 3.0 (Gervini & Long, Plan Constraints and preferences in PDDL3, 2005), (Gervini & Long, Preferences and soft constraints in PDDL 3, 2006): En esta versión añaden restricciones para especificar trayectorias de estados, y preferencias, que sirven para el control del algoritmo de planificación.

- PDDL 3.1 (Helmert, 2008), (Kovacs, 2011): En esta versión fue definida en las competencias de IPC de 2008 y 2011. Introdujo *object-fluents*, las variables que pueden tomar valores de cualquier tipo. Suponía un cambio de bastante importancia semántica.

2.3 Trabajos Relacionados

2.3.1 Estimación Huella de Carbono Generada por Actividades Agrícolas

En Ecuador, tomaron como caso de estudio la Empresa Ecoroses S.A. en el año 2015. Calcularon la HC mediante dos metodologías: GHG Protocol y PAS 2050 y compararon los resultados de estas dos metodologías. Los factores de emisión fueron recopilados mediante IPCC y Ecoinvent v2.2. El resultado que obtuvieron de la HC fue de 3,75 kg CO₂eq/kg de rosa exportada, las fuentes de

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		30 de 100

emisión de GEI que más afectaron fueron: los productos agrícolas (37,7%), la energía eléctrica (13,3%) y el uso de combustibles fósiles (10,95%). Propusieron implementar buenas prácticas ambientales para reducir los GEI, como, el uso adecuado de fertilizantes, orgánicos, ahorro energético y biocombustibles (Guallasamin Constante & Simón-Baile, 2018), no se tienen datos suficientes por el cual realizaron la propuesta para reducir la HC de la empresa Ecoroses S.A.

Estimaron la HC en los cultivos de Quinua de los cantones Cayambe y Riobamba ubicados en los Andes ecuatorianos. En el estudio siguieron las directrices del IPCC 2006 para el Sector AFOLU y de Energía, para el Análisis de Ciclo de Vida de la quinua. Recolectaron los datos mediante entrevistas, observaciones en campo, análisis de muestra de suelo y fertilizantes. Para el cálculo, los datos fueron tabulados en Excel, los cuales contuvieron la actividad y factor de emisión. Sus resultados fueron que en Cayambe y Riobamba se emiten 468,56 kg CO₂eq/ha y 425,38 kg CO₂eq/ha respectivamente, debido al uso de combustibles fertilizantes (Pinzón Colmenares, 2017).

En dos veredas al sur del Huila eligieron una muestra de 25 predios cafeteros, con el fin de analizar la magnitud de las emisiones GEI y poder obtener las actividades contaminantes. Las metodologías que se emplearon en este estudio fueron el protocolo GEI 2001 y las directrices del IPCC de 2019. Mediante encuestas identificaron y realizaron los cálculos obteniendo como resultado que la actividad con mayor emisión en la producción de café fue la labor de fertilización con un valor de 390175,24 kg CO₂-eq, el uso de combustible con una emisión 4600,22 kg CO₂-eq, una emisión por uso de electricidad de 301,71 kg CO₂-eq y por último la emisión por el uso de pesticidas de 157,47 kg CO₂-eq. La fuente de emisión con menor porcentaje de contaminación fue la aplicación de pesticidas, generando un porcentaje de menos de 1% de las emisiones totales (Babativa Contreras & González Meneses, 2020).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		31 de 100

En MAVALLE S.A.S. empresa del sector agrícola, industrial y comercial ubicada en el municipio de Puerto López, Meta, realizaron procesos de medición de huella de carbono donde identificaron emisiones de GEI con el fin de implementar estrategias que permitan la gestión y disminución de la huella de carbono. Como metodología para llevar a cabo la estimación de la huella de carbono para el proceso de caucho neutral, utilizaron la metodología descrita en el protocolo GHG y en la ISO:2018 (Organización Internacional de Normalización (ISO), 2018). La mayor contribución a la huella de carbono la realizaron las emisiones de proceso, con la aplicación de fertilizantes (3.624,35 Ton CO₂e) y urea (891,88 Ton CO₂e) a las plantaciones, uso de GLP (486,30 Ton CO₂e) para el proceso de secado del caucho y el uso de Diesel (402,54 Ton CO₂e) para el movimiento de maquinaria agrícola en el transporte de la materia prima (Gutiérrez Cruz, 2021).

Estimaron la HC producida por las actividades agrícolas del cultivo de banano (*Musa paradisiaca*) en el país Ecuador, durante los años 2020 y 2021. Aplicaron la metodología del Protocolo de GEI (Greenhouse Gas Protocol GHG Protocol) para calcular las emisiones directas generadas por el uso de combustibles de fuentes móviles y la aplicación de fertilizantes, así como las emisiones indirectas generadas por el consumo eléctrico y el consumo de combustible para la fumigación aérea. Los resultados mostraron que durante el 2020 aproximadamente el 12,86% de las emisiones de GEI correspondieron al consumo de combustible por parte de las bombas hidráulicas, el 71,45% a las emisiones generadas por la aplicación de fertilizantes, el 2,76% al consumo de energía eléctrica y el 12,92% al consumo de combustible para la fumigación aérea. Durante el año 2021, los resultados fueron del 13,91%, 68,93%, 2,74% y 14,37% respectivamente, correspondiendo al consumo de combustible por parte de las bombas, aplicación de fertilizantes, consumo de electricidad y fumigación aérea. Concluyeron que la diferencia en la HC en los años en estudio se debió a

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		32 de 100

las medidas implementadas para reducir la cantidad de fertilizantes sintéticos, como la recolección de datos de cada actividad generadora de emisiones, específicamente, durante los años 2020 y 2021 aplicaron 436.610 kg y 367.960 kg respectivamente, de fertilizante sintético. El N, como ingrediente activo, fue en promedio del 24,97% y 26,50% para los años 2020 y 2021, respectivamente. Estos valores los utilizaron para estimar la cantidad total de N aplicado en el campo para el período en estudio multiplicando la cantidad total de kilogramos de cada fertilizante por el porcentaje de N estimado en cada uno (Espinoza & Martínez, 2022).

Realizaron una estimación de la generación HC en el cultivo y producción de cacao (*Theobroma cacao*) en la finca Santa Cruz en Puerto Quito, Ecuador, con el objetivo de desarrollar medidas y estrategias para reducir las emisiones GEI. Emplearon modelos alométricos (que representan una alternativa matemática para estimar el crecimiento en altura de especies agroforestales (Agrosavia, s.f.)), evaluando las raíces con el modelo del IPCC y midiendo las emisiones de GEI a través de análisis de masa y energía expresado en balance. Llevaron a cabo una entrevista a trabajadores y administradores de la finca para recopilar información sobre las acciones realizadas dentro del sistema agrícola. Utilizaron un diseño experimental donde los tipos de cultivo fueron el factor de estudio, con tres tratamientos: i) Monocultivo de Cacao, ii) Cultivo de cacao asociado con árboles maderables, iii) Cultivo de cacao asociado con árboles frutales. Consideraron factores de emisión como energía, agua, combustibles, residuos y fertilizantes. Los resultados mostraron que los tratamientos investigados almacenaron carbono en la biomasa arriba y abajo del suelo en un rango de 27,25 ton/ha a 131,59 t/ha. El tratamiento de cacao asociado con árboles maderables demostró ser el mejor almacenador de carbono arriba y abajo del suelo, con un valor de 131,59 t/ha, en comparación con los otros dos tratamientos: 27,25 t/ha para el monocultivo de cacao y 79,97 t/ha en el cultivo de cacao

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		33 de 100

asociado con árboles frutales (ARMAS ROSERO, GUALOTUÑA PAUCAR, & ULLOA VACA, 2023).

Estimaron la HC del Maní Blancheado en la compañía Prodeman, provincia de Córdoba, Argentina, utilizando la base de datos Ecoinvent (ECOINVENT, 2023), la herramienta utilizada para ordenar los datos y realizar el cálculo de la HC fue una plantilla especialmente diseñada en Microsoft EXCEL por INTI. De esta manera, obtuvieron un inventario de emisores de GEI de la compañía tales como producción, transporte de materia prima, las cuales recabaron datos por el uso de fertilizantes, agroquímicos, combustibles, semillas, residuos de cosechas, energía eléctrica. La metodología utilizada fue GreenHouse Gas Protocol (GHG) con la cual se determinó que las emisiones de GEI durante la campaña 2018-2019 fueron de 40.964,17 t CO₂ eq. De las cuales, 9522 (23.2%) correspondieron a la producción industrial. Debido a la falta de información de HC en Maní Blancheado establecieron comparaciones con cultivos anteriores referentes al mismo tipo de cultivo, dicha comparación la realizaron de manera cualitativa por motivos de confidencialidad (Senzini, 2022).

2.3.2 Estimación y Mitigación Huella de Carbono Generada por Actividades Agrícolas

La Tabla 2.3.1 agrupa trabajos en los cuales además de calcular la huella de carbono, se han abordado esfuerzos por proponer planes/programas de mitigación. En la Tabla 2.3.1, la columna "Cultivo" identifica específicamente los tipos de cultivos analizados, la columna "Enfoque" establece los modelos y técnicas utilizadas para reducir las emisiones, destacando la diversidad de enfoques aplicados, la columna "Fuentes de Emisión" destaca los factores clave que contribuyen a las emisiones de GEI en el contexto agrícola, proporcionando una base para la formulación de acciones específicas. Por último, la columna

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		34 de 100

"Acciones de Mitigación" presenta de manera sistemática las medidas concretas y viables destinadas a mitigar las emisiones identificadas.

Llevaron a cabo un análisis estrategias de mitigación de emisiones de GEI en el cultivo de palma aceitera en la región de Ucayali, Perú, utilizaron las directrices del IPCC del 2006 para los inventarios nacionales de GEI. Convocaron a un grupo de agricultores para recabar información sobre las actividades que generan emisiones de GEI, dividiendo el ciclo del cultivo en tres fases: preparación del terreno, fase de mantenimiento y fase productiva. Identificaron las principales actividades realizadas en cada fase, como la preparación del terreno, la siembra, la fertilización, el manejo de plagas, las podas y la cosecha, recopilando información sobre el uso de insumos, procedencia, frecuencia de la labor, maquinaria y gestión de residuos, entre otros aspectos. Las principales fuentes de emisión identificadas fueron el uso de fertilizantes, la manufactura de insumos, el transporte de insumos, el manejo de residuos inorgánicos y el uso de maquinaria, siendo la urea la mayor fuente de emisión debido a su alta magnitud en la manufactura, representando cerca del 50% de las emisiones. Posteriormente, realizaron una revisión detallada de artículos científicos y literatura gris, junto con la colaboración de expertos, para identificar prácticas con potencial de mitigar las emisiones provenientes del cultivo de palma aceitera, como la promoción de la siembra en áreas ya intervenidas, la implementación de sistemas agroforestales, la optimización de la aplicación de fertilizantes y enmiendas, y el aumento de la producción por unidad de área. Según los resultados obtenidos, las prácticas de manejo del cultivo con potencial de mitigación deben centrarse en la reducción de emisiones por el cambio en el uso del suelo, que representan hasta el 99% de las emisiones en cultivos establecidos en áreas recién deforestadas, seguido por el manejo de los fertilizantes y su transporte (Romero, Pareja, Tristán, Sánchez Choy, & Quintero, 2022).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		35 de 100

Tabla 2.3.1 Mitigación de Emisiones de GEI en sector agrícola

Trabajo	Cultivo	Enfoque	Fuentes de Emisión
(Morales A, Zorogastúa C., de Mendiburu, & Quiroz, 2018)	Maíz, camote, yuca	Modelo CCAFS-Mitigation Options Tools (CCAFS-MOT): para la reducción energética proveniente de los combustibles fósiles, reducción del impacto ambiental.	F, P, C , uso energético por la labranza.
(Cayambe Terán & Escobar Barragán, 2022)	Palma aceitera (Elaeis guineensis)	Metodología de ponderación lineal del método Ashby.	R, E, C, P, F
(Lomelí Rodríguez, 2020)	Aguacate (Persea americana, Hass)	ISO 14064, mediante 3 fases, estimación de HC, estudios ecofisiológicos, propuestas de acciones para la mitigación, respectivamente.	E, C, F, R , empaque de producto
(Ramírez C., Munar F., García Núñez, Mosquera Montoya, &	Aceite de palma crudo (APC)	Análisis ciclo de vida.	Cambio en el uso del suelo, Efluente de planta de beneficio de aceite de palma, F, E, C

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		36 de 100

Faaij, 2021)			
--------------	--	--	--

Fuente: Elaboración propia

- **F** - Fertilizante
- **P** - Plaguicidas
- **C** - Combustible
- **R** - Residuos
- **E** - Energía eléctrica

Tabla 2.3.2 Acciones de mitigación de Emisiones de GEI en sector agrícola

Trabajo	Acciones de mitigación
(Morales A, Zorogastúa C., de Mendiburu, & Quiroz, 2018)	IRA, AO, L, IN
(Cayambe Terán & Escobar Barragán, 2022)	RFN, RC, IC,
(Lomelí Rodríguez, 2020)	RC, UE, UMR
(Ramírez C., Munar F., García Núñez, Mosquera Montoya, & Faaij, 2021)	RC

Fuente: Elaboración propia

- **IRA** - Incorporar residuos agrícolas
- **AO** - Abonos orgánicos
- **L** - Labrar
- **IN** - Inhibidores de nitrificación
- **RFN** - Reducir entrada de fertilizantes nitrogenados sintéticos
- **RC** - Reducir el consumo de combustible y energía
- **IC** - Intercalar cultivos

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		37 de 100

- **UE** - Usar energía alternativa
- **UFO** - Usar alternativas de fertilizantes orgánicos
- **UMR** - Usar Material Reciclado

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		38 de 100

CAPÍTULO 3. MODELO DE EMISIONES GEI PARA ACTIVIDADES AGRÍCOLAS

En este capítulo se aborda el modelo de huella de carbono en el sector agrícola colombiano. Se detallan la metodología, los materiales y métodos empleados para evaluar y cuantificar las emisiones de GEI mediante un Sistema de Transición de Estados. Para el presente proyecto, se han definido niveles de emisión en una escala del 1 al 10, representando diferentes magnitudes de impacto ambiental, desde un 10% hasta un 100% de capacidad de emisión. A través de este modelo se identifica el estado inicial con altas emisiones de GEI y se trazan estrategias para alcanzar un estado objetivo con menores emisiones, utilizando un conjunto de acciones de mitigación específicas. Estas acciones, fundamentadas en estudios previos, son visualizadas en grafos de estados y versiones preliminares en PDDL, demostrando el proceso para la formulación y resolución del problema de mitigación de la huella de carbono agrícola.

El proceso para llegar a los códigos PDDL implicó varias etapas que pueden resumirse de la siguiente manera:

- **Análisis del dominio y los requisitos del problema:** Se llevó a cabo un análisis exhaustivo del dominio del problema, en este caso, la mitigación de la huella de carbono en el sector agrícola colombiano. Esta fase incluyó la identificación de los estados posibles de emisiones de GEI, las acciones que pueden mitigar estas emisiones y los objetivos de mitigación.
- **Identificación de acciones y estados:** A partir de la literatura existente y la experiencia en el campo, se identificaron las acciones posibles que pueden ayudar a mitigar las emisiones de GEI en el sector agrícola colombiano. Además, se definieron los estados posibles de

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		39 de 100

emisiones de GEI, que van desde un nivel bajo al inicio hasta un nivel alto al final.

