



**TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**OPTIMIZACIÓN DEL TENDIDO DE UN DUCTO
APLICANDO INTELIGENCIA DE ENJAMBRE**

Autor: Martín Ariel Atlas

**Directores de Tesis:
Ing. Diego Ros Rooney
Ing. Julio García Velasco**

2009

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por todo el apoyo que me brindan día a día.

A mi novia, Yael Balbachán, por estar siempre a mi lado y por todo el cariño que le tengo.

Resumen ejecutivo

Se presenta una herramienta con el fin de poder determinar el camino crítico en tres dimensiones aplicando inteligencia de enjambre. Dicha herramienta es utilizada para determinar la ruta óptima de un gasoducto, teniendo en cuenta los costos de inversión y de operación descontados al presente, requerimientos comerciales y restricciones del terreno, técnicas, medioambientales y normativas. En este trabajo se desarrolla una herramienta de simulación basada en la inteligencia de enjambre que permite reducir en un 15% el costo total de un gasoducto de un caso real.

En la actualidad, las empresas constructoras de ductos no utilizan una herramienta analítica integrada para la toma de decisiones sobre la ruta óptima, sino que, por un lado, el proceso se basa fundamentalmente en la experiencia de los ingenieros de ductos y, por otro, las áreas y tecnologías involucradas analizan distintas partes del problema en forma independiente. El análisis de costos se focaliza principalmente en los costos de inversión, no realizándose un análisis integrado con los costos operativos. Por otra parte, esta etapa del proceso requiere la participación de más de un área de una empresa dado que, por ejemplo, el área de ingeniería y construcción suele estar separada del área especializada en costos. Esto implica la participación de una mayor cantidad de recursos y el involucramiento de tecnologías de distinta naturaleza, lo cual se traduce en menor certeza sobre la optimización real de la ruta finalmente seleccionada, mayores costos y tiempos para la toma de decisiones.

En este trabajo se propone el desarrollo de una herramienta informática que permita determinar la ruta óptima de un gasoducto utilizando como base un algoritmo de inteligencia de enjambre, como se denomina a la disciplina que estudia el comportamiento colectivo en sistemas compuestos por varios individuos. El algoritmo matemático utilizado se denomina Ant Colony Optimization, y su lógica se basa en la capacidad que poseen las hormigas para encontrar el camino más corto entre el nido en el que viven y la mejor fuente de alimentación para la colonia. Las hormigas son individuos simples que basan su accionar en el control descentralizado, es decir sin ningún tipo de supervisión, y en la auto-organización para alcanzar sus metas en forma exitosa. Su comportamiento se basa en seguir un conjunto de reglas simples y en dejar rastros de su experiencia en el medioambiente, mediante el depósito de una hormona denominada feromona, para que otras compañeras puedan percibirlos y tomar decisiones basadas en esos rastros. La inteligencia de enjambre se enfoca en el comportamiento colectivo que resulta de las interacciones locales de los individuos entre sí y de los individuos con el medioambiente en el que se encuentran. Se propone utilizar la misma lógica que existe en la naturaleza para resolver el problema de determinación de ruta óptima de un gasoducto, teniendo en cuenta un conjunto de restricciones.

La herramienta informática desarrollada utiliza la lógica de las hormigas dado que los agentes creados deben buscar la ruta de menor costo total entre dos puntos geográficos

(emulando al nido y a la fuente de alimentación de la colonia). Dicha herramienta se basa en la simulación basada en agentes utilizando el programa de NetLogo, que permite construir un escenario y un conjunto de agentes que se mueven a través del mismo siguiendo determinadas reglas. Por último, se toman conceptos de la mecánica de fluidos y de matemática como soporte para la codificación de la herramienta y para la resolución final del problema.

El camino óptimo encontrado utilizando la herramienta construida reduce el costo total en un 15% respecto al gasoducto de un caso real.

Se ha logrado desarrollar una herramienta que podría ser utilizada para tomar decisiones sobre la ruta que debe seguir un gasoducto. La herramienta brinda un soporte analítico confiable, de fácil utilización y que además permite rápidamente realizar cambios de variables y parámetros clave para analizar distintos escenarios. La base analítica radica en la integración de los costos de inversión y operativos, buscando una optimización conjunta de ambos.

Por último, la herramienta podría resolver la misma problemática para otro tipo de ductos (oleoductos, acueductos, etc.) y para otros problemas de camino crítico en tres dimensiones. Asimismo, se podría investigar la integración de la herramienta con otros programas informáticos que forman parte del proceso de construcción de un ducto y, de esta forma, lograr una herramienta única con distintos módulos que brinde una solución integrada para la definición y traza de un ducto.

Executive brief

A tool in order to determine the three-dimensional critical path by applying swarm intelligence is presented. This tool is used to determine a gas pipeline's optimal route, taking into account investment and operating discounted at present costs, commercial requirements, and related to the field, technical, environmental and regulatory restrictions. A simulation tool based on swarm intelligence that reduces by 15% a real case's total cost has been developed.

Nowadays, pipeline construction companies do not use an integrated analytical tool for decision-making on the optimal route; but, on the one hand, the process is fundamentally based on pipeline engineers' experience and, on the other hand, involved departments and technologies analyze different aspects of the problem independently. Cost analysis is primarily focused on investment costs, and the operating costs analysis is not integrated. Moreover, this stage requires the participation of more than one department of a company as, for example, the engineering and construction is often separated from costs area. This involves a greater amount of resources and involvement of different types of technologies, which is translated into less certainty about the optimization of the route finally selected, higher costs and more time in the decision making process.

This paper propounds the development of a tool to determine a gas pipeline's optimal route using an algorithm based on swarm intelligence, as it is called the discipline which studies the collective behavior of systems composed of several individuals. The mathematical algorithm used is called Ant Colony Optimization and its rationale is based on the ability ants have to find the shortest path between the nest in which they live and the best source of food for the colony. Ants are just individuals who base their actions on decentralized control, without any supervision, and self-organization to successfully achieve their goals. Their behavior is based on a limited set of simple rules and on leaving traces of their previous experience in the environment by the deposit of a hormone called pheromone, so that other ants may perceive them and make decisions based on such traces. The swarm intelligence focuses on the collective behavior resulting from local interactions of individuals between themselves and of the individuals with the environment in which they live. It is proposed to use the same logic that exists in nature to solve the problem of determining optimal route of a gas pipeline, taking into account a set of restrictions.

The developed tool uses ants' logic as the agents must seek the least cost path between two points (emulating the nest and the cologne's food supply). This tool is based on agent-based simulation using NetLogo, a software which allows building a "world" and a set of agents that move through it by following certain rules. Finally, some fluids mechanics and math concepts are used as a support for writing the tool's code and for the final resolution of the problem.

The optimal path found using the developed tool reduces a real case's gas pipeline total cost by 15%.

A tool that could be used to make decisions about the route to be followed by a gas pipeline has been developed. The tool provides a reliable analytical support, is easy to use and allows analyzing different scenarios by rapid changes to key variables and parameters. The analysis is based in the integration of investment and operational costs, looking for a joint optimization of both.

Finally, the tool could be used in finding a solution to similar problems for other type of pipelines (oil pipelines, aqueducts, etc.) and for other three-dimensional critical path determination problems. Similarly, the integration of the tool with other software which are part of the process of building a pipeline could be investigated and, thereby, achieving a unique tool with different modules that provides an integrated solution to a pipeline's definition and final design.

Referencia bibliográfica

Se desarrolla una herramienta de optimización basada en algoritmos de inteligencia de enjambre, en la simulación, y en conceptos de mecánica de fluidos para resolver un problema de optimización combinatoria como es la determinación de un camino crítico en tres dimensiones.

En particular, se analiza la determinación de la ruta de menor costo que debe seguir un gasoducto que se desea construir entre dos puntos geográficos, teniendo en cuenta en forma simultánea los costos de inversión y de operación descontados al presente, y una serie de restricciones comerciales, técnicas, medioambientales y legales.

La herramienta puede resolver problemáticas de la traza de ductos en general y sienta las bases para la aplicación de algoritmos de enjambre a otros problemas de camino crítico en tres dimensiones.

Palabras clave: enjambre, hormigas, ducto, optimización, camino crítico en tres dimensiones, simulación, agentes, Ant Colony Optimization.

Abstract

An optimization tool based on swarm intelligence algorithms, on simulation and on fluids mechanics concepts to solve a combinatorial optimization problem as the three-dimensional critical path determination is, is developed.

The finding of the lowest cost route to be followed by a gas pipeline to be built between two points is analyzed, taking into account the simultaneous investment costs and operating costs discounted at present, and a series of commercial requirements and technical, environmental and legal restrictions.

The tool can solve pipelines design problems and lays the groundwork for the application of swarm intelligence algorithms to other three-dimensional critical path problems.

Key words: swarm, ants, pipeline, optimization, three-dimensional critical path, simulation, agents, Ant Colony Optimization.

Agradecimientos

Quiero agradecer profundamente a todos aquellos que han colaborado conmigo en este proyecto, especialmente a:

- Diego Ros Rooney, porque su dedicación, esfuerzo y apoyo resultaron determinantes para que este proyecto salga adelante.
- Julio García Velasco por sus valiosos aportes al proyecto.
- Pablo Videla y su equipo de trabajo, Pablo Genta, Roxana Josens, los profesores Gustavo Cavallo y Remo Frabotta por su colaboración en el proyecto.
- Federico Pereira Chwe, Julián Landerreche, Ernestina Benedetto y Ezequiel Atlas por su ayuda y colaboración.

Tabla de contenidos

1	Introducción	1
1.1	Presentación del problema	1
1.2	Marco teórico	2
1.3	Objetivo del trabajo	4
1.4	Estructura del trabajo	5
2	El tendido de ductos.....	6
2.1	Transporte por cañerías.....	6
2.2	Proceso actual de construcción de ductos.....	9
2.2.1	Disciplinas que intervienen en el proceso.....	9
2.2.2	Determinación de la traza	10
2.2.3	Potenciales mejoras.....	13
3	Inteligencia de enjambre	15
3.1	Definición y clasificación	15
3.2	Los insectos sociales	17
3.2.1	Las hormigas.....	18
3.3	Sistemas de enjambre.....	21
3.3.1	Propiedades de un sistema de enjambre	21
3.3.2	Ventajas y desventajas de un sistema de enjambre.....	22
3.4	Creación de sistemas de enjambre	23
3.5	Ejemplos de comportamientos de enjambre	23
3.5.1	Búsqueda de alimentos	23
3.5.2	Construcción de nidos.....	29
3.5.3	Agrupación de hormigas	31
3.5.4	Bandadas y cardúmenes.....	32
3.5.5	Transporte de objetos pesados	33
3.5.6	Otros comportamientos y aplicaciones	33
3.6	La estigmergia.....	35
3.6.1	La auto-organización	38
4	Optimización de colonia de hormigas	43

4.1	ACO Metaheurístico.....	44
4.2	Principales algoritmos ACO.....	47
4.3	Convergencia de las soluciones.....	49
4.4	Comparación entre ACO y las hormigas reales	50
4.5	Aplicaciones del ACO	52
4.5.1	Aplicaciones a problemas NP-hard	52
4.5.2	Aplicaciones a redes de telecomunicación	53
4.5.3	Aplicaciones a problemas industriales	54
5	La simulación como herramienta	55
5.1	Introducción.....	55
5.2	Pasos en un estudio de simulación	56
5.3	Terminología a utilizar en el modelo	59
5.4	Modelización basada en agentes	59
5.4.1	Introducción.....	59
5.4.2	Características	60
5.4.3	Áreas de aplicación	61
5.4.4	¿Por qué ABM es adecuado para este problema?	61
6	Conceptos de mecánica de fluidos	63
6.1	Introducción.....	63
6.2	Optimización	64
6.2.1	Costos	64
6.2.2	Desarrollo matemático	67
7	Herramienta	74
7.1	Formulación del problema y objetivos.....	74
7.2	Modelo conceptual	75
7.2.1	Definiciones.....	75
7.2.2	Descripción de la lógica del modelo	77
7.2.3	Supuestos y simplificaciones.....	81
7.2.4	Límites del modelo	82
7.2.5	Agentes y decisiones	83
7.2.6	Variables.....	83

7.2.7	Variables de control	84
7.3	Modelo de datos	85
7.3.1	Requerimientos comerciales	85
7.3.2	Información del terreno	85
7.3.3	Parámetros	90
7.4	Modelo operacional	93
7.4.1	Selección de programa de simulación	93
7.4.2	Breve descripción de NetLogo	95
7.4.3	Codificación del modelo	96
7.5	Verificación y validación del modelo	124
7.5.1	Verificación del modelo	124
7.5.2	Validación del modelo	125
7.5.3	Resultados de la verificación y validación	125
7.6	Diseño experimental	126
7.6.1	Período de calentamiento (warm-up)	126
7.6.2	Duración de las corridas	126
7.6.3	Plan de cuadros	127
8	Análisis de resultados	128
8.1	Caso base	128
8.2	Análisis del caso base	132
8.3	Análisis de sensibilidad	135
9	Conclusiones y futuras líneas de investigación	136
10	Anexos	140
10.1	Factor de diseño	140
10.2	Programas de simulación basada en agentes	141
11	Bibliografía	153

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los primeros pasos en la construcción de un ducto es determinar la ruta por la que éste deberá pasar. La resolución de este punto no es una tarea sencilla. Los puntos de inicio y destino pueden estar separados por hasta miles de kilómetros, y entre ellos hay un curso plagado de obstáculos, como montañas irregulares, ríos, pantanos, aldeas, pueblos, parques nacionales y áreas sensibles del medioambiente. La tarea es encontrar la ruta de menor costo total de inversión y operación, teniendo en cuenta a la vez otros factores como la operación futura, el impacto en el medioambiente, impacto social, requerimientos comerciales, facilidad para construcción, legislación, etc.; desafío que comúnmente es afrontado por los ingenieros de ductos. Existen muchas interacciones y complejidades que deben ser tenidas en cuenta cuando se recorren distintos terrenos y distintos países y regiones. Investigar una oportunidad de inversión en un ducto, evaluar un proyecto de ductos o planear una ruta de un ducto, todos requieren una gran cantidad de datos a ser recolectados por adelantado, cubriendo factores que varían desde lo geográfico y topográfico hasta las políticas locales, infraestructura existente y la ubicación de áreas sensibles del medioambiente. El proceso completo puede demorar meses, y las decisiones realizadas pueden depender mucho de la experiencia y de cálculos manuales. El proceso, a menudo, se concentra en profesionales sentados frente a un mapa analizando la traza del ducto. En muchas ocasiones resulta muy difícil corroborar si la solución finalmente encontrada es realmente el óptimo desde el punto de vista económico y teniendo en cuenta las restricciones mencionada anteriormente.

Para la solución de esta problemática se propone el desarrollo de una herramienta de simulación basada en el concepto de inteligencia de enjambre, la cual, entre otras ventajas, reducirá el tiempo del proceso de la toma de decisiones y proveerá un soporte analítico objetivo que permita justificar la selección de la traza y tener mayor certeza que se trata de la solución óptima.

1.1 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La determinación de la ruta por la que un gasoducto deberá pasar es una problemática que siempre ha sido objeto de investigación por parte de aquellas empresas que tienen como actividad principal el diseño y la construcción de los mismos y de las consultoras que las asesoran en dicha materia. En la actualidad, las empresas continúan en la búsqueda de herramientas o algoritmos que provean soluciones que permitan integrar en un mismo análisis la gran cantidad de variables que deben contemplarse en la evaluación de dichos tendidos.

El problema involucra múltiples variables de distinta naturaleza. En el terreno en el que se realizará el tendido del ducto suelen presentarse una gran cantidad de restricciones, cuyas características pueden variar dependiendo de la región geográfica. Estas restricciones, que deben incluirse en el análisis, actúan como obstáculos y pueden agruparse en dos categorías: naturales o artificiales. En el primer grupo se encuentran

las características físicas del terreno, como las montañas, ríos, lagos y lagunas, tipos de suelo y patrimonios naturales, entre otros. En el segundo grupo se encuentran, entre otros, las zonas urbanas (riesgo social), represas, plantas generadoras de energía, zonas arqueológicas, zonas cercanas a propiedades privadas de alto valor o áreas relevantes para el gobierno (por ej. campos militares y zonas militares restringidas). Algunos obstáculos directamente deben ser evitados, como por ejemplo los patrimonios naturales, mientras que superar otros puede conllevar un costo adicional, como por ejemplo los ríos. Como, además, existe la alternativa de la construcción en altura y en profundidad y el relieve del terreno es irregular, el problema a resolver se presenta en tres dimensiones.

El análisis del tendido de un ducto se basa en determinar el camino por el que deberá pasar y las especificaciones del mismo, optimizando el costo total y teniendo en cuenta las restricciones presentes en el terreno junto con el marco regulatorio y ambiental de la región. El costo total está definido como la suma del costo de la inversión inicial para construir el ducto y el costo de operación del mismo a lo largo de su vida útil, incluyendo el mantenimiento, descontado a una tasa apropiada para la industria.

En la actualidad existen varias empresas en el mundo que diseñan y construyen gasoductos (por ejemplo Techint en Argentina, Bechtel, Technip, Saipem, WorleyParsons, AMEC PLC, Stroitransgaz), que utilizan técnicas que abordan al problema sólo por partes y no de forma integrada. Por ejemplo, el costo de inversión y el de operación no se analizan en forma conjunta buscando una optimización del recorrido y del dimensionamiento del ducto, sino que cada uno es evaluado en forma independiente y en una etapa distinta. Por otro lado, las rutas alternativas son determinadas en base a la experiencia de los ingenieros de ductos sin utilizar una herramienta informática específica que sustente dichas alternativas y que permita tomar una decisión más objetiva. Además, en este proceso suelen intervenir distintas áreas de una misma empresa y una mayor cantidad de recursos y, por lo tanto, esto impacta en un mayor costo.

En muchas ocasiones se obtienen soluciones que se supone que son las óptimas, pero que en la práctica es muy difícil de corroborar dado que no hay herramientas que permitan realizar una evaluación integral de todas las variables en juego. Y éste es el gran desafío que se plantea en este trabajo: lograr integrarlas en una misma herramienta que permita encontrar la solución óptima.

1.2 MARCO TEÓRICO

Para construir esta herramienta, se plantea la alternativa de utilizar algoritmos basados en la teoría de enjambres para resolver la problemática mencionada. Debido a la lógica que hay detrás de estos algoritmos, éstos constituyen una base interesante de una herramienta que sea capaz de resolver eficientemente la problemática del tendido de ductos, considerando las variables técnicas, de la naturaleza y económicas.

El comportamiento de algunas especies del reino animal ha sido una fuente de inspiración para el desarrollo de soluciones innovadoras a diversos problemas de ingeniería. En los últimos veinte años, los biólogos y científicos han estudiado a las comunidades de abejas, avispas, termitas y hormigas, entre otros insectos sociales, bancos de peces, bandadas de aves y distintos grupos de animales terrestres, con el objetivo de entender cómo se organizan para llevar a cabo eficazmente diversas tareas complejas que requieren una alta coordinación de sus miembros y para adaptarse rápidamente a cambios en el medio en el que se encuentran. La observación del comportamiento de los seres vivos ha dado origen a diversas disciplinas, entre las que se encuentran los algoritmos genéticos, las estrategias de evolución y las redes neuronales, entre muchas otras.

La inteligencia de enjambre (IE) es la disciplina que estudia el comportamiento colectivo en sistemas compuestos por varios individuos simples que basan su accionar en el control descentralizado (es decir, sin ningún tipo de supervisión) y en la auto-organización para alcanzar sus metas exitosamente, para aplicar dicho comportamiento a la resolución de diversos problemas complejos. En particular, la disciplina se enfoca en el comportamiento colectivo que resulta de las interacciones locales de los individuos entre sí y de los individuos con el medioambiente en el que se encuentran. La IE es una rama de la inteligencia natural, disciplina que estudia el comportamiento de los seres vivos, y alimenta los estudios de inteligencia artificial, disciplina que se encarga de estudiar y desarrollar procesos artificiales que imitan a la inteligencia de los seres vivos.

El comportamiento inteligente de los sistemas de enjambre frecuentemente se origina a través de una comunicación indirecta entre sus miembros, que se conoce como el principio de *estigmergia*¹. Este tipo de comunicación se basa en el hecho de que dichos miembros tienen la capacidad de interactuar con el medioambiente, recibiendo y procesando información del mismo. Por lo tanto, si bien actúan en forma independiente, a través del medioambiente dejan rastros de su experiencia, los cuales son útiles para las decisiones que deban tomar otros individuos que pertenecen al sistema. De esta forma, aunque no exista un control centralizado que indique u ordene cómo deben comportarse los agentes individuales, las interacciones locales entre los agentes son la base del comportamiento global. Así, por ejemplo, las colonias de insectos llevan a cabo actuaciones de nivel complejo de forma inteligente, flexible y fiable, que no serían factibles si tuviesen que ser realizadas por un insecto de forma individual (éstos son no inteligentes, no fiables y simples). Los agentes individuales no tienen conocimiento sobre resolución de problemas: el comportamiento inteligente del grupo surge como resultado del accionar de las sociedades de estos agentes, cada uno de los cuales sigue reglas simples y utiliza comunicación local simple.

¹ Stigmergy, en inglés.

En particular, los insectos sociales (y especialmente las hormigas) han inspirado un sinnúmero de métodos y técnicas, entre las cuales la más estudiada y la más exitosa es una técnica de optimización general conocida como Ant Colony Optimization² (ACO) [Dorigo, Birattari & Stützle, 2006], que será desarrollada en el capítulo 4, dado que la lógica del mismo es la base de la herramienta que se desarrolla en el presente trabajo.

En efecto, los insectos sociales emplean algoritmos ingeniosos y sofisticados para evaluar una variedad de situaciones, como por ejemplo nuevos lugares para asentar sus nidos o emigrar en forma coordinada. Otras actividades que han sido estudiadas son las siguientes:

- Construcción de puentes.
- Construcción y mantenimiento de hormigueros, colmenas de abejas y los montículos en donde habitan las termitas.
- Cooperación para transportar objetos de tamaños grandes.
- Encontrar las rutas más cortas desde el nido hasta una fuente de comida.
- Regular la temperatura de sus nidos con un rango de precisión de un grado Celsius.
- Explotar preferencialmente la fuente de comida más rica disponible alrededor del nido.

Muchos de estos comportamientos dieron origen a diversos algoritmos para resolver problemas de ingeniería. Southest Airlines, por ejemplo, implementó un algoritmo basado en la capacidad de las hormigas para hallar la ruta más corta desde el nido hasta la fuente de comida, para resolver un problema en el sector operativo de carga de mercadería [Bonabeau & Meyer, 2001]. British Telecom ha implementado algoritmos basados en comportamientos de hormigas para mejorar el flujo de información en la red de telecomunicaciones. De igual forma, Unilever, McGraw-Hill y Capital One han utilizado algoritmos basados en insectos sociales para desarrollar formas más eficientes de organizar el equipamiento en sus fábricas, dividir tareas entre los trabajadores, organizar a la gente y aún para delinear estrategias [Bonabeau & Meyer, 2001].

Los insectos sociales pueden inspirar nuevas soluciones a varios problemas actuales en distintos ámbitos para los que las soluciones robustas son difíciles o imposibles de encontrar utilizando aproximaciones tradicionales.

1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo de este trabajo es implementar el modelo ACO, que está basado en la capacidad de las hormigas para encontrar la ruta más corta entre el nido y la fuente de alimentación, para la resolución de un problema de optimización combinatoria como es la determinación del camino crítico en tres dimensiones. En particular, se analizará el

² Optimización de la Colonia de Hormigas.

camino óptimo para el tendido de un gasoducto entre dos puntos geográficos separados por una larga distancia y por un terreno con diferentes relieves y obstáculos naturales y artificiales. Para ello, se desarrollará un modelo de simulación.

El método ACO reduciría notablemente los tiempos de procesamiento de la información en comparación con las técnicas actuales por la lógica que cada agente lleva consigo mismo, ya que tienen en cuenta el resultado obtenido por distintos agentes que llevaron a cabo la misma secuencia con anterioridad. Esta lógica hace que en un menor lapso de tiempo se converja hacia la solución óptima.

Por otro lado, la lógica de los agentes hormigas permitiría analizar en forma integrada la curva de costos de construcción y de costos operativos, al tiempo que tiene en cuenta distinta información sobre el terreno, requerimientos comerciales, marco normativo, restricciones ambientales, etc. De esta forma, la industria de la construcción de ductos podría contar con una herramienta informática con la cual el proceso de toma de decisiones será más objetivo al estar respaldadas por una herramienta analítica de optimización.

Se simuló el tendido de un gasoducto real mediante un prototipo del modelo de simulación, analizando los beneficios del método aplicado frente a los sistemas actuales de diseño.

Otro de los aportes interesantes de este trabajo es el desarrollo de una aplicación de algoritmos de enjambre a la resolución de un problema de búsqueda de camino crítico en tres dimensiones, cuya base puede ser aplicada a otros problemas con estas características y no sólo a la optimización en el tendido de un gasoducto. En una búsqueda bibliográfica realizada, no se han encontrado aplicaciones de estas características.

1.4 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

En el segundo capítulo de este informe se describirá el proceso actual de determinación de ruta óptima para ductos y la problemática actual de las empresas. En el tercer, cuarto, quinto y sexto capítulos se desarrollarán las bases teóricas de la herramienta que se desea construir. En el tercer capítulo se presentará el concepto de inteligencia de enjambre y el mundo de los insectos sociales, con especial foco en el comportamiento de búsqueda de alimento de las hormigas, que servirá como base para el desarrollo de la herramienta. El cuarto capítulo está destinado al modelo ACO, la base lógico-matemática de la herramienta. En el quinto capítulo se introduce la herramienta a utilizar para resolver el problema del tendido de gasoductos: la simulación basada en agentes. En el sexto capítulo se presenta el marco teórico de mecánica de fluidos y optimización. En el séptimo capítulo se aborda el problema concreto del tendido de gasoductos mediante el desarrollo la herramienta. En el octavo capítulo se presentan el análisis y los resultados obtenidos con la herramienta y, en el último capítulo se presentan las conclusiones del proyecto.

2 EL TENDIDO DE DUCTOS

2.1 TRANSPORTE POR CAÑERÍAS

Un ducto es una construcción que se utiliza como medio de transporte de distintos fluidos entre un punto y otro. En el presente informe se trabajará con ductos capaces de transportar grandes volúmenes de fluido entre dos lugares separados por varios kilómetros. En particular, el fluido que se analizará es un gas, por lo que dichos ductos se denominan gasoductos. También existen oleoductos, que se utilizan para transportar petróleo, o acueductos que transportan agua, ductos que transportan productos derivados del petróleo, etc. La planificación y construcción de los grandes ductos requiere especial atención, dado que en su recorrido probablemente se encuentren diversos obstáculos que deben ser superados.

El transporte por tubería consiste básicamente en la conducción de fluidos (líquidos, gases) o materias fluidificadas, a presión y de manera continua, a lo largo de una línea constituida esencialmente por una tubería, que hace el doble papel de vehículo y de vía.

Los tubos utilizados en los transportes por tubería son de diversos materiales (acero, plásticos, etc.), habiéndose alcanzado últimamente grandes avances en la calidad de los materiales y en la protección frente a la corrosión de las tuberías enterradas.

En general, se puede transportar cualquier materia fluida por tubería; pero, en la actualidad, se transportan básicamente los mencionados en la siguiente tabla:

Categoría de productos	Producto	Nombre del ducto
Materias energéticas	- Petróleo	Oleoducto
	- Productos refinados (gasóleo, gasolina, kerosene)	
	- Fuelóleo (con calentamiento)	Fueloducto
	- Gas natural	Gasoducto
	- Gas natural licuado (con enfriamiento)	
	- Gases Licuados de Petróleo (Propano, Butano)	
Materia básica no energética	- Carbón (pulverizado)	Carboductos
	- Agua	Acueducto
	- Amoníaco (con enfriamiento)	Amonoductos
	- Etileno	Etilenoductos
Materias no energéticas	- Otras materias (anhídrido carbónico, oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, minerales de hierro, cobre, concentrados de fosfatos, caolín, caliza, estériles de estos u otros minerales, granos de cereales (en medio de aire), desechos, etc.)	

Tabla 1. Transporte en ductos

A continuación se enumeran los elementos esenciales que componen un transporte por tubería típico:

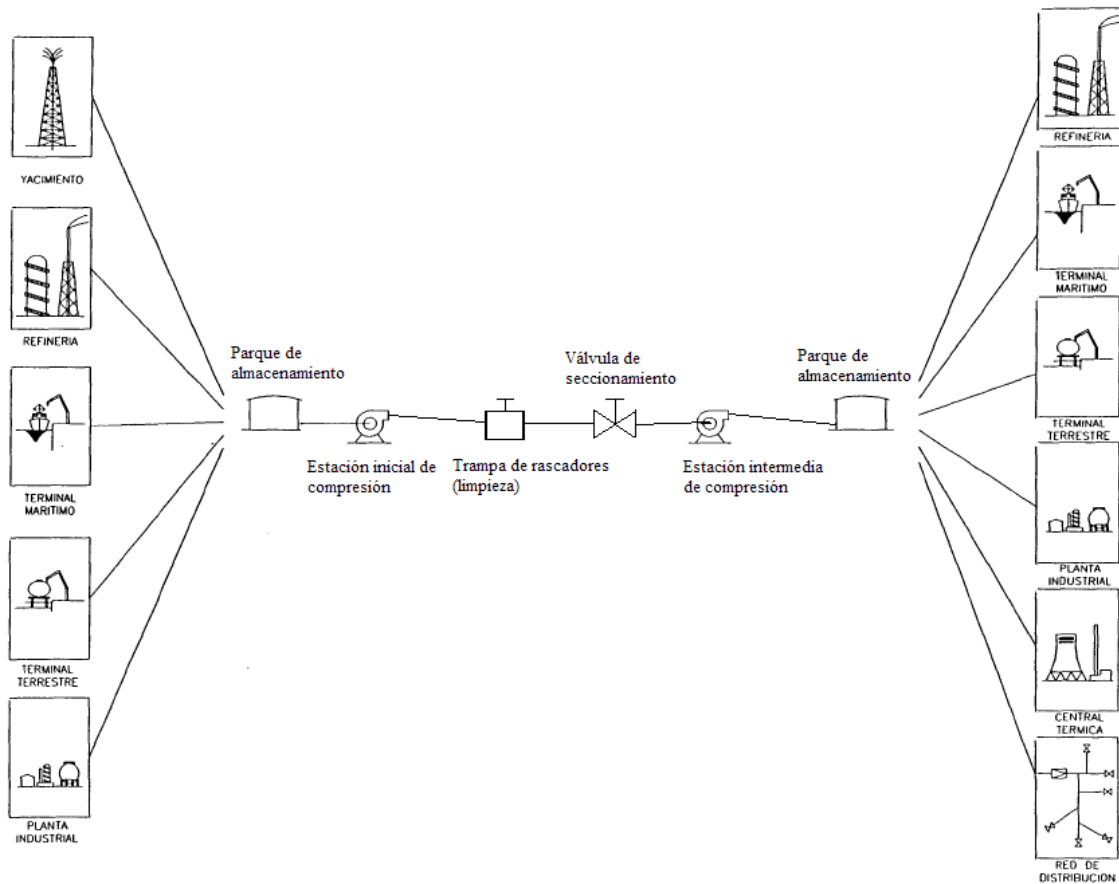


Figura 1. Algunos elementos típicos de un gasoducto

Primeramente, el transporte puede tener su origen en

- un yacimiento,
- una refinería o planta de tratamiento,
- un terminal marítimo o terrestre,
- una planta industrial.

En todos los casos, ya sea a través de la red de tuberías de recogida, de las tuberías de salida de las unidades de tratamiento o de las tuberías de descarga del buque, se llega a un parque de almacenamiento, que se suele disponer en el comienzo del transporte por tubería para asegurar la regulación del fluido antes de su impulsión, mediante bombas o compresores, a través de la canalización. En el caso de un gas, esta compresión le aporta la presión necesaria para transportarse a una alta velocidad. A medida que el gas se transporta, la presión del mismo disminuye hasta llegar a un mínimo en el que se necesita una nueva compresión. Esto se realiza colocando estaciones de compresión intermedias a lo largo de la conducción, que aporten en forma de presión la energía perdida en el transporte. La siguiente figura muestra cómo es la variación de presión a lo largo del recorrido. Al cociente entre la presión máxima y la mínima se lo denomina relación de compresión.

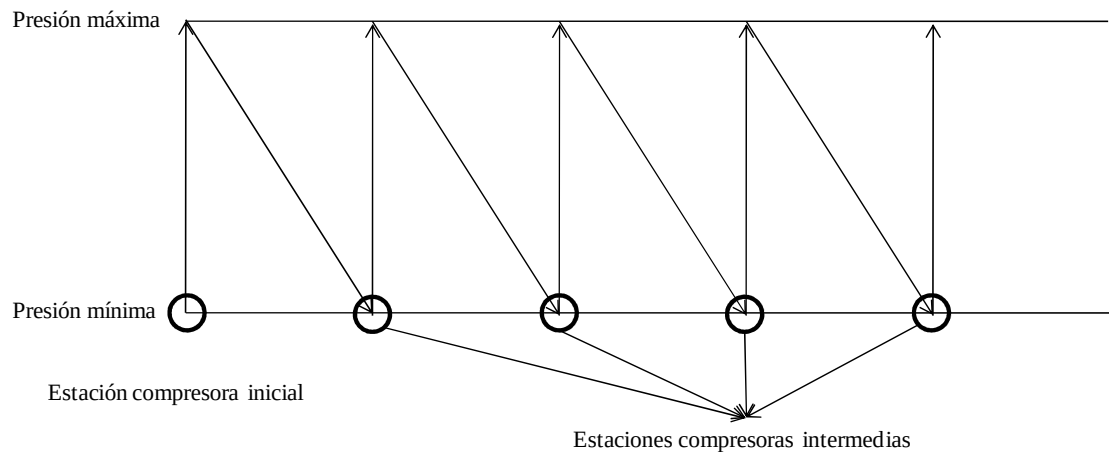


Figura 2. Variación de presión del gas a lo largo del gasoducto

La función de una estación compresora de gas es elevar la presión del fluido en la línea, con el fin de suministrar la energía necesaria para su transporte. Para la estación compresora se cuenta con una línea de succión donde el flujo inicia su recorrido, pasando luego por unos medidores de flujo computarizados que son los encargados de medir y almacenar minuto a minuto toda la información referente a la corriente de entrada, datos de presión, temperatura, volumen y caudal. El gas continúa su recorrido hacia los compresores, pasando antes por los "scrubbers", que se encargan de extraer el posible contenido de líquido. Finalmente, el gas a una mayor presión, sale por la línea de descarga de las compresoras, pasando por los medidores de flujo de esta línea. Toda estación cuenta, también, con un suministro de potencia para la puesta en marcha de los compresores, un motor por cada compresor, un ventilador para el sistema de enfriamiento, un sistema de válvulas que regulan el paso de gas tanto para el funcionamiento de los compresores como para el sostenimiento de la presión de trabajo deseada, un pequeño compresor para el accionamiento de dichas válvulas, filtros que se encargan de extraer las impurezas que pueda contener el gas para cumplir con los requerimientos del mercado y toda la instrumentación necesaria para el control del proceso de compresión. Además, dentro de la estación hay tanques de almacenamiento para los lubricantes y refrigerantes que son utilizados en los motores, y para los condensados drenados en la operación, esto último, con el propósito de proteger y conservar el entorno natural.

En el punto final de entrega, el fluido se recibe en otro parque de almacenamiento, que puede estar situado en una refinería, una terminal marítima o terrestre, una planta industrial, una central térmica, o incluso la tubería puede ramificarse (red de distribución) hasta llevar el producto directamente a cada uno de los usuarios, como es el caso del gas natural. La optimización del número de estaciones compresoras y de la potencia de las mismas hace que el fluido llegue a dicho punto final a la mínima presión admisible.

Otros elementos complementarios necesarios para la línea de transporte son: la protección catódica contra la corrosión, las trampas de rascadores (escotillas que se

utilizan en el proceso de limpieza del ducto), las válvulas de seccionamiento en línea, los elementos de control y regulación, las telecomunicaciones, la protección contra incendios, etc.

2.2 PROCESO ACTUAL DE CONSTRUCCIÓN DE DUCTOS

En el desarrollo de un transporte por tubería se pueden distinguir tres etapas: el proyecto, la construcción y la explotación.

Durante la primera etapa se realiza la concepción de la instalación, a base de definir, calcular, diseñar y presupuestar los elementos de que se compone y que luego habrá que construir. El conjunto de las dos primeras etapas (proyecto + construcción) constituye la fase de creación de la infraestructura, que luego va a pasar a la fase de su explotación.

La primera etapa incluye fundamentalmente tres grandes subetapas:

1. Determinación de la necesidad de construir un gasoducto.
2. Determinación de los puntos de inicio y de partida del gasoducto.
3. Determinación del recorrido del gasoducto, especificaciones y diseño.

Este trabajo estará focalizado en la tercera subetapa, es decir, en la determinación del recorrido del gasoducto, teniendo en cuenta las primeras dos subetapas y las etapas de construcción, operación y mantenimiento del ducto.

Se asume que las primeras dos subetapas ya se han completado, es decir, se cuenta con la necesidad de construir un ducto y se han determinado los puntos de partida y de destino, conociéndose, además, las características y propiedades del gas a transportar (densidad, viscosidad, masa molar, composición, etc.) y los requerimientos comerciales en el punto de llegada. Por lo general, es el cliente quien realiza los estudios de mercado para determinar la necesidad de construir un gasoducto y qué regiones deberá atravesar. Luego, con la determinación de la ruta óptima, se realiza un análisis económico para determinar la factibilidad del proyecto.

2.2.1 Disciplinas que intervienen en el proceso

El proceso de construcción de un ducto involucra diversas disciplinas técnicas:

1. La hidráulica, la mecánica de fluidos y la termodinámica: para los cálculos hidráulicos y de dimensionamiento de las secciones y diámetros de los tubos, de las potencias de compresión, así como para los cálculos de la distribución de las temperaturas a lo largo de la línea (en los casos de fluidos calentados o enfriados).
2. La cartografía, la fotografía aérea y la topografía: para los estudios del trazado de la línea.
3. La geología y la geotecnia: para los estudios del trazado y para la disposición de los medios constructivos necesarios.
4. La oceanografía: en el caso de conducciones submarinas.

5. La resistencia de materiales, la elasticidad y la plasticidad: para los cálculos de tensiones y de espesor de los tubos.
6. La mecánica: para la elección adecuada de los materiales de tubos y accesorios, válvulas, bombas y compresores, así como de los motores de combustión interna (en caso de accionamiento diesel).
7. La electrotecnia: para los motores eléctricos, las acometidas eléctricas y la protección catódica de las instalaciones.
8. La instrumentación, la telecomunicación y la informática: para el control, la regulación y la automatización de las instalaciones.
9. La economía del transporte: para los estudios integrados de transporte, costo del mismo y evaluación de proyectos.
10. La economía de construcción para determinación del costo de inversión.
11. La estadística y la matemática como soporte de todas las anteriores

2.2.2 Determinación de la traza

A partir de reuniones con una empresa que se dedica a la construcción de ductos y de conversaciones telefónicas con un ingeniero en ductos con experiencia en diseño y construcción de ductos en Arabia Saudita, Sudán, México, Estados Unidos e Italia, entre otros, se hizo un relevamiento de la metodología actual de determinación de la traza de un ducto.

El proceso de determinación de la traza óptima en la actualidad se puede resumir en las siguientes etapas:

1. Definición en gabinete de alternativas de trazas en base a información de topografía digital y cartas digitales GIS³ de la zona en estudio.
2. Recorridas de campo para visualizar las alternativas de traza e identificar dificultades constructivas y de logística. De la recorrida surgirá un ranking de alternativas viables.
3. Simulación hidráulica sobre las alternativas seleccionadas para dimensionar las instalaciones necesarias de cada una para transportar el caudal del fluido en las condiciones solicitadas por el cliente.
4. Análisis de costos (presupuestario) de las instalaciones necesarias (según cálculo hidráulico) y las obras de montaje (según definición y recorrida de traza).
5. La traza óptima será la que con menor costo asegure las condiciones de entrega solicitadas por el cliente. Obviamente las dificultades constructivas encarecerán la alternativa.

Este esquema se representa en el siguiente diagrama de flujo:

³ Sistema de información geográfica.