- Definición del modelo de transición de estados: Se definió un modelo de transición de estados que describe cómo las acciones afectan los niveles de emisiones de GEI en un cultivo. Esta fase se basó en la comprensión de cómo cada acción contribuye a la mitigación de las emisiones y en qué medida.
- Traducción a PDDL: Una vez comprendidos claramente los estados, acciones y relaciones entre ellos, se procedió a traducir esta información al lenguaje de planificación PDDL. Esto implicó la definición de tipos, predicados, funciones y acciones en el código PDDL.
- Validación y ajuste: Después de la codificación en PDDL, se llevó a cabo una validación del modelo para asegurarse de que refleja correctamente el problema y sus requisitos. Esta etapa implicó revisar el código, realizar pruebas y realizar ajustes según fuera necesario para mejorar la precisión y la eficacia del modelo.

En resumen, el proceso involucró un análisis detallado del problema, la identificación de acciones y estados relevantes, la definición de un modelo de transición de estados y finalmente la traducción de este modelo a código PDDL. Cada etapa fue fundamental para garantizar que el modelo refleja con precisión el problema de mitigación de la huella de carbono en el sector agrícola colombiano y pudiera ser utilizado eficazmente por un planificador de IA para generar planes de mitigación.

3.1 Metodología

La figura 3.1.1, muestra la metodología llevada a cabo para el desarrollo del presente proyecto. Cabe anotar que es una metodología propia, la cual se estableció y refinó con la experiencia del propio desarrollo del proyecto.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		40 de 100

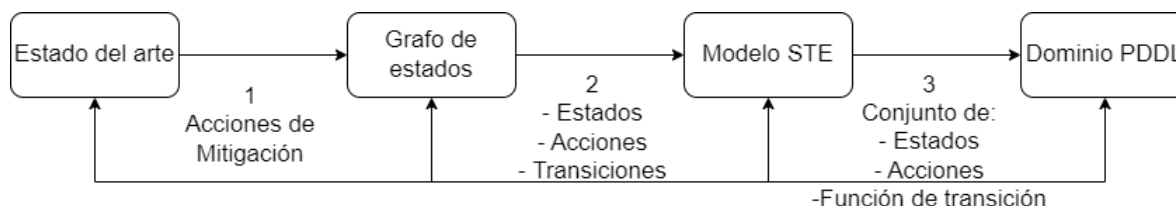


Figura 3.1.1 Procedimiento para la Construcción del Modelo STE y el Dominio PDDL

Nota: Elaboración propia

Inicialmente, se realizó un exhaustivo estado del arte alrededor de la temática de huella de carbono generada por actividades agrícolas, dentro y fuera de Colombia. Algunas preguntas guía fueron: ¿cómo se ha cuantificado la generación de huella de carbono generada por actividades agrícolas? ¿qué utilidad tiene la información de fuentes de emisoras de GEI en aras de su mitigación? ¿qué planes/programas/acciones se han tomado para mitigar dicha generación? ¿qué herramientas tecnológicas han sido usadas para calcular dichos planes/programas/acciones? ¿qué relevancia tiene el tipo de cultivo (producto) en las emisiones y correspondiente mitigación de GEI? A lo largo del estudio de los artículos relacionados se identificaron acciones de mitigación de huella de carbono recurrentes, entre uno y otro estudio, las cuales son el insumo para la siguiente etapa en la metodología, es decir, Grafo de Estados.

El Grafo de Estados se construyó estableciendo como ‘estados’ diferentes niveles de emisión de GEI por cultivo. Se asumieron los niveles en una escala de 0% a 100%. Dicho de otro modo, estos niveles hacen alusión a qué tanta contaminación está generando un determinado cultivo. Las acciones recibidas del módulo anterior se convierten en las aristas de este grafo, dando lugar así a las transiciones, es decir, cambios de estado. En este sentido, esta etapa entrega a la siguiente: estados, acciones y transiciones.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		41 de 100

El Modelo del Sistema basado en el Sistema de Transición de Estados (STE) (Ghallab, Nau, & Traverso, Automated Planning, 2004) se realiza a partir de la información entregada en la anterior etapa, definiendo así mismo el tamaño de cada conjunto (estados, acciones) y la función de transición. El modelo consta de un conjunto de acciones y una función de transiciones. Los estados son definidos por nosotros y serán explicados en las subsecciones del presente capítulo. Las acciones se derivan del análisis de los trabajos relacionados como se muestran en las tablas 1 y 2. Finalmente, los conjuntos definidos para el modelo se traducen al lenguaje PDDL en el cual el Dominio del Problema queda codificado.

Como lo indica la Figura 3.1.1, en cada etapa del proyecto, fue retroalimentada con resultados de la etapa anterior. Por ejemplo, la ejecución de las pruebas en la última etapa (Dominio PDDL) permitió identificar falencias en las etapas anteriores. Esto llevó a reiniciar la búsqueda de artículos para ampliar la cantidad de acciones de mitigación, que marcan la evolución del proyecto en todas las etapas subsiguientes. De esta forma, se identificó que la versión PDDL 1.2 no era suficiente para cumplir con los requerimientos del grafo, modelo y dominio, y se optó por migrar a PDDL2.1. La versión PDDL 1.2 solo permite definir acciones con precondiciones y efectos especificados como conjuntos literales, es decir, predicados que pueden ser verdaderos o falsos. Por otro lado, la versión PDDL 2.1 permite el uso de valores numéricos y el manejo de recursos basados en métricas. Esto último fue crucial para nuestro proyecto, ya que se utilizó para reducir el nivel de emisiones de HC con el menor presupuesto posible, una capacidad que no está disponible en PDDL 1.2. Además, PDDL 2.1 incluye la posibilidad de definir acciones con valores numéricos y optimización de recursos, lo que permitió una planificación más precisa y efectiva.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		42 de 100

3.2 Modelo del Sistema

En el contexto del análisis de la huella de carbono del sector agrícola colombiano, se han establecido estados en escala de 1 al 10, representando cada uno representando un nivel de emisión de huella de carbono. Estos niveles se ilustran en una escala visual, como se muestra en la Figura 3.2.1. Por ejemplo, el estado inicial, marcado en verde, indica emisiones de GEI equivalentes al 10%, mientras que el último estado, marcado en rojo, representa emisiones que alcanzan el 100% de dicha capacidad, denotando un nivel significativamente alto de impacto ambiental. Esto significa que la actividad agrícola en cuestión está produciendo una alta cantidad de emisiones de GEI, contribuyendo considerablemente al calentamiento global y al cambio climático debido a las prácticas agrícolas empleadas.

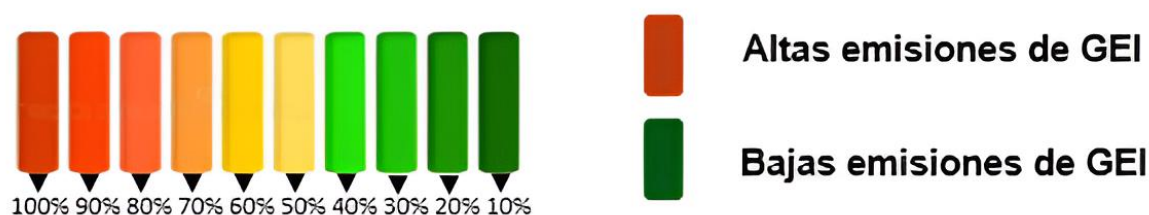


Figura 3.2.1 Estados de las emisiones de GEI en un cultivo en Colombia

Nota: Elaboración propia

De acuerdo al estudio de los trabajos relacionados, condensado en la Tabla 2.3.1 y Tabla 2.3.2, algunas acciones consideradas para mitigar la HC en el sector agrícola colombiano son:

- **Incorporar_labranza_combinada**
- **Usar_inhibidores_de_nitrificacion**
- **Incorporar_abono_organico**
- **Sembrar_arboles**
- **Intercalar_cultivos**

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		43 de 100

- **Reducir_combustible**

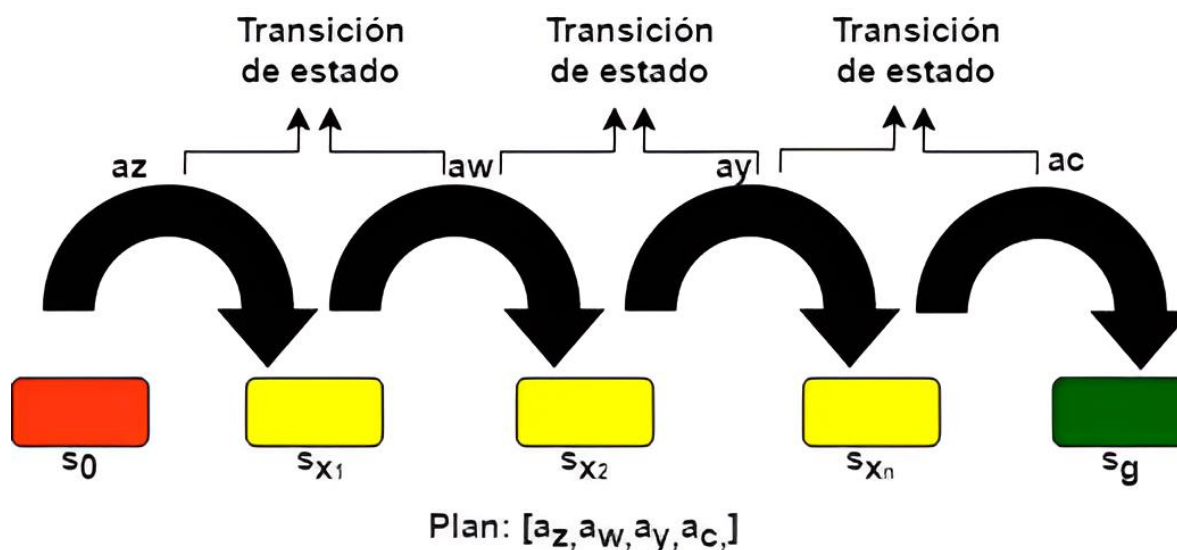


Figura 3.2.2 Plan de mitigación de HC calculado por AP

Nota: Elaboración propia

La Figura 3.2.2 representa transiciones desde un estado inicial hasta un estado objetivo. El bloque rojo representa el estado inicial (s_0) el cual es no deseado por sus altas emisiones de GEI mientras que el bloque amarillo representa un estado intermedio y el bloque verde representa el estado objetivo (s_g) o deseado por sus bajas emisiones de GEI. Las flechas indican transiciones de estado, los cuales tienen lugar únicamente por la aplicación de una de las acciones anteriormente mencionadas, que en conjunto conforman un plan. Es decir, en la Figura 3.2.2, el Plan conformado por las acciones $[s_0, s_{x1}, s_{x2}, s_{xn}, s_g]$ generará las transiciones de estado (a_z, a_w, a_y, a_c) que llevará al cultivo del estado inicial -no deseado – s_0 al estado objetivo s_g .

La Figura 3.2.3 muestra nuestra adaptación del modelo de AP al contexto de la mitigación de la HC generada por actividades agrícolas. De acuerdo a la

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		44 de 100

Figura 3.2.3, un estado inicial está dado por altas emisiones de GEI y un estado objetivo, por emisiones de GEI inferiores al estado inicial.

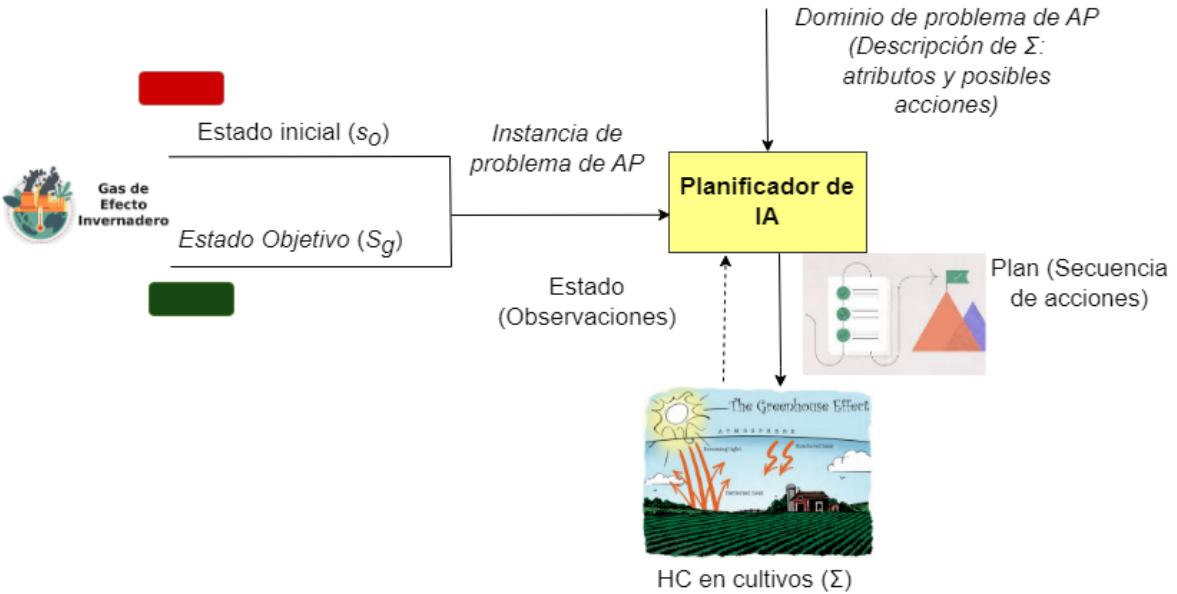


Figura 3.2.3 AP aplicado a la mitigación de HC en actividades agrícolas

Nota: Elaboración propia

3.2.1 Grafo de estados

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		45 de 100

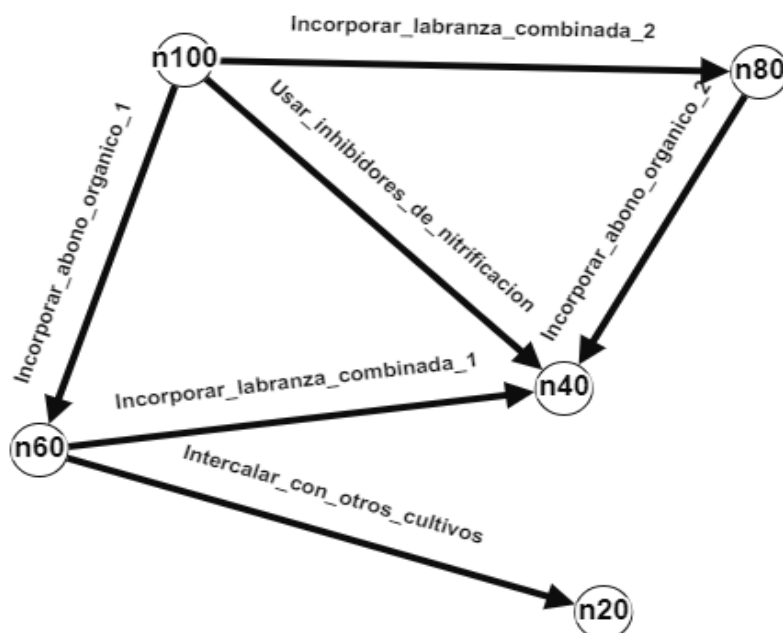


Figura 3.2.4 Grafo de estados Versión PDDL 1.2

Nota: Elaboración propia

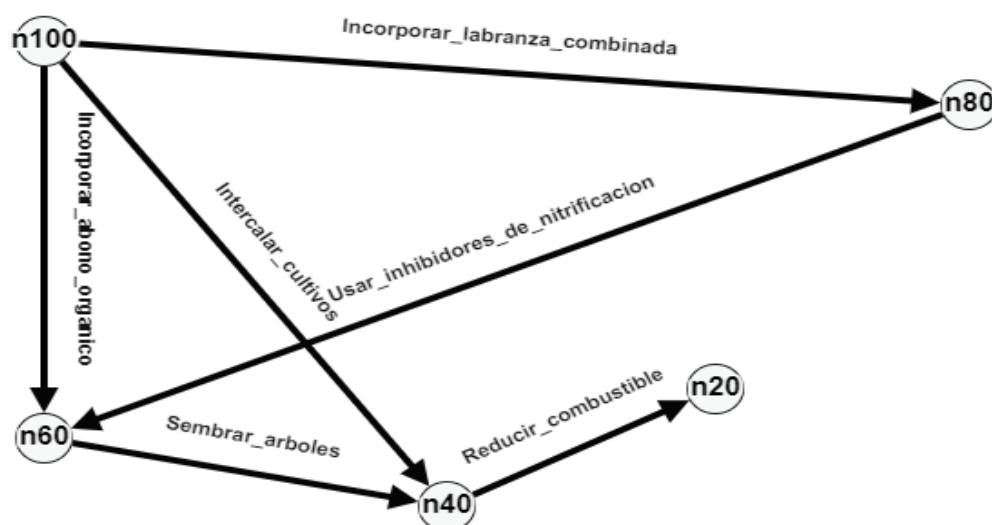


Figura 3.2.5 Grafo de estados Versión PDDL 2.1

Nota: Elaboración propia

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		46 de 100

Las Figura 3.2.4 y 3.2.3, muestran una versión preliminar del Grafo de Estados que representa el espacio de estados para mitigación de huella de carbono en el sector agrícola colombiano. En este espacio de estados, el planificador de IA buscará un camino de aristas que conduzca desde un estado inicial (no deseado) hasta un estado objetivo.