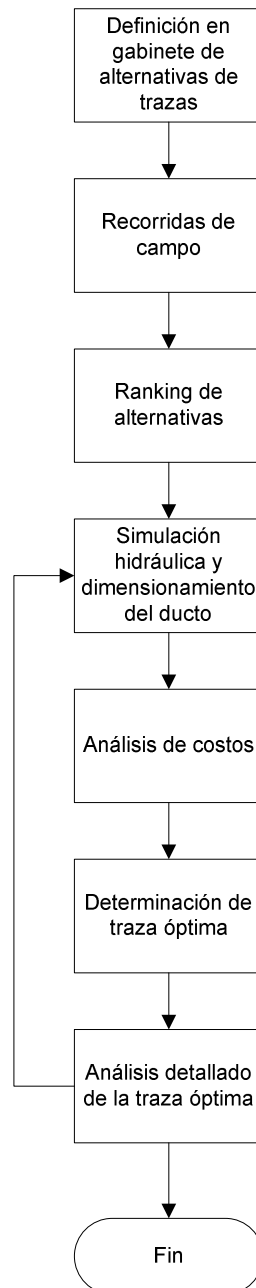


Figura 3. Proceso actual de determinación de la traza óptima de un ducto

El principal objetivo del proceso de determinación de la traza es establecer cuál es la mejor alternativa de ruta por la que deberá pasar el ducto y las especificaciones del mismo. Una vez seleccionada la traza óptima de acuerdo al proceso mencionado, ésta debe ser sometida a un riguroso análisis detallado con la finalidad de realizar los ajustes necesarios. El análisis se realiza para distintos tramos del ducto mediante simulaciones hidráulicas. En esta etapa se involucran otras disciplinas como la ingeniería de detalle y constructiva, lo que permite redimensionar al ducto y recalcular todas las variables y parámetros, realizándose una nueva optimización de la línea que por supuesto estará basada en la traza determinada originalmente. De esta forma la traza óptima es ajustada.

Una vez iniciada la etapa de construcción, es muy común que aparezcan factores que no habían sido tenidos en cuenta en el análisis original (por ejemplo, un río no relevado, un asentamiento poblacional indígena, condiciones del suelo no contempladas, etc.) que obligan a replantear la traza seleccionada continuamente.

El proceso completo involucra distintas áreas de una empresa, en especial las áreas de ingeniería y construcción y de costos, quienes trabajan conjuntamente. Los equipos conformados suelen ser numerosos dado que distintas partes se especializan en distintos aspectos del proceso: un grupo es encargado de realizar simulaciones hidráulicas, otro grupo releva el terreno, otro grupo realiza el análisis de costos, etc.

Distintos programas informáticos son utilizados en la etapa de determinación de la ruta óptima. A continuación se mencionan los más importantes:

- Arcview GIS: información georeferenciada.
- MapInfo: información georeferenciada.
- Icarus: comparación de alternativas de rutas.
- CAD: diseño 2D y 3D.

Las primeras dos etapas del proceso de determinación de ruta óptima intentan determinar la mejor ruta posible para el ducto, primero trabajando en gabinete y luego recolectando información de campo. El resultado de este análisis arroja entre tres y cuatro rutas alternativas aproximadamente. El análisis está basado fundamentalmente en la experiencia de los ingenieros de ductos, quienes ya conocen por dónde puede o no pasar una línea. No utilizan ninguna herramienta informática específica para evaluar distintas trazas y compararlas. Para evaluar las distintas alternativas, se basan en distintas premisas que surgen de experiencias anteriores. Entre ellas, se pueden destacar las siguientes:

1. Menor longitud posible de la línea de conducción.
2. Minimizar los cambios de altura.
3. Evitar el paso por zonas habitadas.
4. Evitar el cruce de intercambios de autopistas.
5. Evitar el cruce de zonas industriales, comerciales y de infraestructura.
6. Evitar el cruce de zonas con construcciones.
7. Cruzar el mínimo número de propiedades privadas.
8. Minimizar el cruce de zonas de interés público.
9. Evitar el paso de zonas de bosques.
10. El cruce de ríos debe hacerse, preferiblemente, por la parte que presente un menor ancho.
11. Evitar el paso por lagos.
12. Evitar el cruce de zonas naturales protegidas.
13. Evitar el cruce de zonas arqueológicas.
14. Es preferible que la ruta seleccionada se encuentre cerca, o mejor aún, adyacente de las líneas de tensión.

15. Es preferible que la ruta seleccionada se encuentre adyacente a caminos, carreteras o líneas de ferrocarril.

Utilizando estas premisas, los ingenieros descartan rápidamente aquellos caminos que atraviesan regiones prohibidas o conflictivas y construyen las alternativas mencionadas. A partir de estas alternativas realizan el análisis del perfil hidráulico para cada una de ellas, utilizando un software específico y también estiman rápidamente un costo de inversión. Los resultados del modelo hidráulico se utilizan luego para alimentar otra plataforma informática, que permite analizar en forma comparativa las distintas alternativas de rutas preseleccionadas, pero que a la vez cuenta con poco nivel de precisión. Los resultados son posteriormente analizados en conjunto con el cliente para o bien seleccionar una de las alternativas o bien para abandonar el proyecto en caso de que no sea factible de realizar.

2.2.3 Potenciales mejoras

En el proceso descrito anteriormente, se identifican distintos puntos de mejora.

Un primer aspecto que puede desprenderse de la descripción anterior radica en la subjetividad de la toma de decisiones. En efecto, el proceso se inicia con la determinación de distintas alternativas de traza que surgen principalmente de la experiencia de los ingenieros de ductos. Si bien el primer análisis de gabinete es reforzado con recorridos de campo y con simulación hidráulica, existe poca objetividad en la selección de alternativas dado que por lo general suelen realizarse a mano alzada por la mayoría de las empresas en todo el mundo y no están sustentadas con una herramienta analítica y, por otro lado, tampoco se analiza toda la combinatoria posible de posibilidades. En muchas ocasiones, la etapa de determinación de la traza es subestimada y las empresas deciden avanzar con el proyecto sin haber realizado un riguroso análisis. Luego, en la recorrida de campo, los ingenieros podrían descubrir que varias de las alternativas analizadas no son factibles. Esto genera no sólo pérdida de tiempo sino también de recursos y de dinero, dado que el esfuerzo involucrado en el análisis del perfil hidráulico de las alternativas, estimación de costos y discusión con el cliente de los resultados es desperdiciado. Existen numerosos ejemplos de la vida real en los que se ha comenzado con la etapa constructiva de un ducto sin haber realizado un análisis a conciencia de la traza del mismo, y se han encontrado casos insólitos en los que han tenido que realizar costosas inversiones por desviaciones del ducto o indemnizaciones por daños al medioambiente, en muchas ocasiones irreparables.

Un segundo aspecto que sale a la luz es la intervención de distintas áreas de la empresa, incluso en una etapa preliminar, dado que el área especializada en ingeniería y construcción suele ser diferente a la especializada en costos. A mayor especialización en las tareas, mayor cantidad de personas se ven involucradas y esto se traduce en un mayor costo y tiempo en el proceso de toma de decisiones.

Un tercer aspecto que se puede apreciar es que el análisis de las distintas variables que intervienen en la toma de la decisión no se realiza en forma integrada. No sólo

participan distintos sectores sino que también utilizan distintos programas informáticos para cada etapa, muchos de ellos no vinculados entre sí, e incluso distintos criterios de selección no integrados entre sí. El ejemplo más claro es que los costos de inversión y de operación se manejan en forma separada, es decir que no se utiliza una única herramienta que evalúe conjuntamente ambos grupos de costos buscando alguna optimización en el tendido.

No se observa en el proceso un análisis integrado, sino más bien una visión fragmentada del problema. De esta forma, se podrían obtener soluciones que se supone que son las óptimas, pero que en la práctica es muy difícil de corroborar dado que no hay herramientas que permitan realizar una evaluación integral de todas las variables en juego.

3 INTELIGENCIA DE ENJAMBRE

3.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

En la naturaleza existen diversos grupos de animales cuyos comportamientos, ya sea por su coordinación o por su perfección, han llamado la atención de los investigadores científicos. Tony White, profesor asociado de Ciencias de la Computación en la Universidad de Carleton, utilizó el término “orquestados” para describir algunos movimientos de estos grupos. Por ejemplo, un cardumen se mueve y huye de los depredadores en forma perfectamente coordinada, un grupo de hormigas busca alimento para su nido en forma organizada y eficiente y una bandada se mueve como si fuera “un conjunto de danza con una excelente coreografía” [White, 2005].

En los últimos veinte años, el comportamiento de varias especies de insectos y animales ha captado el interés de investigadores pertenecientes a diversos ámbitos de la ciencia, en especial biólogos y computadores científicos, quienes han estudiado cómo modelar enjambres de insectos sociales para comprender cómo interactúan entre sí para alcanzar metas complejas y cómo se desarrollan. Los ingenieros, cada vez en mayor medida, también han comenzado a interesarse en los enjambres biológicos y en el comportamiento colectivo de los insectos sociales (denominado comportamiento de enjambre) dado que la inteligencia resultante de los enjambres puede ser aplicada en diversas áreas, como por ejemplo optimización de procesos, robótica, patrones de rutas en sistemas de transporte y aplicaciones militares [White, 2005].

Se define a la inteligencia de enjambre como la disciplina que estudia el comportamiento colectivo en sistemas naturales y artificiales compuestos por varios individuos simples que basan su accionar en el control descentralizado (es decir, sin ningún tipo de supervisión) y en la auto-organización para alcanzar sus metas exitosamente, con el objetivo de trasladar dicho comportamiento a la resolución de problemas de las personas en el mundo real. En particular, la disciplina se enfoca en el comportamiento colectivo que resulta de las interacciones locales de los individuos entre sí y de los individuos con el medioambiente en el que se encuentran [Dorigo & Birattari, 2007]. La IE es una rama de la inteligencia natural, disciplina que estudia el comportamiento de los seres vivos, y alimenta los estudios de inteligencia artificial, disciplina que se encarga de estudiar y desarrollar procesos artificiales que imitan a la inteligencia de los seres vivos.

La IE es un acercamiento relativamente nuevo a la resolución de problemas, que se ha inspirado en el comportamiento social de algunas especies de insectos y de otros animales. Algunos de los sistemas estudiados por la IE son las colonias de hormigas y termitas, bancos de peces, bandadas de aves, y manadas de animales terrestres. Incluso algunos artefactos creados por los humanos también entran en el dominio de la IE, como por ejemplo algunos sistemas de robots y también algunos programas de computadoras

que están escritos para abordar problemas de optimización y análisis de datos [Dorigo & Birattari, 2007].

Tony White definió a la IE como la inteligencia colectiva emergente de grupos de agentes simples autónomos. En esta definición, un agente autónomo es un subsistema que interactúa con su medioambiente, en el cual probablemente se encuentren otros agentes, pero que actúan relativamente en forma independiente del resto de ellos. El agente autónomo no sigue órdenes de un líder ni algún tipo de plan global. Por ejemplo, para que un pájaro participe de una bandada, sólo ajusta sus movimientos para coordinarlos con los movimientos de sus compañeras, típicamente las que se encuentran más cerca. Un pájaro en una bandada simplemente trata de permanecer cerca de sus vecinos, evitando colisionar con ellos. Cada pájaro no sigue órdenes de ningún pájaro líder dado que no hay un pájaro líder. Cualquier pájaro puede volar en la parte delantera, en el centro o en la parte trasera de la bandada. El comportamiento de enjambre ayuda a los pájaros a tomar ventaja en varias circunstancias incluyendo protección de depredadores (especialmente para pájaros ubicados en el medio de la bandada), y para buscar comida (dado que cada pájaro está, de alguna forma, utilizando los ojos de cada compañero) [White, 2005].

La IE posee un marcado carácter multidisciplinario, desde el punto de vista de que los sistemas de enjambre estudiados pueden ser encuadrados en varios dominios. Así, las investigaciones en IE pueden clasificarse de acuerdo a distintos criterios [Dorigo & Birattari, 2007]:

- Natural vs. artificial: es habitual dividir las investigaciones de la IE en estas dos áreas, de acuerdo a la naturaleza de los sistemas bajo análisis. Se habla entonces de una investigación de IE *natural* cuando se estudian los sistemas biológicos y de IE *artificial* cuando se estudian los artefactos humanos.
- Científica vs. ingenieril: una clasificación alternativa, y algunas veces más informativa, de las investigaciones de IE está dada por las metas perseguidas. Se identifica una corriente *científica* y una *ingenieril*. El objetivo de la corriente científica es modelar los sistemas de IE e identificar y comprender los mecanismos que permiten al sistema como un todo comportarse de una forma coordinada como resultado de las interacciones locales individuo-individuo e individuo-medioambiente. Por otro lado, el objetivo de la corriente ingenieril es explotar los resultados obtenidos por la corriente científica para diseñar sistemas que sean capaces de resolver problemas de relevancia práctica.

Las dos dicotomías natural/artificial y científica/ingenieril son ortogonales: aunque la típica investigación científica se ocupa de los sistemas naturales y la típica aplicación ingenieril se ocupa del desarrollo de un sistema artificial, en varios estudios de IE se ha estado trabajando con enjambres de robots para validar modelos matemáticos de sistemas biológicos. Estos estudios son simplemente de una naturaleza especulativa y definitivamente pertenecen a la corriente científica de la IE. Por otro lado, es posible

influenciar o modificar el comportamiento de los individuos pertenecientes a un enjambre biológico, de modo tal que surgirá un nuevo nivel de comportamiento de enjambre, que es, de alguna forma, útil para la resolución de algunas tareas de interés práctico. En este caso, aunque el sistema de estudio es natural, las metas perseguidas están definitivamente ligadas a las de una aplicación ingenieril [Dorigo & Birattari, 2007].

Las áreas en las que se han implementado aplicaciones de los principios de enjambre son muy diversas, incluyendo optimización, administración de redes, robótica colectiva, administración de la cadena de abastecimiento, producción y aplicaciones militares, entre otras. Varios ejemplos de aplicaciones se presentan en secciones posteriores de este capítulo.

3.2 LOS INSECTOS SOCIALES

El término “animal social” se utiliza para definir a aquellos animales que presentan un comportamiento altamente interactivo con otros miembros de su misma especie hasta el punto de conformar una sociedad distinta y reconocible. En cierta medida, todos los animales presentan algún grado de sociabilidad. Sin embargo, el término animal social suele emplearse sólo cuando el nivel de organización social es muy desarrollado, con grupos permanentes de adultos viviendo juntos, relacionándose entre sí y realizando actividades complejas en forma cooperativa.

El comportamiento social en la naturaleza se divide en dos categorías: aquellas especies cuyos individuos forman un enjambre porque se benefician de alguna forma de dicha convivencia, y los insectos sociales, que viven en colonias cuyos miembros no pueden sobrevivir por sí solos [Pfeil, 2006].

Los insectos sociales son los animales sociales que más han acaparado la atención de los científicos. Existen cuatro especies de insectos sociales: las hormigas, algunas especies de abejas y de avispas (Orden Hymenoptera) y las termitas (Orden Isoptera).

Entre las principales características, desde el punto de vista del comportamiento, de los insectos sociales se encuentran las siguientes:

- Viven en colonias formadas por una gran cantidad de individuos. Presentan una forma extrema de sociabilidad, constituyendo sociedades altamente organizadas.
- Comparten recursos y cooperan entre sí para realizar distintas actividades, como por ejemplo la creación, protección y defensa del nido, el cuidado de los individuos más jóvenes y la alimentación de la colonia.
- Presentan un comportamiento de división de tareas entre las distintas castas o clases en que se dividen.

El comportamiento cooperativo es necesario para la supervivencia e incrementa notablemente la productividad de la colonia. Las colonias de insectos realizan distintas actividades con un alto grado de eficiencia y pueden adaptarse a distintos ambientes. Se

cree que la causa de esta eficiencia radica en el hecho de que, mientras cada individuo de la colonia considera su propia labor como si se encontrara solo, el impacto de su actividad sobre la colonia parece ser parte de una coordinación centralizada. Sin embargo, esto último no es así: no hay un individuo que controle al resto del grupo.

3.2.1 Las hormigas

Dado que para alcanzar el objetivo del presente trabajo se desarrollará un modelo de simulación basado en un comportamiento particular de las hormigas, en esta sección se realizará una breve introducción a dicha especie con la finalidad de resaltar algunas de las características más importantes que serán utilizadas en el modelo.

Desde el punto de vista del comportamiento, las hormigas son animales sociales bastante simples dado que cuentan con un repertorio de acciones limitado: los estudios han revelado que sólo poseen entre diez y cuarenta comportamientos elementales.

A pesar de esto, las hormigas llevan a cabo diversas tareas complejas que son imposibles de realizar por un individuo solitario, entre las que se puede mencionar las siguientes:

- Construir puentes.
- Construir y mantener el nido.
- Cooperar para transportar objetos de gran tamaño.
- Encontrar las rutas más cortas desde el nido hasta una fuente de comida.
- Regular la temperatura del nido.
- Explotar preferentemente la fuente de comida más rica disponible.

Para ilustrar la complejidad de las actividades realizadas por las hormigas, basta con observar la estructura de sus nidos. En ellos es posible encontrar una guardería, distintos depósitos e incluso huertas.

La clave para comprender cómo es posible que estos animales, que prácticamente no tienen cerebro, alcancen esta compleja organización podría ser la división de tareas. Las hormigas son altamente especializadas, hasta tal punto que algunos individuos tienen que ser alimentados por otros, dado que son incapaces de conseguir comida por su propia cuenta. Algunos individuos se encargan de recolectar alimento para la colonia, otros son responsables del cuidado de las larvas, otros reparan el nido o lo protegen de las amenazas externas.

Para alcanzar metas tan complejas en forma eficiente, las distintas tareas tienen que estar muy bien coordinadas. Diversas investigaciones realizadas por científicos arrojaron resultados sorprendentes: en los nidos de hormigas no existen los supervisores. Ninguna hormiga, ni siquiera la reina, es capaz de manejar la colonia. No obstante, la coordinación existe y es resultado de algún tipo de proceso auto-organizativo [Rennard, 2003], concepto que será desarrollado más adelante.

3.2.1.1 La comunicación en las hormigas

La teoría evolutiva indica que los insectos más primitivos tenían la capacidad de realizar tareas individualmente. Con el transcurso del tiempo, los insectos evolucionaron hacia una mayor socialización y cooperación entre los miembros de la colonia para lograr la supervivencia en distintos ambientes. Para que el proceso de socialización sea exitoso, fue necesario que se desarrollaran distintas formas de comunicación entre los individuos.

Las hormigas basan su compleja organización social en las diferentes feromonas (una hormona que emiten algunos insectos y que atrae fuertemente a insectos de la misma especie) que transmiten, que se pueden agrupar en diferentes tipos:

- Feromonas de organización social (Trophallaxis): se transmiten por vías digestivas, ya sea por la boca (estomodeal) o por el ano (proctodeal). Son la base de la organización social, y con ella se puede transmitir diferentes tipos de información, como los niveles de alimento o las necesidades de la reina.
- Feromonas de casta: en el proceso de desarrollo se presentan diferentes castas según su alimentación. Las obreras alimentan a las larvas con la feromona, según sea el requerimiento del hormiguero.
- Feromonas disparadoras: se trata de sustancias olorosas transmitidas al medio ambiente. Se pueden diferenciar cuatro tipos de éstas:
 - Feromonas marcadoras de pistas: cuando una hormiga o un grupo de hormigas encuentra el alimento, deja un rastro para que otros individuos se dirijan a la misma fuente de alimento. Las hormigas marcan el rastro en el suelo mediante las glándulas que tienen en el abdomen.
 - Feromonas de agregación social: las colonias en las que viven las hormigas tienen un olor característico y propio, que lo presentan todos y sólo los individuos de esa colonia. Un individuo intruso sería rápidamente reconocido por su olor.
 - Feromonas de alarma: mediante olores, puede hacerse un rápido aviso de la presencia de un enemigo. En muy poco tiempo, se activa una alarma general.
 - Feromonas sexuales: las hembras producen olores de atracción para los machos, para ayudarles a encontrarse y realizar la cópula.

El comportamiento que más interesa para el presente trabajo es la comunicación por feromonas marcadoras de pistas que utilizan las hormigas para dejar rastros cuando encuentran una fuente de alimentación. Esto implica que las hormigas modifican el medioambiente, depositando una sustancia química que sirve como guía para sus compañeras. Debido a que la mayoría de los tipos de hormigas están permanentemente en contacto con el suelo, estos mensajes químicos están muy desarrollados en ellas.

En forma sintética, cuando una hormiga recolectora encuentra una fuente de alimento, deja un rastro químico en el suelo en su camino de vuelta al nido (la feromona mencionada anteriormente). Cuando se encuentra con otras hormigas, les comunica el hallazgo regurgitando parte del alimento y las invita a seguir el rastro mediante señales táctiles. Cuando éstas vuelven también al hormiguero, refuerzan el rastro, atrayendo así a más hormigas, hasta que la comida se termina, de forma que a partir de ese momento el rastro no es reforzado y se disipa lentamente.

Los métodos de búsqueda de alimento comúnmente empleados por hormigas de colonias sedentarias pueden agruparse en tres categorías [Fernández, 2003]:

- individual, donde una obrera colecta alimentos independientemente de las otras;
- con reclutamiento, donde obreras buscan el alimento aisladamente, pero la colecta es hecha por un sistema coordinado entre los individuos;
- el de grupo, donde las obreras colectan independientemente, pero moviéndose por trillas (rastros) o columnas definidas.

La estrategia de comunicación que utilizan las hormigas varía según la colonia y el tamaño. Incluso, distintas especies de hormigas utilizan diferentes técnicas para reclutar a sus compañeras a las nuevas fuentes de alimentación. Hay tres formas básicas en las que las hormigas llevan a sus compañeras a nuevas fuente de comida:

- Depositar feromona en el camino es una forma de “reclutamiento masivo”: una gran masa de hormigas es atraída por el camino en donde la concentración de feromona es más fuerte.
- En algunas especies, sin embargo, una hormiga que encuentra una fuente de alimentación regresa al nido y hace vibrar sus antenas para convencer a otra compañera para regresar al sitio. Esto se denomina “reclutamiento de tándem”.
- En otros casos, una hormiga hace vibrar sus antenas para conseguir que un número de compañeras la sigan. Esto es el “reclutamiento de grupo”.

En los tres casos, las hormigas individuales pueden transportar información sobre la calidad de la fuente de alimentación, ya sea depositando más feromona o incrementando la frecuencia de vibración de sus antenas. Es interesante destacar que el reclutamiento masivo es usualmente asociado a colonias de gran tamaño, el reclutamiento de tándem con pequeñas colonias y el reclutamiento de grupo con colonias de tamaño medio. Esta correlación no es accidental, sino que millones de años de evolución la han moldeado. Existen modelos matemáticos de los distintos mecanismos de reclutamiento para explicar esta observación. Para una colonia grande que puede defender sus fuentes de comida, un camino fuerte de feromonas tiene sentido estratégico, particularmente cuando una gran fuente de alimento, como el cuerpo de un animal, es descubierto. Las pequeñas colonias son menos capaces de defenderse de predadores y competidores, por lo que una estrategia de búsqueda de alimentación flexible es ventajosa porque les permite a las hormigas moverse rápidamente hacia otra fuente de comida cuando son amenazadas. El reclutamiento de grupo es ideal para colonias de tamaño medio en

ambientes de cambio rápido e impredecible: permite que las hormigas exploten una fuente de comida eficientemente al tiempo que es flexible y capaz de explorar sus alrededores para fuentes adicionales [Bonabeau & Meyer, 2001].

3.3 SISTEMAS DE ENJAMBRE

3.3.1 Propiedades de un sistema de enjambre

El típico sistema de enjambres posee las siguientes propiedades [Dorigo & Birattari, 2007]:

1. Está compuesto por varios individuos.
2. Los individuos son relativamente homogéneos (es decir, o son todos idénticos o pertenecen a muy pocas tipologías).
3. Las interacciones entre los individuos están basadas en reglas de comportamiento simples que explotan sólo la información local que los individuos intercambian directamente o vía el medioambiente.

Los sistemas de enjambre se caracterizan por estar compuestos por agentes simples interactuando a través del medioambiente utilizando señales espacial y temporalmente distribuidas. Por *simple* se entiende que los agentes poseen limitada capacidad cognitiva y memoria; algunas veces, incluso, directamente no tienen memoria. Además, el comportamiento de los agentes individuales está caracterizado por un pequeño número de reglas. La complejidad (o simplicidad) de un agente se puede definir como una función del número de reglas que son requeridas para explicar su comportamiento [White, 2005]. Esto es lo que más ha acaparado la atención de los investigadores: comparado con la complejidad de las construcciones y acciones de la colonia, la relativa simplicidad de un único individuo es una característica destacada de los insectos sociales [Pfeil, 2006].

Esta última propiedad es la más importante de un sistema de enjambres: su habilidad para actuar de forma coordinada sin la presencia de un coordinador o de un controlador externo. En la naturaleza pueden observarse varios ejemplos de enjambres que realizan distintas actividades sin ningún individuo controlando el grupo, o que esté en conocimiento del comportamiento general del grupo. A pesar de la falta de individuos a cargo del grupo, el enjambre como un todo puede mostrar un comportamiento inteligente. Este es el resultado de la interacción de los individuos que están cerca unos de otros y que actúan sobre la base de reglas simples [Dorigo & Birattari, 2007].

En efecto, esta propiedad les permite a los sistemas de enjambre resolver problemas emergentes. La resolución de problemas emergentes es una clase de resolución de problemas donde el comportamiento de los agentes individuales no está guiado por una meta; es decir, muy poca o prácticamente ninguna información se puede inferir sobre cómo se está resolviendo el problema mediante la observación de los agentes individuales [White, 2005].

3.3.2 Ventajas y desventajas de un sistema de enjambre

Los sistemas de enjambres presentan varias ventajas y desventajas en relación a su funcionamiento.

Entre las ventajas se pueden mencionar [White, 2005; Bonabeau & Meyer, 2001]:

- Carencia de objetivos: los agentes no están guiados por una meta, sino que reaccionan de acuerdo a las características del entorno, en vez de planear qué hacer en función de un objetivo.
- Simplicidad: los agentes son simples, con mínimo comportamiento y memoria.
- Robustez: la falla de los agentes individuales es tolerada; el comportamiento emergente es robusto con respecto a la falla individual. Al ser un sistema en el que se requieren múltiples acciones de los agentes para que una solución emerja, la actividad de un agente individual no es tan importante. Esto permite que los sistemas estigmérgicos sean resistentes a las fallas de los agentes individuales y reaccionen extremadamente bien a medioambientes que cambian dinámicamente [White, 2005].
- Flexibilidad: los agentes pueden reaccionar a contextos que cambian drásticamente, originados tanto por perturbaciones internas como externas.
- No se requiere interacción directa entre los agentes.
- Escalabilidad: existen sistemas de enjambre que van desde unos pocos individuos hasta millones.
- Auto-organización y descentralización: los caminos a las soluciones son emergentes más que predefinidos. El control es descentralizado; no hay información global en el sistema ni un controlador central en la colonia.

Los sistemas de enjambre también presentan algunas desventajas cuando se intenta realizar un análisis de los mismos o cuando se realiza alguna aplicación específica [White, 2005; Bonabeau & Meyer, 2001]:

- El comportamiento colectivo no puede ser inferido a partir del comportamiento individual de un agente. Esto implica que a través de la observación de agentes individuales no se podrá predecir el comportamiento de la colonia. Como consecuencia, es difícil predecir el comportamiento colectivo a partir de reglas individuales.
- El comportamiento individual se asemeja al ruido dado que la elección de una acción es estocástica.
- Diseñar sistemas basados en enjambres es difícil: casi no hay mecanismos analíticos para su diseño.

- Los parámetros que definen el sistema de enjambre pueden tener un efecto dramático sobre el surgimiento (o no) del comportamiento colectivo.
- Pequeños cambios en las reglas llevan a diferentes niveles de comportamiento grupales.

3.4 CREACIÓN DE SISTEMAS DE ENJAMBRE

Un sistema basado en enjambre puede ser programado utilizando los siguientes principios:

1. Los agentes son independientes y autónomos. No son simplemente funciones como en el caso de un sistema convencional orientado a objetos.
2. Los agentes deben ser pequeños y sus comportamientos simples. Deben ser capaces de tratar con el ruido. De hecho, el ruido es una característica deseable.
3. El sistema debe ser descentralizado, no se apoya en información global. Esto lo hace más confiable.
4. Los agentes deben ser diversos desde el punto de vista del comportamiento, el cual es típicamente estocástico.
5. El sistema debe permitir a la información filtrarse del sistema; es decir, introducir desorden en alguna escala.
6. Los agentes deben compartir información, preferiblemente en forma local.
7. Planificación y ejecución ocurren al mismo tiempo: el sistema es reactivo.

3.5 EJEMPLOS DE COMPORTAMIENTOS DE ENJAMBRE

En esta sección se presentan varios comportamientos de enjambre presentes en la naturaleza que han sido investigados por los biólogos y científicos. Varios de estos comportamientos han sido posteriormente modelados y algunos de estos modelos han sido aplicados a la resolución de problemas de la vida de las personas, como se presentará más adelante.

3.5.1 Búsqueda de alimentos

En varias especies de hormigas, las hormigas que caminan hacia y desde una fuente de alimentos depositan en el suelo una sustancia conocida como feromona. Otras hormigas perciben la presencia de feromona y tienden a seguir los caminos en donde la concentración de esta sustancia es mayor. A través de este mecanismo, las hormigas son capaces de transportar alimentos a su nido de una forma muy eficiente.

3.5.1.1 Descripción del proceso de búsqueda de alimentos

Cuando una hormiga deposita feromona en el suelo, este químico puede cambiar el comportamiento futuro de las hormigas que pasen por esa ubicación, por lo menos hasta el momento en que esté totalmente evaporada.

En los alrededores de una colonia de hormigas, las hormigas depositarán un camino de feromonas mientras salen en búsqueda de alimento. Las hormigas tienen receptores para

reconocer las feromonas que otras hormigas han depositado. Habrá una función decisión que activa un comportamiento apropiado en las hormigas cuando encuentran caminos de feromona.

Jean-Philippe Rennard, un investigador francés sobre inteligencia artificial, explica claramente este comportamiento de las hormigas. Al comienzo de la búsqueda, una cantidad de hormigas está caminando, más o menos en forma aleatoria, en los alrededores del nido. Ellas están buscando alimento. A través de su recorrido, depositan un suave camino de feromonas. Cuando una hormiga encuentra comida, regresa al nido, depositando un camino más fuerte de feromonas (la intensidad del camino posiblemente dependa de la riqueza de la fuente encontrada, que se evalúa en función de las necesidades del nido). Como las hormigas suelen seguir los caminos de feromona, un creciente número de individuos tenderá a seguir el camino marcado por la primera hormiga y alcanzará la fuente de alimentación. Cuando regresen al nido, reforzarán dicho camino. Esto se conoce como retroalimentación positiva (feedback positivo o auto-amplificación), un fenómeno en el que más individuos reforzarán el camino, atrayendo nuevos individuos que seguirán reforzando el camino y así sucesivamente.

En este ejemplo, las hormigas no se comunican directamente. La información es intercambiada a través de modificaciones en el medioambiente (en este caso gradientes locales de feromonas).

Como se mencionó anteriormente, Grassé demostró que este fenómeno no depende de la comunicación directa entre los individuos. El comportamiento de búsqueda de alimentos en las hormigas se asemeja al comportamiento de construcción de nidos de las termitas, en el que es la estructura del nido la que coordina las tareas de los trabajadores, esencialmente a través de concentraciones locales de feromonas. El estado de la estructura del nido dispara algunos comportamientos que modifican la estructura del nido y disparan a su vez nuevos comportamientos hasta que la construcción esté terminada. En el caso de búsqueda de alimentos, el camino de feromonas condicionará el comportamiento de las hormigas hasta que la fuente de alimentación esté agotada.

Las hormigas tienden a seguir caminos de feromonas, pero es sólo una inclinación. En cualquier momento, existe una probabilidad de que la hormiga abandone el camino y se mueva más o menos aleatoriamente. Es posible entonces que la hormiga “perdida” encuentre una nueva fuente de alimentación, eventualmente, mucho más rica que la que estaba siendo explotada. Construyendo un nuevo camino de feromona, esta hormiga atraerá nuevos individuos y se instalará un nuevo ciclo de retroalimentación positiva.

Finalmente, cuando se agote la fuente, un ciclo de retroalimentación negativa aparecerá. Si la desaparición de feromona por evaporación es suficientemente rápida, cuando el recurso se agote, menos y menos hormigas tenderán a seguir el camino y éste desaparecerá progresivamente [Rennard, 2003].

Cuando una hormiga deposita un camino de feromonas en el medioambiente, las feromonas permanecen sólo por un corto período de tiempo antes de que se evaporen.

Esto asegura que caminos de feromonas recientes no sean confundidos con otros anteriores, que podrían estar relacionados con circunstancias que han cambiando. Los sistemas estigmérgicos pueden ser diseñados para tener una característica similar - equivalente a la evaporación - que hace que los caminos que estén fuera de fecha o con información redundante sean removidos. Esto puede prevenir que un sistema se haga menos eficiente a través del tiempo, uno de los principales problemas para la mayoría de los sistema de administración de información.

3.5.1.2 El experimento del puente doble

En un clásico experimento realizado en 1990, Deneubourg y su equipo de trabajo investigaron intensamente la secreción de feromona y el comportamiento posterior de las hormigas, demostrando que una colonia de hormigas, cuando tiene la opción de elegir entre dos caminos de distintas distancias entre el nido y la fuente de alimentación, tiene una alta probabilidad de elegir colectivamente el camino más corto [Dorigo *et al.*, 2006].

En un experimento conocido como el “experimento del puente doble”, el hormiguero de una colonia de hormigas argentinas fue conectado a una fuente de alimentación por dos puentes de igual longitud (figura 1(a)). En esas condiciones, las hormigas comienzan a explorar los alrededores del nido y eventualmente encuentran la fuente de alimentación.

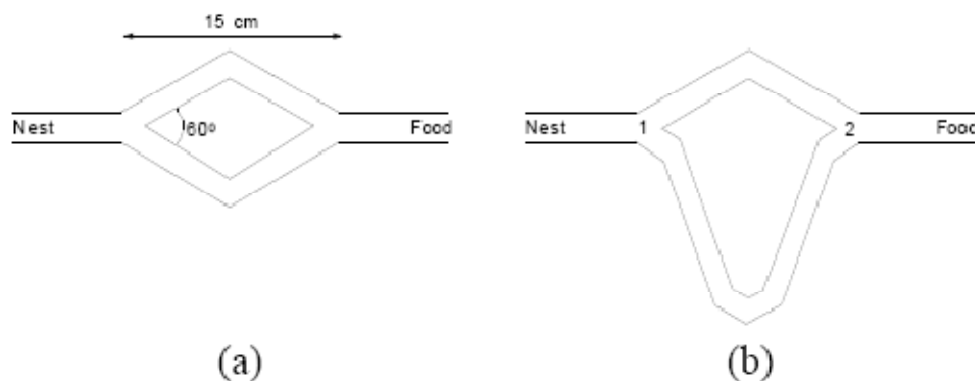


Figura 4. Experimento del doble puente

En el trayecto que separa a la fuente de alimentación del nido, las hormigas argentinas depositan feromona. Inicialmente, una hormiga elige aleatoriamente uno de los puentes. Sin embargo, debido a las fluctuaciones aleatorias, después de algún tiempo uno de los caminos presenta una concentración más elevada de feromona que el otro y, por lo tanto, atrae más hormigas. Esto sigue elevando la cantidad de feromona en ese puente, haciéndolo cada vez más atractivo con el resultado que después de algún tiempo la colonia entera convergirá hacia el uso del mismo puente⁴.

⁴ Deneubourg y sus colegas repitieron el experimento un número de veces y observaron que cada uno de los puentes era utilizado en el 50% de los casos.

Este comportamiento de la colonia, basado en la autocatálisis, esto es, en la explotación del feedback positivo, puede ser explotado por las hormigas para encontrar la ruta más corta entre la fuente de alimentación y su nido. Goss, un investigador sobre el comportamiento de los insectos sociales, consideró una variante del experimento del puente doble en la que uno de los puentes es significativamente más largo que el otro (figura 1(b)). En este caso, las fluctuaciones estocásticas en la elección inicial de un puente se verán muy reducidas y un segundo mecanismo juega un rol muy importante: las hormigas que eligen por azar el puente más corto son las primeras en regresar al nido. Por lo tanto, el puente corto recibe la feromona más temprano que el puente largo y este hecho incrementa la probabilidad de que más hormigas lo elijan antes que al puente largo. Goss desarrolló un modelo matemático del comportamiento observado: asumiendo que en un momento determinado en el tiempo m_1 hormigas han utilizado el primer puente y m_2 hormigas el segundo, la probabilidad p_1 que tiene una hormiga de elegir el primer puente es:

$$p_1 = \frac{(m_1 + k)^h}{(m_1 + k)^h + (m_2 + k)^h}$$

donde los parámetros k y h se adecúan a los datos experimentales. Simulaciones de Monte Carlo han mostrado resultados muy precisos para $k \approx 20$ y $h \approx 2$ [Dorigo *et al.*, 2006].

3.5.1.3 Comportamiento frente a la presencia de obstáculos

Las hormigas reales también son capaces de adaptarse a cambios en el medioambiente, por ejemplo encontrando un nuevo camino más corto hacia la fuente de alimentos una vez que el anterior no es realizable debido a un nuevo obstáculo.



Figura 5. Hormigas dirigiéndose a la fuente de alimentos

El comportamiento elemental de las hormigas de seguir preferentemente aquellos caminos que tengan una más alta concentración de feromona puede ser utilizado para explicar cómo es que pueden encontrar el camino más corto que reconecta una línea rota a partir de la aparición repentina de un obstáculo inesperado que ha interrumpido el camino inicial.

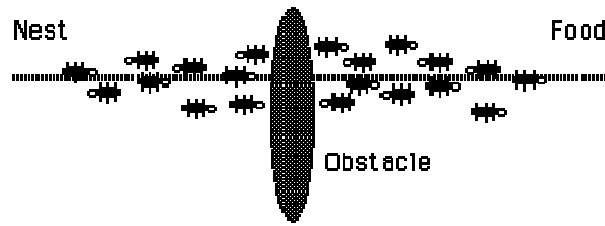


Figura 6. Presencia de obstáculo en el camino de las hormigas

De hecho, una vez que el obstáculo aparece, aquellas hormigas que se encuentran justo en frente de él no pueden continuar siguiendo el camino de feromona y por lo tanto tienen que elegir entre doblar a la derecha o a la izquierda. En esta situación podemos esperar que la mitad de las hormigas elijan la derecha y la otra mitad, la izquierda. La misma situación puede encontrarse del otro lado del obstáculo.

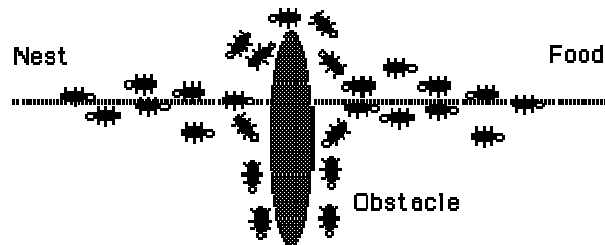


Figura 7. Alternativas para superar el obstáculo

Es interesante notar que aquellas hormigas que elijan, por azar, el camino más corto alrededor del obstáculo reconstituirán más rápidamente el camino de feromonas interrumpido en comparación con aquellas que elijan el camino más largo. Entonces, el camino más corto recibirá una mayor cantidad de feromona por unidad de tiempo y esto causará una mayor cantidad de hormigas eligiendo el camino más corto. Debido al proceso de retroalimentación positiva (cada hormiga incrementa la cantidad de feromona depositada), todas las hormigas elegirán el camino más corto.

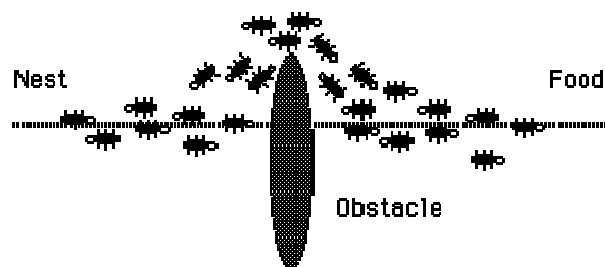


Figura 8. Elección del camino más corto

3.5.1.4 Aplicaciones basadas en el comportamiento de búsqueda de alimento de las hormigas

La búsqueda de alimentos ha dado origen a uno de los algoritmos más exitosos de la IE: Ant Colony Optimization, introducido por Marco Dorigo en su tesis de Ph.D. (1992).

Debido a su importancia en el presente trabajo, este algoritmo será desarrollado en el siguiente capítulo.

El Modelo de Asalto del Ejército de Hormigas también tiene por objetivo la búsqueda de alimento en forma eficiente y efectiva, utilizando señales basadas en la feromona. En dicho modelo, los agentes crean un frente de búsqueda de comida que cubra un amplio camino, logrando encontrar la comida de forma extremadamente efectiva. Este modelo tiene mucho valor para las fuerzas militares dado que, a partir de él, pueden crearse mecanismos para rastrear minas terrestres, un problema que es muy común en varias partes del mundo [White, 2005]. Este modelo ha sido simulado utilizando NetLogo y los resultados concuerdan extremadamente bien con la observación experimental.

La administración de redes basada en enjambres es otra aplicación de los algoritmos basados en la capacidad de las hormigas para buscar alimento en forma eficiente. Las primeras aplicaciones basadas en enjambres a la administración de redes fueron propuestas por Schoonderwoerd y su equipo de trabajo (1996) y por Di Caro y Dorigo (1998). Schoonderwoerd y sus colegas propusieron un algoritmo denominado Ant-Based Control (ABC) para el ruteo y balanceo de carga en redes de conmutación de circuitos; Di Caro y Dorigo propusieron AntNet, un algoritmo para el ruteo en redes de conmutación de paquetes. Mientras que ABC fue una prueba de concepto, AntNet, que es un algoritmo de tipo ACO, ha tenido excelentes rendimientos, especialmente en situaciones de tráfico de datos altamente dinámicas y estocásticas, como puede observarse en redes similares a Internet. Estos algoritmos son ejemplos de sistemas exitosos artificiales / ingenieriles de IE [Dorigo & Birattari, 2007].

Otras aplicaciones del comportamiento de búsqueda de alimentos de las hormigas son en el rubro telecomunicaciones (optimización del tráfico de datos) y ruteo de vehículos (optimización del recorrido de flotas de vehículos para reparto de mercadería con distintas condiciones de capacidad, tráfico, ventana horaria de entrega, etc.).

3.5.2 Construcción de nidos

Las avispas construyen nidos que poseen una estructura interna muy compleja. Su realización requiere de un conocimiento y coordinación que están muy lejos de las capacidades cognitivas de una avispa sola. Las termitas, por su parte, construyen nidos cuyas dimensiones (que pueden alcanzar varios metros de diámetro y altura) son enormes en comparación con el tamaño de un individuo simple, que mide unos pocos milímetros. Lewis Thomas, médico e investigador norteamericano, afirmó que “el interior de los nidos es como un laberinto en tres dimensiones, con intrincados arreglos de galerías espiraladas, corredores y bóvedas arqueadas, ventiladas y climatizadas. Hay magníficas cavernas para los jardines de hongos de los que depende la alimentación de las termitas, y que además utilizan como fuente de calor. Hay una cámara acorazada de forma redonda para la reina, denominada la celda real. La unidad estructural fundamental, en la que se basa el diseño completo, es el arco.” [Lewis, 1974].



En la década de los cuarenta y cincuenta del siglo veinte, el entomólogo francés Pierre-Paul Grassé, un biólogo que estudió el comportamiento de las hormigas y termitas, observó que algunas especies de termitas reaccionaban a lo que él denominó estímulo significativo. En muchas ocasiones, los efectos de dichas reacciones actuaban como nuevos estímulos significativos tanto para el insecto que lo originó como para el resto de los insectos de la colonia [Dorigo *et al.*, 2006]. De esta forma, se desencadenaba una secuencia de acciones que le permitía a la colonia alcanzar metas complejas.

En uno de sus experimentos, Grassé colocó unas cuantas termitas en un plato lleno de tierra y pequeñas bolas de lodo con el objetivo de estudiar su comportamiento. Las termitas comenzaron a recorrer el terreno en forma desorganizada, levantando las bolas de lodo aleatoriamente y depositándolas nuevamente en distintos lugares. De pronto, y por una cuestión azarosa, ocurría que dos o tres bolas de lodo quedaban amontonadas una encima de otra y esta “estructura” transformaba el comportamiento de todas las termitas. Ahora ellas comenzaron a mostrar un mayor interés en la columna primitiva, agregando nuevas bolas de lodo y fragmentos de tierra. Luego de alcanzar una determinada altura, la construcción se detenía hasta que otra columna comenzaba a formarse en las cercanías. Cuando esto sucedía, la estructura cambiaba de una columna a un arco, inclinándose en una curva suave, el arco se unía y las termitas comenzaban a construir otro [Lewis, 1974].

Grassé quiso comprender cómo era posible que estas criaturas virtualmente sin cerebro pudieran construir estructuras arquitectónicas extremadamente complejas. Era una pregunta que, hasta ese momento, nadie había sido capaz de responder.

A partir del experimento que realizó con termitas, en el que estudió el proceso de construcción de nidos, Grassé sacó algunas conclusiones. Observó que las termitas trabajadoras, en presencia de una determinada configuración de la construcción (y de otras termitas trabajadoras), eran estimuladas hacia un alto grado de actividad, tendiendo a agregar material de construcción, las pequeñas bolas de lodo, en sectores específicos de la estructura. A medida que la estructura mutaba producto de los agregados de material, surgían nuevos sectores para agregar material. Así, la nueva configuración disparaba otra acción (igual o diferente que la anterior), que podía ser realizada por la misma termita o por cualquier otra de la colonia. Grassé lo definió de la siguiente manera: un trabajador depositaba una pieza de material de construcción (realiza “trabajo”) en un lugar particular; esto cambia la percepción sensorial obtenida subsecuentemente en ese lugar, y entonces podría cambiar el comportamiento producido (y el trabajo realizado) en ese lugar en el futuro [Holland & Melhuish, 1999].

Así, la estructura crecía progresivamente hasta su finalización. Las termitas, entonces, construirían otra estructura, o comenzarían una nueva tarea que podía ser disparada por la presencia de la estructura terminada [Holland & Melhuish, 1999].

De esta forma, Grassé probó que la coordinación de tareas y la regulación de la actividad constructiva no dependen directamente de cada termita trabajadora, sino de las construcciones mismas o, más precisamente, de la configuración de la estructura que cada termita percibía. Es decir, el trabajador no dirige su trabajo, sino que es guiado por él. Esta forma de estimulación especial ha recibido el nombre de estigmergia⁵ (stigma: estimular; ergon: trabajo, obra = obra estimulante) [Grassé, 1959]. Lewis Thomas propuso la traducción “iniciar trabajo” y afirmó que la intención de Grassé fue indicar que el producto del trabajo mismo es el que provee el estímulo y la instrucción para la realización de más trabajo [Lewis, 1974].

Otros investigadores ampliaron las investigaciones de Grassé y la definición de estigmergia. Cuando comienzan a construir un nido, las termitas modifican el medioambiente local (es decir, el medioambiente que está en los alrededores de la termita) haciendo pequeñas bolas de lodo y depositándolas en el sustrato; cada bola de lodo es impregnada con una pequeña cantidad de una feromona particular. Las termitas depositan sus bolas de lodo probabilísticamente, inicialmente en forma aleatoria. Sin embargo, la probabilidad de depositar una bola de lodo en un lugar determinado se incrementa con la presencia percibida de otras bolas de lodo y la concentración de feromona percibida. Los primeros depósitos al azar incrementan la probabilidad de que otras termitas depositen sus cargas en un mismo lugar. A través de este juego ciego y aleatorio, se forman pequeñas columnas; la feromona amontonada en los alrededores de las columnas causa que las cimas sean construidas con una tendencia hacia las columnas

⁵ Stigmergy en inglés.

vecinas, para que finalmente se encuentren formando arcos, que son las unidades constructivas básicas [Beckerts, *et al.*, 1994].

Varios modelos matemáticos han sido desarrollados a partir del comportamiento de construcción de nidos. Algunos de estos modelos han sido implementados en programas de computación y utilizados para producir estructuras simuladas que recrean la morfología de los nidos reales. Un ejemplo puede encontrarse en el software NetLogo, en el algoritmo denominado *Termites*.

3.5.3 Agrupación de hormigas

Las hormigas construyen cementerios recolectando cuerpos de sus compañeras fallecidas y depositándolos a todos en un mismo lugar del nido. Ellas también organizan la disposición espacial de las larvas en distintos grupos, colocando a las más jóvenes y las más pequeñas en el centro del grupo y las más viejas en la periferia.

Este comportamiento de agrupación ha inspirado varios estudios científicos. Los científicos han construido modelos probabilísticos simples de dichos comportamientos y los han testeado en simulación [Bonabeau *et al.*, 1999]. Deneubourg y sus colegas (1991) estuvieron entre los primeros investigadores en proponer un modelo de distribución probabilística para explicar este comportamiento de agrupación. En dicho modelo, las hormigas recogen y depositan objetos con probabilidades que dependen de la información disponible localmente para las hormigas acerca de la densidad de cuerpos: una hormiga sin carga tiene una probabilidad de levantar un cuerpo o una larva que es inversamente proporcional a la densidad de cuerpos o larvas percibida localmente, mientras que la probabilidad que tiene una hormiga con carga de depositar el objeto es proporcional a la densidad local de objetos similares. Este modelo ha sido validado contra datos experimentales obtenidos con hormigas reales. En la taxonomía, este es un ejemplo de un sistema natural y científico de IE.

Los ingenieros han utilizado modelos basados en el comportamiento de agrupación de las hormigas como fuente de inspiración para diseñar algoritmos de minería de datos. Un trabajo importante en esta dirección fue desarrollado por Lumer y Faieta en 1994. Ellos definieron un ambiente artificial en el que las hormigas artificiales recogían y depositaban objetos con probabilidades gobernadas por las similitudes con otros objetos de datos que ya estaban presentes en sus inmediaciones. El mismo algoritmo ha sido utilizado también para resolver problemas de optimización combinatoria reformulados como problemas de agrupación [Dorigo & Birattari, 2007].

Beckers y su equipo de trabajo han programado un grupo de robots para implementar un comportamiento de agrupación similar, siendo éste uno de los primeros estudios de IE científicamente orientados en los que se utilizan agentes artificiales. Este último es un ejemplo de un sistema artificial y científico [Dorigo & Birattari, 2007].

3.5.4 Bandadas y cardúmenes

La agrupación de grandes grupos de pájaros en bandadas y de peces en cardúmenes son ejemplos de comportamientos grupales altamente coordinados. Los científicos han demostrado que estos elegantes comportamientos de nivel de enjambre pueden ser explicados como el resultado de procesos auto-organizados sin líderes a cargo y donde las decisiones de movimiento de cada individuo están basadas solamente en la información disponible localmente: la distancia, velocidad percibida y dirección del movimiento de sus vecinos. Estos estudios han inspirado diversas simulaciones computacionales que son utilizadas en la actualidad en la industria de computación gráfica para la reproducción realista de la agrupación en películas y juegos de computadoras. Reynolds realizó la primera simulación en el año 1987 denominada Boids, que es un modelo de comportamiento distribuido para simular el movimiento de una bandada. En la taxonomía, estos son ejemplos, respectivamente, de sistemas natural y científico, y artificial e ingenieril de IE [Dorigo & Birattari, 2007].

El comportamiento de agrupación en bandadas y cardúmenes ha sido la fuente de inspiración para el desarrollo del modelo Optimización de Enjambres de Partículas (PSO)⁶, desarrollado por el Dr. Eberhart y el Dr. Kennedy en 1995. PSO es una técnica de optimización estocástica basada en la población utilizada para la resolución de problemas de optimización combinatoria. Está inspirada en el comportamiento social de la agrupación de pájaros en bandadas y de peces en cardúmenes. En el algoritmo PSO un conjunto de agentes artificiales denominados partículas buscan soluciones satisfactorias a un problema de optimización continuo. Cada partícula es una solución del problema considerado y utiliza su propia experiencia y la experiencia de las partículas vecinas para elegir cómo moverse en el espacio de búsqueda. En la práctica, en la fase inicial cada partícula está ubicada en una posición inicial aleatoria y posee una velocidad inicial determinada. La posición de la partícula representa una solución del problema y tiene por lo tanto un valor otorgado por la función objetivo. Mientras se mueven en el espacio de búsqueda, las partículas memorizan la posición de la mejor solución que encuentran. En cada iteración del algoritmo, cada partícula se mueve con una velocidad determinada como la suma ponderada de tres componentes: la velocidad en el estado anterior, una componente de velocidad que dirige a la partícula hacia la ubicación (en el espacio de búsqueda) donde previamente había encontrado la mejor solución hasta el momento, y una componente de velocidad que dirige a la partícula hacia la ubicación (en el espacio de búsqueda) donde las partículas vecinas encontraron la mejor solución hasta el momento. PSO ha sido aplicado a diferentes problemas y es otro ejemplo de un sistema exitoso artificial e ingenieril de la IE [Dorigo & Birattari, 2007].

⁶ Particle Swarm Optimization, en inglés.

También hay modelos estigmérgicos de interés militar basados en la agrupación en bandadas o en manadas. En el comportamiento de agrupación, un gran número de agentes simples se mueve a través de un terreno cubierto por obstáculos (potencialmente amenazas) sin un control centralizado. Las señales del medioambiente en este ejemplo son las posiciones y velocidades de los agentes mismos. Este modelo podría aplicarse en el campo militar: los tanques podrían moverse a través de un terreno teniendo en cuenta sólo los tanques que están cerca de él. Otro uso similar del modelo podría ser la auto-organización de un escuadrón de aviones [White, 2005].

3.5.5 Transporte de objetos pesados

En algunas especies de hormigas, cuando una hormiga no puede transportar al nido por sí misma una presa, recluta a sus compañeras para que la ayuden. Luego, durante un período inicial que puede durar varios minutos, las hormigas cambian sus posiciones y alineaciones alrededor del objeto hasta que son capaces de moverlo hacia el nido.

Utilizando robots mecánicos, Ron Kube y Hong Zhang de la universidad de Alberta han reproducido este comportamiento, en el que un conjunto de robots debían empujar una caja hacia un objetivo. Cada robot fue programado con instrucciones muy simples: encontrar la caja, hacer contacto con ella, posicionarse de forma tal que la caja esté entre el robot y el objetivo, y luego empujar la caja hacia el objetivo. Los resultados del experimento han sido exitosos.

3.5.6 Otros comportamientos y aplicaciones

3.5.6.1 Sistemas informáticos

El proceso de estigmergia también tiene lugar en Internet. En efecto, los grupos de noticias y los foros de discusión se manifiestan en este mismo modo. Las personas encuentran lugares de interés donde descubren mensajes que les son de utilidad. Los mensajes provocan que otras personas respondan, agregando sus propios mensajes. La gente se moverá de un grupo a otro, eligiendo participar sólo en aquellos donde los mensajes sean de su interés particular. No hay un cuerpo centralizado u organizado para crear las decenas de miles de nuevos grupos y foros de discusión que nacen en forma espontánea en Internet. Las organizaciones no proveen contenido. La gente no opera en secreto entre sí sobre qué mensajes enviar. El sistema entero ha evolucionado orgánicamente y es guiado por la gente actuando en forma independiente.

El fenómeno de la estigmergia está comenzando a resultar de interés creciente en el negocio a través de Internet. Puede ser utilizada para crear bases de datos auto-organizadas de bajo costo de construcción y mantenimiento y proveer un servicio y eficiencia que aventaja por lejos a cualquiera que puede ser creado a través del diseño y control racional.

Dos ejemplos sobre sistemas estigmérgicos, creciendo y evolucionando sin un control central u organización, son *The Open Source Movement* y *Napster*. Estos fenómenos

aparecen casi espontáneamente; creciendo tanto en poder como en influencia, compiten contra los gigantes industriales. Aún con su vasta organización y enormes recursos financieros, Microsoft no está a la altura de los esfuerzos acumulados de decenas de miles de programadores independientes en la batalla por la supremacía en el mercado de los servidores. Construyendo a partir de los esfuerzos de cada uno, los programadores independientes y desorganizados han creado un sistema gratuito y altamente flexible conocido como Linux, el cual compite abiertamente con Microsoft. Similarmente, con Napster, un sistema simple ideado por estudiantes, evolucionó en un espacio de personas que creó una base de datos distribuida repartida entre cientos de miles de computadoras privadas. Los esfuerzos combinados de la industria de la música han tenido que recurrir a acciones legales para detener la libre distribución de los activos musicales protegidos por derechos de autor. Aun así, el sistema se adaptó y evolucionó en nuevas formas que no tienen control central.

3.5.6.2 Robótica de enjambres

Existe un gran número de comportamientos de enjambre observados en sistemas naturales que han inspirado formas innovadoras de resolver problemas utilizando enjambres de robots. Esto se ha denominado *robótica de enjambres*. En otras palabras, la robótica de enjambres es la aplicación de los principios de la IE al control de enjambres de robots. Al igual que con los sistemas de IE en general, los sistemas robóticos de enjambres pueden tener una tendencia científica o ingenieril. La agrupación en enjambres de robots fue mencionada anteriormente como un ejemplo de sistema artificial y científico. Un ejemplo de sistema artificial e ingenieril de IE, que ya se ha mencionado, es el transporte colectivo de un objeto demasiado pesado para un solo robot [Dorigo & Birattari, 2007].

3.5.6.3 Problemas de distribución óptima de recursos

Los sistemas militares tradicionales han sido diseñados bajo la modalidad conocida como “de arriba hacia abajo”, es decir, sistemas de control centralizados. En estos sistemas se suele asignar a cada entidad un rol fijo, por lo que el sistema falla cuando una entidad que cumple un rol crítico falla o deja de estar disponible. Los sistemas de insectos sociales no exhiben dicha característica dado que la asignación de roles es flexible y está basada en las amenazas y estímulos percibidos [White, 2005].

Como analogía a la problemática militar, se ha utilizado a la IE para programar un partido de fútbol robótico simulado, donde los roles de los defensores, mediocampistas y atacantes eran asignados dinámicamente y podían cambiar durante el partido. Más aún, los jugadores podían cansarse o lesionarse, como en un partido real. Mientras que el fútbol es un juego, comparte varias características con los juegos militares de guerra, donde una amenaza debe ser contrarrestada utilizando una distribución óptima de los recursos disponibles [White, 2005].

3.5.6.4 Sociedades de animales

Un posible desarrollo de la IE es la explotación controlada del comportamiento colectivo de las sociedades de animales. No hay ejemplos disponibles en esta área de IE aunque en la actualidad se están llevando a cabo algunas investigaciones prometedoras: por ejemplo, en el proyecto Leurre, pequeños insectos-robots son utilizados como carnadas para influenciar el comportamiento de un grupo de cucarachas. La tecnología desarrollada en este proyecto podría ser aplicada a varios dominios, incluyendo la agricultura y reproducción de ganado [Dorigo & Birattari, 2007].

3.6 LA ESTIGMERGIA

En esta sección se profundizará el concepto de estigmergia, que constituye el eje del algoritmo matemático sobre el cual se basa la herramienta a desarrollar en el presente trabajo.

Grassé utilizó el término estigmergia en el contexto de los insectos sociales para describir la forma de comunicación particular en la que los “insectos trabajadores son estimulados por los trabajos que han realizado ellos y otros insectos trabajadores” [Dorigo *et al.*, 2006].

Su descubrimiento acerca de la comunicación en los insectos sociales desafió cualquier explicación racional hasta ese momento. No había planes, organización o control desarrollado en los cerebros o genes de los insectos. Incluso, no se comunicaban entre ellos. Las estructuras sofisticadas y complejas emergían espontáneamente. La respuesta la encontró a través del estudio de las características de la auto-organización de los sistemas complejos. La complejidad en los sistemas estigmérgicos no emerge como consecuencia de las interacciones entre individuos sino de las interacciones entre los individuos y el medioambiente en común. Ellos interactúan con el medioambiente produciendo cambios en el mismo. Estos cambios afectan la forma en la que futuros cambios serán realizados. Esto ocasiona un efecto de retroalimentación positivo, donde la información se alimenta de más información.

Con posterioridad a las observaciones de Grassé, varios científicos han enriquecido la definición de estigmergia.

Istvan Karsai, biólogo húngaro y profesor asociado de la Universidad East Tennessee State, afirmó que Grassé utilizó el término estigmergia para describir “un mecanismo de tipo descentralizado de flujo de información en los insectos sociales”. Según él, en general todas las especies de grupos multi-agentes requieren una coordinación de sus esfuerzos y parece ser que la estigmergia es un medio muy poderoso para coordinar las actividades por largos períodos de tiempo y espacio en una amplia variedad de sistemas. En una situación en la que varios individuos contribuyen al esfuerzo colectivo, como en la construcción de un nido, los estímulos provistos por la estructura emergente misma pueden proveer una rica fuente de información para los insectos trabajadores.

Théraulaz, investigador asociado del Laboratorio de Etología y de Psicología Animal del Centro Nacional de la Investigación Científica en Francia, y Bonabeau, CEO y jefe científico de Icosystem Corporation, definieron a la estigmergia como una clase de mecanismo que media las interacciones animal-animal. La introducción del concepto de estigmergia hizo posible explicar lo que hasta ese momento habían sido consideradas observaciones paradójicas. En una sociedad de insectos, los individuos trabajan como si estuvieran solos mientras que sus actividades colectivas parecen estar coordinadas.

Las definiciones de Istvan Karsai y Théraulaz y Bonabeau concuerdan en que el principio de estigmergia implica la interacción de agentes simples a través de un medio en común sin un control central. Es por eso que investigar a los agentes individuales no tiene mucho sentido si se pretende estudiar las propiedades emergentes del sistema. Como consecuencia, la estimulación suele utilizarse para comprender dinámicas emergentes en sistemas estigmérgicos. Los sistemas estigmérgicos son típicamente estocásticos por naturaleza; las acciones individuales son elegidas en forma probabilística entre una limitada cantidad de comportamientos. Las acciones llevadas a cabo por agentes individuales modifican la naturaleza del medioambiente; por ejemplo, un químico volátil, la feromona, es depositado por las hormigas. Esta señal química es percibida por otros agentes y resulta en una modificación probabilística de las elecciones sobre las futuras acciones [White, 2005].

Las dos características principales de la estigmergia que la diferencian de otras formas de comunicación son las siguientes [Dorigo *et al.*, 2006]:

- La estigmergia es una forma de comunicación indirecta y no simbólica que utiliza como medio el medioambiente: los insectos intercambian información modificando el medioambiente; y
- La información estigmérgica es local: sólo puede ser accedida por aquellos insectos que visitan el lugar exacto en el que es liberada (o en sus inmediatos alrededores).

El control descentralizado en la estigmergia también juega un rol preponderante. La estigmergia no requiere planeamiento, ni líderes, ni comunicación directa entre los participantes. Es auto-organizada.

En un sistema estigmérgico:

- Los individuos no dependen de instrucciones.
- Cada individuo recoge información por sí mismo y decide por sí solo qué debe hacer.
- La información es recogida de un medioambiente compartido.
- La toma de decisiones no está centralizada.
- Los individuos necesitan sólo unas pocas reglas elementales.

- Existe el fenómeno de evaporación.

Owen Holland, investigador de robótica de la Universidad de Essex, y Chris Melhuish, director del Laboratorio Inteligente de Sistemas Autónomos de la Universidad del Oeste de Inglaterra, afirman que “si la estigmergia se encuentra en las raíces del comportamiento constructivo de las termitas, hormigas, abejas y avispas, entonces es con seguridad un principio poderoso, dado que las construcciones de los insectos sociales se destacan por su complejidad, tamaño y capacidad de adaptación.”. Sin embargo, esta idea es fácilmente trasladable a otros dominios; puede observarse en forma general como una explicación sobre cómo los sistemas simples pueden producir un amplio rango de comportamientos altamente organizados y coordinados y resultados concretos de dichos comportamientos, simplemente explotando la influencia del medioambiente [Holland and Melhuish, 1999].

En la actualidad, el principal objetivo, afirman los autores, es extender la definición de estigmergia, reemplazando el sentido de “trabajo” por el sentido de “cualquier cambio en el medioambiente producido por el animal” (de hecho, ahora se comprende que la regulación del comportamiento constructivo de la termita involucra tanto feromonas como características estructurales de la construcción).

Holland y Melhuish sostienen que, a pesar de que existen varias formas modernas de tratar a la estigmergia como un fenómeno general, todavía hay espacio para mayor precisión en su definición. Por ejemplo, el sentido de “estimulación” original de Grassé debe ser formalmente redefinido. Lo único que debe ocurrir para que una comunicación sea estigmérgica es que el resultado del comportamiento de los agentes sea adecuadamente afectado por cambios medioambientales previos, y esto puede suceder de varias formas:

- (i) la elección de una acción por parte del agente podría ser afectada (un efecto cualitativo)
- (ii) la acción elegida podría ser la misma, pero la posición exacta, fuerza, frecuencia, duración, o cualquier otro parámetro de la acción podría estar afectado (un efecto cuantitativo)
- (i) captura el sentido de Grassé sobre la acción que está siendo guiada, y (ii) también incluye el elemento de intensidad de la actividad. El efecto cualitativo en (i) podría ser controlado internamente por algún mecanismo umbral actuando sobre un estímulo de entrada que varíe cuantitativamente. Sin embargo, existe una tercera posibilidad que la formulación de Grassé no contempla:
- (iii) una acción previa en un lugar determinado podría no afectar ni a la acción ni a los parámetros de una acción siguiente, sino sólo al resultado (un efecto cualitativo y/o cuantitativo).

Los autores profundizan este concepto a través de una explicación simple: considérese un auto que está siendo manejado por un camino embarrado. Aunque el conductor

intentara conducir por un curso determinado, las ruedas podrían asentarse en surcos profundos, lo que llevaría al auto a circular por otro curso. Las acciones llevadas a cabo por otros conductores que circularon por el camino previamente han afectado el resultado de las acciones que está llevando a cabo este conductor (y, a su vez, él profundizará los surcos aún más, y tendrá más dificultades la próxima vez). Esta influencia se denomina estigmergia pasiva, mientras que (i) y (ii) se conocen como estigmergia activa, en el sentido en que afectan al agente. La estigmergia pasiva está muy relacionada a situaciones puramente físicas donde alguna fuerza actuando en forma constante, a menudo un fluido, modifica el entorno de forma tal de cambiar su efecto futuro sobre el medioambiente. Ejemplos de esto son la formación de dunas de arena, deltas y los ríos serpenteantes.

3.6.1 La auto-organización

Nacida dentro de la física y química para “describir la emergencia de patrones macroscópicos más allá de procesos e interacciones definidas en el nivel microscópico” [Bonabeau et al., 1997], la teoría de la AO se ha extendido al campo de la biología, particularmente el de la etología, y finalmente a los insectos sociales. La teoría se ha aplicado a diversos patrones de comportamiento en hormigas, abejas, avispas sociales y termitas.

La AO en los sistemas de enjambre ocurre a través de distintos medios, los cuales no tienen que estar todos presentes en un sistema para que ocurra la resolución efectiva del problema. Debe destacarse que la memoria del agente no es un aspecto importante del sistema de enjambre.

Ahora bien, ¿cómo se explica que la estigmergia pueda producir patrones complejos? La estigmergia es esencialmente un mecanismo que permite al medioambiente estructurarse a través de las actividades de los agentes en el medioambiente: el estado del medioambiente y la distribución actual de los agentes en él determinan cómo el medioambiente y la distribución de los agentes cambiará en el futuro. Como afirmó Bonabeau, cualquier estructura que emerja de esta interacción repetida se desarrolla a través de un proceso de AO. Bonabeau y sus colegas han provisto un breve resumen de la naturaleza y propiedades de la AO, definiéndola como “(...) un conjunto de mecanismos dinámicos en los que las estructuras aparecen a nivel global del sistema a partir de interacciones entre sus componentes de más bajo nivel. Las reglas que especifican las interacciones entre las unidades constituyentes del sistema son ejecutadas exclusivamente sobre la base de información local, sin referencia al patrón global, el cual es una propiedad emergente del sistema más que una propiedad impuesta en el sistema por la influencia de una orden externa.”. Ellos identificaron cuatro componentes básicos de la AO y tres características distintivas. Los componentes básicos son:

1. Retroalimentación positiva.

2. Retroalimentación negativa.
3. Amplificación de fluctuaciones.
4. Presencia de múltiples interacciones.

1. Retroalimentación positiva

Consiste en acciones simples que promueven la creación de estructuras como por ejemplo el reclutamiento de hormigas a una fuente de alimentos o la construcción de nidos. En el primer ejemplo, la estigmergia está presente en forma explícita, con una señal independiente, la feromona, que provee la retroalimentación. En el segundo ejemplo, la estigmergia está presente a través del trabajo que se está realizando, es decir, la estructura que se está construyendo. Esta segunda forma de estigmergia se denomina estigmergia sematectónica. Un tercer ejemplo es el ya mencionado comportamiento de agrupación de las hormigas.

La retroalimentación positiva en un sistema auto-organizado conduce a los agentes en el sistema a reforzar las acciones que provean la mayor ganancia para el grupo. Se dice que la retroalimentación positiva en sistemas estigmergicos forma un proceso autocatalítico.

2. Retroalimentación negativa

Es el contrapeso de la retroalimentación positiva, ayudando a la estabilización de un patrón colectivo (saturación, agotamiento, competencia), por ejemplo cuando el número de hormigas obreras disponibles es insuficiente para explotar una fuente de alimento, o cuando llegan hormigas de otra colonia o especie a esta fuente de alimentación.

Mientras que la retroalimentación positiva atrae más y más agentes a participar en un proceso de resolución del problema, reforzando las acciones de otros agentes haciéndolas más probables, esto puede causar una convergencia prematura a una solución subóptima si no se provee retroalimentación negativa. La retroalimentación negativa es utilizada para estabilización y está diseñada para asegurar que una decisión errónea, o un pequeño número de decisiones erróneas, no afecte el proceso de resolución del problema entero. La naturaleza altamente volátil de la feromona provee esto en los sistemas de hormigas. En efecto, la volatilidad de la feromona asegura que las señales deben ser continuamente reforzadas para persistir en el medioambiente. Se puede pensar a la volatilidad de la feromona, o a la retroalimentación negativa en general, como el “olvido”.

3. Amplificación de fluctuaciones

Las acciones al azar, por ejemplo las hormigas buscando alimento caminando sin rumbo fijo, pueden descubrir soluciones espontáneamente, como toparse con una rica e inexplorada fuente de alimento.

En efecto, en la mayoría de los sistemas de enjambre existe un comportamiento estocástico. Por ejemplo, las hormigas continuamente realizan elecciones sobre dónde

buscar alimento. Las decisiones se realizan basadas en los niveles de feromona presentes en el suelo. Sin embargo, en ausencia de feromona, una decisión será igualmente tomada y el valor de esta acción será posteriormente amplificado por otras hormigas que tendrán sus opciones de movimiento condicionadas por la feromona depositada. También ha sido demostrado que periódicamente ignorar señales en el medioambiente puede ser beneficioso. En este caso una acción es elegida aleatoriamente. Esto muchas veces permite descubrir nuevas soluciones.

A menudo la naturaleza de las fluctuaciones en un sistema de enjambre es caótica; esto es, aunque las dinámicas emergentes son predecibles en algún sentido macro, la trayectoria del sistema y la microestructura no pueden predecirse. Un ejemplo de esto puede observarse en el comportamiento de agrupación de las hormigas. Mientras que puede demostrarse que con tiempo suficiente las hormigas agruparán todos los objetos de un mismo tipo en una misma pila, la ubicación de la pila y las posiciones actuales de los objetos individuales no pueden predecirse. Corridas sucesivas de una simulación del sistema darán como resultado estructuras significativamente diferentes; sin embargo, los objetos estarán agrupados en grupos.

4. Múltiples interacciones

Bajo una “mínima densidad de individuos mutuamente tolerantes”, un individuo de una colonia puede generar una estructura auto-organizada. Los sistemas de enjambre confían en múltiples interacciones, es decir, varios agentes realizando la misma acción, para que emerja el comportamiento de resolución del problema. Las interacciones con el entorno causan el cambio, y éstos se ven reflejados en el medioambiente. La memoria del agente no es un factor importante en la resolución del problema; los patrones espacio-temporales en el medioambiente sí lo son. Las señales de un individuo deben ser percibidas por otros para que estas múltiples interacciones tengan valor. El grado con el que los agentes pueden percibir otros cambios de los agentes en el medioambiente determina el valor de las múltiples acciones de los agentes dado que dichos cambios afectan las decisiones que realiza el agente que las percibe.

Además de las múltiples interacciones, es importante que el comportamiento de los agentes exhiba diversidad. Esto implica que distintas decisiones pueden ser tomadas para un entorno dado. Usualmente, cuando se enfrentan con varias acciones competentes, un valor de la acción será asociado con cada acción y una elección estocástica será realizada.

Los autores de esta propuesta resumen tres características distintivas de la auto-organización:

- la creación de estructuras espacio-temporales en un medio inicialmente homogéneo,
- la posible coexistencia de diferentes estados estables (multiestabilidad), y
- la existencia de bifurcaciones enfrente de parámetros variables.

La aplicación de las ideas arriba expuestas a varios aspectos en el comportamiento de los insectos sociales ha mostrado algunas consecuencias interesantes. Sus investigadores afirman que la AO no es un “mecanismo universal” y que muchos comportamientos en los insectos sociales pueden tener otra explicación (por ejemplo el uso de la feromona por la reina para el control de la colonia). [Fernández, 2003].

Holland y Melhuish mencionan otros puntos de vista para abordar el tema de la estigmergia. Uno de ellos consiste en considerar cuáles son las características mínimas necesarias que debería tener un agente y el medioambiente para estar en presencia de la estigmergia. Un agente posee dos habilidades clave: puede moverse a través del medioambiente y puede actuar sobre el medioambiente. El medioambiente debe ser capaz de ser modificado localmente por los agentes y esos cambios deben persistir lo suficiente como para afectar la elección, parámetros, o consecuencias del comportamiento de los agentes. Por lo tanto, esto elimina la posibilidad de que exista la estigmergia en ambientes vacíos o altamente dinámicos, como el espacio, aire y agua. La modificación del medioambiente puede ser reducida a un pequeño número de categorías: un material puede ser tomado del medioambiente, o agregado a él, o alguna cualidad local del medioambiente puede ser alterada. De este modo, queda definido el alcance de la estigmergia: los tres tipos de cambio medioambiental pueden producir los tres tipos de acción estigmergía en las dos habilidades de los agentes. Debe quedar en claro que en varios sistemas biológicos alguna forma de estigmergia debe inevitablemente estar presente, y puede esperarse que esté presente en varios sistemas artificiales cuando se desarrollan en el mundo real. Sin embargo, sólo en aquellas instancias en que la estigmergia da lugar a la AO se producirán efectos notables o útiles.

Como Grassé señaló en su trabajo original, existen dos formas de estructurar la generación de secuencias de comportamientos en los insectos (y, por extensión, en agentes simples de cualquier tipo). En la primera, encontrada en especies solitarias como la avispa excavadora, la ejecución del primer movimiento en la secuencia establece algún estado interno que luego, a menudo en conjunto con alguna señal externa apropiada, inicia el segundo movimiento, y así sucesivamente. En la segunda, encontrada tanto en los insectos solitarios como en los sociales, no existe el estado interno; la señal externa sola es suficiente. Esta segunda forma usualmente requiere que la señal externa esté correlacionada con la finalización exitosa del primer movimiento.

Esta segunda estrategia es más apropiada para los insectos sociales y establece el escenario para la estigmergia. Dado que hay varios agentes idénticos disponibles, no se requiere que la secuencia de movimientos conectada sea realizada por un agente único. La sola presencia de señales asegurará la ejecución de una secuencia completa, aún si cada movimiento es realizado por un agente diferente. En particular, donde haya varias señales similares para una determinada sub-tarea en una ubicación determinada, la tasa de realización de la sub-tarea será una función del número de agentes que se encuentran en esa ubicación (esto no sería necesariamente el caso si el agente tuviera que estar en

un estado interno determinado para estar apto para responder a la señal). Si hubiera varias ubicaciones con esas señales, la sub-tarea será realizada más rápido en las ubicaciones que tengan la mayor cantidad de agentes presentes. La estigmergia puede por lo tanto controlar el desarrollo morfogénico de una construcción u otro patrón espacial a través del control de la distribución de los agentes en el medioambiente más que sólo a través del control de la provocación de las acciones constructivas en lugares específicos [Holland & Melhuish, 1999].

4 OPTIMIZACION DE COLONIA DE HORMIGAS⁷

En esta sección se desarrollará uno de los más conocidos algoritmos de IE, utilizado para la resolución de diversos problemas ingenieriles.

ACO ha sido formalizado en un algoritmo metaheurístico para problemas de optimización combinatoria por Dorigo en el año 1992. Un metaheurístico es un conjunto de conceptos algorítmicos que puede ser utilizado para definir métodos heurísticos aplicables a un amplio conjunto de problemas diferentes. En otras palabras, un metaheurístico es un marco algorítmico de propósito general que puede ser aplicado a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones. Ejemplos de metaheurísticos incluyen recocimiento simulado, búsqueda tabu, búsqueda local de iteración, computación evolucionaria y ACO.

El algoritmo ACO está basado en la población y puede ser utilizado para encontrar soluciones aproximadas a problemas de optimización difíciles de resolver mediante técnicas tradicionales. Se inspira en el ya mencionado comportamiento de búsqueda de alimentos de las colonias de hormigas.

ACO ha sido aplicado exitosamente a varios problemas clásicos tanto de optimización combinatoria como de optimización discretos con componentes estocásticos y/o dinámicos. Entre los ejemplos se encuentra la aplicación al ruteo en redes de comunicación y a versiones estocásticas de conocidos problemas de optimización combinatoria, como el problema probabilístico del agente viajero. Además, distintos investigadores han propuesto variantes del algoritmo ACO así puede ser utilizado para resolver problemas de optimización continuos y de varias variables. ACO es probablemente el ejemplo más exitoso de sistemas artificiales e ingenieriles de IE con numerosas aplicaciones a problemáticas del mundo real [Dorigo & Birattari, 2007].

El modelo propuesto por Deubourg para explicar el comportamiento de búsqueda de alimentos de las hormigas fue la principal fuente de inspiración para el desarrollo del modelo ACO. En ACO, un número de hormigas artificiales construyen soluciones para un problema de optimización e intercambian información sobre la calidad de estas soluciones a través de un entorno de comunicación que es semejante al adoptado por las hormigas reales [Dorigo *et al.*, 2006]. En este algoritmo, el problema de optimización es transformado en un problema cuyo objetivo es encontrar el camino de menor costo en un gráfico ponderado. Las hormigas artificiales construyen soluciones paulatinamente moviéndose sobre dicho gráfico.

Diferentes variantes del algoritmo ACO han sido propuestos. El algoritmo original es conocido como *Sistema de Hormigas* (Ant System). A partir de entonces, varios otros algoritmos ACO fueron introducidos. En la siguiente tabla se presenta un listado de variantes exitosas.

⁷ Ant Colony Optimization, por sus siglas en ingles.

Algoritmo	Autores	Año
Ant System	Dorigo et al.	1991
Elitist AS	Dorigo et al.	1992
Ant-Q	Gambardella & Dorigo	1995
Ant Colony System	Gambardella & Dorigo	1996
Max-Min AS	Stützle & Hoos	1996
Rank-Based AS	Bullnheimer et al.	1997
Ants	Maniezzo	1999
Bwas	Cordon et al.	2000
Hyper-Cube AS	Blum et al.	2001

Tabla 2. Listado de algoritmos ACO exitosos

Todos los algoritmos ACO comparten la misma idea característica, la cual puede ilustrarse mejor a través de un ejemplo sobre cómo se aplican. A continuación se describe en términos simples cómo un algoritmo ACO genérico es aplicado a la resolución del problema del agente viajero y luego se dará una descripción más formal del algoritmo.

4.1 ACO METAHEURÍSTICO

El ejemplo más conocido de aplicación del ACO es el problema del agente viajero. En el problema del agente viajero, un número de ciudades es dado y la distancia entre las ciudades es conocida. El objetivo es encontrar el camino más corto que permita visitar cada ciudad una sola vez. En términos más formales, la meta es encontrar el recorrido Hamiltoniano de mínima distancia en un grafo totalmente conectado.

En ACO, el problema es abordado simulando un número de hormigas artificiales moviéndose sobre un grafo que codifica al problema mismo: cada vértice representa una ciudad y cada borde representa la conexión entre dos ciudades. Una variable denominada feromona es asociada con cada borde y puede ser leída y modificada por las hormigas.

ACO es un algoritmo iterativo. En cada iteración, un número de hormigas artificiales es establecido y cada una de ellas construye una solución recorriendo los vértices del gráfico con la limitación de no visitar un vértice que ya ha visitado en su recorrido. En cada paso de la construcción de una solución, una hormiga elige el siguiente vértice a ser visitado de acuerdo a un mecanismo estocástico que está condicionado por la feromona: cuando está en el vértice i , el siguiente vértice es seleccionado estocásticamente entre aquellos que no fueron visitados previamente. En particular, si j no ha sido visitado anteriormente, puede ser seleccionado con una probabilidad que es proporcional a la feromona asociada con el borde (i, j) .

Al final de la iteración, basado en la calidad de las soluciones construidas por las hormigas, los valores de feromonas son modificados para predisponer a las hormigas en futuras iteraciones a construir soluciones similares a las mejores que han sido construidas previamente.

Para aplicar ACO a un problema de optimización combinatoria determinado, se necesita un modelo adecuado. Un modelo $P = (S, \Omega, f)$ de un problema de optimización combinatoria consiste en:

- Un espacio de búsqueda S definido sobre un conjunto finito de variables de decisión discretas $X_i, i=1, \dots, n$;
- Un conjunto Ω de restricciones entre las variables; y
- Una función objetivo $f : S \rightarrow R_0^+$ a ser minimizada.

La variable genérica X_i toma valores en $D_i = \{v_i^1, \dots, v_i^{|D_i|}\}$. Una solución factible $s \in S$ es una completa asignación de valores a variables que satisfacen todas las restricciones en Ω . Una solución $s^* \in S$ se denomina óptimo global si y sólo si: $f(s^*) \leq f(s) \forall s \in S$.