La aplicación de acciones como las mencionadas en la Sección 2.3, disminuye los niveles de GEI de un determinado cultivo. GEI. Por ejemplo, como lo describe la Figura 3.2.4, la acción *Incorporar_abono_organico_1* mitiga en un 40% los niveles de GEI, la acción *Uso_Inhibidores_de_nitrificacion*, mitiga un 60% de los niveles de GEI, la acción *Intercalar_labranza_combinada_2*, mitiga un 20% de los niveles de GEI, la acción *Incorporar_abono_organico_2*, mitiga un 40% de los niveles de GEI, la acción *Incorporar_labranza_combinada_1*, mitiga un 20% de los niveles de GEI, la acción *Intercalar_con_otros_cultivos*, mitiga un 40% de los niveles de GEI.

Formulación del Problema basado en el Sistema de Transición de Estados

La generación de HC en un cultivo de Colombia está dada por $\Sigma = (S, A, \gamma)$, donde:

$S = \{s1, s2, s3, s4, s5\}$ son los niveles de emisiones de GEI generados por dicha actividad, es decir, s1 representa un nivel de emisiones del 10% respecto a una contaminación total y s5 representa un nivel de emisiones del 100%.

$A = \{a1, a2, a3, a4, a5, a6\}$ son las posibles acciones que, aplicadas a Σ , generan transiciones entre los estados de S. Estas son:

- a1: Incorporar_labranza_combinada
- a2: Usar_inhibidores_de_nitrificacion
- a3: Incorporar_abono_organico
- a4: Sembrar_arboles

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		47 de 100

a5: Intercalar_cultivos

a6: Reducir_combustible

Para un cultivo en particular, en un momento dado se tiene una instancia de problema dada por (Σ, so, Sg) , donde $so \in S$ es un nivel de emisión de GEI que se desea reducir, mientras que $Sg \in S$ es el nivel de emisiones de GEI al cual se desea llegar en el cultivo, como se observa en la Figura 3.2.2.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		48 de 100

CAPÍTULO 4. PLANES DE MITIGACIÓN DE HUELLA DE CARBONO GENERADOS CON PLANIFICACIÓN AUTOMÁTICA

En este capítulo se ahonda en la creación práctica de planes de mitigación de la huella de carbono, generados mediante técnicas de planificación automática y lenguaje PDDL. Este capítulo constituye un hito en el proceso de investigación, en el que los resultados teóricos y los algoritmos de planificación se convierten en acciones concretas y aplicables.

En el proyecto de planificación automática se trabajaron dos versiones de PDDL: PDDL 1.2 y PDDL 2.1, cada una con sus propias características y capacidades específicas. La razón principal para trabajar con ambas versiones radica en las necesidades y complejidades del dominio del problema que se estaba abordando.

- PDDL 1.2: Esta versión de PDDL es más antigua y ofrece una representación más básica del dominio del problema. Se centra en la descripción de tipos, predicados y acciones con precondiciones y efectos. Es adecuada para problemas de planificación que no requieren modelar relaciones numéricas complejas o estados del mundo que cambian de manera continua.
- PDDL 2.1: Por otro lado, PDDL 2.1 es una versión más reciente que introduce capacidades adicionales de modelado. En particular, permite el uso de funciones para representar relaciones numéricas entre los objetos del dominio, así como la especificación de requisitos y extensiones que pueden adaptarse mejor a las necesidades específicas del problema. Además, ofrece una mayor flexibilidad en la representación de acciones con efectos más complejos, incluidos los cambios en funciones numéricas a lo largo del tiempo.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		49 de 100

La decisión de trabajar con PDDL 2.1 se basó en la necesidad de modelar aspectos cuantitativos del dominio del problema, como el presupuesto asociado a ciertos objetos del dominio, así como la complejidad de las interacciones entre las acciones y el estado del mundo. PDDL 2.1 ofrece herramientas más avanzadas para modelar este tipo de situaciones, lo que puede resultar en una representación más precisa y flexible del dominio del problema. Además, el uso de PDDL 2.1 puede facilitar la resolución de problemas de planificación más complejos y realistas.

4.1 Dominio del problema de Planificación Automática en PDDL 1.2

Dominio del problema de Planificación Automática

Un dominio de problema *AP* se refiere al conjunto de posibles estados, acciones y restricciones que caracterizan un problema específico de planificación. En términos simples, describe el entorno en el que un agente o sistema de planificación debe operar para alcanzar un objetivo deseado. A continuación, se presentan las secciones que constituyen un dominio de AP en código PDDL 1.2. El código de cada una de estas secciones es el resultado del análisis de Estado del Arte, Modelo y Grafo de Estados presentados en los capítulos anteriores.

Types: En el Código 1.1, el encabezado del dominio del problema AP incluye el nombre de identificación **mitigacion-huella-carbono**, en la línea de los tipos se especifica los tipos de objetos que existirán en este dominio.

Código 1.1: Types del dominio del problema de AP

```
(define (domain mitigacion-huella-carbono)
  (:types
    cultivo nivel_emisiones emission - object
  )
)
```

Predicates: En esta sección, los hechos booleanos se denominan predicados. En el Código 1.2, las dos primeras líneas del código indican una

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		50 de 100

relación que establece en qué estado y el nivel de emisión se encuentra un cultivo específico. El predicado accesible se relaciona con la accesibilidad de un cultivo en una determinada emisión y el predicado siguiente se usa para modelar la transición entre diferentes niveles de emisiones en el dominio.

Código 1.2: Predicates del dominio del problema de AP

```
(:predicates
  (en ?c - cultivo ?n - emission)
  (nivel_emision ?c - cultivo ?n - nivel_emisiones)
  (accesible ?c - cultivo ?x ?y - emission)
  (siguiente ?n1 ?n2 - nivel_emisiones)
)
```

Actions: Una acción PDDL comprende parámetros, condiciones previas y efectos. Los parámetros definen sobre qué tipos estamos realizando una acción. Las condiciones previas son una serie de hechos, conjunciones y disyunciones que deben satisfacerse para que se aplique la acción. Los efectos definen qué hechos deben establecerse como verdaderos o falsos o cambiar su valor numérico cuando se aplica una acción. En el Código 1.3, se define como nombre a la acción `usar_inhibidores_de_nitrificación`, seguido de los parámetros el cual se toma un cultivo con dos estados de emisión y dos niveles de emisiones, estos parámetros se utilizan para especificar el contexto en el que se realiza la acción. Las precondiciones deben cumplirse para que la acción sea ejecutable, las precondiciones son condiciones que deben ser verdaderas en el estado actual para que la acción tenga sentido. Se inicia en un cultivo con un estado inicial de emisión, luego se indica que el cultivo es accesible en las coordenadas de emisión inicial y emisión objetivo, posteriormente se indica un nivel de emisión a un cultivo, y por último la sección de siguiente indica un nivel de emisiones inicial sigue a otro nivel de emisión objetivo.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		51 de 100

Los efectos indican cómo cambiará el estado del dominio después de ejecutar la acción. La primera línea de los efectos, indica que el cultivo ya no estará en la emisión inicial y la siguiente línea indica que está en la emisión objetivo, pasa igualmente con las líneas de nivel de emisión.

Código 1.3: Action del dominio del problema de AP

```
(: action usar_inhibidores_de_nitrificación
  :parameters (?c - cultivo ?so ?sg - emission
    ?ne-so ?ne-sg - nivel_emisiones)
  :precondition (and
    (en ?c ?so)
    (accesible ?c ?so ?sg)
    (nivel_emision ?v ?ne-so)
    (siguiente ?ne-so ?ne-sg)
  )
  :effect (and
    (not (en ?c ?so))
    (en ?c ?sg)
    (not (nivel_emision ?c ?ne-so))
    (nivel_emision ?c ?ne-sg)
  )
)
```

4.2 Dominio del problema de Planificación Automática en PDDL 2.1

La diferencia principal entre PDDL 2.1 y PDDL 1.2 radica en las capacidades adicionales de modelado que ofrece PDDL 2.1 en comparación con su predecesor.

- **Funciones vs. Predicados:** En PDDL 1.2, se utilizan principalmente predicados para representar relaciones booleanas entre los objetos del dominio. Sin embargo, en PDDL 2.1 se introducen las funciones, que permiten modelar relaciones numéricas entre los objetos del dominio. Esto ofrece una mayor flexibilidad para modelar aspectos cuantitativos del problema de planificación. En el ejemplo proporcionado, en PDDL 1.2 se utilizan predicados

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		52 de 100

para representar el nivel de emisión de un cultivo y su accesibilidad en diferentes estados, mientras que en PDDL 2.1 se usan funciones para representar el nivel de emisión y el presupuesto asociado a un cultivo.

- **Acciones más expresivas:** En PDDL 2.1, las acciones pueden tener efectos más complejos que en PDDL 1.2. Por ejemplo, en el código proporcionado para PDDL 2.1, las acciones tienen efectos que involucran la modificación de funciones numéricas (por ejemplo, el nivel de emisión y el presupuesto total usado) además de los cambios en predicados. Esto permite modelar de manera más precisa cómo las acciones afectan al estado del mundo.

- **Requisitos y Extensiones:** PDDL 2.1 introduce la capacidad de especificar requisitos y extensiones que pueden adaptarse mejor a las necesidades específicas del dominio de planificación. En el ejemplo dado, se especifica que el dominio del problema AP en PDDL 2.1 requiere el uso de los requisitos `:typing`, `:strips`. Estos requisitos indican que se permite el uso de tipos, acciones con efectos simplificados (strips).

En el proyecto, la decisión de codificar en PDDL 2.1 probablemente se tomó debido a la necesidad de modelar aspectos cuantitativos del problema de planificación (como el presupuesto asociado a un cultivo, utilizando la métrica para minimizar el presupuesto total usado) y la complejidad de las interacciones entre las acciones y el estado del mundo. PDDL 2.1 ofrece herramientas más avanzadas para modelar este tipo de situaciones, lo que puede resultar en una representación más precisa y flexible del dominio del problema.

Types: En el Código 2.1, el encabezado del dominio del problema AP incluye el nombre de identificación "mitigacion-hc", donde en la línea de tipos se especifican los tipos de objetos que existirán en este dominio.

Código 2.1: Types del dominio del problema de AP

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		53 de 100

```
(define (domain mitigacion-hc)
  (:requirements :typing :strips :fluents)
  (:types cultivo)
```

Functions: Las funciones son constructos que representan relaciones numéricas entre las variables del dominio de planificación. Permiten modelar aspectos cuantitativos de un problema de planificación, como la cantidad de recursos utilizados, el costo de ejecutar acciones o cualquier otra métrica numérica relevante para el problema. En el Código 2.2, la primera función, nivel-emision, indica el nivel de emisión de un cultivo específico; la segunda función, presupuesto, está vinculada al presupuesto asociado a dicho cultivo. Finalmente, la función presupuesto-total-usado representa el total del presupuesto que se ha utilizado.

Código 2.2: Predicates del dominio del problema de AP

```
(:functions
  (nivel-emision ?c - cultivo)
  (presupuesto ?c - cultivo)
  (presupuesto-total-usado)
)
```

Actions: En el código 2.3, la acción Incorporar_abono_organico representa la implementación de una técnica que incorpora abono orgánico en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 20.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe estar entre 500 y 999 (mayor o igual a 500 y menor a 1000).

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos:

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		54 de 100

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 20.
- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 500.
- Aumenta el presupuesto total usado en 500.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante la incorporación de abono orgánico, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

Código 2.3: Action Incorporar_abono_organico del dominio del problema de AP

```
(:action Incorporar_abono_organico
  :parameters (?c - cultivo)
  :precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 20)
    (>= (presupuesto ?c) 500)
    (< (presupuesto ?c) 1000))
  :effect (and
    (decrease (nivel-emision ?c) 20)
    (decrease (presupuesto ?c) 500)
    (increase (presupuesto-total-usado) 500))
)
```

En el código 2.4, la acción Incorporar_labranza_combinada representa la implementación de una técnica de labranza combinada en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 10.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe ser mayor o igual a 100.

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos:

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 10.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		55 de 100

- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 100.
- Aumenta el presupuesto total usado en 100.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante la labranza combinada, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

Código 2.4: Action Incorporar_labranza_combinada del dominio del problema de AP

```
(:action Incorporar_labranza_combinada
  :parameters (?c - cultivo)
  :precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 10)
    (>= (presupuesto ?c) 100))
  :effect (and
    (decrease (nivel-emision ?c) 10)
    (decrease (presupuesto ?c) 100)
    (increase (presupuesto-total-usado) 100))
)
```

En el código 2.5, la acción Intercalar_cultivos representa la implementación de una técnica de intercalación de cultivos en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 50.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe ser mayor o igual a 300.

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 50.
- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 300.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		56 de 100

- Aumenta el presupuesto total usado en 300.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante la intercalación de cultivos, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

Código 2.5: Action Intercalar_cultivos del dominio del problema de AP

```
(:action Intercalar_cultivos
  :parameters (?c - cultivo)
  :precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 50)
    (>= (presupuesto ?c) 300))
  :effect (and
    (decrease (nivel-emision ?c) 50)
    (decrease (presupuesto ?c) 300)
    (increase (presupuesto-total-usado) 300))
)
```

En el código 2.6, la acción Usar_inhibidores_de_nitrificacion representa la implementación de una técnica que utiliza inhibidores de nitrificación en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 25.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe ser mayor o igual a 250.

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos:

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 25.
- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 250.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante el uso de inhibidores de nitrificación, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		57 de 100

Código 2.6: Action Usar_inhibidores_de_nitrificacion del dominio del problema de AP

```
(:action Usar_inhibidores_de_nitrificacion
  :parameters (?c - cultivo)
  :precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 25)
    (>= (presupuesto ?c) 250))
  :effect (and
    (decrease (nivel-emision ?c) 25)
    (decrease (presupuesto ?c) 250))
)
```

En el código 2.7, la acción Reducir_combustible representa la implementación de una técnica para reducir el uso de combustible en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 15.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe ser mayor o igual a 150.

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos:

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 15.
- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 150.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante la reducción del uso de combustible, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

Código 2.7: Action Reducir_combustible del dominio del problema de AP

```
(:action Reducir_combustible
  : parameters (?c - cultivo)
  : precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 15)
    (>= (presupuesto ?c) 150))
)
```

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		58 de 100

```

      :effect (and
        (decrease (nivel-emision ?c) 15)
        (decrease (presupuesto ?c) 150))
    )

```

En el código 2.8, la acción Sembrar_arboles representa la implementación de una técnica de siembra de árboles en un cultivo específico. Para que esta acción se pueda llevar a cabo, se deben cumplir las siguientes precondiciones:

- El nivel de emisión del cultivo debe ser mayor o igual a 5.
- El presupuesto disponible para el cultivo debe ser mayor o igual a 50.

Cuando la acción se ejecuta, tiene los siguientes efectos:

- Reduce el nivel de emisión del cultivo en 5.
- Reduce el presupuesto disponible para el cultivo en 50.

Esta acción permite mitigar el impacto ambiental del cultivo mediante la siembra de árboles, a un costo específico en términos de presupuesto disponible para el cultivo.

Código 2.8: Action Sembrar_arboles del dominio del problema de AP

```

(:action Sembrar_arboles
  :parameters (?c - cultivo)
  :precondition (and
    (>= (nivel-emision ?c) 5)
    (>= (presupuesto ?c) 50))
  :effect (and
    (decrease (nivel-emision ?c) 5)
    (decrease (presupuesto ?c) 50))
)

```

Durante el desarrollo de este proyecto, se ha creado una serie de códigos en PDDL que respaldan las investigaciones y objetivos. Todos estos recursos están disponibles en el repositorio de GitHub. Se invita a revisarlos para obtener más información sobre cómo se abordaron los desafíos del proyecto y cómo se

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		59 de 100

organizó el trabajo. Se espera que estos recursos sean útiles para quienes los consulten. Los dominios e instancias del problema completos se pueden consultar en el repositorio de GitHub (Alvarado Imbachi, 2024).

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		60 de 100

CAPÍTULO 5. Evaluación

El desarrollo de sistemas de planificación y optimización requiere una cuidadosa definición de los problemas y sus respectivas instancias. En este contexto, PDDL se ha convertido en una herramienta fundamental para la formalización de dominios y problemas en el campo de la planificación automatizada. En este apartado, nos centraremos en los resultados obtenidos al emplear PDDL 1.2 y PDDL 2.1 para modelar instancias de problemas específicos. Se analizarán tanto la definición de los objetos y estados iniciales como los objetivos planteados. Además, se presentará el entorno de pruebas utilizado para el desarrollo de este proyecto, destacando las herramientas específicas empleadas y las decisiones de configuración que respaldaron la eficiencia y efectividad del proceso de planificación.

5.1 Instancia del Problema

5.1.1 PDDL 1.2

Las instancias de problema de AP permiten realizar expresiones de dominio de problema de AP para una situación particular. En PDDL, una instancia de problema AP comprende secciones a saber, objetos, inicio y objetivo. La sección de objetos crea instancias de los tipos. La sección de inicio se da cuenta de los hechos en So. La sección Objetivo instancia los hechos en Sg.

En el Código 1.4 se define el encabezado para nombrar la instancia y su correspondiente dominio del problema y luego los objetos, en el ejemplo se tienen como objetos: arroz y café del cultivo, n100, n80, n60, n40, n20 de la emisión y nCien nOchenta nSesenta nCuarenta nVeinte de los niveles de las emisiones.

Código 1.4: Objetos de la instancia del problema de AP

(define (problem huella-carbono)

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		61 de 100

```
(:domain mitigacion-huella-carbono)
(:objects
  arroz cafe - cultivo
  n100 n80 n60 n40 n20 -emision
  nCien nOchenta nSesenta nCuarenta nVeinte -
  nivel_emisiones
)
```

El Código 1.5, ejemplifica los hechos del estado inicial de la instancia del problema conforme se asignaron en los predicados del dominio del problema.

Código 1.5: Estado inicial de la instancia del problema de AP

```
(:init
  (en arroz n100)
  (en cafe n80)
  (nivel_emision arroz nCien)
  (nivel_emision cafe nOchenta)
  (siguiente nCien nOchenta)
  (siguiente nOchenta nSesenta)
  (siguiente nSesenta nCuarenta)
  (siguiente nCuarenta nVeinte)
  (accesible arroz n100 n80)
  (accesible arroz n80 n40)
  (accesible cafe n80 n60)
  (accesible cafe n100 n60)
  (accesible cafe n60 n40)
)
```

El Código 1.6 ejemplifica los hechos del estado objetivo, la intención es mitigar los niveles de emisión para el cultivo del arroz a emisiones de 40 % y mitigar los niveles de emisión para el cultivo de café a emisiones del 40%.

Código 1.6: Estado objetivo de la instancia del problema de AP

```
(:goal (and (en arroz n40)
             (en cafe n40)
           )
)
```

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		62 de 100

5.1.2 PDDL 2.1

En el Código 2.9 se define el encabezado para nombrar la instancia y su correspondiente dominio del problema y luego los objetos, en el ejemplo se tiene como objeto: café del cultivo.

Código 2.9: Objetos de la instancia del problema de AP

```
(define (problem problem-hc)
  (:domain mitigacion-hc)
  (:objects
    palma yuca papa platano - cultivo
  )
```

El Código 2.10, ejemplifica los hechos del estado inicial de la instancia del problema conforme se asignaron en las funciones del dominio del problema.

Código 2.11: Estado inicial de la instancia del problema de AP

```
(:init
  (= (nivel-emision palma) 70)
  (= (nivel-emision yuca) 65)
  (= (nivel-emision papa) 100)
  (= (nivel-emision platano) 90)
  (= (presupuesto palma) 6000)
  (= (presupuesto yuca) 6000)
  (= (presupuesto papa) 6000)
  (= (presupuesto platano) 6000)
  (= (presupuesto-total-usado) 0)
)
```

El Código 2.12 ejemplifica los hechos del estado objetivo, con la intención de reducir los niveles de emisión del cultivo de café a 80, utilizando el menor presupuesto posible. La métrica busca minimizar el presupuesto total usado, prefiriendo aquellas acciones que logren el estado objetivo con el menor gasto.

En el lenguaje PDDL 2.1, se introdujo la capacidad de definir una métrica que permitiera evaluar la calidad de las soluciones generadas por el planificador.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		63 de 100

Esto se logra mediante la especificación de la métrica dentro de la definición del problema o dominio (Russell, Norvig, & Davis, 2009).

(i) Relación con PDDL 2.1 y funciones:

En PDDL 2.1, la métrica se relaciona estrechamente con las funciones, que son expresiones matemáticas definidas en el dominio que pueden cambiar su valor a lo largo de la ejecución del plan. Estas funciones pueden ser utilizadas en la definición de la métrica para cuantificar ciertos aspectos del plan, como el costo total, la calidad de la solución, entre otros.

(ii) Necesidad para el modelo:

Se evaluó la necesidad de incluir la métrica en este modelo para evaluar la calidad de las soluciones generadas por el planificador en términos de un criterio específico. En este caso, se decidió minimizar el presupuesto-total-usado, lo que permite controlar y reducir los costos asociados con las acciones ejecutadas en el plan.

(iii) Valor agregado a la solución:

La inclusión de la métrica en este modelo proporciona varios beneficios y valor agregado a nuestra solución:

- **Evaluación de la calidad del plan:** Permite evaluar la calidad del plan generado por el planificador en términos de un criterio específico, en este caso, el presupuesto total utilizado.
- **Control sobre los recursos:** Al minimizar el presupuesto total utilizado, se puede controlar y reducir los recursos necesarios para llevar a cabo las acciones en el plan, lo que puede ser crucial en entornos donde los recursos son limitados o costosos.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		64 de 100

- **Optimización del plan:** La capacidad de minimizar la métrica permite optimizar el plan para alcanzar el objetivo deseado con la menor cantidad de recursos posibles, lo que puede conducir a soluciones más eficientes y rentables.

Código 2.12: Estado objetivo de la instancia del problema de AP

```
(:goal (and
  (= (nivel-emision palma) 20)
  (= (nivel-emision yuca) 15)
  (= (nivel-emision papa) 0)
  (= (nivel-emision platano) 10)
)
)
(:metric minimize (presupuesto-total-usado)))
```

5.2 Diagrama de flujo PDDL

La figura siguiente figura representa un diagrama de flujo que detalla el proceso de toma de decisiones para reducir las emisiones de GEI utilizando diversas acciones dependiendo del nivel de emisión inicial y el presupuesto disponible:

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		65 de 100

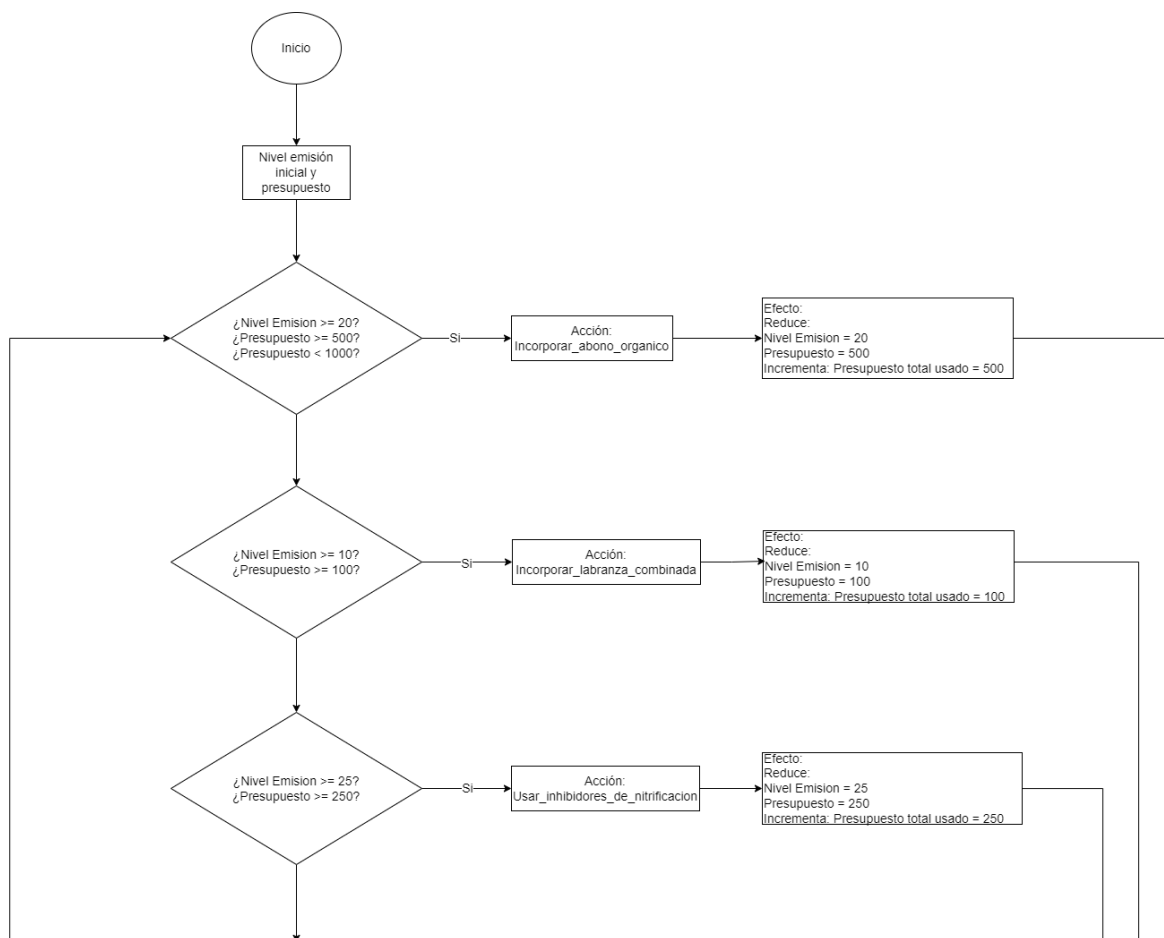


Figura 5.2.1 Diagrama de Flujo Parte A

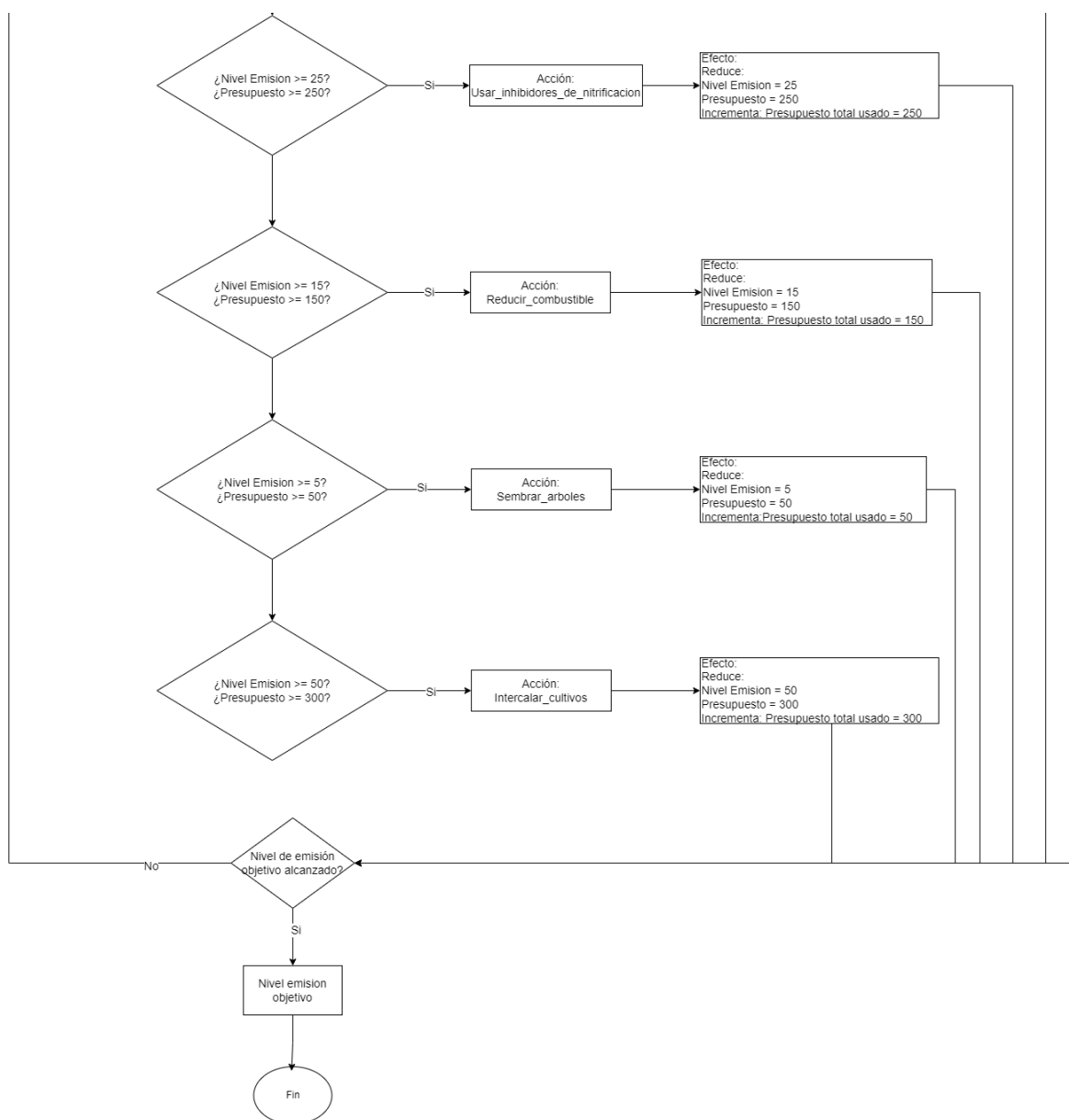


Figura 5.2.2 Diagrama de Flujo Parte B

Nota: Elaboración propia

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		67 de 100

Tabla 5.2.1 Plan de pruebas

Parámetro	Valor y unidades
Objects (objetos)	1,2,3,4, tipos de cultivos
Cantidad acciones	3, 6
Goal (Meta)	90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10
Presupuesto	1000, 2000, 6000
Presupuesto total usado	Metric
Nivel emisión por acción	20, 10, 50, 25, 15, 5

Fuente: (Rodriguez-Vivas, Caicedo Rendon, Ordoñez, Campos, & Casilimas, 2023)

- **Objetos:** Representan los cultivos a los que se aplican los planes de mitigación de emisiones de GEI. Por ejemplo, se aplicaron planes de mitigación de niveles de emisión a:

- 1 objeto, correspondiente a un cultivo.
- 2 objetos, correspondientes a dos cultivos.
- 3 objetos, correspondientes a tres cultivos.
- 4 objetos, correspondientes a cuatro cultivos.