El modelo de un problema de optimización combinatoria es utilizado para definir el modelo de feromona del ACO. Un valor de feromona es asociado con cada posible componente de solución; es decir, con cada posible asignación de un valor a una variable. Formalmente, el valor feromona τ_{ij} es asociado con el componente de solución c_{ij} , el cual consiste en la asignación $X_i = v_i^j$. El conjunto de todos los componentes de solución posibles se denomina C .

En ACO, una hormiga artificial construye una solución atravesando el gráfico que está totalmente conectado $G_C(V, E)$, donde V es un conjunto de vértices y E es un conjunto de bordes. Las hormigas artificiales se mueven de un vértice a otro por los bordes del gráfico, construyendo incrementalmente una solución parcial. Adicionalmente, las hormigas depositan una determinada cantidad de feromona en los componentes, es decir, en los bordes que ellas atraviesan. La cantidad $\Delta\tau$ de feromona depositada puede depender de la calidad de la solución encontrada. Las siguientes hormigas utilizan la información de la feromona como guía hacia regiones prometedoras del espacio de búsqueda.

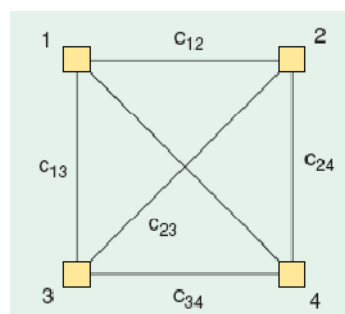


Figura 9. Ejemplo de construcción del grafo en el problema del agente viajero

El ACO metaheurístico se muestra a continuación:

Establecer parámetros, inicializar los caminos de feromona

Mientras que la *condición final* no se encuentre **hacer**

ConstruirSolucionesHormigas

AplicarBúsquedaLocal (opcional)

ActualizarFeromonas

Terminar Mientras

Una vez inicializado, el metaheurístico itera sobre tres fases: en cada iteración, un número de soluciones es construido por las hormigas; estas soluciones son luego mejoradas a través de búsqueda local (este paso es opcional), y finalmente la feromona es actualizada. A continuación se brinda una descripción detallada de las tres fases:

ConstruirSolucionesHormigas

Un conjunto de m hormigas artificiales construyen soluciones de elementos pertenecientes a un conjunto finito de componentes de solución disponibles $C = \{c_{ij}\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, |D_i|$. Una construcción de una solución comienza con una solución parcial vacía $s^p = \emptyset$. En cada paso de construcción, la solución parcial s^p es extendida, agregando un componente de solución factible del conjunto $N(s^p) \subseteq C$, que se define como el conjunto de componentes que pueden ser agregados a la solución parcial actual s^p sin violar ninguna de las restricciones en Ω . El proceso de construir soluciones puede ser interpretado como un recorrido sobre el gráfico de construcción $G_C = (V, E)$.

La elección de un componente de solución de $N(s^p)$ es guiada por un mecanismo estocástico, el cual está basado en feromona asociada con cada uno de los elementos de $N(s^p)$. La regla para la elección estocástica de los componentes de solución varía entre los distintos algoritmos ACO pero, en todas ellas, está inspirada en un modelo del comportamiento de las hormigas reales.

AplicarBúsquedaLocal

Una vez que las soluciones han sido construidas, y antes de actualizar la feromona, es común mejorar las soluciones obtenidas por las hormigas a través de la búsqueda local. Esta fase, que es muy específica de cada problema, es opcional, aunque suele incluirse en los algoritmos ACO más modernos.

ActualizarFeromonas

El objetivo de la actualización de la feromona es incrementar los valores de feromonas asociados con buenas o prometedoras soluciones, y decrecer aquellas que están asociadas con malas soluciones. Usualmente, esto se logra (i) decreciendo todos los valores de feromona a través de la evaporación de feromona, e (ii) incrementando los niveles de feromona asociados con un conjunto de buenas soluciones elegido.

4.2 PRINCIPALES ALGORITMOS ACO

Varios algoritmos ACO han sido propuestos en la literatura. En esta sección, se presenta el Sistema de Hormigas (Ant System) original, y las dos variantes más exitosas: MAX-MIN Ant System (MMAS) y Ant Colony System (ACS). Para ilustrar las diferencias entre los tres algoritmos, se utiliza al problema del agente viajero como un ejemplo concreto.

1) Ant System (AS)

AS es el primer algoritmo ACO propuesto en la literatura. Su principal característica es que, en cada iteración, los valores de feromonas son actualizados por todas las m hormigas que han construido una solución en la iteración misma. La feromona τ_{ij} , asociada con el borde que une las ciudades i y j , es actualizada de la siguiente manera:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k$$

donde ρ es la tasa de evaporación, m es el número de hormigas, y $\Delta \tau_{ij}$ es la cantidad de feromona depositada en el borde (i, j) por la hormiga k :

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q / L_k & \text{si la hormiga } k \text{ utilizó el borde } (i, j) \text{ en su tour,} \\ 0 & \text{de otra forma,} \end{cases}$$

donde Q es una constante, y L_k es la longitud del camino construido por la hormiga k .

En la construcción de una solución, las hormigas seleccionan la siguiente ciudad a ser visitada a través de un mecanismo estocástico. Cuando la hormiga k está en la ciudad i y ha construido hasta el momento la solución parcial s^p , la probabilidad de ir a la ciudad j está dada por:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{c_{ij} \in N(s^p)} \tau_{il}^\alpha \cdot \eta_{il}^\beta} & \text{si } c_{ij} \in N(s^p), \\ 0 & \text{de otra forma,} \end{cases}$$

donde $N(s^p)$ es el conjunto de componentes de solución factibles; esto es, los bordes (i, l) donde l es una ciudad que aún no ha sido visitada por la hormiga k . Los parámetros α y β controlan la importancia relativa de la feromona contra la información heurística η_{ij} , la cual se define como:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}},$$

donde d_{ij} es la distancia entre las ciudades i y j .

2) MAX-MIN Ant System (MMAS)

Este algoritmo es una mejora del AS original. Sus elementos característicos son que sólo la mejor hormiga actualiza el camino de feromona y que el valor de la feromona está limitado. La actualización de feromona se implementa de la siguiente manera:

$$\tau_{ij} \leftarrow [(1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{mejor}]_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}},$$

donde $\tau_{\max}$ y $\tau_{\min}$ son, respectivamente, el límite mayor y menor impuesto sobre la feromona; el operador $[x]_b^a$ es definido como:

$$[x]_b^a = \begin{cases} a & \text{si } x > a, \\ b & \text{si } x < b, \\ x & \text{de otra forma;} \end{cases}$$

y $\Delta \tau_{ij}^{mejor}$ es:

$$\Delta \tau_{ij}^{mejor} = \begin{cases} 1/L_{mejor} & \text{si } (i, j) \text{ pertenece al mejor recorrido,} \\ 0 & \text{de otra forma,} \end{cases}$$

donde L_{mejor} es la longitud del recorrido de la mejor hormiga. Esto puede ser (sujeto a la decisión del diseñador del algoritmo) o el mejor recorrido encontrado en la iteración actual (*iteration-best*, L_{ib}) o la mejor solución encontrada desde el inicio del algoritmo (*best-so-far*, L_{bs}) o una combinación de ambas.

Considerando los límites bajos y altos de los valores de feromona, $\tau_{\min}$ y $\tau_{\max}$, ellos son típicamente obtenidos en forma empírica y ajustados para el problema específico que se esté resolviendo. No obstante, algunas pautas han sido provistas para definir $\tau_{\min}$ y $\tau_{\max}$ sobre la base de consideraciones analíticas.

Se ha decidido utilizar esta variante en este trabajo para construir la herramienta porque evita la eliminación de soluciones que podrían ser óptimas o el refuerzo de caminos que podrían ser subóptimos.

3) Ant Colony System (ACS)

El aporte más interesante de la ACS es la introducción de la actualización de la feromona local además de la actualización de feromona realizada al final de cada proceso de construcción (denominado actualización de feromona offline).

La actualización de feromona local es realizada por todas las hormigas después de cada paso de construcción. Cada hormiga la aplica sólo al último borde atravesado:

$$\tau_{ij} = (1 - \varphi) \cdot \tau_{ij} + \varphi \cdot \tau_0,$$

donde $\varphi \in (0,1]$ es el coeficiente de decaimiento de la feromona, y τ_0 es el valor inicial de la feromona.

La meta principal de la actualización local es diversificar la búsqueda realizada por las siguientes hormigas durante una iteración: decreciendo la concentración de feromona en los bordes atravesados, las hormigas motivan a las siguientes hormigas a elegir otros bordes y, entonces, a producir soluciones diferentes. Esto disminuye la posibilidad de que varias hormigas produzcan soluciones idénticas durante una iteración.

La actualización de feromona offline, al igual que MMAS, es aplicada al final de cada iteración por sólo una hormiga, la cual puede ser o la *iteration-best* o la *best-so-far*. Sin embargo, la fórmula de actualización es levemente diferente:

$$\tau_{ij} \leftarrow \begin{cases} (1-\rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \Delta\tau_{ij} & \text{si (i,j) pertenece al mejor recorrido,} \\ \tau_{ij} & \text{de otra forma.} \end{cases}$$

Como en MMAS, $\Delta\tau_{ij} = 1/L_{\text{mejor}}$, donde L_{mejor} puede ser o L_{ib} o L_{bs} .

Otra diferencia importante entre ACS y AS está en la regla de decisión utilizada por las hormigas durante el proceso de construcción. En ACS, la denominada regla cuasi-aleatoria proporcional es utilizada: la probabilidad para una hormiga de moverse de la ciudad i a la ciudad j depende de una variable aleatoria q uniformemente distribuida en $[0, 1]$, y un parámetro q_0 ; si $q \leq q_0$, entonces $j = \arg \max_{c_{ij} \in N(s^p)} \{\tau_{ij} \eta_{ij}^\beta\}$, de otra forma se utiliza la ecuación de Ant System⁸.

4.3 CONVERGENCIA DE LAS SOLUCIONES

Una cuestión importante cuando se habla de algoritmos meta-heurísticos se relaciona con la convergencia: ¿es posible encontrar siempre una solución óptima en un algoritmo determinado de tipo ACO? Las primeras pruebas de convergencia fueron presentadas por Gutjahr, un profesor universitario de la Universidad de Viena, para un algoritmo ACO denominado Graph-Based Ant System⁹ (GBAS). Gutjahr demostró convergencia a la solución óptima. GBAS es un algoritmo ACO muy peculiar y los resultados obtenidos no se extienden directamente a otros algoritmos ACO. En particular, no se extienden a los algoritmos ACO que son comúnmente adoptados en aplicaciones.

Stützle y Dorigo propusieron otra prueba de convergencia. Ellos consideraron el MAX-MIN Ant System y el ACS, y demostraron que es posible probar que el costo de la mejor solución encontrada converge siempre al costo óptimo.

Desafortunadamente, todos estos resultados de convergencia no permiten predecir cuán rápido las soluciones óptimas pueden encontrarse. Sólo recientemente, Gutjahr presentó

⁸ La notación $\arg \max_x f(x)$ se refiere al valor de x para el cual $f(\cdot)$ es maximizada. Si el máximo es alcanzado por más de un valor de x , es un problema de indiferencia cuál es considerada.

⁹ Sistema de Hormigas Basado en Gráfico.

un marco analítico que permite predicciones teóricas acerca de la velocidad de convergencia de algoritmos ACO específicos.

4.4 COMPARACIÓN ENTRE ACO Y LAS HORMIGAS REALES

Dorigo explicó las diferencias y similitudes entre el modelo ACO y las hormigas reales [Dorigo *et al.*, 1999]. La mayoría de las ideas del ACO surgen de las hormigas reales. En particular, el uso de: (i) una colonia de individuos que cooperan, (ii) un camino de feromona (artificial) para la comunicación estigmérgica local, (iii) una secuencia de movimientos locales para encontrar las rutas más cortas, y (iv) una política de decisión estocástica utilizando información local y no mirando hacia delante.

Colonia de individuos que cooperan

Como en las colonias de hormigas reales, los algoritmos de hormigas están compuestos de una población, o colonia, de entidades concurrentes y asincrónicas cooperando globalmente para encontrar una buena “solución” a la tarea bajo consideración. Aunque la complejidad de cada hormiga artificial es tal que puede construir una solución factible (como una hormiga real puede encontrar de alguna forma un camino entre el nido y la fuente de alimentación), soluciones de alta calidad son el resultado de la cooperación entre los individuos de la colonia entera. Las hormigas cooperan por medio de la información que ellas concurrentemente leen / escriben en los estados del problema que visitan, como se explica en el siguiente ítem.

Camino de feromona y estigmergia

Las hormigas artificiales modifican algunos aspectos del medioambiente como lo hacen las hormigas reales. Mientras que una hormiga real deposita en el estado del mundo que visita una sustancia química, la feromona, las hormigas artificiales modifican alguna información numérica localmente almacenada en el estado del problema que visitan. Esta información tiene en cuenta la historia / performance actual de la hormiga y puede ser escrita / leída por cualquier hormiga que accede al estado. Por analogía, se denomina a esta información numérica camino de feromona artificial. En los algoritmos ACO, los caminos de feromona locales son la única vía de comunicación entre las hormigas. Esta forma estigmérgica de comunicación juega un rol importante en la utilización de conocimiento colectivo. Su principal efecto es cambiar la forma en la que el medioambiente (el terreno del problema) es percibido localmente por las hormigas como una función de toda la historia pasada de toda la colonia de hormigas. Usualmente, en los algoritmos ACO, un mecanismo de evaporación, similar a la evaporación de la feromona real, modifica la información de feromona a través del tiempo. La evaporación de la feromona permite a la colonia de hormigas olvidar lentamente la historia pasada para dirigir su búsqueda hacia nuevas direcciones sin estar demasiado condicionadas por las decisiones pasadas.

Búsqueda del camino más corto y movimientos locales

Las hormigas artificiales y reales comparten una tarea en común: encontrar el camino más corto (mínimo costo) uniendo el origen (nido) con el destino (comida). Las hormigas reales no saltan, sólo caminan a través de estados de terrenos adyacentes, y lo mismo hacen las hormigas artificiales, moviéndose paso a paso a través de “estados adyacentes” del problema. Por supuesto, las definiciones exactas del estado y adyacencias son específicas del problema.

Política de transición de estado estocástica y miope

Las hormigas artificiales, como las reales, construyen soluciones aplicando políticas de decisión probabilísticas para moverse a través de estados adyacentes. Como en las hormigas reales, las políticas de las hormigas artificiales hacen uso sólo de la información local y no hacen uso de mirar hacia adelante para predecir estados futuros. Por lo tanto, la política aplicada es completamente local, en tiempo y espacio. La política es una función de ambas: la información a priori representada por las especificaciones del problema (equivalente a la estructura del terreno para hormigas reales), y de las modificaciones locales en el medioambiente (camino de feromona) inducidas por hormigas anteriores.

Sin embargo, las hormigas artificiales tienen también algunas características cuya contraparte no está presente en las hormigas reales:

- Las hormigas artificiales viven en un mundo discreto y sus movimientos consisten en transiciones de estados discretos a estados discretos.
- Las hormigas artificiales tienen un estado interno. Este estado privado contiene la memoria de las acciones pasadas.
- Las hormigas artificiales depositan una cantidad de feromona que es función de la calidad de la solución encontrada (en realidad, algunas hormigas reales tienen un comportamiento similar: depositan más feromona en caso de encontrar fuentes de comida más ricas).
- Los tiempos de las hormigas artificiales en el depósito de feromona depende del problema y a menudo no refleja el comportamiento de las hormigas reales. Por ejemplo, en varios casos las hormigas artificiales actualizan los caminos de feromonas sólo después de haber generado una solución.
- Para mejorar la eficiencia general del sistema, los algoritmos ACO pueden ser enriquecidos con capacidades extra como el mirar hacia adelante, optimización local, regresar por el camino, y muchas más, que no pueden encontrarse en hormigas reales.

4.5 APLICACIONES DEL ACO

En años recientes, el interés de la comunidad científica en el ACO ha crecido notablemente. De hecho, varias aplicaciones exitosas de ACO a un amplio rango de problemas de optimización discreta están disponibles. La gran mayoría de estas aplicaciones son para problemas NP-hard, esto es, para problemas para los que los algoritmos más conocidos que garantizan identificar una solución óptima tienen tiempo exponencial en el caso más complejo. La utilización de dichos algoritmos no es usualmente viable en la práctica, y los algoritmos ACO pueden ser útiles para encontrar rápidamente soluciones de alta calidad.

Otras aplicaciones populares existen para problemas dinámicos de camino más corto que se presentan en problemas de redes de telecomunicaciones. El número de aplicaciones exitosas a problemas académicos ha motivado a la gente a adoptar ACO para la solución de problemas industriales, probando que esta técnica de inteligencia computacional es también útil en aplicaciones del mundo real.

4.5.1 Aplicaciones a problemas NP-hard

La aproximación usual para mostrar la utilidad de una nueva técnica meta-heurística es aplicarla a un número de diferentes problemas y comparar sus rendimientos con la de las técnicas actuales. En el caso de ACO, esta investigación inicialmente consistió en testear los algoritmos al problema del agente viajero. Subsecuentemente, otros problemas de tipo NP-hard fueron también considerados. Hasta el momento, ACO ha sido testeado en probablemente más de cien problemas de tipo NP-hard distintos. Varios de los problemas atacados pueden ser considerados dentro de una de las siguientes categorías: problemas de ruteo como por ejemplo en la distribución de bienes; problemas de asignación, donde un conjunto de ítems (objetos, actividades, etc.) debe ser asignado a un número dado de recursos (ubicaciones, agentes, etc.) sujeto a algunas restricciones; problemas de programación, los cuales, en el sentido más amplio, se relacionan con la alocaación de recursos escasos a tareas a través del tiempo; y problemas de subconjunto, donde una solución a un problema es considerada como una selección de un subconjunto de ítems disponibles. Adicionalmente, ACO ha sido exitosamente aplicado a otros problemas emergentes en campos como aprendizaje de máquinas y bioinformática.

Una característica común a varios de estas aplicaciones es que el algoritmo ACO de mejor rendimiento hace uso intensivo de la fase opcional de búsqueda local del ACO meta-heurístico. Esto es típicamente muy efectivo desde que, por un lado, las soluciones construidas por las hormigas pueden a menudo ser mejoradas por un algoritmo adecuado de búsqueda local; por otro lado, generar soluciones iniciales adecuadas para algoritmos de búsqueda local es una tarea difícil y varios resultados experimentales muestran que el proceso probabilístico y adaptativo de ACO de generación de soluciones es particularmente apropiado para esta tarea. En la siguiente tabla, se presentan algunas de las aplicaciones más conocidas de algoritmos ACO. El resultado

global que emerge de estas aplicaciones es que, para varios problemas, los algoritmos ACO producen resultados que están muy cerca de algunos de los algoritmos de mejor rendimiento, mientras en algunos problemas son lo mejor que hay. Estos últimos problemas incluyen los problemas de orden secuencial, problemas de programación de apertura de negocio, algunas variantes de los problemas de ruteo de vehículos, problemas de clasificación y acoplamiento de proteínas ligadoras.

Tipo de problema	Nombre del problema	Autores	Año
Ruteo	Agente viajero	Dorigo et al.	1991, 1996
		Dorigo & Gambardella	1997
		Stützle & Hoos	1997, 2000
	Ruteo de vehículos	Gambardella et al.	1999
		Reimann et al.	2004
	Ordenamiento secuencial	Dorigo & Gambardella	2000
Asignación	Asignación cuadrática	Stützle & Hoos	2000
		Maniezzo	1999
	Asignación de clases	Socha et al.	2002, 2003
	Coloreo de gráficos	Costa & Hertz	1997
Scheduling	Programación de proyectos	Merkle et al.	2002
		Den Besten et al.	2000
	Tardanza total ponderada	Merkle & Middendorf	2000
		Blum	2005
Subset	Problema del conjunto de cobertura	Lessing et al.	2004
		Blum & Blesa	2005
	Knapsack múltiple	Leguizamón & Michalewicz	1999
	Problema de la clique máxima	Fenet & Solnon	2003
Otros	Problema de satisfacción de restricciones	Solnon	2000, 2002
		Parpinelli et al.	2002
	Reglas de clasificación	Martens et al.	2006
		Campos et al.	2002
	Redes bayesianas	Shmygelska & Hoos	2005
	Acoplamiento de proteínas ligadoras	Korb et al.	2006

Tabla 3. Aplicaciones de ACO agrupadas por tipo de problema

4.5.2 Aplicaciones a redes de telecomunicación

Los algoritmos ACO han demostrado ser un acercamiento muy efectivo para encontrar soluciones a problemas de ruteo en redes de telecomunicaciones donde las propiedades del sistema, como el costo de utilizar las conexiones o la disponibilidad de nodos, varían en el tiempo. Los algoritmos ACO fueron aplicados primeramente a problemas de ruteo en redes de telefonía y luego en redes de área local o Internet. Siguiendo la prueba de concepto provista por Schoonderwoerd, arquitecto de tecnología de la información de IBM, y su equipo de trabajo, las estrategias inspiradas en hormigas para redes de comunicación mejoraron al punto de ser las mejores en redes no inalámbricas. Un ejemplo conocido (y ya mencionado) es AntNet, que ha sido extensamente testeado, en simulación, sobre distintas redes y bajo distintos patrones de tráfico, probando ser muy adaptativa y robusta. Una comparación con algoritmos de ruteo de última generación ha demostrado que, en la mayoría de las situaciones consideradas, AntNet es mejor que sus competidores.

Los algoritmos basados en hormigas han dado crecimiento a varios otros algoritmos de ruteo, mejorando el rendimiento en una variedad de escenarios de redes no inalámbricas. Más recientemente, un algoritmo ACO diseñado para la desafiante clase de redes móviles demostró ser competitivo con algoritmos de ruteo de última generación, mientras que al mismo tiempo ofrecían mejor escalabilidad.

Uno de los ejemplos más conocidos de aplicación del algoritmo ACO es la implementación que está realizando British Telecom en sus redes de telecomunicaciones, para que ellas puedan autoregularse, recuperarse de lesiones y responder a cambios en la demanda. El objetivo de British Telecom es utilizar estas técnicas para hacer que sus redes inalámbricas sean más confiables y adaptables y ayudar a distribuir servicios basados en redes.

4.5.3 Aplicaciones a problemas industriales

El éxito del modelo ACO en problemas académicos ha acaparado la atención de varias compañías que han comenzado a aplicar algoritmos ACO a la resolución de problemas del mundo real. Entre las primeras compañías que explotaron algoritmos basados en ACO meta-heurísticos está Euro-Bios, quien ha aplicado ACO a un número de distintos problemas de programación de agenda. Los problemas modelados incluían varias restricciones del mundo real, como los tiempos de puesta a punto de equipos, restricciones de capacidad, compatibilidad de recursos y calendarios de mantenimiento. Otra compañía que ha jugado, y todavía juega, un rol importante en promover la aplicación en el mundo real de ACO es AntOptima. Los investigadores de AntOptima han desarrollado un conjunto de herramientas para la solución de problemas de ruteo de vehículos, cuyos algoritmos de optimización están basados en ACO. Productos particularmente exitosos basados en estas herramientas son (i) DYVOIL, para la administración y optimización de la distribución de combustible para calefacción con una flota de camiones no homogénea, utilizada por primera vez por Pina Petroli en Suiza, y (ii) AntRoute, para el ruteo de cientos de vehículos de compañías como Migros, la principal cadena de supermercados suiza, o Barilla, la principal productora de pastas en Italia. Otra aplicación al ruteo de vehículos fue desarrollada por BiosGroup para la compañía francesa Air Liquide. Otras aplicaciones interesantes al mundo real son aquellas de Gravel, Price y Gagné, quienes han aplicado ACO a un problema de programación industrial en un centro de fundición de aluminio, y por Bautista y Pereira, quienes aplicaron exitosamente ACO para resolver un problema de balanceo en una línea de montaje con funciones multi-objetivos y restricciones entre las tareas para un línea de montaje de bicicletas.

Otras empresas que han aplicado esta técnica a sus procesos industriales son Southest Airlines, Unilever, McGraw-Hill y Capital One.

5 LA SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA

5.1 INTRODUCCIÓN

Una simulación es una imitación de la operación de un proceso o sistema del mundo real a través del tiempo. La simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema y la observación de dicha historia artificial para sacar inferencias concernientes a las características operativas del sistema real.

El comportamiento de un sistema a medida que evoluciona a través del tiempo es estudiado mediante el desarrollo de un modelo de simulación. Este modelo usualmente toma la forma de un conjunto de supuestos concernientes a la operación del sistema. Dichos supuestos son expresados en relaciones matemáticas, lógicas y simbólicas entre las entidades, u objetos de interés, del sistema. Una vez desarrollado y validado, el modelo puede ser utilizado para investigar una amplia variedad de escenarios sobre el sistema del mundo real. Potenciales cambios sobre el sistema pueden primero ser simulados, de forma de predecir su impacto en el comportamiento del sistema. La simulación también puede ser utilizada para estudiar sistemas en la etapa de diseño, antes de que esos sistemas sean construidos. Por lo tanto, la modelización en simulación puede ser utilizada como una herramienta de análisis para predecir el efecto de cambios en sistemas existentes y como una herramienta de diseño para predecir el rendimiento de nuevos sistemas bajo un conjunto de circunstancias cambiantes.

La simulación como herramienta para la determinación de la ruta y especificaciones óptimas de un ducto pueden ser utilizada por, entre otros, los siguientes motivos:

1. Permite modelar el proceso tal como es en la realidad.
2. Permite introducir el factor probabilístico.
3. Las salidas gráficas hacen que los resultados sean fácilmente comprensibles.
4. El problema es muy difícil de resolver en forma analítica.
5. El experimento requiere una elevada inversión de recursos, tiempo y dinero. La ejecución de la obra implica fabricar los componentes, disponer de los recursos, preparar el terreno y tomar otras decisiones que son irreversibles en caso de que se decida suspender el proyecto.
6. La simulación es una herramienta muy rica para evaluar distintas alternativas en distintos escenarios, variar parámetros, hacer sensibilidades, análisis estadístico.

Sin embargo, no hay que perder de vista que la simulación presenta ciertas desventajas:

1. No da respuestas exactas, sólo aproximaciones.
2. La construcción de un modelo requiere de un cierto entrenamiento en la herramienta a utilizar.
3. Los resultados pueden ser difíciles de interpretar.
4. La creación de un modelo y los análisis de sus resultados insumen generalmente bastante tiempo.

5.2 PASOS EN UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN

En la siguiente figura se presenta un conjunto de pasos para guiar al desarrollador del modelo en estudio de simulación completo. A continuación, se presenta una breve explicación de cada etapa del proceso de simulación, las cuales servirán como guía para el desarrollo del modelo:

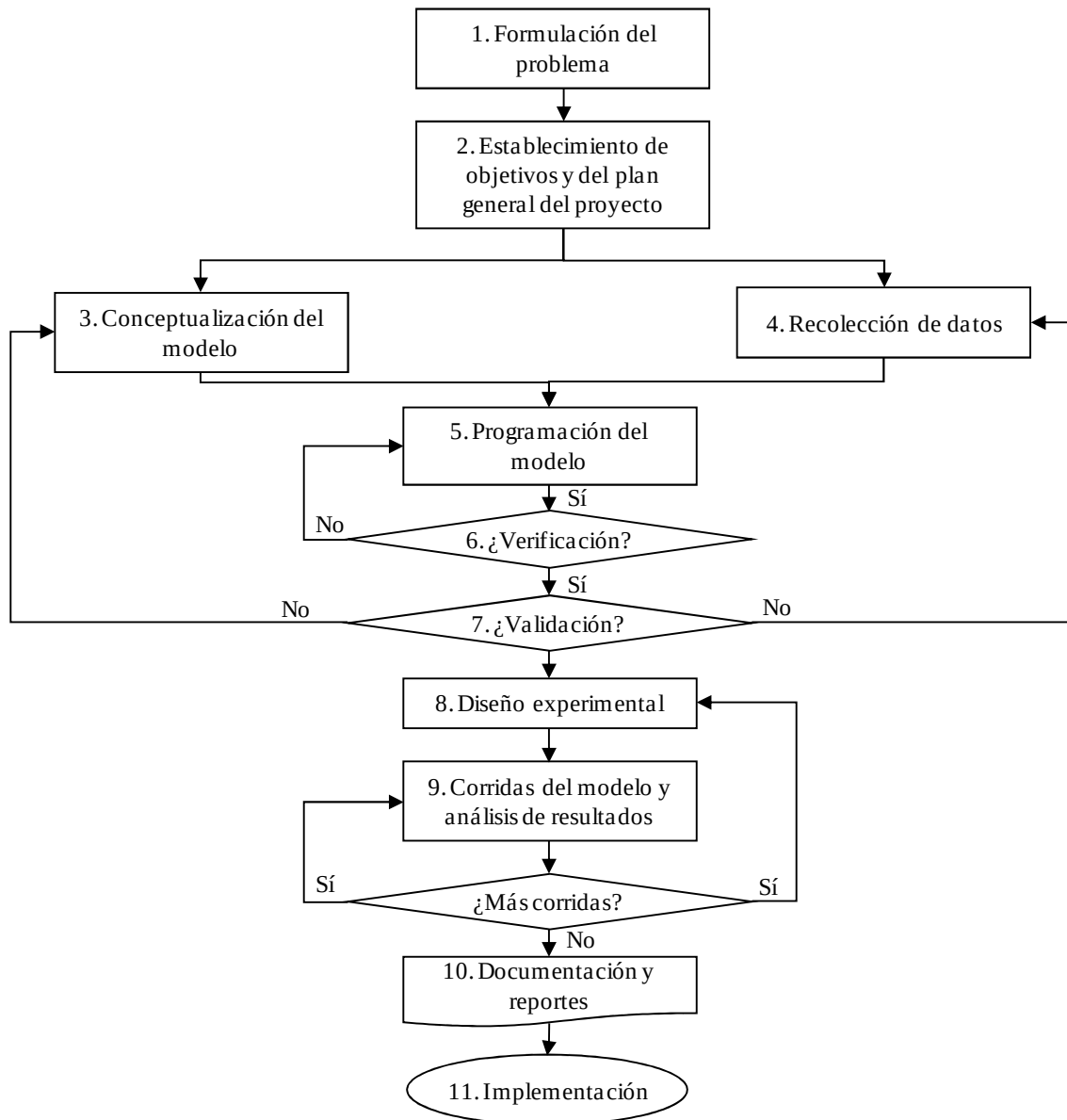


Figura 10. Pasos a seguir para construir un modelo de simulación

1. **Formulación del problema:** cada estudio debe comenzar con un enunciado del problema. Si el enunciado es provisto por los diseñadores de las políticas, o aquellos que tienen el problema, el analista debe asegurarse de que el problema descrito está claramente comprendido. Si el enunciado del problema está siendo desarrollado por el analista, es importante que los diseñadores de las políticas comprendan y estén de acuerdo con la formulación.

2. **Establecimiento de objetivos y del plan general del proyecto:** los objetivos indican las preguntas que debe responder la simulación. En este punto, debe realizarse una determinación en relación a si la simulación es la metodología adecuada para el problema como está formulado y los objetivos como fueron establecidos. Asumiendo que se decide que la simulación es apropiada, el plan general del proyecto debe incluir un enunciado de los sistemas alternativos a ser considerados y de un método de evaluar la efectividad de estas alternativas. También debe incluir el plan del estudio en términos de gente involucrada, el costo del estudio, y el número de días requeridos para lograr cada fase del trabajo, junto con los resultados esperados al finalizar cada etapa. Los objetivos deben ser medibles y cuantificables.
3. **Modelo conceptual:** esta etapa implica el diseño conceptual del modelo. El arte de modelar es realizado por la habilidad de abstraer las características esenciales del problema, elegir y modificar los supuestos básicos que caracterizan al sistema, y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta una aproximación útil de los resultados.
4. **Recolección de datos:** hay una continua relación entre la construcción de un modelo y la recolección de los datos de entrada necesarios. Los objetivos del estudio orientan al tipo de datos a ser recolectados. Los datos históricos son importantes para validar el modelo de simulación. El relevamiento debe encararse primero definiendo el relevamiento vs. el conocimiento, es decir, sabiendo qué datos pueden obtenerse desde bases existentes y cuáles desde mediciones de campo. Debe considerarse la calidad vs. urgencia y los costos asociados. Esto dependerá de qué tan sensible se estima que es el sistema a los datos a ser recolectados, poniendo un mayor énfasis y esfuerzo en aquellos datos a los que el sistema es muy sensible.
5. **Programación del modelo:** el primer paso antes de la programación del modelo es la selección del software. Existen muchos software de simulación en el mercado, cada uno de los cuales presenta ventajas y desventajas en la resolución de distintos tipos de problema. Codificación. Diferentes lenguajes. Tiempo de programación.
6. **Verificación del modelo:** la verificación se relaciona con el programa de computación preparado para el modelo de simulación. ¿Está funcionando adecuadamente el programa de computación? Si los parámetros de entrada y la estructura lógica del modelo están correctamente representadas en el programa, la verificación está completada.
7. **Validación:** la validación es usualmente lograda a través de la calibración del modelo, un proceso iterativo de comparación del modelo contra el comportamiento actual del sistema y utilizando las discrepancias entre ambos, y los conocimientos adquiridos, para mejorar el modelo. Este proceso es iterado hasta que la precisión del modelo es juzgada aceptable. El modelo debe replicar todas las medidas más importantes del sistema.

- 8. Diseño experimental:** deben determinarse las alternativas que van a ser simuladas. A menudo, la decisión en relación a cuáles alternativas simular será una función de las corridas que deben ser completadas y analizadas. Para cada diseño de sistema que es simulada, las decisiones necesitan ser realizadas en relación a la longitud del período de iniciación, el largo de las corridas de simulación, y el número de replicaciones a ser realizadas para cada corrida en base al grado de confianza requerido y a la disponibilidad de tiempo, presupuesto, recursos, etc. Plan de cuadros.
- 9. Corridas y análisis:** las corridas, y su subsecuente análisis, son utilizadas para estimar medidas de performance para los diseños del sistema que están siendo simulados. Dado el análisis de las corridas que han sido completadas, el analista determina si se necesitan más corridas o no. El análisis incluye sensibilidades de los parámetros, comparación de resultados obtenidos versus esperados, verificación de los objetivos planteados, etc.
- 10. Documentación y reportes:** es importante documentar el programa desarrollado, de forma tal de que si es necesario utilizarlo nuevamente o por otra persona, podría ser necesario entender cómo opera el programa. También es importante documentar todos los reportes que contengan los análisis de las corridas realizadas y la historia del proyecto de simulación y sus resultados. Estos reportes del proyecto brindan una cronología del trabajo realizado y de las decisiones tomadas.
- 11. Implementación:** el éxito de la etapa de implementación depende de qué tan bien se han realizado los pasos anteriores. Es también contingente el cuán bien el analista ha involucrado al usuario final del modelo durante el proceso de simulación completo. Si el usuario del modelo ha sido bien involucrado durante el proceso de construcción del modelo y si el usuario comprende la naturaleza del modelo y de sus resultados, entonces será más fácil realizar la implementación.

En resumen, el proceso completo de construcción de un modelo de simulación puede dividirse en cuatro fases.

La primera fase, que consiste en los pasos uno (formulación del problema) y dos (establecimiento del objetivo y del plan de diseño general) es un período de descubrimiento y orientación. El enunciado inicial del problema es usualmente bastante confuso, los objetivos iniciales probablemente deberán ser reformulados, y el plan del proyecto original deberá ser pulido varias veces. Estas recalibraciones y clarificaciones podrían ocurrir en esta fase misma, o por ahí en el transcurso de otra fase. Esta etapa es esencial para el éxito del modelo. Muchas veces permite adquirir un grado mayor de entendimiento de la situación como un todo.

La segunda fase se relaciona con la construcción del modelo y la recolección de datos e incluye a los pasos tres (conceptualización del modelo), cuatro (recolección de datos), cinco (programación del modelo), seis (verificación) y siete (validación). Una continua

interacción entre estos pasos se requiere. Excluir al usuario del modelo durante esta etapa puede tener implicaciones directas en el momento de la implementación.

La tercera fase se vincula a las corridas del modelo. Involucra a los pasos ocho (diseño experimental) y nueve (corridas y análisis). Esta fase debe tener un detallado plan para experimentar con el modelo de simulación. Las variables de salida son estimaciones que contienen errores aleatorios, y por lo tanto, un adecuado análisis estadístico debe realizarse. Esta filosofía se contradice con aquella del analista que realiza una simple corrida y saca inferencias de ella. Las corridas del modelo permiten recolectar los datos que permitirán realizar el análisis y verificar el cumplimiento de objetivos.

La cuarta fase, implementación, involucra a los pasos diez (documentación y reportes) y once (implementación). Una implementación exitosa depende del continuo involucramiento del usuario del modelo y de completar exitosamente todos los pasos del proceso.

5.3 TERMINOLOGÍA A UTILIZAR EN EL MODELO

Para modelar un sistema, es necesario entender el concepto de un sistema y los límites del sistema. Un *sistema* se define como un grupo de objetos que se colocan juntos en algún tipo de interacción regular o interdependencia hacia el cumplimiento de algún propósito. El sistema es a menudo afectado por cambios que ocurren fuera del sistema. Estos cambios se dice que ocurren en el *entorno del sistema*. En el modelado de sistemas, es necesario decidir sobre los *límites* entre el sistema y su entorno.

Para entender y analizar un sistema, un número de términos deben ser definidos.

- Una *entidad* es un objeto de interés en un sistema que requiere una definición explícita. Una entidad puede ser dinámica en el sentido de que se mueve a través del sistema, o puede ser estática en el sentido de que sirve o atiende a otras entidades.
- Un *atributo* es una propiedad de una entidad.
- El *estado* de un sistema se define como una colección de variables necesarias para describir al sistema en cualquier momento.

5.4 MODELIZACIÓN BASADA EN AGENTES

5.4.1 Introducción

Un modelo basado en agentes (ABM, por sus siglas en inglés) es un modelo computacional cuyo objetivo es simular las acciones e interacciones de individuos autónomos pertenecientes a una red para evaluar su impacto sobre el sistema como un todo. Los ABMs combinan elementos de teoría de juegos, sistemas complejos, emergencia, sociología computacional, sistemas multi-agentes y programación evolutiva.

Los modelos simulan operaciones simultáneas entre múltiples agentes, en un intento por recrear y predecir las acciones de fenómenos complejos. Se supone que los agentes individuales actúan según lo que perciben como su propio interés, como ser la reproducción, el beneficio económico o adquirir estatus social, y su conocimiento es limitado. Los agentes pueden experimentar “aprendizaje”, adaptación y reproducción.

La idea de ABM fue desarrollada como un concepto relativamente simple a fines de la década del cuarenta. Dado que requiere procedimientos computacionales intensivos, no fue ampliamente difundida hasta la década del noventa.

5.4.2 Características

En un modelo ABM, se modela un sistema como un conjunto de entidades que toman decisiones en forma autónoma denominadas agentes. Cada agente evalúa su situación individualmente y toma una decisión sobre la base de un conjunto de reglas. Los agentes pueden ejecutar distintos comportamientos apropiados para el sistema que representan – por ejemplo, produciendo, consumiendo, o vendiendo. Las interacciones repetitivas entre los agentes son una característica de los ABM, que recae en el poder de las computadoras para explorar dinámicas fuera del alcance de métodos puramente matemáticos. En forma simplificada, un ABM consiste en un sistema de agentes y las relaciones entre ellos. Aún un simple ABM puede exhibir patrones de comportamiento complejos y proveer información valorable sobre las dinámicas del sistema en el mundo real que emula. Adicionalmente, los agentes pueden ser capaces de evolucionar, permitiendo la aparición de comportamientos inesperados. Los ABM sofisticados suelen incorporar redes neuronales, algoritmos evolucionarios, y otras técnicas de aprendizaje para permitir aprendizaje realista y adaptación [Bonabeau, 2002].

Según, Bonabeau, entre los principales beneficios de ABM sobre otras técnicas de modelización pueden ser capturados en los siguientes tres enunciados:

1. ABM captura el fenómeno emergente.

Los fenómenos emergentes resultan de las interacciones de entidades individuales. Por definición, no pueden ser reducidos a las partes del sistema: el todo es más que la suma de las partes debido a las interacciones entre las partes. Un fenómeno emergente puede tener propiedades que no están relacionadas con las propiedades de las partes que lo componen. Esta característica de los fenómenos emergentes hace que sean difíciles de entender y predecir: los fenómenos emergentes pueden ser contraintuitivos. ABM es, por su naturaleza, la aproximación canónica a modelizar fenómenos emergentes: en ABM, uno modela y simula el comportamiento de las unidades que componen al sistema (los agentes) y sus interacciones, capturando la emergencia de “abajo hacia arriba” cuando la simulación corre.

2. ABM provee una descripción natural del sistema.

En varias ocasiones, ABM es lo más natural para describir y simular un sistema compuesto de entidades con comportamiento. Cuando uno intenta modelar interacciones entre individuos, ABM hace que el modelo se asemeje mucho a la realidad.