- **Cantidad acciones:** Este aspecto se refiere al número y diversidad de acciones disponibles para reducir las emisiones de GEI en cada cultivo. La variedad de acciones proporciona flexibilidad en la implementación de estrategias de mitigación, permitiendo adaptarse a las condiciones específicas de cada situación. Cada acción de mitigación puede tener diferentes impactos en términos de eficacia, costo y practicidad, lo que resalta la importancia de seleccionar cuidadosamente las acciones más adecuadas para alcanzar los objetivos de reducción de emisiones. La

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		68 de 100

cantidad de acciones se refiere al número de acciones de mitigación disponibles para reducir las emisiones de GEI. Las acciones disponibles incluyen seis métodos específicos, como incorporar abono orgánico, labranza combinada, intercalar cultivos, usar inhibidores de nitrificación, reducir combustible y sembrar árboles.

- **Meta (Goal):** La meta representa los niveles deseados de emisiones de GEI a los que se aspira llegar mediante la implementación de las acciones de mitigación. Establecer metas claras y alcanzables es fundamental para orientar y evaluar el progreso en la reducción de emisiones a lo largo del tiempo. Los niveles de emisión inicial (100) y los objetivos de reducción gradual (90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 y 10) proporcionan un marco de referencia para medir el éxito de las medidas de mitigación implementadas.

- **Presupuesto:** Es el presupuesto disponible para implementar las acciones de mitigación. En este caso, los presupuestos son 1000, 2000 y 6000 unidades monetarias. El presupuesto disponible para implementar las acciones de mitigación es un factor crítico que influye en la selección y priorización de las estrategias a aplicar. Dado que diferentes acciones pueden tener costos variables asociados, el presupuesto disponible determina en gran medida la escala y el alcance de las medidas de mitigación que pueden ser implementadas.

- **Nivel emisión por acción:** Cada acción de mitigación tiene asociado un nivel específico de reducción de emisiones de GEI. Estos niveles representan la cantidad de emisiones que se espera reducir mediante la implementación de cada acción. La diversidad de acciones disponibles permite abordar diferentes fuentes y mecanismos de emisión, lo que contribuye a un enfoque integral para la reducción de emisiones en el

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		69 de 100

sector agrícola. Una acción puede reducir el nivel de emisiones de GEI, por ejemplo: la acción Intercalar_cultivos permite reducir el nivel de emisión de un total de 50 unidades, la acción Incorporar_abono_organico permite reducir el nivel de emisión de un total de 20 unidades, Incorporar_labranza_combinada permite reducir el nivel de emisión de un total de 10 unidades, Usar_inhibidores_de_nitrificacion permite reducir el nivel de emisión de un total de 25 unidades, Reducir_combustible permite reducir el nivel de emisión de un total de 15 unidades, Sembrar_arboles permite reducir el nivel de emisión de un total de 5 unidades.

5.3 Ambiente de Pruebas

La Figura 5.2.1 muestra el ambiente de pruebas implementado en una computadora portátil con sistema operativo Ubuntu 22.04.1 LTS. Esta configuración cuenta con una CPU Intel® Core™ i5-12500H 2.50 GHz y 16GB de RAM. Se utilizaron una variedad de herramientas cada una con su papel:

Para establecer el entorno de desarrollo, se generaron el dominio y las instancias del problema AP utilizando PDDL 1.2 (Ghallab, y otros, 1998) y PDDL 2.1 (Fox & Long, 2003).

ENHSP (ENHSP, s.f.): Se empleó el Planificador de Búsqueda Heurística Numérica Expresiva para desarrollar el módulo de planificación. La elección de ENHSP-20 se basó en su estado como proyecto activo, respaldado por un equipo de desarrolladores comprometidos que ofrecen soporte continuo. Además, ha demostrado su eficacia en competencias reconocidas como ICAPS (International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2023). ICAPS se refiere a la Conferencia Internacional sobre Planificación Automática y Scheduling (International Conference on Automated Planning and Scheduling), que es un

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		70 de 100

evento académico anual donde se presentan investigaciones y avances en el campo de la planificación automática y la programación de tareas (ICAPS, 2024).

- **Sublime Text** (Sublime Text, s.f.): Se utilizó este editor de texto avanzado para codificar el dominio y las instancias del problema utilizando PDDL 2.1 (Fox & Long, 2003). La versatilidad y las capacidades de personalización de Sublime permitieron trabajar con eficiencia y precisión en la creación de los modelos.

- **MyPDDL** (Planning.wiki - The AI Planning & PDDL Wiki, s.f.): Esta herramienta complementaria proporcionó una interfaz intuitiva y potente para la manipulación y gestión de archivos PDDL, facilitando enormemente el proceso de desarrollo al ofrecer funciones específicas para trabajar con este lenguaje de descripción de problemas de planificación.

Además de estas herramientas, se requirió la instalación de Java Runtime Environment (JRE) 17.0.5 para asegurar la compatibilidad y el rendimiento de las aplicaciones utilizadas. La elección de JRE 17.0.5 se fundamentó en su última versión estable y en las mejoras y correcciones de errores que ofrece en comparación con versiones anteriores.

La elección de montar todo el entorno en un sistema operativo Ubuntu se basó en su robustez, seguridad y amplia compatibilidad con las herramientas y tecnologías utilizadas en el proyecto. Además, su naturaleza de código abierto proporcionó la flexibilidad y la libertad necesarias para adaptar y personalizar el entorno según las necesidades específicas del proyecto.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		71 de 100

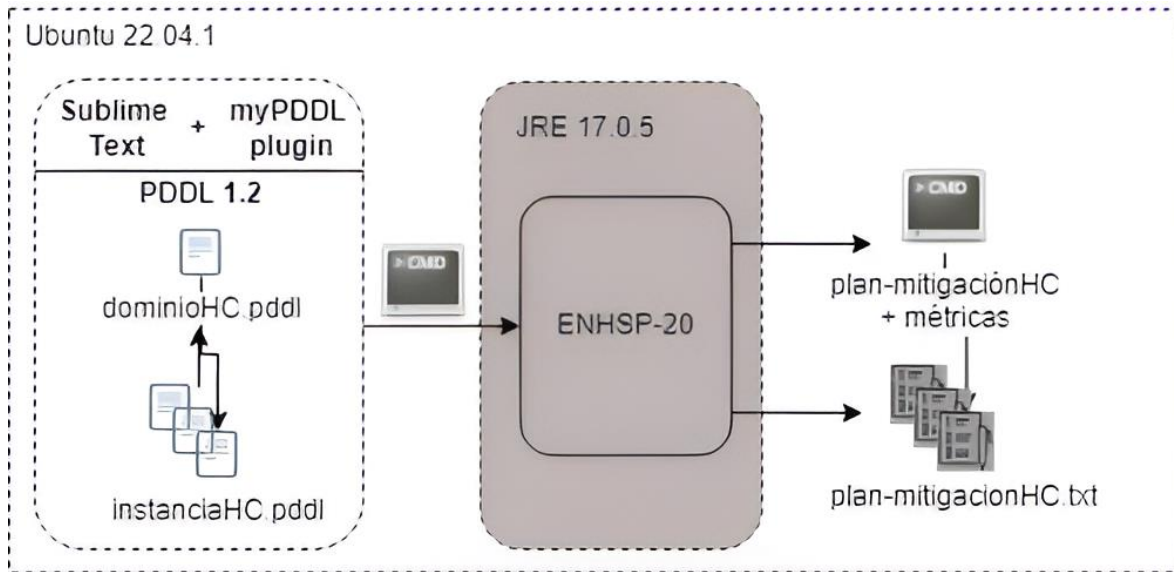


Figura 5.3.1 Entorno de pruebas

Fuente: (Rodríguez-Vivas, Caicedo Rendon, Ordoñez, Campos, & Casilimas, 2023)

5.4 Métricas

El proceso de recopilación de datos se llevó a cabo de manera meticulosa, adaptándose a las necesidades específicas del proyecto y centrándose en métricas clave que se consideraron fundamentales para lograr resultados efectivos en la mitigación de los niveles de emisión. Las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del proceso incluyeron:

Planning Time (Tiempo de planificación):

Este indicador hace referencia al tiempo total que demanda un algoritmo de planificación desde el inicio de su ejecución hasta que produce una solución viable. Cuanto menor sea este tiempo, más eficiente se considera el algoritmo en la generación de planes de mitigación. La optimización de este tiempo es esencial para garantizar una respuesta rápida y oportuna a los desafíos relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		72 de 100

Planning Length (Longitud de la planificación):

La longitud de la planificación se refiere al número total de acciones incluidas en el plan generado por el algoritmo de planificación. Este indicador proporciona información sobre la calidad del plan, puesto que se busca minimizar la cantidad de acciones necesarias para alcanzar los objetivos de mitigación. Una menor longitud de planificación sugiere un enfoque más eficiente y efectivo para abordar el problema, dado que se logra el objetivo con un menor número de acciones.

Costo:

El costo se determina en función de varios factores, incluyendo la cantidad de objetos evaluados, las acciones requeridas para implementar el plan de mitigación, el presupuesto disponible y la meta deseada en términos de reducción de emisiones. Este aspecto es crucial para evaluar la viabilidad económica de las estrategias de mitigación propuestas. Se busca minimizar los costos asociados con la implementación del plan sin comprometer la efectividad en la reducción de emisiones.

Las métricas de Planning Time, Planning Length y Costo fueron empleadas para analizar el desempeño del algoritmo y la eficacia de los planes de mitigación generados. La duración de la planificación se refiere específicamente al tiempo total requerido por el algoritmo para identificar las acciones necesarias para mitigar los niveles de emisión. Este tiempo es un factor crítico en la evaluación de la eficiencia y la capacidad de respuesta del sistema ante los desafíos ambientales planteados.

5.5 Resultados

El Código 1.7 representa el Plan de Mitigación calculado por ENHSP para el dominio mencionado en el Código X.X. y la instancia correspondiente al Código

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		73 de 100

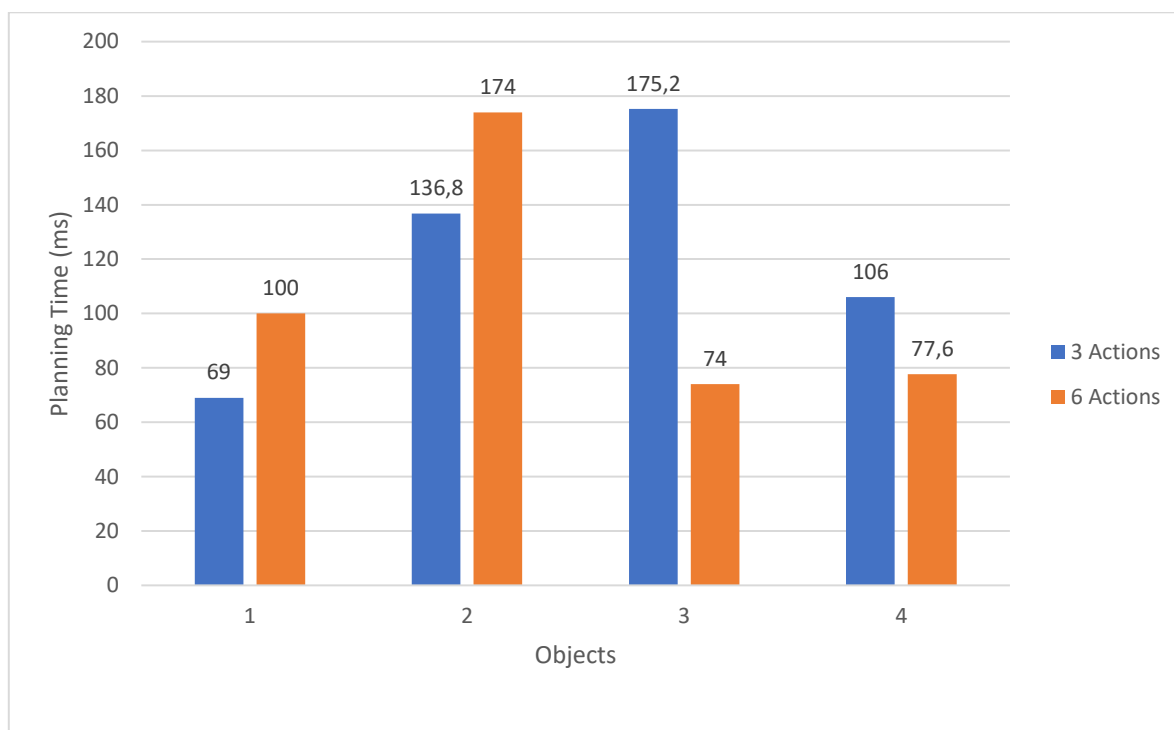
Y.Y. La acción "Usar inhibidores de nitrificación" forma parte del dominio de planificación. En el contexto de mitigación de niveles de emisión para el cultivo de arroz, este proceso requiere que los niveles pasen de nCien a nSesenta, transitando por el estado nOchenta antes de alcanzar el estado objetivo de nCuarenta. Para el cultivo de café, la transición es de nOchenta a nCuarenta, pasando por el estado nSesenta antes de alcanzar el estado objetivo de nCuarenta.