3. ABM es flexible.

La flexibilidad del ABM puede ser observada desde muchas dimensiones. Por ejemplo, es fácil agregar nuevos agentes al modelo. ABM también provee un marco natural para modificar la complejidad de los agentes: comportamiento, grado de racionalidad, habilidad para aprender y evolucionar, y reglas de interacción. Otra dimensión de la flexibilidad es la habilidad para modificar niveles de descripción y agregación: uno puede fácilmente jugar con grupos de agentes, subgrupos de agentes, o agentes individuales, con diversos niveles de descripción coexistiendo en un mismo modelo.

5.4.3 Áreas de aplicación

Ejemplos de fenómenos emergentes abundan en las ciencias sociales, políticas y económicas. En un contexto de negocios, situaciones de interés donde fenómenos emergentes pueden aparecer pueden clasificarse en cuatro áreas:

- Flujos: evacuación, tráfico y gestión de flujo de consumidores.
- Mercados: mercado de acciones, herramientas para compras de productos y servicios en Internet y simulación estratégica.
- Organizaciones: riesgo operacional y diseño organizacional.
- Difusión: difusión de dinámicas de innovación y adopción.

Ejemplos concretos dentro de las industrias incluyen, entre otros:

- transporte de fluidos
- optimización de cadena de abastecimiento y logística
- modelización del comportamiento de consumidores, incluyendo el boca a boca
- redes sociales
- computación distribuida
- administración de personal
- administración de portafolios de inversión
- congestión del tráfico

5.4.4 ¿Por qué ABM es adecuado para este problema?

La decisión de utilizar ABM para la construcción de la herramienta en el presente trabajo se basó fundamentalmente en la naturaleza del problema y en la capacidad que tienen los ABM de construir soluciones para esta clase del problema.

La búsqueda de solución debe ser un proceso iterativo. El programa primero deberá determinar una posible ruta para el ducto y, para esta solución, se deberá dimensionar el ducto en forma óptima. Luego se deberá construir una segunda alternativa de ruta, que puede o no compartir algún tramo de su recorrido con la primera, y nuevamente se

deberá dimensionar al ducto en forma óptima. Este proceso será repetido hasta que la solución encontrada sea la óptima, de acuerdo a algún criterio determinado.

La metodología ABM es muy adecuada para construir una solución de este tipo por la lógica cada agente lleva consigo mismo, ya que tienen en cuenta el resultado obtenido por distintos agentes que llevaron a cabo la misma secuencia con anterioridad. Es decir, los distintos agentes construirán soluciones pero basados en la experiencia de los agentes anteriores. Es por eso que cada agente, al encontrar una solución exitosa, deja un rastro para que otros agentes puedan mejorarla. El problema a estudiar tiene un muy alto número de combinatorias posibles, imposibles de evaluar en su totalidad. El basarse en experiencias previas reduce drásticamente el tiempo de simulación y, por ende, los costos.

La gran cantidad de variables que está en juego en el problema que se está resolviendo y la naturaleza de éstas también es una razón para utilizar ABM. Determinadas variables son inherentes a un escenario (terreno sobre el que se desea construir al ducto), que deben ser leídas por los agentes que transiten por él, y otras variables son inherentes a los agentes, que son las entidades que construyen las soluciones. Los agentes interactúan con el medioambiente y tienen la capacidad de modificarlo.

6 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Como ya se ha mencionado, la resolución del problema a resolver requiere la aplicación de conceptos que pertenecen a diversas disciplinas, como la mecánica de fluidos, termodinámica, matemática, etc. En esta sección, se presentará un resumen de los principales conceptos técnicos que serán utilizados en el diseño de la herramienta. Esta sección está basada en el apunte “Optimización del proyecto de ductos” de los profesores Gustavo Cavallo y Remo Frabotta.

La herramienta que servirá como base para la determinación de la ruta óptima que deberá seguir un ducto se basa en la optimización de costos. Los costos a tener en cuenta son tanto los de inversión como los de operación. Para un recorrido determinado, son muchas las variables que hay que dimensionar y que tienen impacto directo en los costos.

El objetivo de un proyecto de ductos deberá ser “transportar el fluido a un costo mínimo de construcción y de operación descontado”. Para transportar un fluido por una cañería es conveniente hacerlo a una velocidad alta del mismo. De esta manera, el diámetro de la cañería resulta ser menor y consecuentemente de menor costo. Sin embargo, el transporte con una alta velocidad de fluido trae como consecuencia la necesidad de impulsarlo con mayor presión, y por ende un consumo mayor de energía de compresión, y compresores de mayor tamaño, lo que implica un costo mayor.

Otra variable en juego es la cantidad de plantas de compresión instaladas sobre la línea, puesto que a mayor cantidad de compresoras, hay un menor salto de presión para una misma distancia de transporte, lo que por un lado aumenta el costo al aumentar el número de plantas de compresión, y por otro disminuye el costo al disminuir el salto de presión.

Al intentar resolver el problema matemáticamente, se presenta el hecho de que la cantidad de ecuaciones que condicionan al problema son menores que la cantidad de incógnitas a resolver y, en consecuencia, el sistema de ecuaciones admite infinitas soluciones. Entre las infinitas soluciones, y con la ayuda de funciones de costo obtenidas del costo de los elementos que constituyen la instalación, se obtiene el proyecto óptimo, utilizando el método matemático de máximos y mínimos condicionados desarrollado por el matemático Joseph Louis Lagrange.

Con las herramientas de la mecánica de fluidos, de resistencia de materiales y termodinámica, se elaboran las funciones de costo correspondiente a los elementos de la instalación (cañerías, plantas de compresión, accesorios, energía necesaria, llenado inicial, etc.). Luego, con apropiados métodos matemáticos, se optimizan las variables de tal manera que la instalación resulte de mínimo costo.

6.2 OPTIMIZACIÓN

Al desarrollar un proyecto de selección de la ruta de un ducto para un determinado caudal y longitud, las variables principales a considerar son el diámetro (D), la presión máxima y mínima, los efectos fluido-dinámicos y térmicos, la distancia entre las plantas de compresión y la relación de presión de estas últimas.

Los profesores Cavallo y Frabotta proponen una metodología de cálculo para obtener el “proyecto óptimo”, esto es, dimensionar al ducto de tal forma de que el costo total (inversión y operación) sea mínimo. En esta sección se explicarán las bases de este proyecto óptimo, que en la siguiente sección será adaptado para ser incluido en el programa diseñado.

Este tratamiento parte de una premisa fundamental: el gas natural es un fluido compresible, cuyas variaciones de viscosidad y sobre todo densidad deben tomarse en cuenta en los cálculos de optimización, pero con la simplificación de suponer al flujo a temperatura constante, o sea isotérmico.

6.2.1 Costos

Una agrupación sencilla de los costos, que luego se utiliza para el desarrollo matemático, es en cuatro grandes grupos:

Grupo	Características
Costo de cañería	Material, revestimiento, válvulas, accesorios e instalación
Costo de energía	Energía consumida para la operación de las instalación de compresión (valor presente)
Costo de plantas compresoras	Incluye otros accesorios (equipos, materiales e instalaciones)
Costo del llenado del ducto	Fluido necesario para llenar inicialmente la cañería (valor presente por recupero al final de

Tabla 4. Agrupación de los costos involucrados en un proyecto de un ducto

Costo de la cañería (C_1)

El costo de la cañería depende del costo del material (o sea el correspondiente a la cañería de acero propiamente dicha, y el revestimiento aislante anticorrosivo y/o térmico, las válvulas de bloqueo de línea, los accesorios varios de cañerías, etc.) y del costo de la instalación.

Este último incluye tópicos tan variados como derechos de paso, ingeniería, topografía, apertura de pistas, desfile de cañerías, la unión de los distintos tramos con soldadura u otro sistema de unión, soportes, el zanjeo en caso de cañería enterrada, pruebas finales, y todos los costos debidos a la mano de obra y equipos inherentes a la instalación. Mediante una investigación de mercado se obtienen los distintos costos en función del diámetro, como se muestra en la siguiente figura.

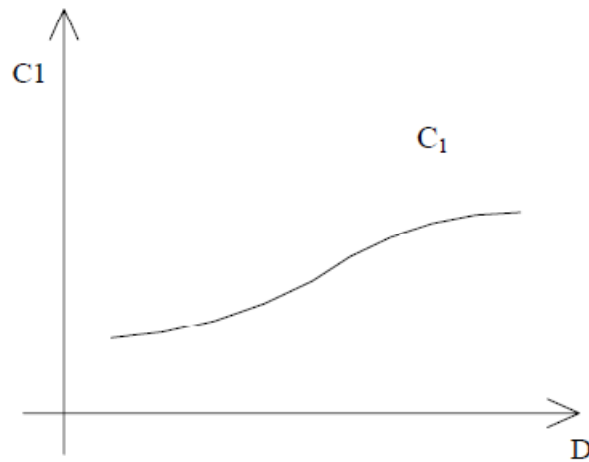


Figura 11. Costo de la cañería en función del diámetro del ducto

Para la obtención de esta función, $C_1 = f(D)$, y a los efectos de una formulación sencilla, resulta útil dividir los costos que intervienen en dos grandes grupos, uno que resulta proporcional al peso de la cañería, C_{11} , y que incluiría operaciones como el transporte de los caños, la descarga, el desfile y la soldadura; y otro proporcional al diámetro exterior de la cañería, C_{12} , comprendiendo ítems como el revestimiento, el zanjeo y la tapada, siendo la expresión resultante:

$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

Este costo forma parte del costo de inversión del ducto.

Costo de la energía consumida en las plantas compresoras (C_2)

Este costo puede considerarse como una función de la potencia necesaria en las plantas de compresión y del tiempo de funcionamiento previsto de la instalación. La siguiente figura muestra una curva aproximada de la variación del costo de la energía consumida en función del diámetro D del gasoducto.

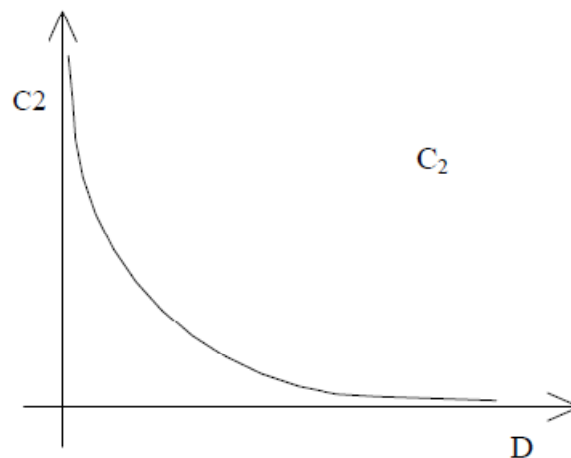


Figura 12. Costo de energía consumida en función del diámetro del ducto

Para su incorporación a la ecuación de costos totales, el precio de la energía consumida durante el funcionamiento debe ser convenientemente actualizado con una tasa de descuento oportuna, por cuanto los pagos se van realizando periódicamente durante la operación del ducto.

Los costos correspondientes al mantenimiento del ducto durante todo el tiempo de funcionamiento de la instalación se deben incluir en este rubro dado que también serán descontados a valor presente.

Costo de las plantas compresoras (C_3)

Este costo puede considerarse como una función de la potencia de compresión incluyendo la necesaria para el funcionamiento del gasoducto y los equipos de reserva (potencia instalada). Se debe incluir en el mismo el costo de las instalaciones periféricas (filtros, válvulas, circuitos de medición y protección, sistema de control, etc.).

Este costo forma parte del costo de inversión del ducto y su relación con el diámetro se observa en la siguiente figura:

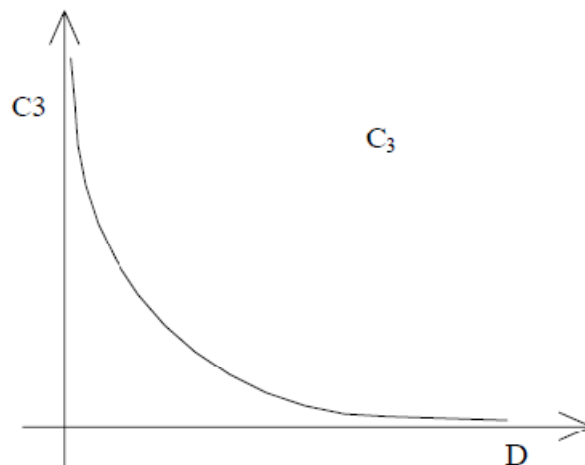


Figura 13. Costo de las plantas compresoras en función del diámetro del ducto

Costo del producto para llenar la cañería (C_4)

Este costo es función del precio del gas natural a transportar (en calidad de ingreso al ducto) para el llenado inicial que posibilite el funcionamiento del conducto, necesario como capital de trabajo, que se incorpora al inicio del proyecto y que en teoría se recuperaría al final de la vida útil fijada para el proyecto. Por este motivo debe considerarse el valor actual del capital inmovilizado.

Es una función directa del volumen de fluido incorporado, o sea del volumen interior de la cañería y la presión media.

Este costo forma parte del costo de inversión del ducto y su relación con el diámetro tiene la misma forma que el costo de cañería (C_1).

Costo total de la instalación (C_T)

Una vez obtenidas las cuatro funciones de costo, se procede a sumarlas para obtener el costo total (C_T):

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 = f(D)$$

El mínimo de C_T se obtiene derivando respecto del diámetro $\frac{\partial C_T}{\partial D} = 0$ y con esto se obtiene el diámetro óptimo.

Los costos del sistema resultan función del diámetro:

- $C_1 = f_1(D)$, costo de la cañería, accesorios, ingeniería, construcción, etc.
- $C_2 = f_2(D)$, costo de la energía consumida de las plantas de compresión (valor presente)
- $C_3 = f_3(D)$, costo de las plantas de compresión
- $C_4 = f_4(D)$, costo del producto para el llenado del ducto (valor presente)
- $C_T = f_T(D) = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$, costo total

La simplificación teórica expuesta para la búsqueda del diámetro óptimo no es posible en forma directa en el esquema de cálculo propuesto porque las funciones de costo C_1 , C_2 , C_3 y C_4 no resultan función de una sola variable a optimizar D , sino que son función de varias variables.

En este caso, la posibilidad real de hallar un óptimo se encuentra directamente ligada al método utilizado. Para optimizar varias variables sujetas a condicionamientos técnicos, se utiliza el método de los multiplicadores de Lagrange (también denominado de “máximos y mínimos condicionados”).

Es importante destacar que en este capítulo sólo se consideran aquellos costos que dependen de alguna de las variables de optimización. Dado que el desarrollo matemático propone la búsqueda de un mínimo a través de derivadas parciales, aquellos costos que no tengan relación con estas variables no influyen en el cálculo del mínimo. En el próximo capítulo se presentará la totalidad de los costos involucrados en la construcción y operación de un ducto.

6.2.2 Desarrollo matemático

Todo gasoducto en general consta de la cañería de línea, una estación compresora de cabecera y estaciones compresoras intermedias, tal como se ha explicado en el segundo capítulo.

Siendo L la longitud de toda la cañería y X la cantidad de estaciones compresoras, entonces la cañería queda dividida en X tramos.

En cada tramo, la cañería tiene una presión máxima P_1 al comienzo y una presión mínima P_2 al final de la cañería debido a la pérdida de presión causada por el flujo. A los efectos de este cálculo, se supone un flujo isotérmico a régimen permanente en toda

su extensión. La ecuación correspondiente a este flujo condicionado isotérmico y simplificada para cañerías largas es la siguiente:

$$C_p^2 = \frac{\pi^2 D_i^5 X}{16 RT f L} (P_1^2 - P_2^2) = \frac{\pi^2 D_i^5 P_1^2 X}{16 RT f L} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right]$$

C_p : caudal de masa [kg / s]

D_i : diámetro interior de la cañería [m]

X : cantidad de plantas compresoras incluida la cabecera

R : constante particular del gas (corregida con el factor Z de compresibilidad) [J / kg K]

T : temperatura equivalente del gas para suponerlo isotérmico [K]

f : factor de fricción obtenido de la fórmula de Colebrook-White o equivalente, en función de la rugosidad de la cañería (prácticamente es independiente de número de Reynolds)

L : longitud total de la cañería [m]

P_1 : presión máxima en el interior de la cañería (en el comienzo) [Pa]

P_2 : presión mínima en el interior de la cañería (en el final) [Pa]

Por lo expuesto, el caudal másico C_p de un determinado gas que puede transportarse por una cañería de longitud L es función del diámetro interior D_i , de la cantidad de plantas compresoras X , de la presión P_1 y de la relación de compresión P_1/P_2 .

Luego, se tiene una sola ecuación con cuatro incógnitas, lo cual admite infinitas soluciones. El problema es seleccionar entre las infinitas soluciones aquella que minimice el costo total, es decir la “solución óptima”. Para este objetivo, se utilizan las funciones de costo de todos los elementos que intervienen en la instalación presentadas anteriormente.

Para simplificar el desarrollo, se define un coeficiente $K_D = \frac{D_i}{D}$, siendo D el diámetro exterior de la cañería.

Costo de la cañería (C_1)

Como fuera expuesto el costo de la cañería está conformado por dos partes, una función del peso del caño y otra función de la superficie exterior:

$$C_1 = C_{11} + C_{12}$$

C_{11} es función del peso de metal, que a los efectos prácticos se puede suponer una función lineal, válida dentro de un determinado intervalo de diámetros.

$$C_{11} = K_{11} \pi D_m e L \gamma_F$$

γ_F : peso específico del material de la cañería [N / m³]

D_m : diámetro medio de la cañería [m]

e : espesor de la cañería [m]

K_{11} : constante de proporcionalidad (valores de mercado) [US\$ / N]

Además, teniendo en cuenta la expresión de la resistencia de los materiales para envolturas cilíndricas delgadas (fórmula normalmente adoptada por la normativa de aplicación ASME B 31.8):

$$\sigma_{ad} = \frac{P_1 D}{2eFET}$$

σ_{ad} : tensión admisible del material [Pa]

F : factor de diseño por presión interna

E : factor longitudinal para juntas

T : factor de reducción de temperatura

La tensión admisible del material, σ_{ad} , también se conoce como el esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS, por sus siglas en inglés) o resistencia mínima a la cedencia prescrita por la especificación bajo la cual el ducto es fabricado.

La tensión admisible σ_{ad} se obtiene a partir de la tensión de fluencia σ_f del material, afectada por un coeficiente de seguridad que se denomina factor de diseño, que toma en consideración regulaciones de seguridad (clases de trazado) y tipo de construcción de la cañería (factor de eficiencia de la soldadura). En efecto, el factor de diseño, F , se relaciona principalmente con la clase de localización. Con el fin de cumplir con la norma ASME B31.8, cada sección del gasoducto se clasificará según la clase de localización y el tipo de construcción del ducto. La clase, la localización y los tipos de construcción del ducto para cada tramo se determinarán durante la fase de diseño detallado del proyecto. La base para clasificar la localización está relacionada con la cantidad de edificios o construcciones que se encuentran dentro de una franja de 400 metros de ancho, medida a partir de la línea central del derecho de vía del gasoducto. El trayecto se seleccionó de tal manera que se evite pasar cerca de aldeas o pueblos. La clasificación de las localizaciones también está sujeta a modificaciones en función del tipo de construcción o instalación de que se trate, por ejemplo una estación de compresión o un cruce (con carretera o con vía férrea). El factor de diseño se determina según las tablas 16 y 17 que se encuentran en el anexo 10.1. El valor de estos factores oscila entre 0,4 y 0,8.

Reemplazando estos valores, resulta:

$$C_{11} = K_{11} \frac{1 + K_D}{2} \frac{\pi D^2 P_1}{2\sigma_{ad} FET} \gamma_F L$$

C_{12} es función de la superficie exterior del caño y, a los efectos de cálculo, se supone una función lineal con la superficie exterior de la cañería, válida para un intervalo determinado de diámetros.

En este costo se incluye el correspondiente al revestimiento anticorrosivo y/o aislante térmico, con un coeficiente K_{12} , y el correspondiente a la mano de obra para el tendido de la cañería, la zanja de alojamiento, arreglos y otros factores inherentes a la instalación, con un coeficiente K_{13} .

$$C_{12} = (K_{12} + K_{13})\pi DL$$

$$C_1 = K_{11} \frac{1 + K_D}{2} \frac{\pi D^2 P_1}{2\sigma} \gamma_F L + (K_{12} + K_{13})\pi DL$$

Costo de la energía utilizada por las plantas compresoras (C_2)

La expresión utilizada para el cálculo de la potencia necesaria en la compresión del gas, admitiendo una compresión isentrópica, afectada por un rendimiento η_c de dicha compresión, es la siguiente:

$$N = C_p \frac{K}{K-1} \frac{RT}{\eta_c} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] X$$

N : potencia requerida [Watts]

K : exponente de la adiabática de compresión

Los compresores están accionados por máquinas motrices, que pueden ser motores alternativos a gas, turbinas de gas o también motores eléctricos, las cuales tienen su propio rendimiento η_m (entendido como relación entre la energía entregada a la máquina por su motor y la energía disponible en el eje de salida).

$$C_2 = K_{02} K_2 \frac{N}{\eta_m} t$$

K_2 : constante de proporcionalidad, correspondiente al costo unitario de la energía [US\$ / Kwh]

t : tiempo de funcionamiento de la instalación [horas]

K_{02} : coeficiente de actualización de costo para el cálculo del valor presente, dado que la energía se paga anualmente durante toda la vida útil del ducto

$$C_2 = \frac{K_{02} K_2 t}{\eta_m \eta_c} \frac{K}{K-1} C_p RT \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] X$$

Costo de las plantas compresoras (C_3)

Este costo resulta una función no lineal de la potencia de las plantas. Para simplificar los cálculos, se asume una función lineal válida dentro de un cierto rango de potencias. La siguiente figura muestra gráficamente tal simplificación:

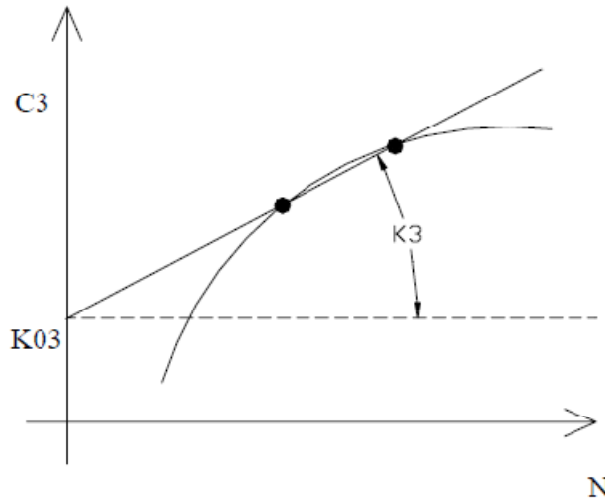


Figura 14. Costo de las plantas compresoras en función de la potencia

$$C_3 = K_{03}X + K_3N$$

K_{03} y K_3 : constantes de proporcionalidad de mercado

$$C_3 = K_{03}X + K_3 \frac{K}{K-1} C_p RT \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] X$$

Costo del gas para llenar la cañería (C_4)

El costo de la masa del gas para el llenado del gasoducto es una función del volumen interior de la cañería (o de su largo y diámetro interior) y además de la presión de transporte. Como dicha presión varía desde P_1 a P_2 , a efectos del cálculo se considera la presión media correspondiente al flujo isotérmico en cañerías largas, y para las relaciones de compresión comúnmente utilizadas (1,3 a 2), dicha función de costo, simplificada, resulta:

$$C_4 = K_{04}K_4K_D^2 \frac{2P_1}{9RT} \pi D^2 L$$

K_4 : coeficiente de costo del gas que refleja el costo del gas en calidad de ingreso a gasoducto (tratado y acondicionado) [US\$ / kg]

K_{04} : coeficiente de actualización del costo del capital inmovilizado durante la vida útil de la línea del gasoducto, y recuperado al momento del abandono

Costo total de la instalación (C_T)

El costo total de la instalación y operación se obtiene de la sumatoria de los costos anteriores:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

Optimización de las variables

Obtenida la función de costo total $C_T = f\left(D; P_1; \frac{P_1}{P_2}; X\right)$, se trata de optimizar las variables diámetro (D), presión máxima de operación (P_1), relación de compresión (P_1/P_2) y cantidad de plantas compresoras intercaladas en la línea (X), todas ellas condicionadas a la ecuación de flujo isotérmico a régimen permanente.

Utilizando el método de los multiplicadores de Lagrange se obtienen los valores óptimos según se muestra a continuación:

Función de costo:

$$C_T = f\left(D; P_1; \frac{P_1}{P_2}; X\right)$$

Ecuación de condición:

$$\varphi = C_p^2 - \frac{\pi^2 D_i^5 P_1^2 X}{16 RTfL} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right] = 0$$

El sistema de Lagrange (con λ , nueva variable, como el multiplicador de Lagrange)

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_T}{\partial D} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial D} &= 0 \\ \frac{\partial C_T}{\partial P_1} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial P_1} &= 0 \\ \frac{\partial C_T}{\partial \left(\frac{P_1}{P_2} \right)} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial \left(\frac{P_1}{P_2} \right)} &= 0 \\ \frac{\partial C_T}{\partial X} + \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial X} &= 0 \end{aligned}$$

Se han obtenido cuatro ecuaciones con el método de Lagrange que, junto con la ecuación de condición, conforman un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas D , P_1 , P_1/P_2 , X y λ .

Resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen las siguientes expresiones:

$$\left(\frac{K_{02} K_2 t}{\eta_m \eta_c} + \frac{K_3}{\eta_c} \right) C_p RT \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 - \frac{3K-1}{K-1} \right] + \frac{K}{K-1} \right\} - K_{03} = 0$$

$$D = \left[\left(\frac{K}{K-1} \left(\frac{K_{02}K_2t}{\eta_m\eta_c} + \frac{K_3}{\eta_c} \right) C_p RT \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] + K_{03} \right) \frac{\left(K_{11} \frac{1+K_D}{8\sigma} \gamma_F + \frac{K_{04}K_4K_D^2}{9RT} \right)^2}{[\pi(K_{12} + K_{13})]^3} \frac{16C_p^2 RT f}{K_D^5 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right]} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$P_1 = \frac{K_{12} + K_{13}}{\left(K_{11} \frac{1+K_D}{8\sigma} \gamma_F + \frac{K_{04}K_4K_D^2}{9RT} \right) D}$$

$$X = \frac{16C_p^2 RT f L}{\pi^2 K_D^5 D^5 P_1^2 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right]}$$

De la primera ecuación se obtiene la relación de compresión.

De la segunda ecuación se obtiene el diámetro exterior.

De la tercera ecuación se obtiene la presión máxima en la cañería.

De la cuarta ecuación se obtiene la cantidad de estaciones compresoras incluida la de cabecera.

Los resultados obedecen a una optimización matemática y la aproximación a valores comerciales o regulatorios plantea a posteriori una nueva optimización en términos de variables de uso común o estandarizado (diámetros externos de cañería por ejemplo), variables discretas (cantidad de plantas compresoras), o dependientes de regulaciones vigentes (presiones máximas de operación), normalmente lograda mediante una serie de cálculos detallados del gasoducto que se está proyectando.

Si por razones de normas de seguridad o por limitaciones tecnológicas no puede alcanzarse la presión máxima óptima, se adoptará la mayor posible. Si difiere mucho del valor óptimo, se debe realizar una nueva optimización fijando el valor de la presión máxima y determinar el valor de los restantes parámetros.

En caso de no poder cumplir con la relación de compresión óptima por razones prácticas, se fija el valor posible de esta variable y se optimizan las restantes.

7 HERRAMIENTA

7.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

En el segundo capítulo se desarrolló el proceso actual de determinación del recorrido de un ducto y se hizo referencia al problema que tienen las constructoras para encontrar una herramienta que integre todas las variables y condiciones (físicas, legales, económicas, etc.) que deben contemplarse en el análisis de dichos tendidos. En este capítulo se utilizará a la simulación basada en ABM como una herramienta para desarrollar un modelo que permita determinar el recorrido de un gasoducto en un escenario determinado, minimizando el costo total del ducto (que incluye no sólo la inversión inicial sino los costos correspondientes a la operación del ducto descontados al momento de la inversión), teniendo en cuenta las restricciones naturales y artificiales del terreno y el marco normativo de la región en la que se está llevando adelante el proyecto. El modelo, cuya lógica está basada en el algoritmo ACO presentado en el cuarto capítulo, resuelve un problema de optimización combinatoria como es la determinación de un camino crítico en tres dimensiones, dado que el terreno en el que se realizará el tendido presenta elevaciones y depresiones. La herramienta será construida en base a un proyecto de un gasoducto real con el objeto de contar con información real y de contrastar los resultados del modelo con el proyecto.

El objetivo del proyecto se establece de la siguiente manera:

Determinar el recorrido de un ducto de manera tal de minimizar los costos de construcción y de operación satisfaciendo requerimientos técnicos, legales, medioambientales y comerciales.

Los costos de construcción dependen del material utilizado, de la longitud y espesor del gasoducto, preparación del terreno, estudios técnicos y ambientales que deban realizarse, de la mano de obra involucrada, y de las válvulas, bombas y otros dispositivos a colocar, entre otros factores. El costo de operación depende principalmente del costo de la energía que consuman las estaciones compresoras (que a su vez depende del tipo de fluido a transportar, de las características del ducto y de las características de las estaciones compresoras, entre los principales factores), de los costos de mantenimiento del ducto y todos los costos relacionados con la operatoria del mismo. Los costos de operación son descontados a la fecha de construcción del ducto y así sumados a la inversión inicial.

La variable a optimizar será denominada costo total del ducto (C_T), que incluye los conceptos mencionados anteriormente. Se creará un indicador que refleje la inversión necesaria para construir el ducto (C_I) y un indicador que refleje el costo de operación del ducto (C_O). Mientras que la inversión necesaria para construir el ducto es un costo de única vez (asumiendo que está concentrado en el año cero del proyecto), el costo de operación existirá a lo largo de toda la vida útil del ducto por lo que se tomará el valor presente del flujo de costos de toda la vida útil del ducto descontados a una tasa

apropiada de uso frecuente en la industria. Por lo tanto, la función objetivo o ecuación a minimizar es la siguiente:

$$C_T = C_I + \sum_{n=1}^x \frac{C_O^n}{(1+t)^n}$$

donde x corresponde a la vida útil del ducto, t es la tasa de descuento del flujo de costos y C_O^n el costo de operación del ducto en el año n .

La siguiente imagen ejemplifica el concepto explicado anteriormente:

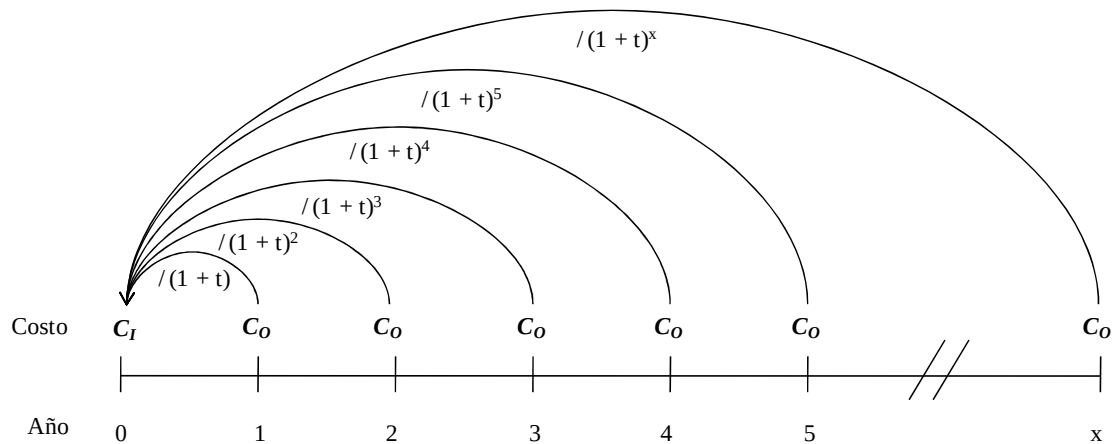


Figura 15. Cálculo del valor presente del flujo de costos del proyecto de ductos

7.2 MODELO CONCEPTUAL

En esta sección se describirá brevemente la lógica utilizada para la creación del modelo, que será explicada con mayor grado de detalle en la etapa del modelo operacional (programación del modelo).

7.2.1 Definiciones

Las siguientes son las definiciones más importantes que serán utilizadas en el modelo:

Terreno

- Los puntos de inicio y de llegada del ducto se denominan *punto de origen* (P_O) y *punto de destino* (P_D), respectivamente.
- El terreno presenta accidentes geográficos naturales (ríos, fallas geográficas, cuerpos de agua, etc.) y artificiales (áreas naturales protegidas, acueductos, represas, puentes, etc.) los cuales estarán identificados en el terreno. Debido a la presencia de estos accidentes, algunas direcciones de movimiento estarán restringidas.
- El terreno contiene una variable que altera la distribución de probabilidades que determinan las decisiones de movimiento de las hormigas que transcurran por él, representando lo que es la feromona en las colonias de hormigas reales. Este

indicador de feromona (I_F) tendrá la particularidad de poder ser modificado por las hormigas en función de las soluciones que encuentren al problema.

Agentes

- Un *agente hormiga* (AH) es una entidad del modelo. La función del AH es recorrer el terreno, partiendo desde el P_O y llegando al P_D . Todos los AH lo hacen. Se comportan en forma individual siguiendo un conjunto de reglas que representan la factibilidad técnico – legal – ambiental de la construcción de un ducto y tomando del ambiente información procesada por la experiencia previa de otros AH.
- El comportamiento de cada AH se modela en términos probabilísticos: cada AH tiene un comportamiento estocástico que depende de su percepción local de la vecindad. Al comienzo de la simulación, las elecciones de la dirección de movimiento se realizará con la misma distribución de probabilidad en todos los puntos del terreno (excepto cuando exista algún tipo de restricción que bloquee alguna dirección). A medida que los AH encuentren soluciones al problema, alterarán las probabilidades de elección de movimiento para los distintos puntos del terreno a través de la modificación del I_F . Todo AH tiene la capacidad de leer e interpretar el terreno sobre el cual se mueve y de modificar el I_F .
- La posición de un AH en un punto del terreno se describe mediante dos coordenadas (x e y). La tercera dimensión estará representada por la elevación del terreno en cada punto.
- Existen dos tipos de AH: los trabajadores (AH_T) y los exploradores (AH_E). Ambos agentes tienen la capacidad de modificar el I_F del terreno. La diferencia radica en que el movimiento de los primeros está condicionado por el I_F , mientras que el de los segundos no. Es decir, para estos últimos las elecciones de la dirección de movimiento se realizarán con la misma distribución de probabilidad a lo largo de toda la simulación. La función de los AH_E será explicada más adelante.

7.2.2 Descripción de la lógica del modelo

La descripción de la lógica del modelo se resume en el siguiente diagrama de flujo:

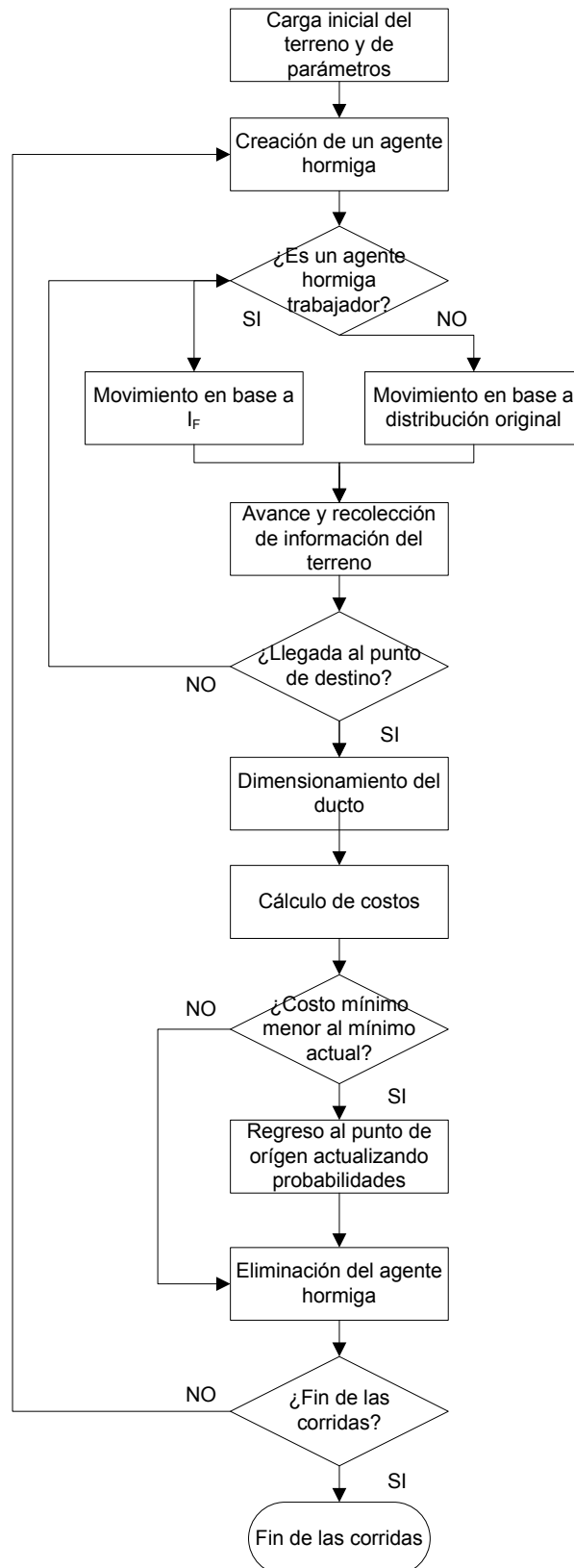


Figura 16. Diagrama de flujo de la lógica del modelo

Un primer aspecto que debería llamar la atención en el diagrama de flujo es que el mismo es un diagrama cerrado (con retroalimentación), es decir que, la llegada de un AH tiene influencia en los nuevos AH que se vayan creando. Como se explicó anteriormente, este flujo cerrado se debe a la modificación de la distribución de probabilidades de los puntos del terreno en función de los recorridos realizados por los AH.

7.2.2.1 Carga inicial del terreno y de parámetros

El primer paso consiste en cargar en el modelo el escenario geográfico con todos sus accidentes naturales y artificiales. Junto con este proceso, se establecerán los límites dentro de los cuales los AH pueden moverse.

Además, se cargarán todos aquellos parámetros y variables necesarias para el funcionamiento del modelo:

- Costos unitarios de inversión y operación, generales o asociados al terreno.
- Información del fluido.
- Parámetros para resolver las ecuaciones de optimización.
- Variables asociadas al terreno (costos que dependen de las características del terreno, indicador de feromona, etc.) y variables globales (contadores de AH, variables para registrar costos, etc.).

Esta carga inicial es la que permite, al ingresar un conjunto de datos iniciales distintos, estudiar otros proyectos.

7.2.2.2 Creación y movimiento del agente hormiga

El ciclo se inicia en el P_O con la creación de un AH que recorrerá, en forma totalmente aleatoria, uno de los caminos que unen a dicho punto con el P_D . En una analogía con la realidad, el P_O podría asociarse con el nido de las hormigas y el punto de destino con la fuente de alimentación; las hormigas parten desde el nido en busca de la fuente de alimentación. Partiendo del P_O , el AH deberá avanzar por el terreno recolectando información del mismo. Cada movimiento del AH finalizará cuando avance una unidad de distancia en alguna dirección posible de movimiento. En cada punto del terreno la elección de movimiento estará gobernada por una distribución de probabilidades. Al inicio de la simulación, una determinada distribución de probabilidades será asignada a todos los puntos del terreno según las condiciones del problema, teniendo en cuenta las direcciones prohibidas por la presencia de algún accidente geográfico, obstáculo, límite del terreno o por algún tipo de restricción. Una vez concluido un movimiento, el AH evalúa la distribución de probabilidades de la nueva ubicación y efectúa el siguiente movimiento. Esta secuencia finaliza cuando el AH arribe al P_D .

Los AH_E son entidades que se comportan de igual forma que los AH_T con la salvedad de que la distribución de probabilidad que gobierna la elección de su movimiento

permanecerá inalterable, es decir con la configuración inicial, durante toda la simulación, sin importar los resultados de los AH que hayan pasado por dichos puntos con anterioridad. Los AH_E serán creados cada una determinada cantidad de AH_T .

El objetivo de los AH_E es reducir el sesgo que se puede llegar a generar por la elección de un determinado camino en una primera instancia, sin ser éste el camino óptimo. Para ello, en el transcurso de la simulación, se creará un AH_E cada un número determinado de AH_T .

Para evitar que se genere un sesgo al comienzo de la simulación, el modelo tendrá un período de calentamiento inicial (warm-up) en el que se creará un número determinado de AH_E que realizarán varios recorridos del terreno. De esta forma, cuando el primer AH_T realice su recorrido, el escenario presentará un costo mínimo umbral para iniciar el proceso de búsqueda del camino óptimo.

7.2.2.3 Dimensionamiento del ducto

Al llegar al P_D , el AH habrá atravesado varios puntos del terreno. Debido al carácter aleatorio del movimiento, el AH pudo haber pasado más de una vez por un mismo punto en su recorrido. Es por eso que para encontrar el camino *directo* entre el P_O y el P_D es necesario eliminar todos los rulos generados en el trayecto mediante un mecanismo adecuado. Una vez eliminados los rulos, el camino directo encontrado por el AH representará la trayectoria que deberá seguir el ducto según ese AH. Se denomina T_n en forma genérica a la trayectoria encontrada por el agente hormiga n.

El siguiente paso consiste en dimensionar al ducto que deberá seguir la trayectoria T_n . Se deberá determinar el diámetro, presión máxima del fluido, relación de compresión y cantidad de estaciones compresoras, que son las variables que permiten calcular el costo total del ducto. De estos resultados, se determinan luego la cantidad de válvulas, espesor, cantidad de plantas de acopio, etc. Para la colocación de los dispositivos adicionales es necesario contar con reglas de decisión que dependerán de la normativa vigente. Este dimensionamiento se realizará de forma tal de optimizar el costo del ducto, de acuerdo al desarrollo matemático expuesto en el capítulo 6.

7.2.2.4 Cálculo del costo total

Una vez que las dimensiones del ducto propuesto por el AH están definidas, se procede a la determinación del costo total del ducto, el cual estará compuesto por el costo de inversión y el costo de operación (descontado a una tasa apropiada para determinar el valor presente).

A continuación se presentan los conceptos que incluye cada grupo de costos:

- Costos de inversión
 - Costo de material
 - Costo de transporte del material

- o Costo de estación compresora
 - o Costo de construcción
 - o Costo de control de erosión
 - o Costo de planta de acopio
 - o Costo de gas natural para llenado del ducto
 - o Costo de las válvulas
- Costos unitarios de operación
 - o Costo de energía eléctrica
 - o Costo de mantenimiento e inspección interna
 - o Costo de seguro

7.2.2.5 Actualización de la distribución de probabilidades

Como ya se ha mencionado, la distribución de probabilidades que gobierna la elección de movimiento de los AH de pasar de un punto del terreno a otro está inicialmente establecida. Sin embargo, esta distribución se verá modificada a medida que se registre el costo total de cada AH que llegue al P_D . El costo total es la variable a optimizar, por lo tanto esta variable se utilizará para determinar si las probabilidades de elección de movimiento del camino elegido por el AH serán actualizadas o no y en qué medida se deberá realizar esto. La actualización de las distribuciones de probabilidad se realizará en función del costo total registrado por el AH, del costo mínimo registrado hasta el momento en que el AH llegó al P_D y del número de AH que han recorrido el terreno sin superar el último costo mínimo registrado. Este mecanismo será desarrollado en el modelo operacional. Aquellos AH que registren un costo menor que el costo mínimo registrado hasta el momento de su llegada a P_D regresarán al P_O . En su recorrido de regreso, el AH modificará la distribución de probabilidades de cada punto del terreno para dejar un rastro de la calidad de la solución encontrada. Como convención, todos los puntos de T_n verán alterada su distribución de probabilidad en la misma proporción.

La modificación de la distribución de probabilidades intenta imitar el comportamiento de las hormigas en la naturaleza cuando dejan rastros de feromona en el camino para orientar a sus compañeras. El mecanismo de actualización de la distribución de probabilidades refuerza con mayor intensidad los caminos que registren un costo total bajo, con lo que otros AH tenderán a seguirlo. Esto, como ya se ha explicado, es la retroalimentación positiva del sistema, dado que a medida que más hormigas lleguen al P_D a través de ese camino, más se incrementará la probabilidad de que otras lo sigan, dejando rastros de feromona que lo refuercen aún más.

Si el AH debe actualizar las probabilidades del camino recorrido, entonces regresa al P_O y luego es eliminado. Si el AH no debe actualizar las probabilidades del camino

recorrido dado que encontró una solución que no es la óptima, entonces es eliminado en el P_D .

7.2.2.6 Criterio de finalización

Se estableció un criterio de convergencia para que el modelo dejara de generar AH. La idea es terminar la corrida cuando un número determinado de AH registre un costo total que se encuentre dentro de un rango razonable alrededor del valor mínimo encontrado. Es decir, para cada AH que llega al punto de destino, se evalúan los costos totales registrados por los últimos n AH y, si se cumple un criterio determinado, entonces se termina la simulación.

7.2.2.7 Criterio de finalización

La evaporación de la feromona no será considerada en el modelo dado que lo que se propone es modificar las probabilidades de elección de la dirección de movimiento por lo que al incrementar la probabilidad de alguna de las direcciones, automáticamente se está disminuyendo la probabilidad de otra de las direcciones.

7.2.3 Supuestos y simplificaciones

Para reflejar determinadas situaciones del problema a resolver en el modelo, se realizaron algunos supuestos y simplificaciones. A los supuestos mencionados en el capítulo 6, que están directamente relacionados con las características del fluido y con las condiciones de transporte, se agregan algunos supuestos relacionados con el criterio constructivo del gasoducto:

- El diámetro del gasoducto se supondrá constante a lo largo de todo el recorrido. Esto facilita el cálculo del diámetro ya que se pueden aplicar directamente las ecuaciones de optimización presentadas en el capítulo 6. En la actualidad también se realiza esta simplificación en la etapa preliminar de determinación de la traza. Posteriormente, una vez seleccionada la ruta, la sección puede variar a lo largo del recorrido de acuerdo a los estudios realizados en la etapa de ingeniería de detalle.
- Se supone que el gasoducto estará enterrado un metro por debajo del nivel del suelo en todo su recorrido. Este supuesto también se encuentra en la realidad en la mayoría de los casos, salvo pocas excepciones. En algunas ocasiones los ductos son construidos por encima del nivel del suelo (en este caso, el ducto requiere de unos soportes especiales para sostenerse). Una de las excepciones, que será contemplada en el modelo, se da cuando el ducto deba atravesar determinados accidentes, como por ejemplo cuando atraviesa por debajo un lago o un río, que suele enterrarse a una distancia mayor por la futura erosión que puede tener el lecho.
- En la búsqueda del camino de menor costo no se tienen en cuenta los recursos disponibles ni los plazos de construcción. La incorporación de limitaciones de

recursos (por ejemplo, dividir al proyecto en etapas, considerar la disponibilidad de mano de obra y de materiales, presupuesto inicial y de operación, etc.) y de restricciones de plazos (por ejemplo, el plazo de entrega de materiales) podrían alterar la ruta seleccionada. Este aspecto tampoco es tenido en cuenta en la realidad en el análisis preliminar. Tampoco hay limitaciones de presupuesto.

- El modelo no evita la necesidad de ir a recorrer el terreno para realizar el trabajo de campo necesario con el objetivo de adquirir un conocimiento más detallado del mismo. El objetivo del modelo es buscar la ruta óptima (como ya ha sido definida) del ducto.
- Hay determinadas condiciones que son difíciles de cuantificar: por ejemplo el impacto medioambiental del ducto. Si bien se evita el cruce por parques nacionales y áreas restringidas, ingresar en ciudades y se utilizan factores de seguridad dependiendo de la zona, el impacto medioambiental deberá ser cuidadosamente analizado para la ruta óptima elegida. Obviamente que esto dependerá de la legislación de cada región, siendo más estricta en determinadas zonas geográficas que en otras. El estudio de impacto ambiental podría generar modificaciones en la ruta óptima.
- Otra cuestión difícil de cuantificar son los derechos de paso, esto es, las compensaciones que se deben realizar a los propietarios de las tierras por las que pasa el ducto. Por lo general, los derechos de paso por la tierra suelen tener alguna influencia en el camino elegido. Sin embargo, no serán considerados en el modelo por no contarse con dicha información.
- Otros supuestos que serán desarrollados más adelante cuando se explique el funcionamiento del modelo son los siguientes:
 - Costos de operación anual constante durante la vida útil del ducto.
 - Recorte del terreno sobre el que pueden moverse los AH.
 - Restricciones al direccionamiento de AH.

7.2.4 Límites del modelo

En esta sección se establecen los límites del modelo, es decir, qué etapas del proyecto general de construcción de un gasoducto serán contempladas por el modelo y qué etapas no. Además, para aquellas etapas que sí estarán contempladas, es necesario establecer qué aspectos quedarán por fuera del modelo, ya sea por la complejidad de la modelización o porque ese aspecto no es cuantificable y medible como para ser incorporado en el modelo.

- Como ya se ha mencionado, el modelo parte de la premisa de que la necesidad de construir un gasoducto ya fue determinada y que los puntos inicial y final del mismo son conocidos. Es decir, el modelo no realiza ningún estudio de mercado ni análisis de la demanda de gas en la región.

- El modelo no ingresa en la etapa de ingeniería de detalle, que es posterior a la etapa de determinación de la traza. Si bien en el modelo se realiza un dimensionamiento de las principales variables tanto hidráulicas como constructivas del ducto, una vez determinada la ruta óptima y verificada la misma en el campo, se debería pasar a la etapa de ingeniería de detalle en la que se analiza al ducto por tramos, profundizando el análisis hidráulico, considerando aspectos tales como intercambio de calor, variaciones de temperatura, condiciones relacionadas con la ingeniería constructiva, entre otros.
- Teniendo en cuenta los dos aspectos anteriores, queda por destacar que el modelo se centra en la determinación del recorrido del gasoducto, asumiendo que la necesidad de realizar el proyecto existe y que se conoce el terreno, hasta determinar una ruta óptima preliminar que se puede utilizar para tomar la decisión de si un proyecto es factible o no de realizarse dado que se conocen la ruta más económica posible y se determinan todos los costos involucrados.

7.2.5 Agentes y decisiones

Los agentes participantes en un proyecto de estas características serían las contrapartes de las empresas involucradas en el proceso de construcción del ducto:

- Líder del proyecto por parte de la empresa que requiere el ducto.
- Líder de proyecto por parte de la empresa constructora.

El líder del proyecto por parte de la empresa que requiere el ducto es aquel que acerca la necesidad a la empresa constructora con el relevamiento de los requerimientos comerciales, es decir, punto inicial y punto final del ducto, caudal y presión requerida.

El líder de proyecto de la empresa constructora es quien coordinará el equipo que utilizará la herramienta en las etapas de parametrización de la misma al proyecto solicitado, recolección de datos, calibración del modelo, realización y análisis de corridas, análisis de sensibilidad y preparación de documento y propuesta final.

De más está decir que la interacción entre ambas partes es continua y los equipos de trabajo de ambas contrapartes necesitan de la otra parte.

En base al análisis realizado, la decisión a tomar será la de construir el ducto por la ruta óptima obtenida y las especificaciones del mismo.

7.2.6 Variables

Las variables del modelo a representar son:

Variables asociadas a la cantidad de AH

- Cantidad de AH: número total de AH que recorren el terreno.
- Cantidad de AH_E en etapa de calentamiento: número total de AH_E que recorrerán el terreno en la etapa de calentamiento.
- Cantidad de AH_T : cantidad de AH_T .

- Cantidad de AH_E : cantidad de AH_E .
- Cantidad de AH desde el último costo mínimo registrado.

Variables asociadas a cada punto del terreno

- Cantidad de feromona depositada en cada punto del terreno, indicador que se utiliza para la toma de decisiones de dirección de movimiento en cada punto del terreno.

Variables asociadas al fluido y dimensionamiento del ducto

- Camino óptimo: camino de menor costo total registrado.
- Longitud.
- Diámetro exterior.
- Diámetro interior.
- Espesor.
- Volumen interior.
- Superficie exterior.
- Presión máxima del fluido.
- Presión mínima del fluido.
- Relación de compresión.
- Cantidad de estaciones compresoras.
- Cantidad de válvulas.
- Cantidad de plantas de acopio.

Variables asociadas al costo

- Costo total de cada AH.
- Mejor costo: mínimo costo total registrado.

7.2.7 Variables de control

Las variables de control son aquellas sobre las que se puede actuar para cambiar el resultado de los indicadores.

En la lógica del algoritmo, las variables de control principales son:

- Parámetro de actualización de probabilidades.
- Distribución de probabilidades de cada punto del terreno.
- Cantidad de AH.
- Cantidad de AH para el período de precalentamiento.

Para el usuario de la herramienta, las variables de control principales son:

- Variación de costos de inversión.
- Variación de costos de operación.

7.3 MODELO DE DATOS

Los datos del proyecto sobre el cual se basa la herramienta fueron provistos por la empresa Ingeniería y Construcción del grupo Techint, por lo que son todos datos que están en concordancia con una situación del mundo real. Muchos de los datos que alimentan a los parámetros de las ecuaciones de optimización fueron provistos por los profesores Cavallo y Frabotta.

7.3.1 Requerimientos comerciales

El proyecto consiste en transportar 700,8 MMCFD¹⁰ de gas natural desde el P_O (Estación Tamazunchale, ubicada aproximadamente a los 21° 14' N y 98° 48' O) hasta el P_D (Estación Santa Ana, ubicada aproximadamente a los 19° 58' N y 99° 21' O) a una presión de llegada de alrededor de 4 MPa.

7.3.2 Información del terreno

Para obtener información sobre el escenario geográfico en el que se realizará el tendido del gasoducto, se consultaron las siguientes fuentes de información:

- La empresa Ingeniería y Construcciones del grupo Techint, responsables del proyecto.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México.
- Internet.

La información recolectada es la siguiente:

- Ubicación geográfica.
- Características naturales de la región: relieve, suelo, clima, vegetación, accidentes geográficos (ríos, lagunas, fallas geográficas).
- Ubicación de localidades urbanas y rurales, zonas declaradas como parques naturales, puentes, minas, represas.
- Coordenadas del punto de origen y de destino.

Toda la información es cargada a nivel celda en una matriz de 495 x 1051, como será explicado más adelante.

El proyecto consiste en el tendido de un gasoducto que une las ciudades de Tamazunchale (Estado San Luis Potosí) y Santa Ana (Estado de Hidalgo), localizadas en el territorio mexicano.

Prácticamente la totalidad del gasoducto estará dentro del estado de Hidalgo. Hidalgo, que posee una superficie de 20.987 km² y cuenta con una población de 2.409.162

¹⁰ Millones de pies cúbicos por día.

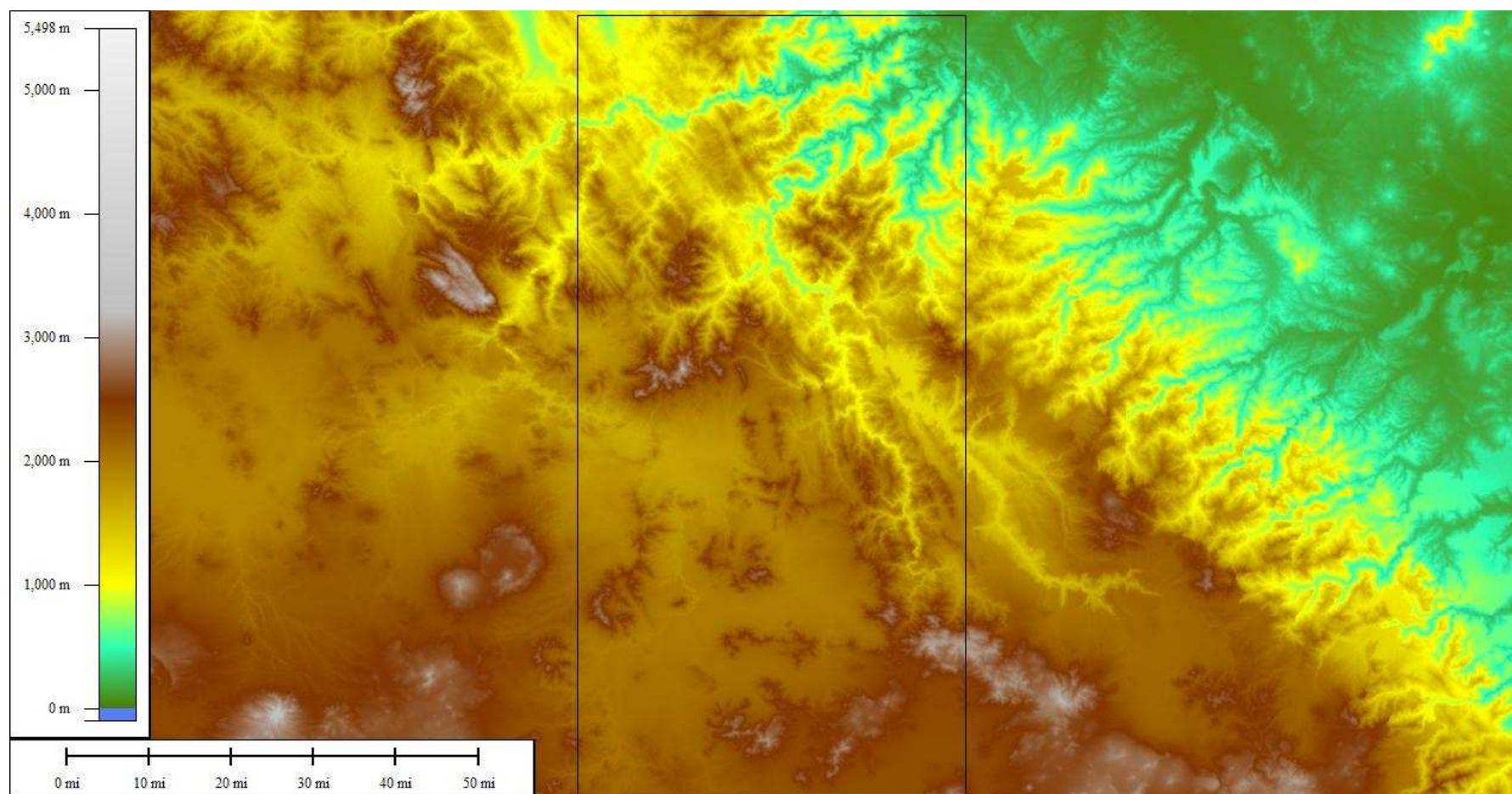
habitantes, está situado en la parte central de México, al oeste de la sierra Madre oriental, al noroeste del sector meridional de la altiplanicie Mexicana y al sur de la Costera nororiental. Encuadrado en la región Centro, limita por el norte con San Luis Potosí (estado desde donde partirá el gasoducto), por el este con Veracruz y Puebla, por el sureste con Tlaxcala, por el sur con el estado de México y por el oeste con Querétaro. Su ubicación geográfica se puede observar en la siguiente imagen:



Fuente: Wikipedia.

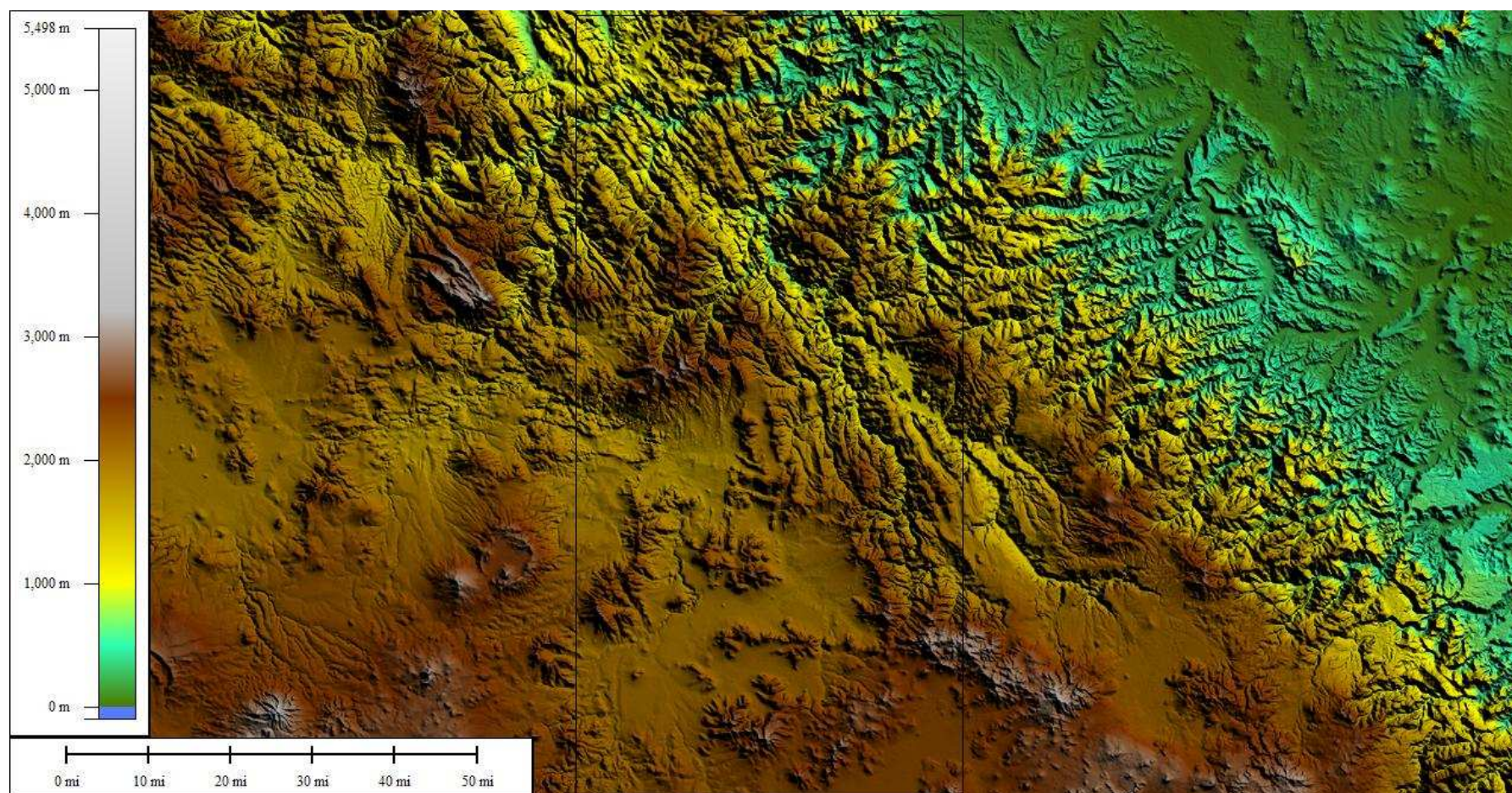
Figura 17. Estado de Hidalgo (México)

Tal como puede apreciarse en las siguientes imágenes, el territorio es eminentemente montañoso en el sur y centro, y presenta una altitud media superior a 2.000 metros sobre el nivel del mar al estar situado en la meseta de Anáhuac. En las imágenes siguientes imágenes el rectángulo delimitado en el centro de la imagen corresponde a la región en la cual estará el gasoducto.



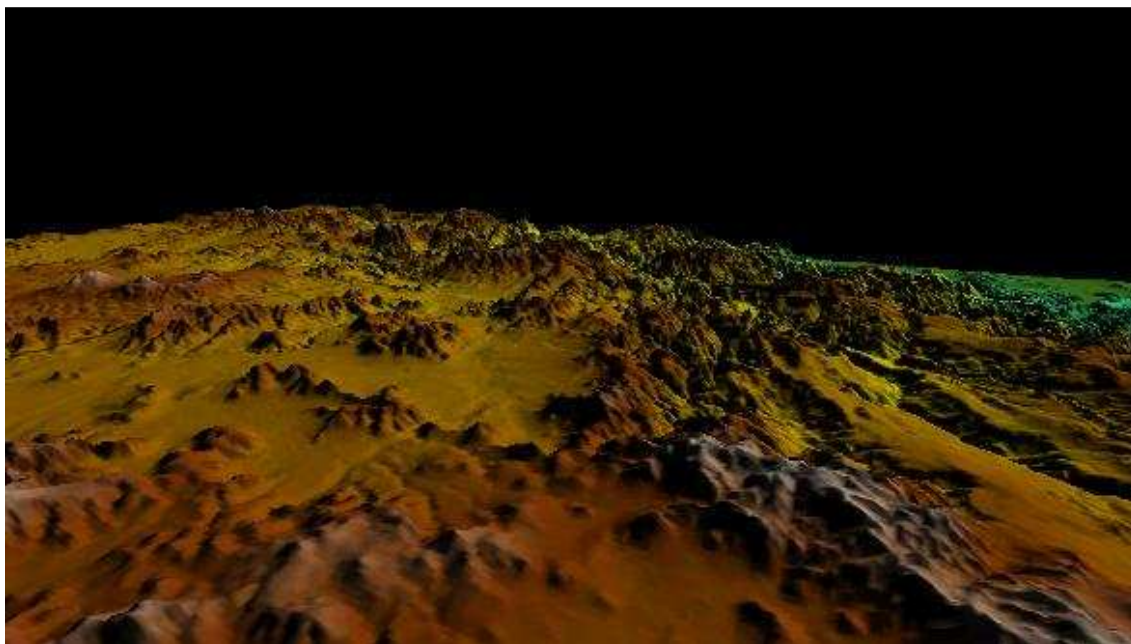
Fuente: Global Mapper.

Figura 18. Vista del relieve de la región (a)



Fuente: Global Mapper.

Figura 19. Vista del relieve de la región (b)



Fuente: Global Mapper.

Figura 20. Vista 3D del relieve de la región

Otras características relevantes de la región:

- Entre las principales corrientes fluviales, que descienden hacia las zonas llanas del norte, destacan los ríos Tula, Amajac y Metztitlán y otros afluentes del Pánuco. Sus principales lagunas son las de Metztitlán, Zupitlán, San Antonio, Pueblilla y Carrillos.
- El tipo de clima que predomina en la mayor parte de la entidad es seco: templado en la llanura, semicálido en la parte central y suroeste, y frío en la montaña.
- Se han decretado en el estado cuatro áreas naturales protegidas con categoría de Parque nacional, que cubren una extensión aproximada de 26.000 hectáreas: El Chico, Los Mármoles, Tula y parte de La Malinche.
- El estado cuenta con importantes zonas arqueológicas que atraen al turista, entre las que destaca Tula.
- El estado se encuentra bien comunicado y está atravesado por la carretera México-Nuevo Laredo, que atraviesa la entidad de sur a norte, une Pachuca, Actopan, Ixmiquilpan, Zimapan y Jacala, y continúa hasta Tamazunchale, ya en el estado de San Luis Potosí; de ella parten diversas carreteras que conectan con la autopista México-Querétaro y la que comunica con Pachuca, Ciudad Serdán y Apan. Se han trazado 865 km. de vías férreas y 3.117 km. de carreteras pavimentadas.
- El estado dispone de un aeropuerto principal en Pachuca y nueve secundarios.

En la siguiente imagen se observa una vista satelital del Estado de Hidalgo y un fragmento del Estado San Luis Potosí, en donde se ubican el P_O (bandera roja) y el P_D (bandera amarilla) del gasoducto:



Fuente: Google Earth.

Figura 21. Vista satelital del Estado de Hidalgo

7.3.3 Parámetros

Varios de los parámetros alimentan las ecuaciones presentadas en el capítulo 6 para el dimensionamiento óptimo del gasoducto.

Información del fluido

- Producto a transportar: gas natural.
- Características físicas del producto
 - o Composición del gas natural

Componente	Símbolo	Mol %	Peso molecular [g/mol]
Nitrógeno	N	0,87%	28,01
Metano	C1	92,67%	16,04
Etano	C2	2,99%	30,07
Propano	C3	1,98%	44,10
Isobutano	iC4	0,53%	58,12
n-Butano	nC4	0,58%	58,12
Isopentano	iC4	0,18%	72,15
n-Hexano	nC6	0,20%	86,18
Total		100,00%	17,83

Tabla 5. Composición del gas natural a transportar

- o Densidad del gas natural = $0,744 \text{ kg} / \text{m}^3$
- o Factor de compresibilidad para constante universal de los gases ideales = 0,8
- Caudal a transportar = $700,8 \text{ MMCFD} = 229,7 \text{ m}^3 / \text{s}$

Costos unitarios

- Costos unitarios de inversión
 - o Costo de material (acero API 5L Grado X70) = $3.000 \text{ US\$} / \text{ton}$
 - o Costo de transporte del material = $0,00015 \text{ US\$} / \text{km} \cdot \text{ton}$
 - o Costo de estación compresora = $1.172 \text{ US\$} / \text{kwh}$ (parte variable) y $13,6 \text{ US\$ millones}$ (parte fija)
 - o Costo de construcción, que depende de las características del terreno (expresados en $\text{US\$} / \text{m}^2$, costo unitario por metro de diámetro y metro de longitud):
 - $20 \text{ US\$} / \text{m}^2$ para zonas relativamente planas con buenos accesos y suelo blando.
 - $40 \text{ US\$} / \text{m}^2$ para zonas montañosa con accesos limitados y terreno con vegetación baja o inexistente.
 - $60 \text{ US\$} / \text{m}^2$ para selva cerrada con muy malos accesos o accesos inexistentes, con lluvias tropicales y en zona montañosa.
 - o Costo de control de erosión = $3 \text{ US\$ millones}$
 - o Costo de planta de acopio = $100.000 \text{ US\$}$ (incluye preparación del suelo y las bermas de apoyo, cercado, alguna construcción menor y una grúa dedicada)
 - o Costo de gas natural para llenado del ducto = $0,024 \text{ US\$} / \text{m}^3$
 - o Costo unitario de válvula:

Diámetro del ducto (pulgadas)	Costo de una válvula (US\$)
24	118.000
30	210.000
36	290.000

Tabla 6. Costo de válvula según el diámetro del ducto

- Costos unitarios de operación
 - o Costo de energía eléctrica = 0,006 US\$ / kwh
 - o Costo unitario de mantenimiento = 240 US\$ / km

Otros parámetros

- Distancia entre puerto y P_O = 360 km (por ruta)
- Constante universal de los gases ideales = 8,314472 J / mol . K
- Temperatura promedio del suelo = 287 K (14 C).
- Exponente de la adiabática de compresión = 1,3
- Rendimiento de la estación compresora = 62 %
- Rendimiento del motor de la estación compresora = 33%
- Tiempo de funcionamiento de la instalación = 8760 horas / año
- Vida útil del ducto = 25 años
- Tasa de descuento = 11,5%
- K_D = 0,98 (relación entre diámetro interior y diámetro exterior)
- Tensión admisible del material = 413 MPa
- Factor de diseño: se realizará un promedio ponderado de los valores de la tabla 16 que se encuentra en el anexo 10.1., según la clase de localización atravesada por el ducto.
- Factor de junta longitudinal: 1
- Factor de diseño por temperatura: 1
- Densidad del material (acero API 5L Grado X70): 7.700 kg / m³
- Factor de fricción (según Diagrama de Moodys): 0,01
- Elevación de cada punto del terreno.
- Variables binarias que representen la presencia de los obstáculos en cada punto del terreno.

7.4 MODELO OPERACIONAL

7.4.1 Selección de programa de simulación

La selección del programa de simulación es una etapa muy importante de la modelización dado que una correcta elección facilita la posterior codificación del programa y desarrollo del modelo. Varios son los factores a tener en cuenta en el momento de realizar la selección:

- Tratamiento de los datos de input
 - o Facilidad de aceptar distribuciones o condiciones en los datos de entrada.
 - o Capacidad de análisis de datos de input.
 - o Vinculación y tratamiento de datos con otros productos (base de datos, planillas de cálculo, etc.).
 - o Importación de datos gráficos de CAD o similares.
- Codificación y Procesamiento
 - o Admitir lenguajes o códigos estándar de programación (VB, “C”, scripting).
 - o Portabilidad (posibilidad de que pueda correrse en diferentes plataformas).
 - o Facilidad de uso y aprendizaje.
 - o Acceso a documentación. Soporte técnico.
 - o Herramientas de depuración interactivas, ayuda en línea, en la web.
 - o Herramientas gráficas de operación.
 - o Escalabilidad (que pueda correr a medida que el modelo crece). Tamaños máximos admisibles.
 - o Herramientas flexibles para modelizar. Biblioteca de patrones genéricos.
 - o Capacidad para incorporar expresiones matemáticas y/o lógicas.
 - o Ayuda de análisis estadístico para corridas independientes.
 - o Alta velocidad de ejecución.
 - o Cómodo manejo de variables globales del sistema y particulares de entidades y procesos.
 - o Programar corridas y escenarios.
 - o Verificación de compatibilidad de unidades de medida.
- Análisis de datos de salida.
 - o Amplio conjunto de reportes estándar customizables.

- o Exportación a archivos de otros formatos.
 - o Análisis estadístico.
 - o Salidas gráficas.
 - o Animaciones.
 - o Posibilidad 3D.
- Fabricante del software
 - o Trayectoria.
 - o Soporte.
 - o Actualizaciones.
 - o Servicios.
- Costo del licenciamiento
 - o Provisión del software, soporte, actualización.

En los últimos años, la comunidad de modelización basada en agentes ha desarrollado varias herramientas prácticas para simulación basada en agentes que han permitido a las personas a desarrollar aplicaciones basadas en agentes. Cada vez más herramientas han aparecido y cada uno posee una variedad de características.

De acuerdo al análisis realizado, tres programas fueron preseleccionados: Arena, NetLogo y Repast. El primero corría con la ventaja del amplio soporte y difusión que posee, además de que el desarrollador del modelo está familiarizado con la herramienta. Sin embargo, el Arena requería una importante adaptación dado que no es un programa natural para el modelado de agentes. En el anexo 10.2 se presenta un listado de programas de modelización basado en agentes, cada uno con sus características. Entre todos ellos se testearon NetLogo y Repast. Luego de realizar diversas pruebas, se eligió a NetLogo para confeccionar la herramienta. La decisión de utilizar NetLogo se basó en los siguientes pilares:

- A diferencia del Arena, el cual había que adaptar, NetLogo es específico de modelización basada en agentes.
- **Posee las características deseadas:** el programa cumple con todo lo necesario para confeccionar el modelo propuesto. Se puede configurar un terreno y asignarle atributos a cada punto del mismo. También se pueden crear distintos tipos de agentes con atributos y darles instrucciones para que se comporten de determinada manera.
- **Soporte técnico y ayuda:** el sitio web oficial de NetLogo, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> contiene un foro en el que la comunidad de usuarios del programa presta soporte técnico y ayuda. Cualquier usuario puede preguntar una inquietud y a las 48 hs. ésta será respondida.
- **Gratuito:** el programa se puede descargar en forma gratuita.

- **Material de aprendizaje:** el programa cuenta con un lenguaje propio de programación. NetLogo posee una extensa documentación y tutoriales. También trae una librería de modelos, con una gran colección de simulaciones ya elaboradas que pueden ser utilizadas y modificadas. Estas simulaciones contienen información sobre distintas áreas en las ciencias naturales y sociales, incluyendo biología y medicina, física y química, matemática y ciencias de la computación, y economía y psicología social.
- **Interface de GIS:** el programa cuenta con una interface de GIS que permite cargar información contenida en mapas de forma tal de que la misma pueda ser codificada para que pueda ser incorporada al terreno en forma de variables.
- Corre en los ordenadores y sistemas operativos más habituales.

7.4.2 Breve descripción de NetLogo

NetLogo es un entorno de modelización programable para simular fenómenos naturales y sociales. Fue realizado por Uri Wilensky in 1999 y está en continuo desarrollo en el Centro para el Aprendizaje Continuo y Modelización basada en Computación.

En NetLogo, los modeladores pueden dar instrucciones a los cientos o miles de “agentes” que operan en forma independiente. Esto permite explorar las conexiones entre el comportamiento de nivel micro de individuos y patrones de nivel macro que emergen de la interacción de varios individuos y el ambiente.

Entre las características más importantes de NetLogo se encuentran:

- Sistema:
 - Plataforma cruzada: corre en Mac, Windows, Linux, etc.
- Lenguaje:
 - Lenguaje JAVA
 - Completamente programable
 - Estructura de lenguaje simple
 - El lenguaje es el dialecto Logo extendido para soportar agentes
 - Los agentes móviles se mueven sobre una grilla de agentes estáticos (celdas)
 - Amplio vocabulario de instrucciones
- Entorno:
 - Posibilidad del modelo en 2D y 3D
 - Centro de comando para interactuar con el modelo durante la simulación
 - Construcción de interfaz mediante botones, barras desplazadoras, listas, monitores, cajas de texto, entre otras
 - Barra de velocidad para ajustar la velocidad del modelo
 - Sistema de ploteo poderoso y flexible
 - Monitores de agentes para inspeccionar y controlar agentes
 - Exportar e importar funciones

7.4.3 Codificación del modelo

7.4.3.1 Definiciones

Antes de comenzar con la codificación del modelo se brindarán algunas definiciones propias de NetLogo.

NetLogo está construido por agentes. Los agentes son seres que siguen instrucciones básicas. Cada agente puede realizar su propia actividad y todos los agentes pueden estar realizando sus actividades en forma simultánea. En NetLogo hay básicamente dos tipos de agentes: los agentes móviles (AM) y las celdas. Los primeros son agentes que se mueven alrededor del mundo. NetLogo denomina “mundo” al terreno en el que se mueven los AM. El mundo es bidimensional y está dividido en una grilla de celdas. Cada celda es una porción cuadrada del mundo sobre el cual los AM se pueden mover. La celda de coordenadas (0, 0) es denominada el origen y las coordenadas del resto de las celdas son las distancias horizontal y vertical a dicha celda, tal como puede apreciarse en la siguiente imagen. Los AM también poseen coordenadas y las mismas hacen referencia a la celda en la que están ubicados.

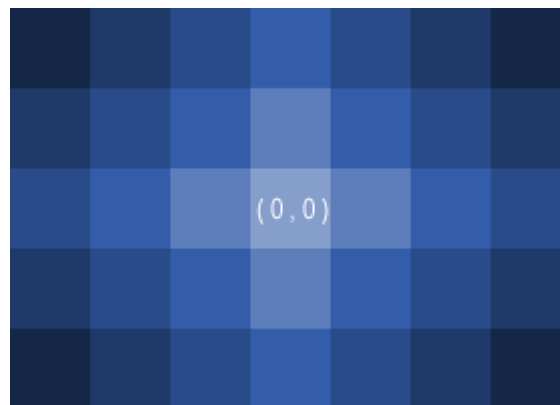


Figura 22. Celdas de NetLogo

Si bien el terreno es bidimensional, el problema fue convertido a tres dimensiones al agregar a cada celda la elevación del terreno. Existe en NetLogo una aplicación de modelización en tres dimensiones que está en etapa de desarrollo.

Los AM interactúan entre sí y con el medio, es decir, se mueven por el mundo (y, por tanto, por encima de las celdas) y pueden interactuar con las celdas sobre las que se mueven.

7.4.3.2 Modelo y funcionamiento de la herramienta

La herramienta cuenta con un **Área de comando**, que se muestra en la siguiente imagen:

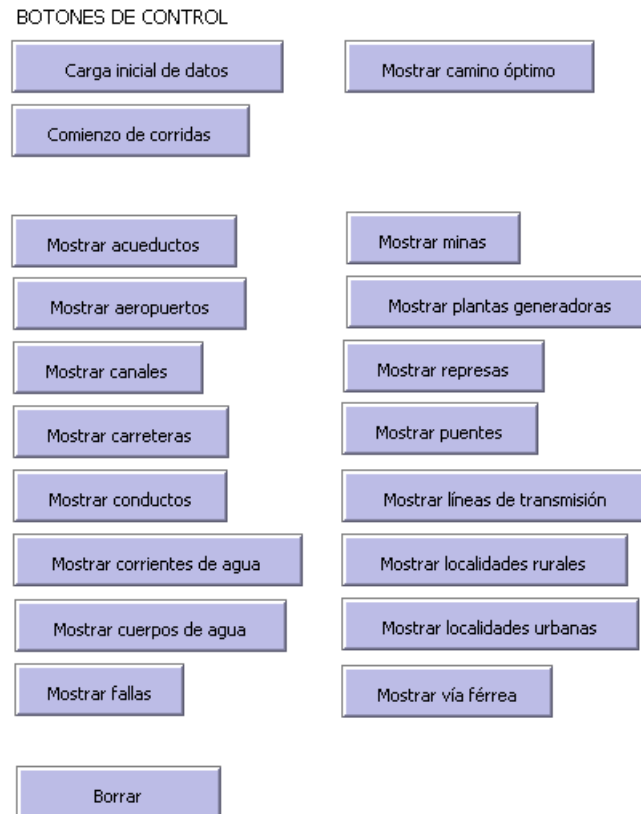


Figura 23. Área de comando

Los botones *Carga inicial de datos* y *Comienzo de corridas* son los botones más importantes del modelo, dado que son los que hacen que el modelo funcione.

Los botones que comienzan con la palabra “Mostrar” colorean determinadas celdas en el terreno, evidenciando una determinada característica del mismo, como por ejemplo un accidente geográfico o el camino óptimo encontrado.

El botón *Borrar* elimina cualquier restricción o camino dibujado, restableciendo el escenario original.