Código 1.7: Plan de mitigación calculado por ENHSP

```
0.0: (usar_inhibidores_de_nitrificación arroz n100 n80 nCien nOchenta)
1.0: (usar_inhibidores_de_nitrificación arroz n80 n40 nOchenta nCuarenta)
2.0: (usar_inhibidores_de_nitrificación cafe n80 n60 nOchenta nSesenta)
3.0: (usar_inhibidores_de_nitrificación cafe n60 n40 nSesenta nCuarenta)
```

Las siguientes gráficas muestran el resultado de realización de planes de mitigación de niveles de emisión de GEI. Se evalúan el tiempo de planificación, la duración de la planificación y los costos asociados con diferentes combinaciones de acciones y objetos.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		74 de 100



Gráfica 5.5.1 Tiempo de Planificación (ms) vs Objetos

Nota: Elaboración propia

Como se observa en la gráfica 5.5.1, el tiempo de planificación generalmente aumenta a medida que aumenta el número de objetos en el problema, lo cual es un comportamiento esperado debido a que más objetos suelen incrementar la complejidad del espacio de estados. Para 1 y 2 objetos, el tiempo de planificación es mayor cuando se tienen 6 acciones en comparación con 3 acciones. Para 3 y 4 objetos, el tiempo de planificación es mayor con 3 acciones que con 6 acciones.

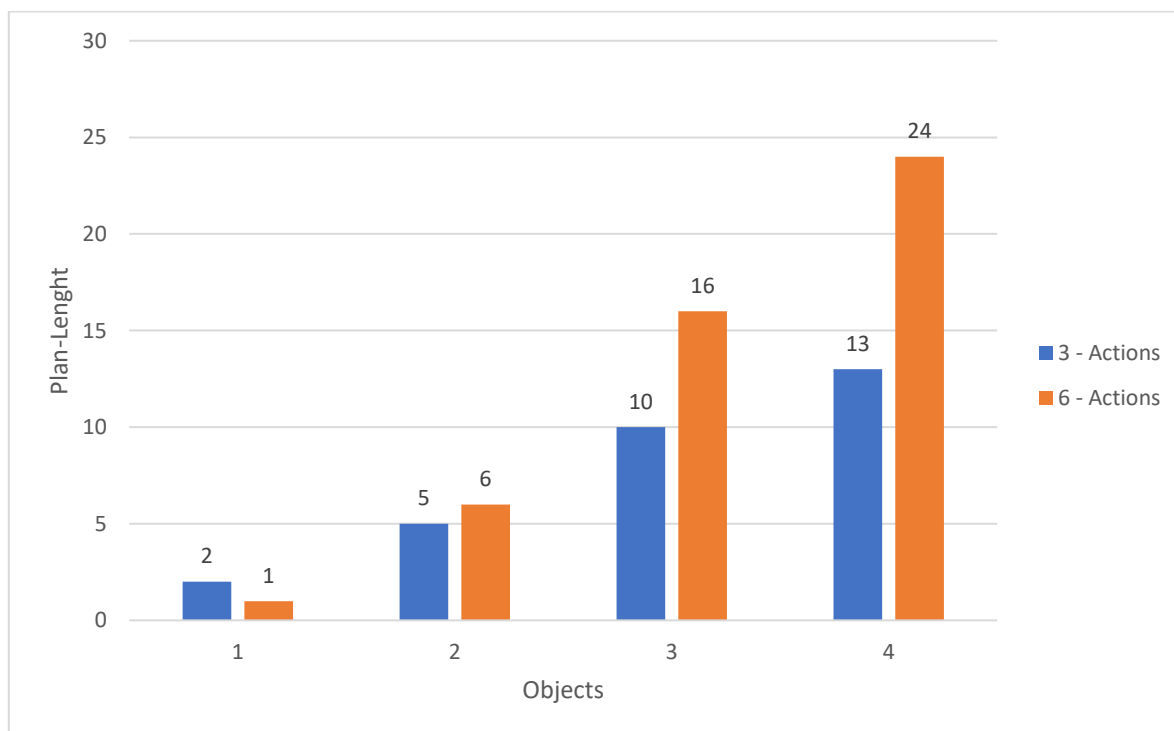
Interpretación de resultados:

- **Incremento con 1 y 2 Objetos:** Para pocos objetos (1 y 2), tener más acciones (6) aumenta el tiempo de planificación debido a la mayor cantidad de opciones y combinaciones posibles que el planificador debe considerar.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		75 de 100

- **Reducción con 3 y 4 Objetos:** Sorprendentemente, para más objetos (3 y 4), el tiempo de planificación es menor con 6 acciones. Esto puede indicar que, con más acciones disponibles, el planificador puede encontrar soluciones más rápido porque tiene más caminos posibles para llegar a una solución eficiente.

En conclusión, La gráfica muestra cómo varía el tiempo de planificación dependiendo del número de objetos y acciones en un problema de planificación. Generalmente, más objetos incrementan el tiempo de planificación, pero el impacto del número de acciones no es lineal y puede variar según la complejidad del problema.



Gráfica 5.5.2 Longitud del Plan vs Objetos

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		76 de 100

Nota: Elaboración propia

Como se aprecia en la gráfica 5.5.2, la duración de la planificación tiende a aumentar a medida que se incrementa la cantidad de objetos. Este comportamiento es previsible, dado que un mayor número de objetos llegar al estado meta se vuelve más complejo. Para los casos de los objetos 1 y 2, la duración de la planificación apenas varía, independientemente de si se emplean 3 o 6 acciones. Sin embargo, para 3 y 4 objetos, la duración de la planificación es notablemente mayor cuando se utilizan 6 acciones en comparación con solo 3.

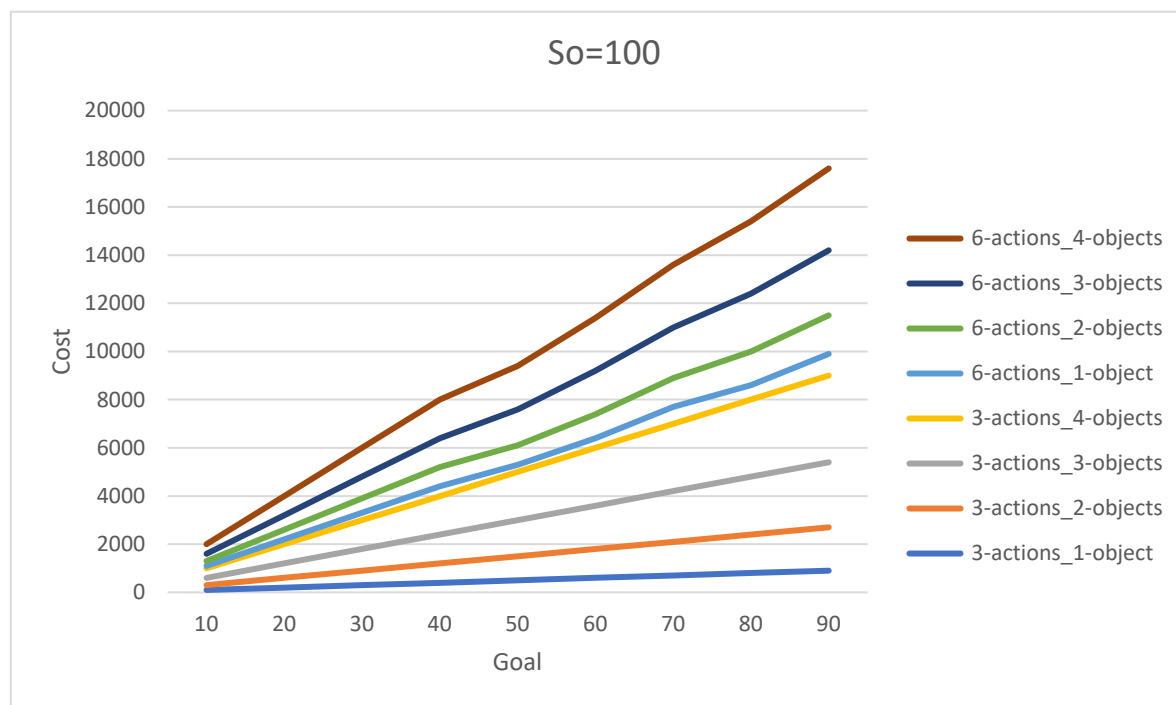
Interpretación de los resultados:

- Similitud con 1 y 2 Objetos: Para un pequeño número de objetos (1 y 2), el incremento en el número de acciones (de 3 a 6) apenas afecta la duración de la planificación. Curiosamente, en el caso de (1) objeto, la duración de la planificación es mayor con menos acciones (3) que con más (6). Esto puede atribuirse al hecho de que un mayor número de acciones brinda al planificador más opciones, lo que potencialmente agiliza la búsqueda de soluciones eficientes.
- Incremento con 3 y 4 Objetos: Por otro lado, al aumentar el número de objetos (3 y 4), la duración de la planificación aumenta, incluso con un mayor número de acciones (6). Este resultado sugiere que a medida que se incrementa la complejidad del problema con más objetos, el tiempo necesario para encontrar soluciones también aumenta. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el objetivo es alcanzar una solución óptima mientras se minimiza el presupuesto total.

En conclusión, la gráfica ilustra cómo varía la duración de la planificación en función del número de objetos y acciones en un problema de planificación. Generalmente, un mayor número de objetos conlleva a una mayor duración de la

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		77 de 100

planificación, aunque el impacto del número de acciones no sigue una relación lineal y puede variar según la complejidad del problema.



Gráfica 5.5.3 Costo vs Objetivo

Nota: Elaboración propia

La gráfica 5.5.3, muestra la relación entre el "Costo" y el "Objetivo (Goal)" para diferentes combinaciones de "acciones" y "objetos". El eje X (horizontal) representa el objetivo que se alcanza, mientras que el eje Y (vertical) muestra el costo asociado con alcanzar ese objetivo. La leyenda en el lado derecho describe las diferentes combinaciones de acciones y objetos.

Se tomo como estado inicial 100 para probar que se quiere evaluar diferentes unidades de reducción dado que tomando este valor como referencia permite evaluar todos los valores de reducción.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		78 de 100

A medida que el objetivo (Goal) aumenta, el costo aumenta para todas las combinaciones. Esto indica que es más costoso alcanzar objetivos más altos, independientemente de la combinación de acciones y objetos.

Comparaciones:

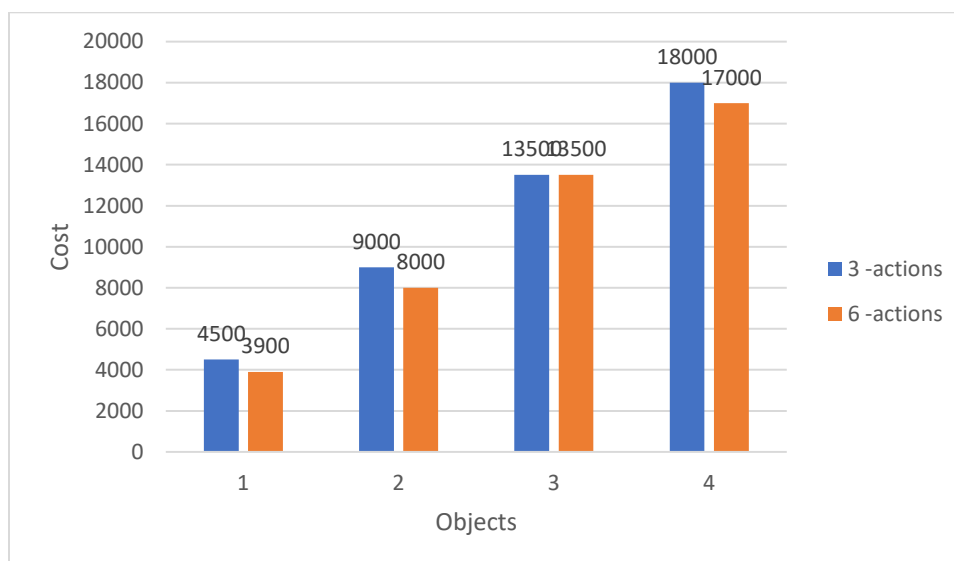
- **6-actions_4-objects (Marrón):** Tiene el costo más alto en todos los niveles de objetivo, indicando que manejar más acciones y objetos es el más costoso.
- **3-actions_1-object (Azul claro):** Tiene el costo más bajo, sugiriendo que menos acciones y objetos resultan en un menor costo.
- **6-actions vs. 3-actions:** Generalmente, las combinaciones con 6 acciones tienen un costo más alto que aquellas con 3 acciones.
- **Más Objetos vs. Menos Objetos:** Para un mismo número de acciones, más objetos resultan en un costo más alto.

Interpretación de los resultados:

- **Mayor Complejidad (más acciones y objetos):** Implica mayores costos debido a la mayor cantidad de recursos y coordinación necesarios.
- **Menor Complejidad (menos acciones y objetos):** Resulta en costos más bajos, lo cual puede ser más eficiente pero posiblemente menos flexible o menos capaz de manejar situaciones más complejas.

En conclusión, esta gráfica muestra las diferentes configuraciones de acciones y objetos afectan los costos en relación a los objetivos. Permite identificar las configuraciones más eficientes en términos de costo para alcanzar objetivos específicos.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		79 de 100



Gráfica 5.5.4 Costo vs Objetos

Nota: Elaboración propia

La gráfica 5.5.4, muestra el costo total asociado con diferentes números de objetos para dos configuraciones de acciones: 3 acciones (en azul) y 6 acciones (en naranja). El eje X (horizontal) representa el número de objetos, mientras que el eje Y (vertical) muestra el costo total correspondiente.

El costo total aumenta a medida que aumenta el número de objetos para ambas configuraciones de acciones. Esto sugiere que manejar más objetos es más costoso, independientemente del número de acciones.

Interpretación de datos:

Costo con 1 objeto:

- **3-actions (4500) vs. 6-actions (3900):**
 - **Observación:** El costo con 3 acciones es de 4500, mientras que con 6 acciones es de 3900.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		80 de 100

- **Interpretación:** Con solo un objeto, es más costoso manejar 3 acciones que 6 acciones. Esto se debe a que, con menos acciones, la eficiencia en la utilización de recursos es menor.

Costo con 2 objetos:

- **3-actions (9000) vs. 6-actions (8000):**
 - **Observación:** El costo con 3 acciones es de 9000, mientras que con 6 acciones es de 8000.
 - **Interpretación:** Similar al caso de 1 objeto, manejar 2 objetos es más costoso con 3 acciones que con 6 acciones. Esto sugiere que la configuración con 6 acciones es más eficiente incluso con un número moderado de objetos

Costo con 3 objetos:

- **3-actions (13500) vs. 6-actions (13500):**
 - **Observación:** El costo es igual para ambas configuraciones, 13500.
 - **Interpretación:** Con 3 objetos, los costos se igualan, indicando que, a partir de cierto punto, el número de acciones no influye significativamente en el costo total. Esto podría significar que ambos sistemas alcanzan una eficiencia similar en este punto de complejidad.

Costo con 4 objetos:

- **3-actions (18000) vs. 6-actions (17000):**
 - **Observación:** El costo con 3 acciones es de 18000, mientras que con 6 acciones es de 17000.
 - **Interpretación:** Con 4 objetos, manejar 6 acciones sigue siendo ligeramente más eficiente en términos de costo que

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		81 de 100

manejar 3 acciones. Esto sugiere que el sistema con más acciones puede distribuir la carga de trabajo de manera más efectiva cuando se trata de un mayor número de objetos.