El modelo se divide en dos grandes secciones:

1. Carga inicial de datos.
2. Comienzo de corridas.

Carga inicial de datos

La carga inicial de datos se realiza al comienzo de la simulación e involucra los siguientes pasos:

1. Carga de información sobre el terreno
2. Asignación de vectores de movimiento a las celdas
3. Asignación de costos de construcción y de costos de construcción adicionales a las celdas
4. Asignación de costo de revestimiento y de costo de revestimiento adicional a las celdas

5. Asignación de incrementos de longitud a las celdas
6. Establecimiento de las clases de localización
7. Asignación de variable de caminos
8. Carga inicial de parámetros

1. Carga de información sobre el terreno

Se consiguió información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de México de escala 1:1.000.000. La información es georeferenciada en formato vectorial e incluye:

- Curvas de nivel
- Generación, líneas de transmisión de energía y conductos
- Infraestructura hidráulica: acueductos, canales, presas
- Localidades rurales y urbanas
- Rasgos hidrográficos: corrientes de agua y cuerpos de agua
- Rasgos arqueológicos
- Vías de comunicación: aeropuertos, carreteras.
- Puentes
- Vía férrea
- Clima
- Temperatura media anual
- Fisiografía
- Geología
- Fallas y fracturas
- Minas y otras ubicaciones geológicas
- Rocas
- Suelos
- Uso de suelo y vegetación
- Zonas de fango, de inundación, arenosas y pantanosas
- Áreas naturales protegidas

Dado que el “mundo” de NetLogo tiene forma rectangular, se eligió un fragmento rectangular del terreno de dimensiones 151,3 km por 71,3 km, tal como se observa en la siguiente figura. Dicho fragmento ha sido representado en NetLogo. NetLogo posee una aplicación GIS que permite cargar la información del terreno, de forma tal de que los AH que recorran el terreno podrán leerla e interpretarla.

El terreno creado posee 1051 celdas en la dirección norte-sur y 495 en la dirección este-oeste, es decir, cuenta con un total de 520.245 celdas. Cada celda representa un cuadrado de terreno de 144 m de lado. En la siguiente imagen se observa el terreno cargado en NetLogo. Se utilizó una escala de marrones para mostrar las elevaciones del terreno (los sectores más claros representan áreas más bajas).

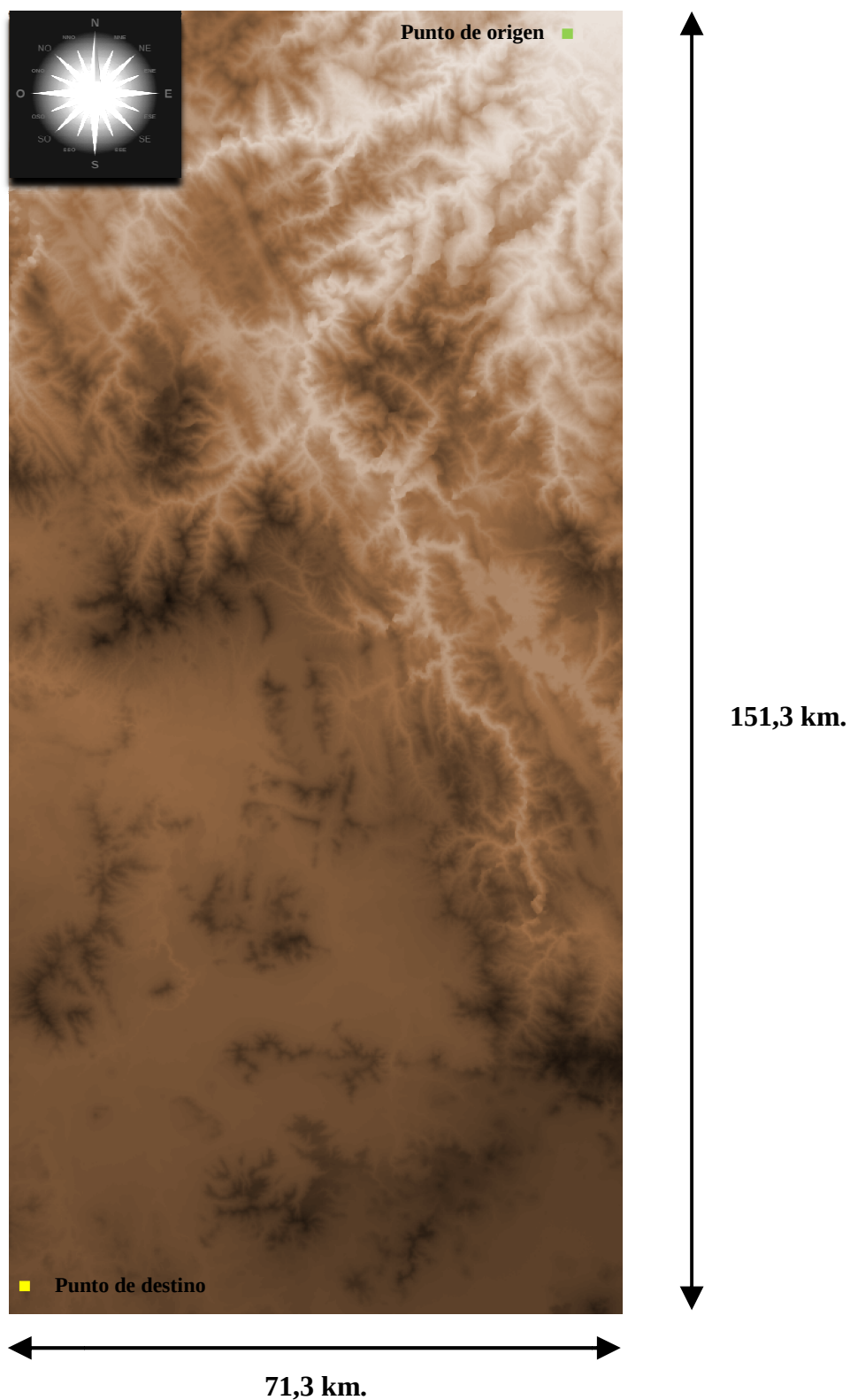


Figura 24. Imagen del terreno cargado en NetLogo

En la siguiente imagen se observa el mismo terreno, pero con áreas ocultas. Estas áreas fueron excluidas del recorrido de las hormigas por incluir puntos que se apartan considerablemente de la recta que une a los dos puntos geográficos dado que, se presupone, el camino óptimo estará en los entornos de dicha línea. Se decidió utilizar

esta franja de terreno a partir de diversas pruebas experimentales realizadas. Al reducir la superficie del terreno, se redujo también el tiempo que tarda un AH en llegar a P_D , dado que el AH no deberá recorrer puntos que no tiene sentido evaluar en este caso.

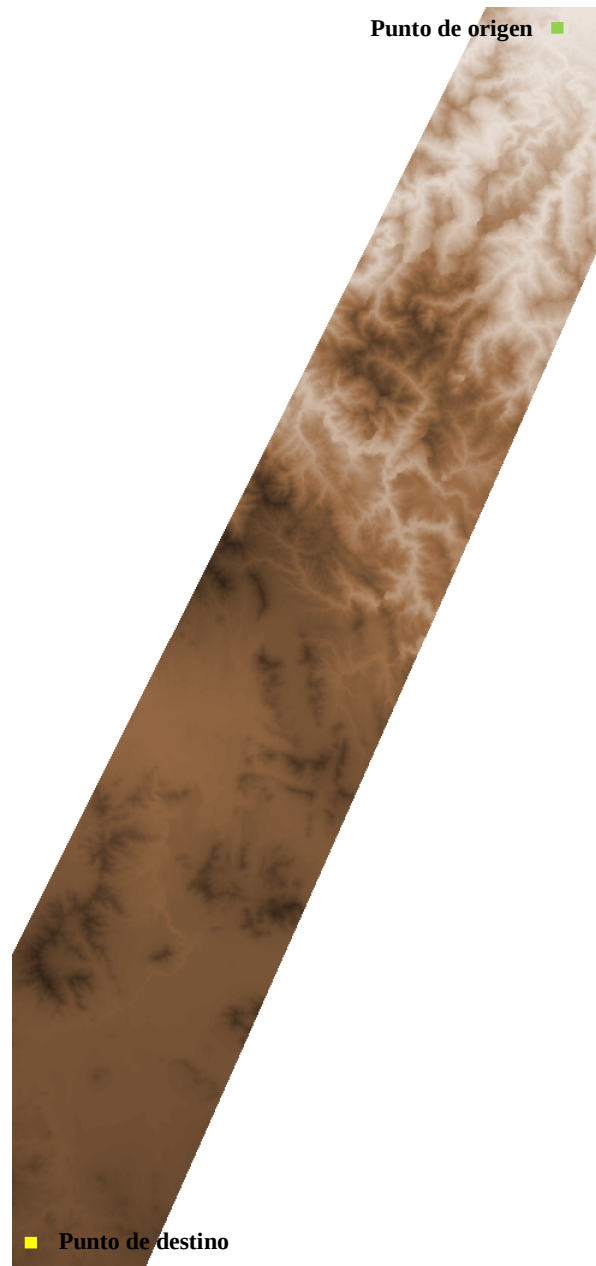


Figura 25. Imagen de la franja de terreno

En caso de que en algún proyecto particular se considere que la solución óptima puede estar fuera de la diagonal principal y de disponer de equipos con mayor potencia y mayor disponibilidad de tiempo para la realización de múltiples corridas, la franja mostrada puede ser fácilmente ampliada.

A continuación se muestran una serie de imágenes con la ubicación de los distintos accidentes geográficos:

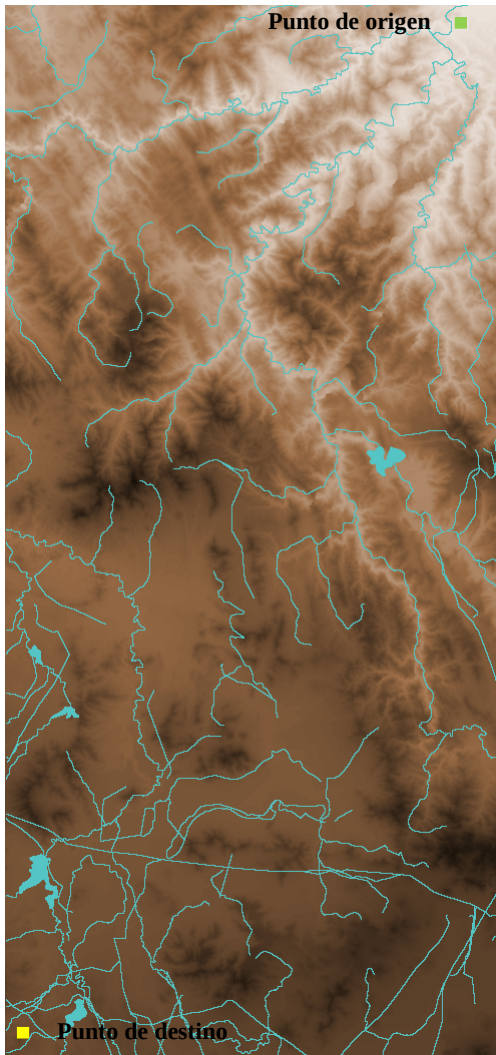


Figura 26. Acueductos, conductos, canales, cuerpos de agua y corrientes de agua

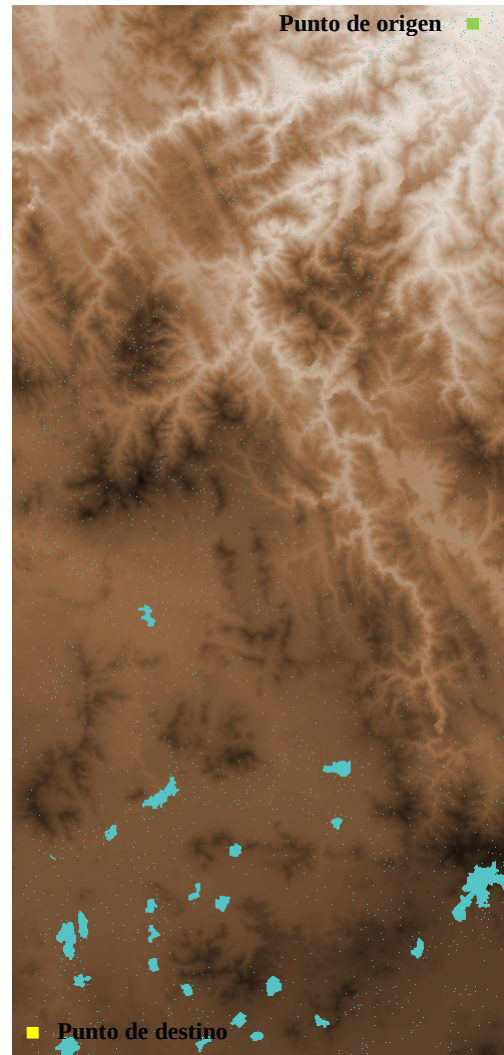


Figura 27. Aeropuertos, minas, plantas generadoras, represas, puentes, localidades rurales y urbanas

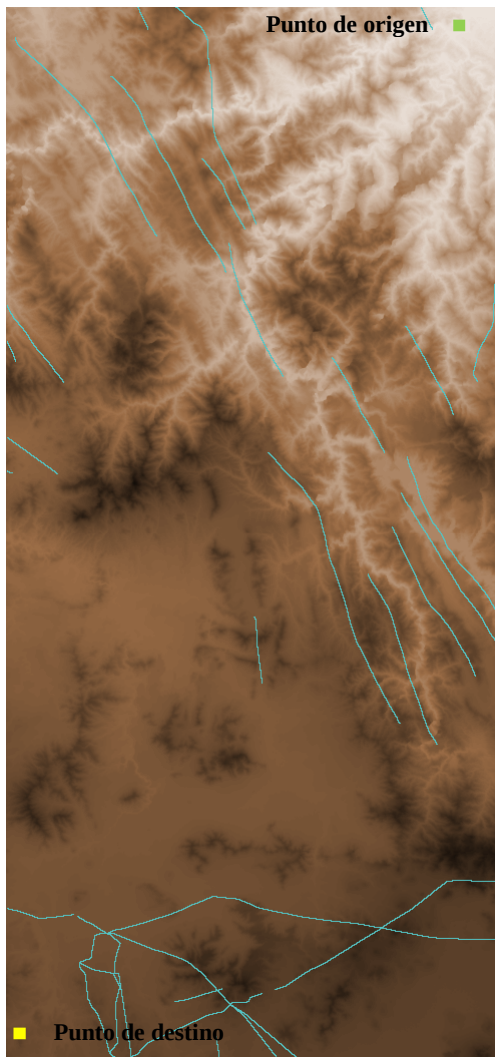


Figura 28. Fallas y líneas de transmisión

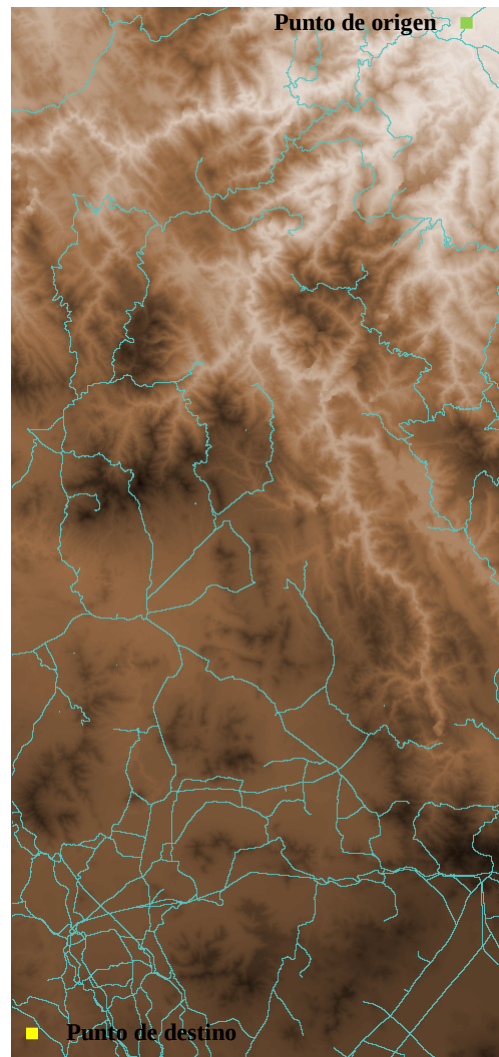


Figura 29. Carreteras y vía férrea

2. Asignación de vectores de movimiento a las celdas

Se asigna a cada celda un *vector de movimiento* que los AH utilizarán para realizar la elección de la dirección de movimiento. Cada AH puede moverse en una de las cuatro direcciones posibles de movimiento (excepto que esté en un extremo del terreno o que haya una restricción en alguna de las direcciones): norte, sur, este y oeste. Como ya se ha mencionado, la profundidad del ducto será constante a lo largo de todo el camino por lo que sólo hay que definir el movimiento en dos dimensiones (y la tercera dimensión queda definida por la altura de cada celda, que ha sido cargada en el punto 1).

Se define al vector de movimiento como un vector de cuatro componentes, una para cada dirección de movimiento. Su funcionamiento se explica mejor a través del siguiente esquema:

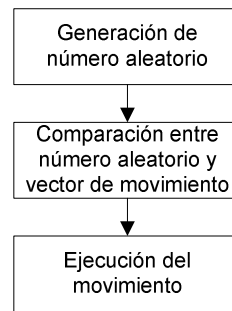


Figura 30. Proceso de movimiento de un AH

Se asume que un AH está detenido en una celda y tiene todas las direcciones de movimiento permitidas. El AH debe elegir una dirección de movimiento para moverse a la siguiente celda. Se define al vector de movimiento de la siguiente manera:

$$\vec{v} = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$$

Cada componente del vector de movimiento está asociada a una dirección de movimiento del AH. La primera componente está asociada con el movimiento hacia el norte, la segunda hacia el este, la tercera hacia el sur y la cuarta hacia el oeste.

Si se plantea la suma acumulada de las componentes del vector de movimiento y se divide a cada elemento por la suma de las cuatro componentes, el vector se transforma en lo siguiente:

$$\vec{r} = \left[\frac{1}{4} \ \frac{2}{4} \ \frac{3}{4} \ \frac{4}{4} \right] = [0,25 \ 0,5 \ 0,75 \ 1]$$

Ante cada elección de movimiento, el programa generará un número aleatorio entre 0 y 1. Si el número está entre 0 y 0,25, entonces el AH avanzará un lugar hacia el norte y realizará una nueva elección de movimiento. Si el número está entre 0,25 y 0,5 se dirigirá hacia el este, si está entre 0,5 y 0,75 hacia el sur y si es mayor a 0,75 se dirigirá hacia el oeste. Nótese cómo en este ejemplo todas las direcciones de movimiento son equiprobables, lo que implica que el AH podrá moverse en cualquier dirección con igual probabilidad.

Si una de las direcciones de movimiento estuviera prohibida, por ejemplo si hay un sitio arqueológico al norte, entonces el vector de movimiento tendrá la siguiente forma:

$$\vec{v} = [0 \ 1 \ 1 \ 1]$$

$$\vec{r} = \left[\frac{0}{3} \ \frac{1}{3} \ \frac{2}{3} \ \frac{3}{3} \right] = [0 \ 0,33 \ 0,67 \ 1]$$

Si el número aleatorio que se genere está entre 0 y 0,33, entonces el AH avanzará un lugar hacia el este, si está entre 0,33 y 0,67 se dirigirá hacia el sur y si es mayor a 0,67 se dirigirá hacia el oeste. Nótese cómo todas las direcciones posibles de movimiento siguen siendo equiprobables, la diferencia radica en que una de las direcciones está prohibida.

A medida que los AH encuentren soluciones modificarán las componentes de los vectores correspondientes a las celdas que hayan transitado. De esta forma, si, por ejemplo, en un momento determinado de la simulación el vector de movimiento para una celda determinada es:

$$\vec{v} = [1 \ 1,5 \ 1,2 \ 1,3]$$
$$\vec{r} = [0,2 \ 0,5 \ 0,74 \ 1]$$

Entonces las cuatro posibles direcciones de movimiento para un AH que se encuentre ubicado en esa celda ya no serán equiprobables, sino que habrá una o más de una dirección que tiene mayor probabilidad de ser elegida.

Este es el mecanismo a través del cual las hormigas leen el medioambiente, es decir, información de lo hecho anteriormente por otras hormigas (aprendizaje). La probabilidad de selección de cada dirección está asociada a la intensidad de feromona.

En la sección de carga inicial, se asignan los vectores de movimiento a todas las celdas del terreno, teniendo en cuentas las restricciones existentes. Sin embargo, no se asignó igual probabilidad de movimiento a todas las direcciones. Dado que ya se conoce el P_O y el P_D , se sabe que el gasoducto recorrerá el terreno en sentido noreste-sudoeste por lo que permitir todas las direcciones de movimiento con igual probabilidad traería dos efectos:

- Mayor tiempo de procesamiento dado que el AH tardará más tiempo en recorrer el terreno hasta encontrar el P_D .
- Caminos ineficientes por la naturaleza del recorrido de los AH. Esto haría que el modelo tarde mucho más tiempo en converger a una solución.

En base a pruebas experimentales, el vector de movimiento para una celda con todas las direcciones de movimiento permitidas se define de la siguiente manera:

$$\vec{v} = [3 \ 3 \ 15 \ 8]$$

Si calculamos el vector normalizado:

$$\vec{r} = [0,10 \ 0,21 \ 0,72 \ 1]$$

Esto quiere decir que un AH que se encuentra sobre una celda con todas las direcciones de movimiento permitidas tomará una decisión de movimiento en base a la siguiente distribución de probabilidades:

- Norte: 10,3%
- Este: 10,3%
- Sur: 51,7%
- Oeste: 27,6%

De esta forma, el AH tendrá más tendencia a moverse hacia el sur y el oeste que hacia otras direcciones. Las probabilidades han sido determinadas en función de la pendiente de la recta que une P_O y P_D .

Tal como se explicó en el ejemplo anterior, al vector de movimiento se le anularán distintas componentes en caso de que alguna dirección se encuentre prohibida.

Las restricciones presentes en la región por las cuales el ducto no podrá pasar son:

- Minas.
- Presas.
- Plantas generadoras.
- Aeropuertos.
- Localidades urbanas.
- Localidades rurales.
- Puentes.

3. Asignación de costos de construcción y de costos de construcción adicionales

Se asignan los costos de construcción al terreno, según el tipo de terreno. Para ello se han tomado tres tipos de terreno base:

- Zonas relativamente planas con buenos accesos y suelo blando.
- Zonas montañosas con accesos limitados y terreno con vegetación baja o inexistente.
- Selva cerrada con muy malos accesos o accesos inexistentes, con lluvias tropicales y en zona montañosa.

Adicionalmente, se ha modificado el costo en función de la altura del terreno (a mayor altura, mayor es el costo de construcción).

A lo largo de su recorrido, el gasoducto deberá superar varios obstáculos. Cada obstáculo conlleva un costo adicional de construcción, que también es asignado a las celdas correspondientes. El criterio de asignación del costo adicional de construcción es el siguiente, basado en datos reales:

- Acueductos, conductos, fallas y líneas de transmisión: se duplica el costo de construcción.
- Canales, carreteras, corrientes de agua, cuerpos de agua y vía férrea: se cuadruplica el costo de construcción.

4. Asignación de costo de revestimiento y de costo de revestimiento adicional

Se asignan costos de revestimiento al terreno. En principio, el costo del revestimiento no depende del tipo de terreno, excepto que exista algún accidente geográfico que requiera algún revestimiento adicional, por ejemplo, aquéllos en los que hay agua para evitar corrosión. Se ha incrementado un 30% el costo de revestimiento para las siguientes restricciones: canales, conductos, corrientes de agua y cuerpos de agua.

5. Asignación de incrementos de longitud a las celdas

Cada celda tiene una longitud determinada que se define como la longitud del segmento de gasoducto que la atraviese. Esta longitud depende de la altura de los extremos de la celda y de la distancia en el plano bidimensional. Sin embargo, para construir el ducto, algunas restricciones conllevan un incremento de longitud dado que deberá alcanzarse una mayor profundidad. En esta etapa de la simulación se identifican aquellas celdas a las que se les cargará un incremento adicional del 30% de longitud. Las celdas afectadas son las que contienen las siguientes restricciones: acueductos, canales, carreteras, conductos, corrientes de agua, cuerpos de agua y vía férrea.

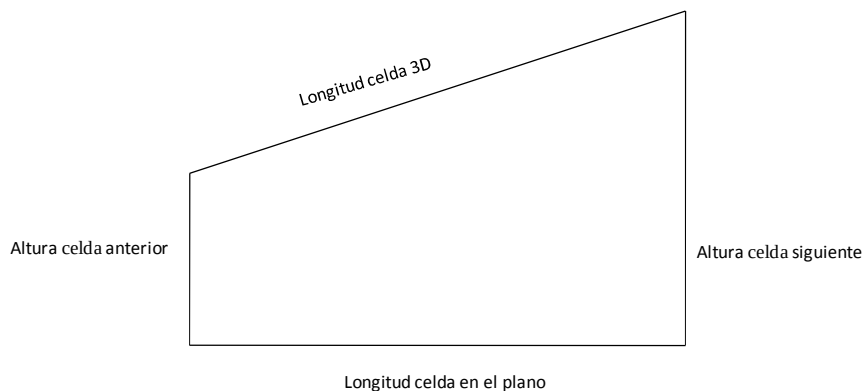


Figura 31. Definición de longitud de una celda

6. Establecimiento de las clases de localización

Se establecen las clases de localización del terreno, que luego serán utilizadas para el cálculo del factor de diseño y para determinar la distancia a la que deben colocarse las válvulas de aislamiento, según la norma ASMBE B31.8. Se asignó la clase de localización 1 a todas las celdas del terreno que se encuentren al norte del sexto inferior del terreno, excepto aquellas que rodean localidades urbanas a las que se les asignó la clase de localización 2, y al resto de las celdas se les asignó la clase de localización 2, dado que el sur es una zona con mayor cantidad de asentamientos urbanos.

Las válvulas de aislamiento, que se suelen colocar cada 30 o 50 km y en algunos cruces especiales como los cruces de frontera, tienen como única función aislar tramos de línea en el caso de una fuga o ruptura. Su ubicación está en función de la ubicación de la población (se ubican en los límites de áreas pobladas de manera tal que los tramos que pasan cerca de las mismas sean fácilmente aislables y de corta longitud).

7. Asignación de variable de caminos

Los ingenieros de ductos, al momento de evaluar las distintas alternativas de rutas, ponderan un factor que es la cercanía a carreteras o vías férreas debido a que esto reduce los costos de transporte y facilita el posterior mantenimiento del gasoducto. En el modelo, aquellas celdas que se encuentran cerca de alguna carretera o vía férrea poseen un costo de transporte menor. Para ello, en esta etapa de la simulación se asigna una variable a cada celda en la que se cuenta la cantidad de carreteras y vías férreas que

pasan en un radio de 300 metros alrededor de la celda. Esta variable será posteriormente utilizada para reducir el costo de dichas celdas.

8. Carga inicial de parámetros

Se cargan los parámetros que alimentan a las ecuaciones presentadas en el capítulo 6:

- Costo de energía eléctrica
- Vida útil del ducto
- Rendimiento de la estación compresora
- Rendimiento del motor
- Densidad del gas
- Caudal y caudal másico del fluido
- Constante universal de los gases corregida por factor de compresibilidad y afectada por la masa molar del gas
- Temperatura promedio de la región
- Exponente de la adiabática de compresión
- Tasa de descuento de uso en la industria
- Cálculo de los factores de valor actual neto
- Costo fijo y variable de la estación compresora
- Costo unitario de transporte
- Costo unitario de material
- Relación de compresión
- Distancia del punto de origen al puerto de Veracruz, lugar al que llegan los materiales
- Relación entre diámetro interior y exterior
- Tensión admisible del material.
- Factor de junta longitudinal.
- Factor de reducción de temperatura
- Densidad del material
- Factor de fricción
- Costo unitario del gas natural
- Costo unitario de las válvulas de aislamiento

Comienzo de corridas

Esta etapa se compone de dos grandes subetapas:

1. Búsqueda del punto de destino.
2. Regreso al punto de origen.

1. Búsqueda del punto de destino

La búsqueda del punto de destino se presenta esquematizada en la siguiente imagen:



Figura 32. Búsqueda del punto de destino

a) Creación de un agente hormiga

Tal como ya se ha mencionado, se crearán dos tipos de agentes: AH_T y AH_E . Cualquier agente que se cree, moverá un contador en una unidad. Existe un contador para los AH_T y otro para los AH_E . Todos los AH se crean en el punto de origen, que en NetLogo tiene las coordenadas (205, 509), es decir, se encuentra muy cerca del ángulo superior derecho de la pantalla, cuyas coordenadas son (247, 525).

b) Selección de dirección de movimiento

Cada AH comenzará a moverse a través del terreno eligiendo en cada celda una dirección de movimiento, basado en el mecanismo de los vectores de movimiento explicado anteriormente. Al inicio de la simulación, el vector de movimiento de los AH_T es idéntico al de los AH_E , pero luego el del primer grupo se verá modificado. Ambos tipos de agentes pueden modificar el vector de movimiento de los AH_T , pero cada tipo de agente puede leer su vector de movimiento. Esto hace que el vector de movimiento de los AH_E permanezca invariable a lo largo de toda la simulación, así se cumple el objetivo para el cual fueron creados: corregir los sesgos que pudieran generarse por soluciones subóptimas.

c) Avance y recolección de información del terreno

A medida que los AH recorren el terreno, almacenan en su memoria un vector con un listado de las coordenadas de las celdas que atravesaron. Como el movimiento de los AH es totalmente aleatorio puede suceder que atraviesen varias veces por el mismo punto, generando “rulos” en el camino. Para hallar el camino “directo” entre el punto de origen y el de destino, se creó un mecanismo que evalúe continuamente si se están creando rulos y, si es así, dichos rulos son eliminados del vector. Dicho mecanismo compara las coordenadas de cada celda atravesada con las celdas que se encuentren registradas en la memoria del AH. Si dicha celda no se encuentra en la secuencia,

entonces se agrega. Caso contrario, se elimina todo el recorrido intermedio, es decir, el rulo. De esta forma, cuando un AH llega al punto de destino, el camino que queda registrado en su memoria es el camino directo entre el P_O y P_D . Este camino directo será el gasoducto propuesto por el AH y el vector registrado en la memoria del AH será posteriormente utilizado para realizar el dimensionamiento del ducto en la siguiente etapa de la simulación. Los AH continuarán moviéndose hasta que lleguen al P_D , que en NetLogo tiene las coordenadas (-238, -503), es decir, se encuentra muy cerca del ángulo inferior izquierdo de la pantalla, cuyas coordenadas son (-247, -525). En la siguiente imagen se puede apreciar un AH recorriendo el terreno.

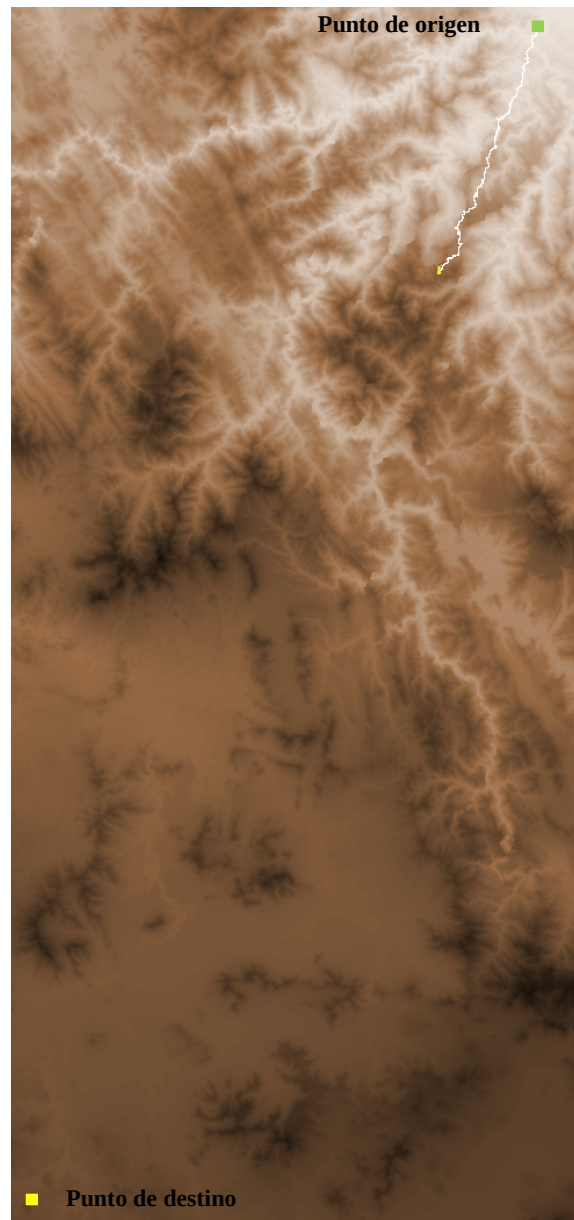


Figura 33. AH recorriendo el terreno

2. Regreso al punto de origen

El regreso al punto de origen se presenta esquematizado en la siguiente imagen:

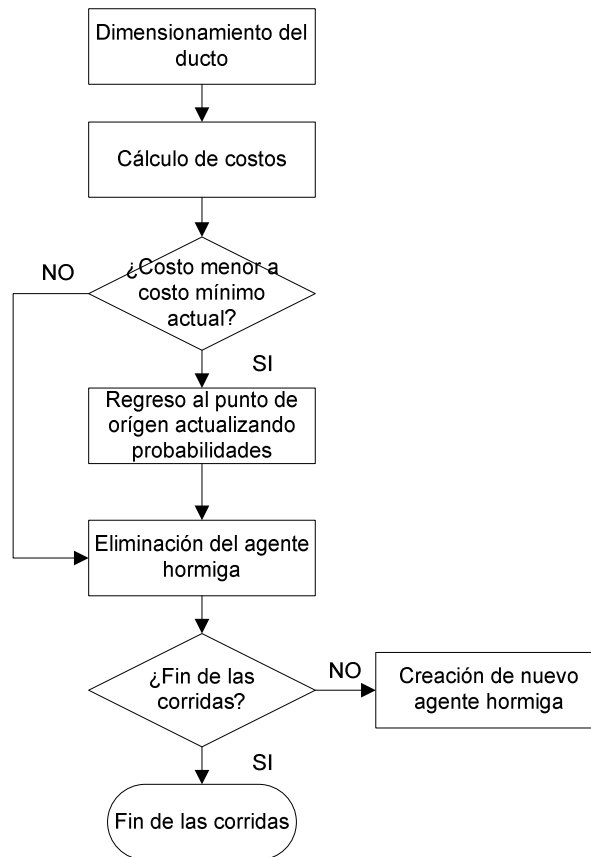


Figura 34. Regreso al punto de origen

a) Dimensionamiento del ducto

Una vez que el AH llega al punto de destino, se procede a dimensionar el ducto propuesto por dicho AH, utilizando la información almacenada por el agente, que es básicamente un vector de coordenadas con el camino realizado (sin rulos) entre P_O y P_D . En esta etapa se calculan aquellos parámetros que dependen del recorrido del AH.

El dimensionamiento del ducto implica determinar los siguientes conceptos:

- **Longitud del ducto**

Primero se determina la longitud del ducto, sumando la longitud de cada celda atravesada por el AH. Para el cálculo de la longitud de cada celda se utilizó el teorema de Pitágoras:

$$L_{celda} = \sqrt{L_{plano}^2 + \Delta h^2}$$

L_{celda} : longitud de la celda en tres dimensiones [m]

L_{plano} : longitud de cada lado de la celda en el plano, equivalente a 144 m para todas las celdas

Δh : diferencia de alturas entre el punto inicial y final de cada celda (o, lo que es equivalente, entre la celda siguiente y la anterior) [m]

Además, tal como ya se ha explicado, se tendrá en cuenta el incremento de longitud para aquellas celdas atravesadas que contengan una restricción. De esta forma:

$$L_{AH} = \sum_{\substack{\text{celdas} \\ \text{recorridas}}} L_{\text{celda}} \times (1 + i_{L-\text{celda}})$$

L_{AH} : longitud del camino para un AH determinado [m]

$i_{L-\text{celda}}$: variable que refleja el incremento de longitud de cada celda. Puede ser 0% si es una celda sin restricciones o 30% en caso de que se presente alguna de las restricciones mencionadas en la etapa de Carga inicial de datos

- **Factor de diseño**

En esta etapa también se determina el factor de diseño de la norma ASME B31.8, ponderando los valores según la clase de localización. Dado que el terreno sólo presenta las clases de localización 1 y 2, se toma un promedio ponderado de ambas.

$$F = \frac{0,72 \times \text{clase.uno} + 0,6 \times \text{clase.dos}}{\text{número.celdas}}$$

F : factor de diseño

clase.uno : cantidad de celdas del recorrido del AH con clase de localización 1

clase.dos : cantidad de celdas del recorrido del AH con clase de localización 2

número.celdas : cantidad de celdas recorridas por el AH

- **Cantidad de válvulas**

Se determina el número de válvulas según la norma ASME B31.8, ponderando los valores según la clase de localización.

$$\text{dist.promedio} = \frac{32.000 \times \text{clase.uno} + 24.000 \times \text{clase.dos}}{\text{número.celdas}}$$

dist.promedio : distancia promedio entre válvulas

$$\text{nro.válv.} = \frac{L_{AH}}{\text{dist.promedio}}$$

- **Relación de compresión, diámetro exterior, presión máxima del fluido y cantidad de estaciones compresoras**

A esta altura, ya quedaron determinados todos los parámetros necesarios para resolver las ecuaciones de optimización presentadas en el capítulo 6 (que se muestran a continuación). Es importante destacar que los costos unitarios de construcción y revestimiento que alimentan a dichas ecuaciones son calculados

en esta etapa, pero para una mejor exposición se presentan en el siguiente apartado en conjunto con el resto de los costos.

La relación de compresión ya fue calculada dado que no depende del recorrido que realice el AH. Utilizando dichas ecuaciones, se determina el diámetro exterior (D), la presión máxima (P_1) y la cantidad de estaciones compresoras (X).

$$\left(\frac{K_{02}K_2t}{\eta_m\eta_c} + \frac{K_3}{\eta_c}\right) C_{\rho RT} \left\{ \frac{1}{2} \left(\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right) \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 - \frac{3K-1}{K-1} \right] + \frac{K}{K-1} \right\} - K_{03} = 0$$

$$D = \left[\left(\frac{K}{K-1} \left(\frac{K_{02}K_2t}{\eta_m\eta_c} + \frac{K_3}{\eta_c} \right) C_{\rho RT} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] + K_{03} \right) \left(K_{11} \frac{1+K_D}{8\sigma} \gamma_F + \frac{K_{04}K_4K_D^2}{9RT} \right)^2 \frac{16C_{\rho}^2 RT f}{[\pi(K_{12} + K_{13})]^3} \frac{1}{K_D^5 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right]} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$P_1 = \frac{K_{12} + K_{13}}{\left(K_{11} \frac{1+K_D}{8\sigma} \gamma_F + \frac{K_{04}K_4K_D^2}{9RT} \right) D}$$

$$X = \frac{16C_{\rho}^2 RT f L}{\pi^2 K_D^5 D^5 P_1^2 \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{-2} \right]}$$

b) Cálculo de costos

El objetivo de esta etapa es determinar el costo total del gasoducto propuesto por el AH y posteriormente decidir si se actualiza o no la distribución de probabilidades del camino recorrido. Al comienzo del capítulo 7, ya se ha definido el costo total del gasoducto utilizando la siguiente fórmula:

$$C_T = C_I + \sum_{n=1}^x \frac{C_O^n}{(1+t)^n}$$

donde x corresponde a la vida útil del ducto expresado en años, t es la tasa de descuento del flujo de costos y C_O^n el costo de operación del ducto en el año n .

Si bien esta formulación es correcta desde el punto de vista conceptual, es común considerar un costo por contingencias que represente cualquier imprevisto que surja durante la construcción del mismo. Es una práctica general de la industria establecer este valor alrededor del 20% del costo de inversión. Por lo tanto, la ecuación se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_T = 1,2C_I + \sum_{n=1}^x \frac{C_O^n}{(1+t)^n}$$

Por otra parte, el costo de operación incluye, tal como se explicó en el capítulo 7, por un lado el costo de la energía eléctrica de operar las estaciones compresoras y, por otro, el

costo de mantenimiento anual del gasoducto. El costo de mantenimiento anual del gasoducto se compone de: un costo de inspección interna (recorridas anuales alrededor del ducto realizando una limpieza del lugar y verificando que todo esté en condiciones adecuadas) y un costo que representa el 2% del costo de inversión inicial del gasoducto. Se agregará además un concepto adicional al costo de operación: el costo del seguro anual, que representará el 0,5% del costo de inversión inicial. Es por eso que la ecuación se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_T = 1,2C_I + \sum_{n=1}^x \frac{C_{O1}^n + 0,025C_I}{(1+t)^n}$$

donde C_{O1}^n es la componente del costo de operación que representa la suma del costo de la energía eléctrica de las plantas compresoras y del costo de inspección interna del ducto en el año n .

Ahora bien, como C_{O1}^n y $0,025C_I$ son iguales en cada año de la vida útil del ducto, la ecuación se puede expresar como sigue:

$$C_T = 1,2C_I + (C_{O1}^n + 0,025C_I) \sum_{n=1}^x \frac{1}{(1+t)^n}$$

Llamando $TAD = \sum_{n=1}^x \frac{1}{(1+t)^n}$ al término que representa a la tasa anual de descuento, la ecuación a optimizar quedaría de la siguiente forma:

$$C_T = C_I(1,2 + 0,025VAN) + C_{O1}^n TAD$$

Esto indica que para hallar el costo total del gasoducto, es necesario determinar C_I y C_{O1}^n .