Se concluye que tener más acciones permite mantener o mejorar la eficiencia sin incrementar significativamente el costo especialmente cuando se manejan múltiples objetos. Esto se debe a una mejor capacidad para distribuir tareas y optimizar recursos.

5.6 Ventajas y desventajas de Planificación Automática

Tabla 5.6.1 Ventajas y desventajas de AP

Planificación Automática	
Ventajas	Desventajas
- La planificación automática puede adaptarse rápidamente a las condiciones cambiantes del clima y del mercado, permitiendo ajustes inmediatos que pueden ayudar a reducir las emisiones de GEI. Flexibilidad: Adaptable a diferentes tipos de cultivos y prácticas agrícolas, permitiendo una amplia aplicabilidad. - Facilita la difusión y adopción de buenas prácticas agrícolas sostenibles en diversas comunidades. - Promueve técnicas que aumentan la materia orgánica en el suelo, mejorando su capacidad para	- No todos los agricultores tienen acceso a la tecnología avanzada necesaria para la planificación automática, lo que puede exacerbar la desigualdad entre grandes y pequeños productores. - Puede haber resistencia por parte de los agricultores a adoptar nuevas tecnologías y métodos, especialmente si no están convencidos de los beneficios a corto plazo o si carecen de la formación necesaria. Dependencia de la tecnología: Fallas técnicas: La planificación automática puede verse afectada por fallos en el sistema, problemas de

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		82 de 100

mitigar emisiones de GEI • Facilita la creación de alianzas estratégicas entre agricultores, investigadores, y gobiernos para compartir conocimientos y recursos. Eficiencia y rapidez: • Optimización de tiempo: Los algoritmos pueden procesar grandes cantidades de datos y generar planes rápidamente, ahorrando tiempo en comparación con la planificación manual. • Reducción de errores: Minimiza los errores humanos comunes en la planificación manual. Manejo de la complejidad: • Gestión de múltiples acciones: Puede considerar múltiples acciones. Mejora en la toma de decisiones: • Datos y análisis: Proporciona análisis detallados y datos precisos para respaldar la toma de decisiones. • Simulación de escenarios: Permite simular diferentes escenarios y evaluar el impacto de diferentes decisiones antes de implementarlas. Ahorro de costos: • Optimización de recursos: Mejora la utilización de recursos, reduciendo costos operativos.	software o interrupciones en la conectividad. • Actualizaciones y mantenimiento: Requiere actualizaciones constantes y mantenimiento para garantizar su funcionamiento óptimo. Resistencia al cambio: • Capacitación: El personal puede necesitar formación para usar nuevos sistemas, lo que implica tiempo y recursos. • Cultura organizacional: Puede haber resistencia por parte del personal acostumbrado a los métodos tradicionales de planificación. Complejidad en la integración: • Sistemas existentes: Integrar nuevos sistemas automáticos con los ya existentes puede ser complejo y presentar desafíos técnicos. • Compatibilidad: Sólo es compatible con la distribución GNU/Linux de Ubuntu 22.04.1 LTS.
---	---

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		83 de 100

• Reducción de desperdicios: Optimiza el uso de materiales y tiempo, disminuyendo el desperdicio.	
--	--

Fuente: Elaboración propia

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		84 de 100

CAPÍTULO 6. Conclusiones y Trabajos Futuros

La idea del presente proyecto de grado surgió de la problemática alrededor del cambio climático y sus nefastas consecuencias a nivel mundial. Específicamente el proyecto se enfocó en automatizar, a través de una técnica de IA, el control de la huella de carbono generada por actividades agrícolas, toda vez que éstas representan el 13.5% de emisiones de GEI a nivel mundial (Andrade, Segura, & Varona, 2015).

Uno de los mayores retos al iniciar la ejecución del proyecto fue la identificación de factores influyentes en las emisiones de GEI en cadenas productivas del sector agrícola, toda vez que debíamos involucrarnos en un área transdisciplinar. En este sentido, se inició un estudio detallado de los trabajos relacionados con la temática. A medida que se analizaban los artículos, se logró identificar criterios para clasificarlos de acuerdo al enfoque del proyecto: planes de mitigación de huella de carbono. Así, se llegó a la siguiente clasificación de trabajos relacionados: (i) cálculo de huella de carbono, (ii) cálculo y mitigación de huella de carbono, (iii) aplicaciones de la IA a la estimación y/o mitigación de huella de carbono generada por actividades agrícolas. La principal contribución del presente proyecto en este aspecto fue listar las acciones de mitigación de huella de carbono mencionadas en los trabajos analizados y determinar la recurrencia de dichas acciones entre uno y otro trabajo. Dicha recurrencia permitió asignar una ‘ponderación’ a cada acción que significa, en el presente proyecto, el porcentaje de contaminación (generada por emisiones de GEI) que dicha acción logrará disminuir.

Implementar la técnica de AP para crear los planes de mitigación de huella de carbono para cultivos ha demostrado ser efectiva y precisa, se ha logrado desarrollar planes de mitigación que consideran las diferentes variables y factores que influyen en las emisiones, permitiendo una gestión más integral y sostenible

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		85 de 100

de actividades agrícolas. Los resultados obtenidos indican que la AP facilita la implementación de acciones de mitigación para enfrentar el cambio climático de manera productiva.

La evaluación del sistema de generación de planes en términos de escalabilidad y adaptabilidad se evidencia que el modelo es robusto y flexible. En escalabilidad, el sistema ha mostrado un comportamiento positivo frente al aumento de parámetros, manteniendo su eficacia y eficiencia en la generación de planes de mitigación de huella de carbono, y en adaptabilidad del sistema a nuevas líneas de productos agrícolas es satisfactoria, demostrando capacidad para ajustarse a diferentes escenarios y condiciones. Lo que significa la reducción de emisiones de GEI y promoción de prácticas agrícolas sostenibles a largo plazo.

Cabe anotar que el proyecto es pionero en aplicar una técnica de IA al cálculo de planes de mitigación de huella de carbono.

Como trabajos futuros se resalta lo siguiente:

- Incrementar la cantidad de acciones de mitigación: Esto se puede lograr ampliando el estado del arte, analizando cada artículo de manera exhaustiva para extraer de ellos más acciones que puedan se adheridas a las Tabla 2.3.1 y 2.3.2.
- Explorar la influencia del tiempo que toma la implantación de una acción: Estimar el tiempo de implantación de una acción de mitigación en un cultivo real, incluir este parámetro en el modelo matemático y en los códigos de dominio a través del comando “durative-actions” disponible a partir de la versión de PDDL 2.1.
- Realizar investigación para mitigar emisiones de GEI para un cultivo en particular: Esta investigación se llevará a cabo mediante trabajo de campo, lo que permitirá obtener datos altamente precisos y específicos sobre la mitigación de emisiones ya que se hará mediante trabajo de

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		86 de 100

campo. Al centrarse en un cultivo en particular, se podrán desarrollar estrategias de mitigación adaptadas a las características y necesidades específicas del cultivo, mejorando así la eficacia de las acciones implementadas. Este enfoque detallado facilitará la identificación de las prácticas más eficientes y sostenibles para reducir las emisiones de GEI, contribuyendo de manera significativa al objetivo global de disminuir la huella de carbono en el sector agrícola.

- **Evaluar el tiempo de vida del cultivo y el tiempo de implementación de acciones:** Considerar estos factores en el modelo para acercarse más a la realidad de prácticas agrícolas, se pretende involucrar estudiantes de Ingeniería Agroambiental, quienes poseen mayor conocimiento sobre el sector agrícola por lo cual serán de gran apoyo para el estudio de cultivos, así como para la estimación y mitigación de emisiones de GEI. El aumento de acciones de mitigación de HC en el contexto agrícola generará un grafo de estados con una mayor cantidad de nodos, aprovechando al máximo las características de AP.

6.1 Implicaciones del trabajo en el contexto Social Local, Regional e Internacional

Impacto Social a Nivel Local

- **Mejora de la Calidad de Vida:** La reducción de emisiones de huella de carbono ayuda a contribuir a mejorar la calidad de salud de los productos agrícolas, la calidad del aire. Menores niveles de emisiones de GEI están asociados con una reducción en enfermedades respiratorias y otras condiciones de salud.
- **Empoderamiento de las Comunidades:** Implementar tecnologías y estrategias de mitigación de emisiones de GEI puede incluir la

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		87 de 100

capacitación de los agricultores en nuevas prácticas sostenibles. Esto puede empoderar a las comunidades locales, mejorando sus habilidades y conocimientos.

- **Generación de Empleo:** La transición hacia prácticas agrícolas sostenibles puede crear nuevas oportunidades de empleo en áreas como la implementación de tecnologías limpias, monitoreo ambiental y asesoramiento técnico.

Impacto Social a Nivel Regional

- **Desarrollo Económico Sostenible:** A nivel regional, la agricultura sostenible puede fomentar un desarrollo económico más equilibrado y sostenible. Esto puede ayudar a mitigar la migración de personas agricultoras de zonas rurales a urbanas al ofrecer oportunidades económicas viables en el campo.

- **Conservación de Recursos Naturales:** La adopción de prácticas que reduzcan la huella de carbono puede contribuir a la conservación de suelos, agua y biodiversidad, beneficiando a las comunidades regionales que dependen directamente de estos recursos.

Impacto Social a Nivel Internacional

Cumplimiento de Compromisos Globales: Colombia, al implementar planes de mitigación de huella de carbono, contribuye a los esfuerzos globales para combatir el cambio climático, cumpliendo con acuerdos internacionales como el Acuerdo de París (Gobierno de Colombia, 2021).

Efecto Demostración: El éxito de estas iniciativas puede servir como ejemplo para otros países en desarrollo, mostrando que es posible implementar estrategias efectivas de mitigación en el sector agrícola, incentivando una mayor acción global.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		88 de 100

Mercados Internacionales: La reducción de la huella de carbono puede mejorar la competitividad de los productos agrícolas colombianos en mercados internacionales, donde los consumidores están cada vez más conscientes del impacto ambiental de los productos que compran.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		89 de 100

Bibliografía

- Alvarado Imbachi, J. A. (2024). *mitigacion-hc*. Obtenido de mitigacion-hc: <https://github.com/AdrianImbachi/mitigacion-hc.git>
- Andrade, H. J., Campo, O., & Segura, M. (2014). *Huella de carbono del sistema de producción de arroz (Oryza sativa) en el municipio de Campoalegre, Huila, Colombia. Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* , 25-31.
- Andrade, H., Segura, M., & Varona, J. (2015). *Estimación de huella de carbono del sistema de producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum) en Palmira, Valle del Cauca, Colombia.*
- Anonymus. (2006). *Teoría de grafos.*
- Arandias Puche, C., Lopez, L., Soto Urdaneta, J., Ramos Sánchez, E., & Castillo De León, D. (2022). *ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS SU EVOLUCIÓN EN LA NUEVA NORMALIDAD. Unicyt*, 6.
- ARMAS ROSERO, J. A., GUALOTUÑA PAUCAR, J. P., & ULLOA VACA, C. A. (2023). *ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN EL CICLO DE PRODUCCIÓN DE CACAO (THEOBROMA CACAO) EN LA FINCA SANTA CRUZ, EN PUERTO QUITO. Trabajo de titulación previo a la obtención del*, 1-53.
- Asocaña. (1997). *Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia. Balance azucarero colombiano.*
- Asociación Española para la Calidad. (s.f.). *LA HUELLA DE CARBONO*. Recuperado el 2023, de <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/huella-de-carbono>
- Babativa Contreras, A., & González Meneses, H. (2020). *Evaluación de la huella de Carbono en cincuenta (50) fincas productoras de café en la 1 vereda Holanda de Pitalito y la Piragua de Timaná, municipios ubicados al sur del departamento del Huila.* 1-80.
- Ballesteros Meneses, K., & Sotelo González, K. (2013). *ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO PARA UNA HECTÁREA CULTIVADA CON CAÑA DE AZÚCAR DESDE UNA PERSPECTIVA ORGÁNICA.* Proyecto de grado.
- Barbedo, J. (2019). *Plant disease identification from individual lesions and spots using deep learning.* Biosystems Engineering.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		90 de 100

British Standards Institution (BSI), Carbon Trust y Defra (Department for Environment Food and Rural Affairs). (2010). *NORMA PAS 2060*. Obtenido de Asociación Española para la Calidad:
<https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2060>

CARBON NEUTRAL +. (19 de Septiembre de 2022). *¿Qué es y cómo se calcula la huella de carbono?* . Obtenido de <https://www.carbonneutralplus.com/que-es-y-como-calcular-la-huella-de-carbono/>

Catalá Goyanes, J. (2014). *Diseño y validación de un procedimiento de cálculo de la huella de carbono en una administración local*.

Cayambe Terán, J. M., & Escobar Barragán, P. R. (2022). *Estimación de la huella de carbono en el sistema de cultivo orgánico y convencional de palma aceitera (Elaeis Guineensis) en Esmeraldas, para desarrollar medidas de mitigación*. Quito: Universidad Tecnológica Indoamérica.

CONPES. (2021). *Política Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación 2022-2031*.

Directorate-General for Environment. (2021). *Environmental footprint methods*. European Commission .

DVA Go Further. (20 de Abril de 2023). *IMPORTANCIA DE LA AGRICULTURA COLOMBIANA*. Obtenido de IMPORTANCIA DE LA AGRICULTURA COLOMBIANA.: <https://dva.com.co/importancia-de-laagricultura-colombiana>

Echeverri Echeverri , C. A. (2006). *Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia)*. *Revisita Ingenierías Universidad de Medellín* , 12.

Echeverri Londoño, C. A. (2006). *Estimación de la Emisión de gases de efecto invernadero en el Municipio de Montería (Córdoba, Colombia)*. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12.

ENHSP. (s.f.). *The ENHSP Planning System*. Obtenido de <https://sites.google.com/view/enhsp/>

Espinoza, P. F., & Martínez, R. C. (2022). *Huella de carbono del cultivo de banano (Musa paradisiaca) en la hacienda La Victoria, provincia de El Oro*.

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2023). *Cambio climático y seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de El

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		91 de 100

cambio climático y la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

- Fikes, R. E., & Nilsson, N. (1971). *Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving*. Artificial Intelligence.
- Fox, M., & Long, D. (2003). *pddl2.1 : An Extension to pddl for Expressing Temporal Planning Domains*. Journal of Artificial Intelligence Research 20, 1-64.
- Ghallab, M., Howe, A., Knoblock, C., McDermott, D., Ram, A., Veloso, M., . . . Wilkins, D. (1998). *PDDL ThePlanning Domain Definition Language Version 1.2*.
- Ghallab, M., Nau, D., & Traverso, P. (2004). *Automated Planning*.
- Ghallab, M., Nau, D., & Traverso, P. (2016). *Automated Planning and Acting*. New York.
- Gobierno de Colombia. (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia para Cumplir con el Acuerdo de París (E2050)*. . Bogotá D.C.
- González Meneses, H. V., Méndez Velásquez , V. E., & Izquierdo Bautista, J. (2014). *Determinación de la huella de carbono en el cultivo de arroz Oryza sativa en el distrito de riego el Juncal, Huila, Colombia*. Revista de Ingenierías y Región, 15.
- Guallasamin Constante, K., & Simón-Baile, D. (2018). *Huella de carbono del cultivo de rosas en Ecuador comparando dos metodologías: GHG Protocolvs. PAS 2050*. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales, 1-30.
- Gutiérrez Cruz, L. (2021). *Estimación de la huella de carbono del proceso de producción de caucho natural–Mavalle SAS*.
- Gutierrez Fernández, F., & Montoya, L. (2014). *La huella de carbono como herramienta para lograr una producción sostenible en un cultivo de flores ubicado en la Sabana de Bogotá – Colombia*. Revista de Tecnología, 14.
- Guzmán, L., & Jaime, A. (2003). *Técnicas de Planificación para la Generación Automática de Programas de Control*.
- ICAPS. (2024). *ICAPS International Conference on Automated Planning and Scheduling*. Recuperado el 2024, de ICAPS International Conference on Automated Planning and Scheduling: <https://www.icaps-conference.org/>

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		92 de 100

- ISO - International Organization for Standarization. (2006). *ISO 14064-1:2006*.
Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-1:ed-1:v1:es>
- Junguito Bonnet, R., Caballero Argáez, C., Perfetti del Corral, J., López Enciso, E., & Leibovich Goldenberg, J. (2022). *Episodios de la historia de la agricultura en Colombia*. Bogotá D.C.
- Lomelí Rodríguez, L. E. (2020). *Estimación de la huella de carbono en el Sitema-Producto aguacate (Persea americana, Hass) en Zapotlán el Grande, Jalisco y propuestas de medidas de mitigación*.
- López Mesa, M. A., Piedrahíta, A. R., & Castellanos Garzon, J. A. (2022). *Medición de la huella de carbono y remoción de CO2 para plantear estrategias de reducción y mitigación en una empresa de silvicultura y compensación forestal*. Ciencia Transdisciplinar en la Nueva Era.
- McDermott, D. M. (2000). *The 1998 AI Planning Systems Competition*. AI Magazine.
- Mendieta, M. P. (2011). *Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono ECDBC*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible , 14.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Programa Nacional de Carbono Neutralidad y Resiliencia Climática*. Obtenido de Programa Nacional de Carbono Neutralidad y Resiliencia Climática:
<https://carbononeutral.minambiente.gov.co/>
- Morales A, R. A., Zorogastúa C., P., de Mendiburu, F., & Quiroz, R. (2018). *Producción mecanizada de maíz, camote y yuca en la Costa Desértica Peruana: Estimación de la huella de carbono y propuestas de mitigación*. Ecología Aplicada.
- Nau, D. S. (2007). *Current Trends in Automated Planning*.
- Núñez Monroy, J., & Núñez Palacios, R. A. (2012). *Huella de Carbono: más allá de un instrumento de medición*. Necesidad de conocer su impacto verdadero. IV Congreso Internacional Latina de Comunicación Social – IV CILCS – Universidad de La Laguna, 17.
- Ordoñez, A., Caicedo, O. M., Villota, W., Rodriguez-Vivas, A., & Fonseca, N. L. (2022). *Model-Based Reinforcement Learning with Automated Planning for Network Management*.

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		93 de 100

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2018). *ISO 45001:2018(es) - Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo* — Requisitos con orientación para su uso.

Parliamentary Office of Science and Technology POSTNOTE. (2006). *CARBON FOOTPRINT OF ELECTRICITY GENERATION* . 1-4.

Pednault, E. (1987). *Formulating multiagent, dynamic-world problems in the classical planning framework*. Computer Science.

Pinzón Colmenares, I. (2017). *Estimación de la huella de carbono en los cultivos de quinua (Chenopodium quinoa) de los cantones Cayambe y Riobamba ubicados en los Andes Ecuatorianos*.

Piotrowski, W., Fox, M., Long, D., Magazzeni, D., & Mercurio, F. (2016). *Heuristic Planning for PDDL+ Domains*. Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-16).

Planning.wiki - The AI Planning & PDDL Wiki. (s.f.). *Planning.Wiki - The AI Planning & PDDL Wiki*. Obtenido de <https://planning.wiki/>

Ramírez C., N. E., Munar F., D. A., García Núñez, J. A., Mosquera Montoya, M., & Faaij, A. P. (2021). *Emisiones de GEI y desempeño económico del sector palmero en Colombia: escenario actual y perspectivas a largo plazo*.

Rodriguez-Vivas, A., Caicedo Rendon, O. M., Ordoñez, A., Campos, J., & Casilimas, K. (2023). *Expert Systems With Applications On the Feasibility of Using an Autonomic Control Loop and Automated Planning for Tenant-oriented Reconfiguration of Network Slices*.

Romero, M., Pareja, P., Tristán, M. C., Sánchez Choy, J., & Quintero, M. (2022). *Análisis ex ante de estrategias de mitigación de GEI en el cultivo de palma aceitera en la región de Ucayali, Perú*.

Romero-Gámez, M., & Suárez-Rey, E. M. (2014). *Huella de Carbono en Cultivos Hortícolas de Hoja: Lechuga y Escarola*. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 1-16 .

Russell, S. J., Norvig, P., & Davis, E. (2009). *artificial intelligence: a modern approach*.

Scala, E. (2023). *The enhsp planner*, GitLab, 2023. Recuperado el 12 de Enero de 2023, de <https://gitlab.com/enricos83/ENHSP-Public/-/tree/enhsp-20>

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		94 de 100

Scala, E. (2023). *The enhsp planning system*. Recuperado el 12 de Enero de 2023, de <https://sites.google.com/view/enhsp/>

Scala, E., Haslum, P., & Thiébaux, S. (2016). *Heuristics for Numeric Planning via Subgoalng*. Proceedings of the Twenty-Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-16).

Science Direct. (s.f.). *Science Direct*. Obtenido de Science Direct: <https://www.sciencedirect.com/journal/expert-systems-with-applications>

Senzini, M. A. (2022). *Cálculo de la huella de carbono en la producción del “maní blanqueado” de todas sus etapas productivas en Prodeman, General Cabrera, Córdoba, durante la campaña 2018-2019*. 1-52.

Sublime Text. (s.f.). Obtenido de <https://www.sublimetext.com/3>

Vargas Gaitán , K. (7 de Marzo de 2016). *La agricultura colombiana en el contexto de la globalización*. Obtenido de El campesino.co.: <https://elcampesino.co/la-agricultura-colombiana-en-el-contexto-de-la-globalizacion/Wolf>

Wolf, R. M., Abramoff, M. D., Channa, R., Tava, C., Clarida, W., & Lehmann, H. P. (2022). *Potential reduction in healthcare carbon footprint by autonomous artificial intelligence*. NPJ digital medicine.

World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development. (1998). *GREENHOUSE GAS PROTOCOL*. Obtenido de GREENHOUSE GAS PROTOCOL: <https://ghgprotocol.org/>

Anexos

Anexo A. Datos de las pruebas

Actions	Objects	Goal	Costos				
3	1	90	100			1	4500
3	1	80	200			2	9000
3	1	70	300		3 -actions	3	13500
3	1	60	400			4	18000
3	1	50	500			1-object	3900
3	1	40	600		6 -actions	2-objects	8000
3	1	30	700			3-objects	13500
3	1	20	800			4-objects	17000
3	1	10	900				
3	2	90	200				
3	2	80	400				
3	2	70	600				
3	2	60	800				
3	2	50	1000				
3	2	40	1200				
3	2	30	1400				
3	2	20	1600				
3	2	10	1800				
3	3	90	300				
3	3	80	600				
3	3	70	900				
3	3	60	1200				
3	3	50	1500				
3	3	40	1800				
3	3	30	2100				
3	3	20	2400				
3	3	10	2700				
3	4	90	400				
3	4	80	800				
3	4	70	1200				
3	4	60	1600				
3	4	50	2000				
3	4	40	2400				
3	4	30	2800				
3	4	20	3200				
3	4	10	3600				

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO			EDO – 01
				Versión 1
				Vigencia: 07/06/2024
				96 de 100

6	1	90	100				
6	1	80	200				
6	1	70	300				
6	1	60	400				
6	1	50	300				
6	1	40	400				
6	1	30	700				
6	1	20	600				
6	1	10	900				
6	2	90	200				
6	2	80	400				
6	2	70	600				
6	2	60	800				
6	2	50	800				
6	2	40	1000				
6	2	30	1200				
6	2	20	1400				
6	2	10	1600				
6	3	90	300				
6	3	80	600				
6	3	70	900				
6	3	60	1200				
6	3	50	1500				
6	3	40	1800				
6	3	30	2100				
6	3	20	2400				
6	3	10	2700				
6	4	90	400				
6	4	80	800				
6	4	70	1200			Área de trazado	
6	4	60	1600				
6	4	50	1800				
6	4	40	2200				
6	4	30	2600				
6	4	20	3000				
6	4	10	3400				

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Input		Output											
2	Actions	Objects	Planning Time	Plan-Length	Search time	Costo								
3	3	1	26	2	23	200								
4	3	1	49	2	28	200								
5	3	1	144	2	125	200	(Incorporar_labranza_combinada_cafe) - dos veces							
6	3	1	58	2	47	200								
7	3	1	68	2	64	200								
8	3	2	112	5	87	900	00_cafe - 700 arroz							
9	3	2	98	5	94	900								
10	3	2	153	5	137	900								
11	3	2	123	5	92	900								
12	3	2	198	5	162	900								
13	3	3	213	10	203	1200								
14	3	3	192	10	184	1200								
15	3	3	169	10	164	1200								
16	3	3	151	10	148	1200								
17	3	3	151	10	142	1200								
18	3	4	67	13	49	1700								
19	3	4	147	13	145	1700								
20	3	4	140	13	126	1700								
21	3	4	61	13	56	1700								
22	3	4	115	13	113	1700								
23	3	1	20	2	17	500								
24	3	1	13	2	31	500								
25	3	1	11	2	9	500								
26	3	1	30	2	28	500								
27	3	1	49	2	42	500								
28	3	2	72	7	70	1050	alma- 550-aguacate							
29	3	2	67	7	65	1050								
30	3	2	70	7	68	1050								
31	3	2	40	7	39	1050								
32	3	2	53	7	51	1050								
33	3	3	176	13	143	1550	0-palma-500-cacao							
34	3	3	150	13	116	1550								
35	3	3	179	13	160	1550								
36	3	3	66	13	61	1550								
37	3	3	121	13	118	1550								
38	3	4	139	14	138	2100	0-cacao-500-palma							
39	3	4	104	14	92	2100								
40	3	4	84	14	81	2100								
41	3	4	136	14	121	2100								
42	3	4	93	14	89	2100								
43	6	1	125	1	103	300								
44	6	1	98	1	90	300								
45	6	1	77	1	54	300								
46	6	2	167	6	164	800	300-yuca-500-palma							
47	6	2	154	6	139	800								
48	6	2	201	6	175	800								
49	6	3	53	16	48	1800	300-yuca-1500-papa							

	Objects	1	2	3	4
Actions	3	69	136.8	175.2	106
Actions	6	100	174	74	77.7
	Planning Time	Planning Time			

	Objects	1	2	3	4
Actions	3	2	5	10	13
Actions	6	1	6	16	24
	Plan-Length	Plan-Length			

	DOCUMENTO FINAL PROYECTO DE GRADO	EDO – 01
		Versión 1
		Vigencia: 07/06/2024
		98 de 100

Anexo B. Resultados de ejecución del planificador ENHSP

```

osboxes@osboxes:~/Documentos/ENHSP-Public-enhsp-20$ java -jar enhsp-dist/enhsp.jar -o pddl2.1/HC/HCV4/ dominioHC.pddl
-f pddl2.1/HC/HCV4/3-actions_1-object/instanciaHC.pddl -print_actions -pt | cat - pddl2.1/HC/HCV4/3-actions_1-object/instanciaHC.pddl_search_gbfs_h_hadd_break_ties_null.npt
Domain parsed
Problem parsed
Grounding..
Grounding Time: 18
Libr Preprocessing
F|:0
X|:2
( Incorporar_abono_organico cafe), ( Intercalar_cultivos cafe), ( Incorporar_labranza_combinada cafe)]
A|:3
P|:0
E|:0
t1 Setup Time (msec): 19
g(n)= 100.0 h(n)=60.0
Problem Solved

Found Plan:
0.0: (Incorporar_labranza_combinada cafe)
1.0: (Incorporar_labranza_combinada cafe)

Plan-Length:2
Metric (Search):200.0
Planning Time (msec): 26
Heuristic Time (msec): 2
Search Time (msec): 23
Expanded Nodes:3
States Evaluated:3
Number of Dead-Ends detected:3
Number of Duplicates detected:0
Plan under Validation/Simulation: [(0,(Incorporar_labranza_combinada cafe)), (0,(Incorporar_labranza_combinada cafe))]
Numeric Plan Trace saved to pddl2.1/HC/HCV4/3-actions_1-object/instanciaHC.pddl_search_gbfs_h_hadd_break_ties_null.npt
(nivel-emision cafe)=100.0 (presupuesto cafe)=1000.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=90.0 (presupuesto cafe)=900.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=80.0 (presupuesto cafe)=800.0 (time)=0

```

```
Found Plan:
0.0: (Intercalar_cultivos maiz)
1.0: (Intercalar_cultivos yuca)
2.0: (Incorporar_labranza_combinada yuca)
3.0: (Incorporar_labranza_combinada arroz)
4.0: (Incorporar_labranza_combinada arroz)
5.0: (Incorporar_labranza_combinada arroz)
6.0: (Incorporar_labranza_combinada arroz)
7.0: (Incorporar_labranza_combinada arroz)
8.0: (Incorporar_labranza_combinada cafe)
9.0: (Incorporar_labranza_combinada cafe)
10.0: (Incorporar_labranza_combinada maiz)
11.0: (Incorporar_labranza_combinada maiz)
12.0: (Incorporar_labranza_combinada maiz)

Plan-Length:13
Metric (Search):1700.0
Planning Time (msec): 115
Heuristic Time (msec): 83
Search Time (msec): 113
Expanded Nodes:14
States Evaluated:39
Number of Dead-Ends detected:44
Number of Duplicates detected:0
Plan under Validation/Simulation: [(0,(Intercalar_cultivos maiz)), (0,(Intercalar_cultivos yuca)), (0,(Incorporar_labranza_combinada yuca)), (0,(Incorporar_labranza_combinada yuca)), (0,(Incorporar_labranza_combinada arroz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada arroz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada arroz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada arroz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada cafe)), (0,(Incorporar_labranza_combinada cafe)), (0,(Incorporar_labranza_combinada maiz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada maiz)), (0,(Incorporar_labranza_combinada maiz))]
Numeric Plan Trace saved to pddl2.1/HC/HCV4/3-actions-4-objects/InstanciaHC.pddl_search_gbfs_h_hadd_break_ties_null.npt
(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=90.0 (nivel-emision maiz)=100.0 (nivel-emision yuca)=70.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=2000.0 (presupuesto maiz)=2000.0 (presupuesto yuca)=2000.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=90.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=70.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=2000.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=2000.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=90.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=20.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=2000.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1700.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=90.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=10.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=2000.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1600.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=90.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=2000.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=80.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=1900.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=70.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=1800.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=60.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=1700.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=100.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=2000.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=90.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=1900.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=80.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=50.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=1800.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1700.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=80.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=40.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=1800.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1600.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=80.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=30.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=1800.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1500.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0

(nivel-emision cafe)=80.0 (nivel-emision arroz)=50.0 (nivel-emision maiz)=20.0 (nivel-emision yuca)=0.0 (presupuesto cafe)=1800.0 (presupuesto arroz)=1600.0 (presupuesto maiz)=1400.0 (presupuesto yuca)=1500.0 (time)=0
```