Costo de inversión

El costo de inversión en el modelo estará compuesto por cuatro grandes grupos de costos, tal como se explicó en el capítulo 7:

1. Costo de la cañería (C_1)
 2. Costo de las estaciones compresoras (C_3)
 3. Costo de llenado del gasoducto (C_4), que será recuperado al finalizar la vida útil del gasoducto dado que representa el capital de trabajo necesario para iniciar la operación
 4. Costo de control de erosión
-
1. El costo de la cañería (C_1) incluye los siguientes conceptos:
 - **Costo de material:** costo del material necesario para construir el gasoducto.
 - **Costo de transporte inicial:** costo de transportar el material desde el puerto hasta el P_O .

- **Costo de transporte interno:** costo de transportar el material desde el P_O hasta el P_D .
- **Costo de las válvulas:** costo de las válvulas de aislación.
- **Costo de revestimiento:** costo del revestimiento a colocar sobre la superficie exterior del ducto.
- **Costo de construcción:** costo de construcción del ducto.

En el capítulo 6 se presentó la fórmula matemática del costo de la cañería:

$$C_1 = K_{11} \frac{1 + K_D}{2} \frac{\pi D^2 P_1}{2\sigma_{FET}} \gamma_F L + (K_{12} + K_{13}) \pi D L$$

Todos los términos de esta fórmula ya han sido presentados en el capítulo 6. Sin embargo, hay tres parámetros, K_{11} , K_{12} y K_{13} que no han sido definidos aún.

Se define K_{11} según la siguiente fórmula:

$$K_{11} = C_{material} + C_t d_{puerto-P_O} + \sum_{\substack{celdas \\ recorridas}} C_{t_i} L_{celda} F_i$$

$C_{material}$: costo unitario de material [US\$ / kg]

C_t : costo de transporte por unidad de peso y de distancia [US\$ / kg . m]

$d_{puerto-P_O}$: distancia entre el puerto y el P_O [m]

C_{t_i} : costo de transporte por unidad de peso y de distancia para la celda i (incluye corrección por cercanía a caminos) [US\$ / kg . m]

L_{celda} : longitud de una celda [m]

F_i : factor que se utiliza para contemplar ajustar el volumen de material a transportar para cada celda

El primer término de la ecuación anterior se refiere al costo del material necesario para construir el gasoducto, mientras que el segundo término se refiere al costo de transporte del material desde el puerto hasta el P_O . El tercer término, relacionado con el transporte interno desde P_O hasta P_D , utiliza información recolectada por el AH al pasar por las distintas celdas del terreno. Esto es así por dos motivos:

- Por un lado, como ya se ha mencionado, el costo unitario de transporte de cada celda está ajustado por una variable propia de cada celda que registra la cantidad de carreteras y vías férreas que se encuentran a menos de 300 metros de dicha celda. Para calcular el costo de transporte interno, primero se determina el costo de transporte por unidad de peso para cada celda, multiplicando el costo de transporte de cada celda por la longitud de cada celda, teniendo en cuenta la variable que reduce el costo de cada celda por la cercanía a carreteras y vías férreas. A continuación se explica la forma de cálculo y el funcionamiento de esta variable:

$$C_{t-celda} = \frac{C_t}{12} (12 - 0,2c) L_{celda}$$

$C_{t-celda}$: costo de transporte de la celda [US\$ / kg]

C_t : costo de transporte unitario (es el mismo para todas las celdas) [US\$ / m . kg]

c : cantidad de caminos en un radio de 300 m alrededor de la celda

Dada la configuración del terreno, c puede tomar valores entre 0 y 12. Es decir, la celda que cuenta con la mayor cantidad de caminos en un radio de 300 metros tiene 12 caminos. Si el valor es 0, entonces la celda está alejada de los caminos y el costo de transporte de la celda equivale al costo de transporte unitario original. Si el valor es 12, entonces el costo de transporte se verá reducido en un 20%. Cualquier otro valor intermedio reducirá el costo en un valor menor al 20%.

- Por otro lado, cuando se construye un ducto, el material es transportado en distintas etapas. Se seleccionan determinados puntos en el recorrido del ducto y en dichos puntos se construyen plantas de acopio de material. Aproximadamente cada cincuenta kilómetros se construye una planta de acopio. Por lo tanto, si el ducto queda dividido en n segmentos de cincuenta kilómetros, se transporta el 100% del volumen de material desde el puerto hasta el P_O , luego el $1 - 1/n$ % del volumen de material hasta el segundo punto, el $1 - 2/n$ % hasta el tercer punto y así hasta llegar al P_D . Este concepto se puede observar en la siguiente figura:

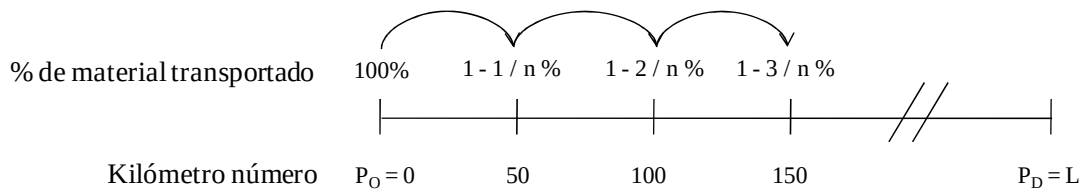


Figura 35. Distribución de las plantas de acopio de material

El factor F_i , entonces, se utiliza para ajustar el volumen de material transportado en cada celda. Siguiendo la imagen anterior, F_i será $1 - 1/n$ % para las celdas ubicadas en el primer tramo, $1 - 2/n$ % para las ubicadas en el segundo, y así sucesivamente hasta llegar a valer cero en el último tramo.

Se define la suma entre K_{12} y K_{13} según la siguiente fórmula:

$$K_{12} + K_{13} = \frac{\alpha \times nro. válv.}{\pi L} + \frac{\sum_{celdas\ recorridas} (C_{R-celda} + C_{R.adic-celda}) \times L_{celda}}{L} + \frac{\sum_{celdas\ recorridas} (C_{C-celda} + C_{C.adic-celda}) \times L_{celda}}{\pi L}$$

α : factor de proporcionalidad para determinar el costo unitario de las válvulas

$nro. válv.$: cantidad de válvulas a colocar

$C_{R-celda}$: costo de revestimiento de cada celda [US\$ / m²]

$C_{R.adic-celda}$: costo de revestimiento adicional de cada celda en base a las presentes en la celda [US\$ / m²]

$C_{C-celda}$: costo de construcción de cada celda [US\$ / m²]

$C_{C.adic-celda}$: costo de construcción adicional de cada celda en base a las presentes en la celda [US\$ / m²]

El primer término de la ecuación anterior se refiere al costo de las válvulas instaladas. Se definió el factor α para relacionar al costo unitario de una válvula en función del diámetro exterior del gasoducto, según se ha explicado en el modelo de datos.

El segundo término se refiere al costo del revestimiento de la cañería, el cual está expresado en unidad monetaria por unidad de superficie exterior del ducto. El tercer término se refiere al costo de construcción del ducto, el cual está expresado en unidad monetaria por metro de longitud y por metro de diámetro exterior. Estos últimos dos costos se relacionan con las celdas que atraviesa el AH dado que cada celda posee una variable con un costo de revestimiento y un costo de construcción.

2. El costo de las estaciones compresoras (C_3) incluye los siguientes conceptos:

- **Costo fijo de una estación compresora**
- **Costo variable de una estación compresora**

El costo de las estaciones compresoras, tal como se explicó en el capítulo 6, resulta una función no lineal de la potencia de las plantas. Para simplificar los cálculos, se asume una función lineal válida dentro de un cierto rango de potencias. El costo está expresado por la siguiente fórmula:

$$C_3 = K_{03}X + K_3N$$

K_{03} y K_3 : constantes de proporcionalidad de mercado

N : potencia de una estación compresora

Las constantes K_{03} y K_3 son parámetros del modelo y sus valores verifican las siguientes relaciones teóricas:

$$K_{03} = 4000\sqrt{N}$$

$$K_3 = \frac{4000}{\sqrt{N}}$$

3. El costo de llenado del gas natural (C_4) representa el costo de la masa del gas para el llenado del gasoducto. Tal como se presentó en el capítulo 6, la fórmula de cálculo es la siguiente:

$$C_4 = K_{04}K_4K_D^2 \frac{2P_1}{9RT} \pi D^2 L$$

K_4 : coeficiente de costo del gas que refleja el costo del gas en calidad de ingreso a gasoducto (tratado y acondicionado) [US\$ / kg]

K_{04} : coeficiente de actualización del costo del capital inmovilizado durante la vida útil de la línea del gasoducto, y recuperado al momento del abandono

Se define K_{04} de la siguiente manera:

$$K_{04} = 1 - \frac{1}{(1 + t)^n}$$

donde t representa la tasa de descuento y n es el número de años de vida útil del gasoducto.

4. El costo de control de erosión tiene muy poca variabilidad con la longitud del ducto o con alguno de los parámetros a optimizar, dentro de los rangos de valores que se están analizando por lo que se lo asume constante.

Costo de operación (C_{01}^n)

Esta componente del costo de operación incluye los siguientes conceptos:

1. Costo de la energía eléctrica consumida por las plantas compresoras (C_2).
2. Costo de inspección interna del gasoducto.

1. El costo de la energía eléctrica consumida por las plantas compresoras ha sido definido en el capítulo 6 de la siguiente forma:

$$C_2 = K_{02} K_2 \frac{N}{\eta_m} t$$

K_2 : constante de proporcionalidad, correspondiente al costo unitario de la energía [US\$ / Khw]

t : tiempo de funcionamiento de la instalación [horas]

K_{02} : coeficiente de actualización de costo para el cálculo del valor presente, dado que la energía se paga anualmente durante toda la vida útil del ducto

2. El costo de inspección interna (recorrida por el terreno bajo el cual está construido, poda de árboles, limpieza del camino, etc.) es una función de la longitud del ducto y se define según la siguiente fórmula:

$$C_{inspec.int.} = \beta \times L \times TAD$$

β : costo de inspección unitario [US\$ / m]

De esta forma quedan determinados todos los costos involucrados en el proyecto:

- Costos de inversión

- o Cañería
 - o Transporte
 - o Estaciones compresoras
 - o Llenado de gas natural
 - o Plantas de acopio de materiales
 - o Control de erosión
- Costos de operación
 - o Costo de energía consumida
 - o Costo de inspección interna
 - o Costo de seguro
 - o Costo de mantenimiento
- Costo de contingencias

c) Actualización de las probabilidades de elección

Una vez determinado el costo total registrado por el AH, éste se compara contra el costo total mínimo registrado hasta ese momento.

1. Si el costo total del AH es mayor que el costo mínimo registrado hasta ese momento, significa que el AH no mejoró la solución encontrada, por lo tanto las probabilidades de elección no son modificadas y el AH es eliminado del modelo.
2. Si el costo es menor, entonces el AH ha logrado mejorar la solución anterior, por lo que deberá retornar al P_O por el mismo camino atravesado para llegar al P_D en el camino de ida. A medida que atraviere los distintos puntos que conforman dicho camino, el AH altera los vectores de movimiento de las celdas, incrementando las probabilidades de elección de las celdas de dicho camino según se explica a continuación. Es importante remarcar que el AH regresa por el camino directo, es decir, que no incluye los rulos que pudo haber realizado en el camino de ida.

Asumiendo que el vector de movimiento tiene la forma genérica:

$$\vec{v} = [a \ b \ c \ d]$$

Se define a k como un parámetro del modelo que multiplicará a la coordenada que se desea actualizar. $k > 1$ por definición, lo que significa que la coordenada actualizada hará que se incremente la probabilidad de que dicha dirección de movimiento sea elegida. Esto se explica mediante un ejemplo. Asumiendo que para un determinado punto la dirección sur debe ser actualizada, esto implica que la tercera coordenada del vector de movimiento será multiplicada por el factor k .

$$\vec{v} = [a \ b \ c \cdot k \ d]$$

De esta forma, el vector normalizado se expresa como sigue:

$$\vec{r} = \left[\frac{a}{S} \ \frac{b}{S} \ \frac{c \cdot k}{S} \ \frac{d}{S} \right]$$

donde $S = a + b + c \cdot k + d$

El factor k será el mismo para todos los puntos del camino recorrido por los AH que encuentren un camino menor al mínimo.

Ahora bien, ¿cómo se determina el factor k ? En primer lugar, se analizó el comportamiento del modelo para distintos valores de k preestablecidos. A continuación se presentan los resultados de las corridas realizadas:

Cantidad de AH por corrida	5.000
Cantidad de AH _E precalentamiento	500
Creación de AH _E luego de precalentamiento	Cada 20 AH _T
Valores de k	2, 3, 4 y 5

Se graficó el costo total registrado por cada AH para valores de k de 2, 3, 4 y 5.

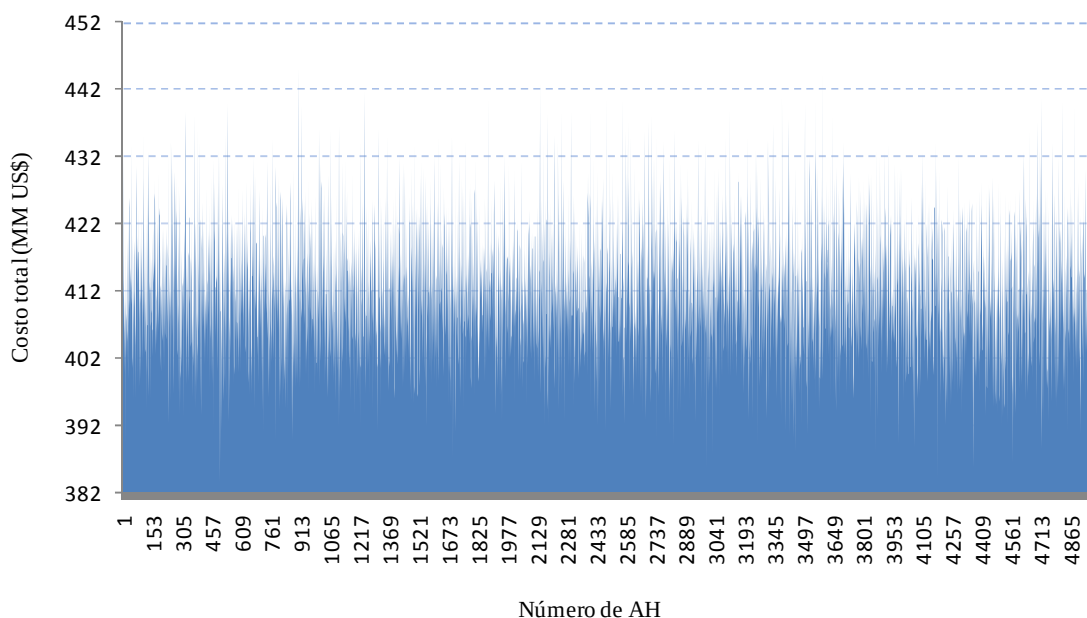


Figura 36. Costo total (MM US\$) para $k = 2$

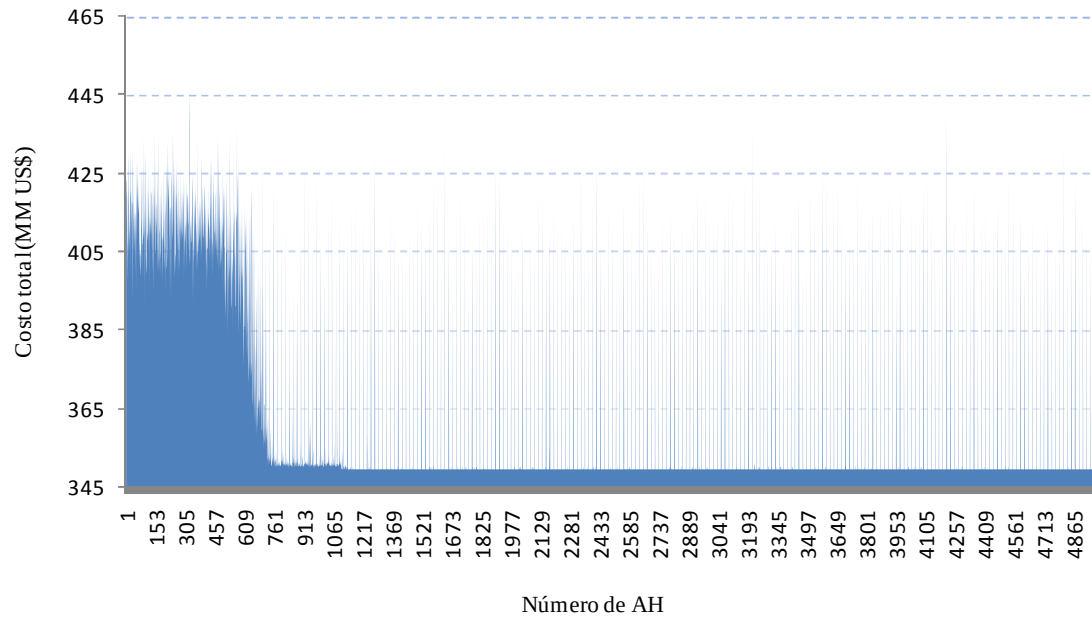


Figura 37. Costo total (MM US\$) para $k = 3$

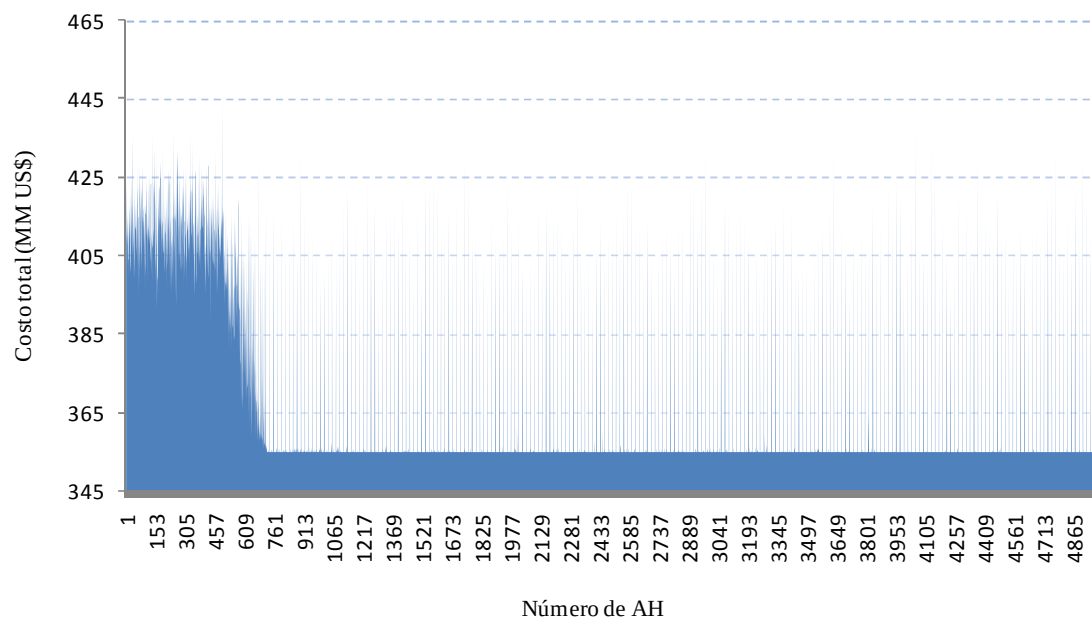


Figura 38. Costo total (MM US\$) para $k = 4$

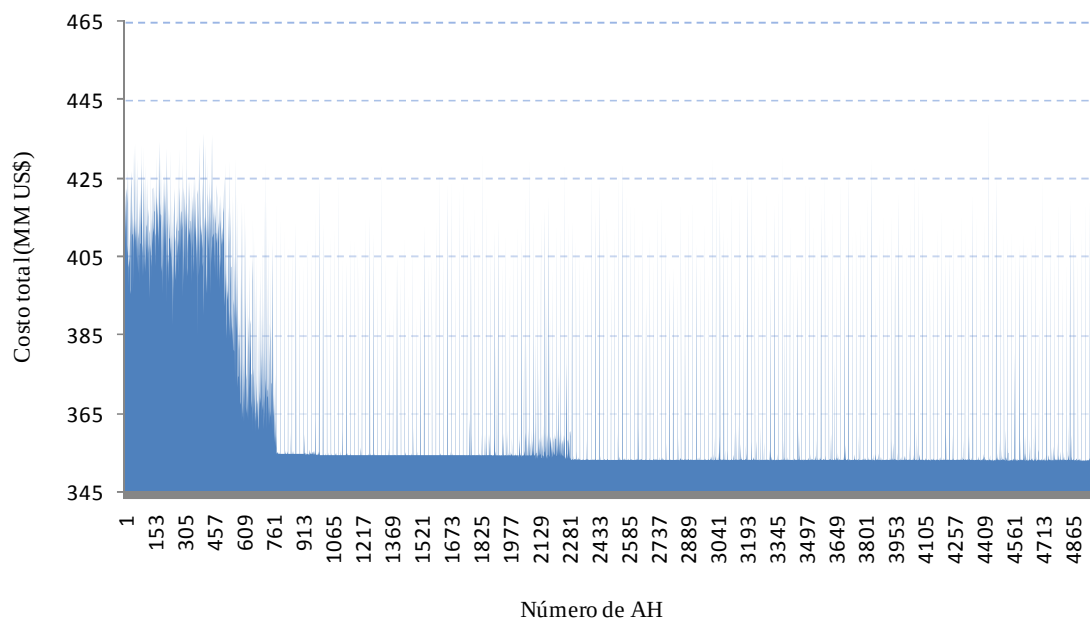


Figura 39. Costo total (MM US\$) para $k = 5$

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, cuando $k = 2$, el costo total no presenta una tendencia convergente. En cambio, a partir de $k = 3$ el costo total converge a un valor. Esto da una idea de la reacción del modelo ante variaciones en el parámetro k . Los picos que se observan una vez que el modelo ha convergido corresponden a los AH_E que recorren el terreno alternando con los AH_T .

Para detectar el valor de k al cual el modelo comienza a converger se realizaron nuevas corridas variando el valor parámetro entre 2 y 3:

Cantidad de AH por corrida	3.000
Cantidad de AH_E precalentamiento	300
Creación de AH_E luego de precalentamiento	Cada 20 AH_T
Valores de k	2 2,1 2,2 2,3 2,4 2,5 2,6 2,7 2,8 2,9 3

A continuación se presentan sólo los resultados intermedios:

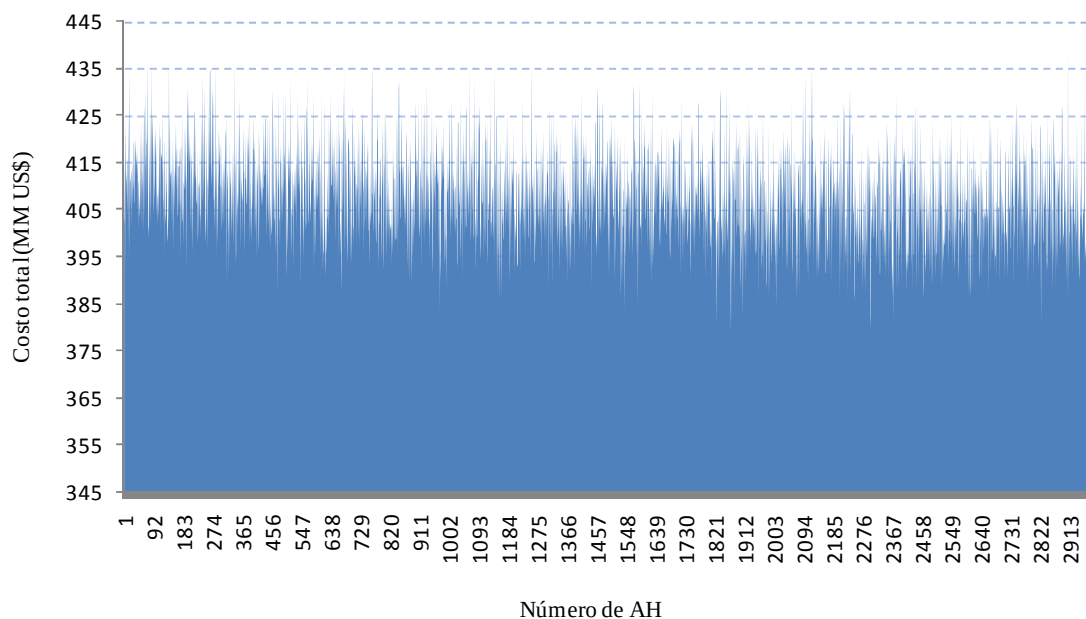


Figura 40. Costo total (MM US\$) para $k = 2,3$

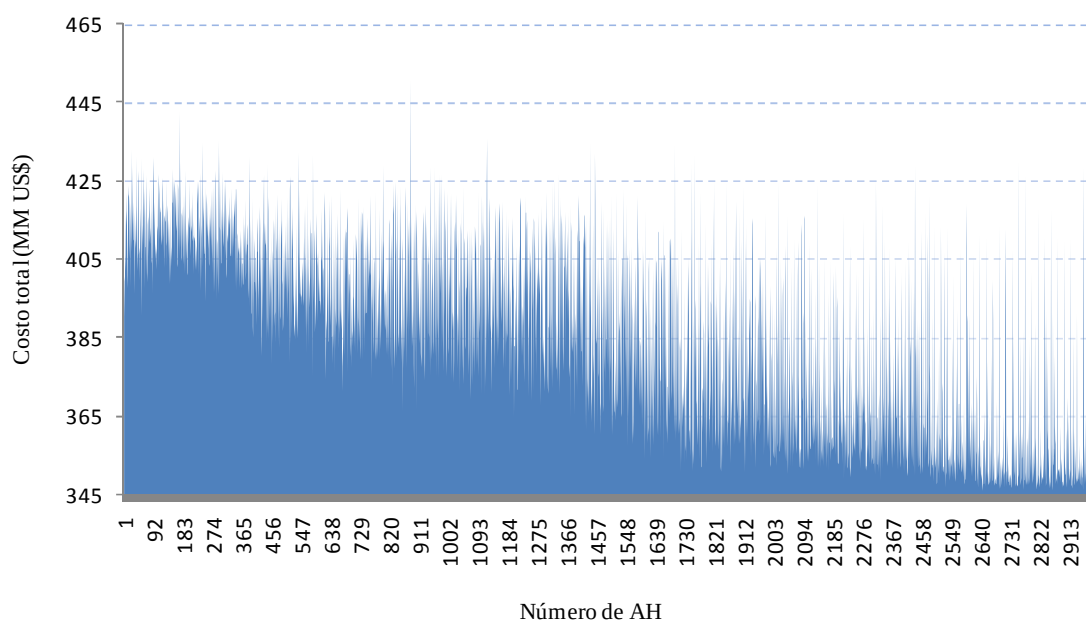


Figura 41. Costo total (MM US\$) para $k = 2,6$

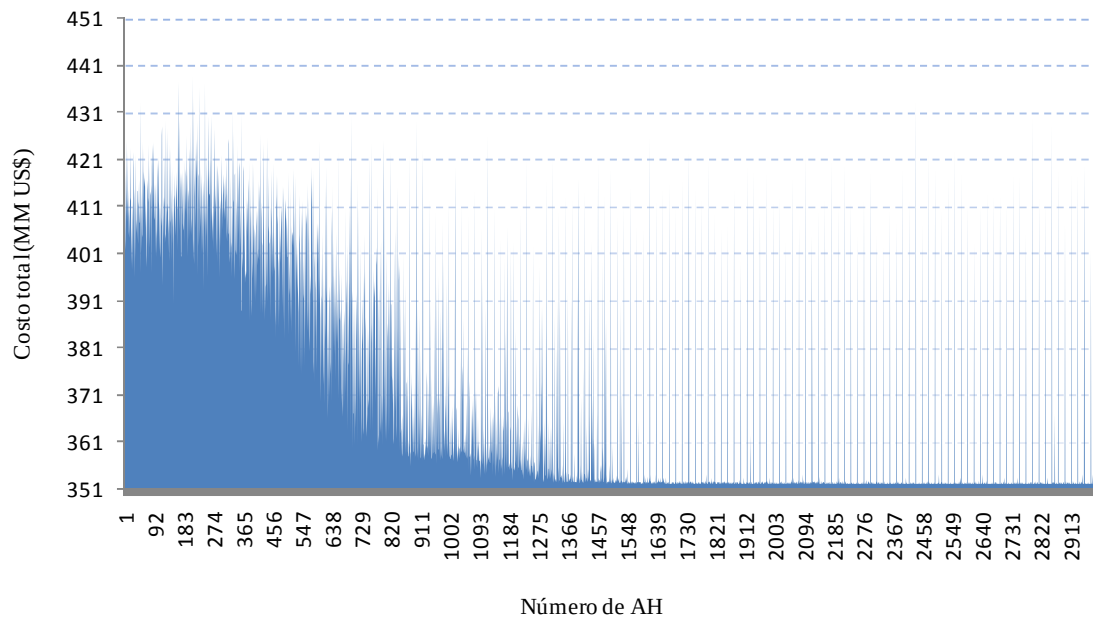


Figura 42. Costo total (MM US\$) para $k = 2,8$

Como se puede observar en los gráficos anteriores, a partir de $k = 2,6$ el modelo comienza a converger. El valor de este parámetro en el modelo debe ser lo suficientemente alto como para permitir la convergencia, pero no tan alto como para forzar una convergencia prematura. Es por eso que se decidió determinar una fórmula de cálculo de este parámetro para cada AH que mejore la solución encontrada con anterioridad al momento de su llegada a P_D . Esta fórmula dependerá de dos variables principalmente:

- En qué medida el AH mejora el costo mínimo registrado hasta el momento: cuanto más bajo sea el costo total registrado por el AH, mayor será el k dado que la probabilidad de que otros AH lo elijan deberá ser más alta.
- Qué tan lejos está el último mínimo registrado hasta el momento: cuantos más lejos esté el último mínimo registrado, mayor será el k dado que evidentemente el último mínimo encontrado es más difícil de superar.

En conclusión se ha contemplado la siguiente fórmula:

$$k = a \left(\frac{c_{\min}}{c_T} \right)^{b \left(1 + \frac{n+1}{c} \right)}$$

donde $c_{\min}$ es el costo total mínimo registrado hasta el momento de la llegada del AH, c_T es el costo total registrado por el AH, $n + 1$ es la cantidad de AH que han recorrido el terreno desde el registro de $c_{\min}$ y a , b y c son parámetros característicos de la ecuación.

Nótese que esta fórmula contempla las dos variables mencionadas anteriormente.

Para determinar los parámetros a , b y c , se ha utilizado la corrida con el parámetro $k = 2,6$ y la herramienta *solver* de Microsoft Excel (programación lineal), con las siguientes condiciones:

- El promedio de los valores de k de todos los AH que llegaron al P_D con un costo menor al costo mínimo registrado hasta el momento debe ser 2,6.
- Debido a la lógica de la fórmula, todos los parámetros deben ser positivos.
- La relación entre el desvío estándar del parámetro k de los AH después del período de calentamiento debe ser mayor al 10% de la media. Este criterio permite que los valores de dicho parámetro presenten una dispersión que premie en mayor medida las rutas de menor costo.
- El riesgo de tener un valor muy alto del parámetro k radica en que el modelo puede convergir a una solución sub-óptima. Es por eso que se estableció un techo de 6,5 para el mismo.

De esta forma, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$a = 1,33$$

$$b = 18,9$$

$$c = 82,0$$

Reemplazando estos valores en la fórmula, quedaría:

$$k = 1,33 \left(\frac{c_{\min}}{c_T} \right)^{18,9 \left(1 + \frac{n+1}{82,0} \right)}$$

d) Fin de las corridas

Se estableció un criterio de convergencia para que el modelo dejara de generar AH. La idea es terminar la corrida cuando un número determinado de AH registre un costo total que se encuentre dentro de un rango razonable alrededor del valor mínimo encontrado. Es decir, para cada AH que llega al punto de destino, se evalúan los costos totales registrados por los últimos n AH y, si se cumple un criterio determinado, entonces se termina la simulación.

En base a observaciones realizadas sobre el modelo, se estableció el siguiente criterio, que se ha verificado luego experimentalmente:

Si el 95% de los últimos 200 AH_T registra un costo total que se encuentra dentro del rango $\pm 1,0\%$ del costo mínimo registrado hasta el momento, se corta la simulación.

7.5 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

7.5.1 Verificación del modelo

Para verificar si la estructura del modelo es lógica, se realizaron algunas sensibilidades en determinadas variables y parámetros y se estudió el comportamiento del modelo.

1. Forzar al AH a recorrer una línea recta desde P_O hasta P_D .

Al forzar a un AH a recorrer una línea recta desde P_O hasta P_D se comprobó manualmente que la longitud del gasoducto es la mínima posible de obtener. El costo total de dicho gasoducto no es el mínimo a pesar de tener la menor longitud.

2. Variar los costos unitarios de inversión y de operación del gasoducto.

Al subir o bajar ambos costos el costo total se comporta de la misma forma y el camino encontrado no varía.

3. Variar el costo de atravesar restricciones.

Aumentando mucho el costo de alguna restricción, el AH evita pasar por ella.

7.5.2 Validación del modelo

Para validar el modelo se han realizado varias corridas del mismo y se han comparado los resultados obtenidos contra datos recopilados sobre gasoductos reales. Dado que la información publicada sólo hace referencia a los costos de construcción del gasoducto, la comparación se realizará sólo para este tipo de costos. Es importante destacar que cada proyecto es de una naturaleza muy distinta por lo que la comparación se hace sólo a modo de referencia, para verificar que los valores obtenidos por el modelo están dentro de un rango lógico. Los costos unitarios varían considerablemente de país a país y esto puede traer como consecuencia que los costos de construcción sean totalmente diferentes. La siguiente tabla presenta un detalle de distintos proyectos de gasoductos en distintas regiones del mundo:

Región	Costo (MM US\$)	Longitud (Km.)	Diámetro (")	Costo unitario por pulaga metro
Algeria	600	746	24	34
Bahamas	144	154	24	39
Bolivia	170	248	16	43
Brasil	206	186	20	55

Fuente: Worldwide Construction Update

Tabla 7. Proyectos de gasoductos alrededor del mundo

7.5.3 Resultados de la verificación y validación

La verificación y validación del modelo han sido dos etapas sumamente importantes en la elaboración del modelo dado que a partir de ellas se han realizado distintos ajustes al modelo que han permitido, por un lado, hacerlo más eficiente y, por otro, entender mejor su funcionamiento. Estas dos etapas son las que han insumido mayor tiempo en la construcción de la herramienta.

A continuación se presenta un detalle de las modificaciones más importantes realizadas a partir de la verificación y la validación del modelo:

- Revisión y mejoras del código.
- Se estableció una franja centrada en la diagonal del terreno para acotar el espacio de movimiento del AH lo que redujo el tiempo de procesamiento. En efecto, las pruebas realizadas demostraron que se necesitaba demasiado tiempo para que el

modelo encuentre una solución óptima dado que los AH recorría zonas del terreno que no forman parte de la lógica en este proyecto.

- Originalmente, todas las direcciones de movimiento en todos los puntos del terreno eran equiprobables. De esta forma, los AH se movían en las cuatro direcciones cardinales hasta que encontraran el P_D . Esto traía dos grandes problemas:
 - los recorridos realizados por los AH eran totalmente indirectos generando gasoductos cuyos costos eran hasta treinta veces mayores que los considerados dentro de parámetros normales, y
 - los AH tardaban demasiado tiempo en encontrar el P_D .

A partir de las pruebas realizadas, se decidió construir un vector de movimiento que oriente al AH a moverse en la dirección de la recta que une al P_O con el P_D . Esto redujo el tiempo de procesamiento y permitió encontrar soluciones más acordes con la realidad del problema.

- Se han ajustado los parámetros, variables y ecuaciones de forma tal de que el modelo refleje adecuadamente el problema y permita encontrar soluciones reales.
- También se ha revisado y optimizado el código en reiteradas oportunidades de forma tal de generar un modelo más eficiente, con el menor tiempo de procesamiento de la información y con la mayor veracidad posible.

7.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

7.6.1 Período de calentamiento (warm-up)

En todo modelo es necesario un período de calentamiento para superar los estados transitorios y que el modelo funcione de manera estable. En este modelo, el período de calentamiento consistirá en el envío de una determinada cantidad de AH_E . El objetivo es que estos AH_E recorran el terreno en forma aleatoria buscando distintos caminos que unan al P_O con el P_D , pero sin alterar los vectores de movimiento de las celdas. Sólo cuando el último AH_E haya terminado su recorrido, se seleccionará el menor costo y éste será utilizado como barrera para que los AH_T comparen su costo total contra este valor y así se inicie el período de actualización de probabilidades.

En base a numerosos experimentos realizados con el modelo, se ha determinado que el período de calentamiento consistirá en la creación de 700 AH_E . Esta cantidad garantiza contar con un costo mínimo razonable de barrera y la actualización de esta ruta se hará con un k igual a 2,6.

7.6.2 Duración de las corridas

Las corridas durarán hasta que el criterio de convergencia corte la simulación.

7.6.3 Plan de cuadros

En esta sección se definen los datos que se desean obtener de la corrida del modelo, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Concepto	Caso base	Gasoducto real	Sensibilidad con incremento de costos unitarios	Sensibilidad con reducción de costos unitarios
Longitud				
Diámetro				
Presión máxima				
Relación de compresión				
Cantidad válvulas				
Cantidad estaciones compresoras				
Presión de llegada a P_D				
Costo total				
Costo de inversión				
Costo de operación				

Tabla 8. Plan de cuadros

Por supuesto, el camino recorrido correspondiente al gasoducto óptimo es lo que se pretende determinar, por lo tanto sus coordenadas también serán registradas y, además, el mismo podrá ser observado en la herramienta.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 CASO BASE

Se realizó una corrida del modelo con todos los parámetros y variables del caso real original. El resultado de la corrida óptima, de 223 km., se presenta en la siguiente imagen:

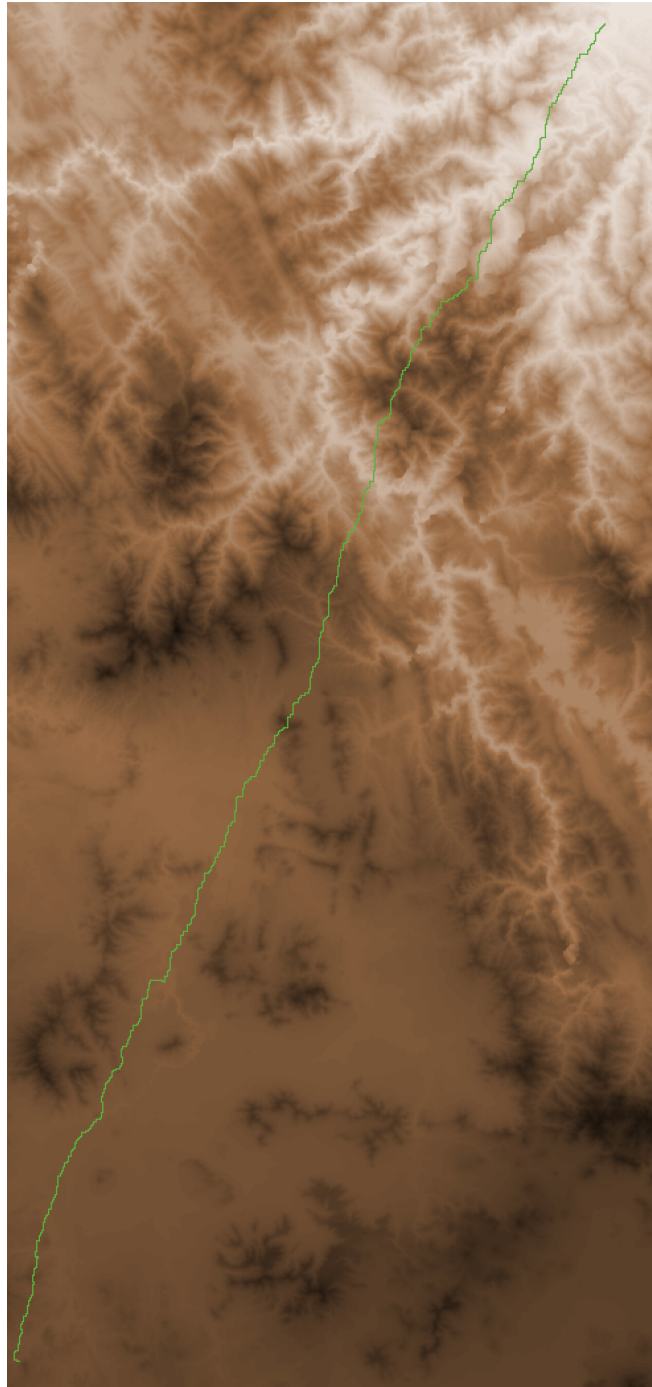


Figura 43. Traza del gasoducto óptimo según el modelo

No se cuenta con información sobre el costo y dimensiones del gasoducto del caso real por lo que se realizó una corrida en el modelo de un AH que siguiera dicho recorrido para generar información comparable.

En la siguiente imagen se observa un comparativo entre ambas trazas, siendo la verde la obtenida por el modelo y la celeste la del caso real:

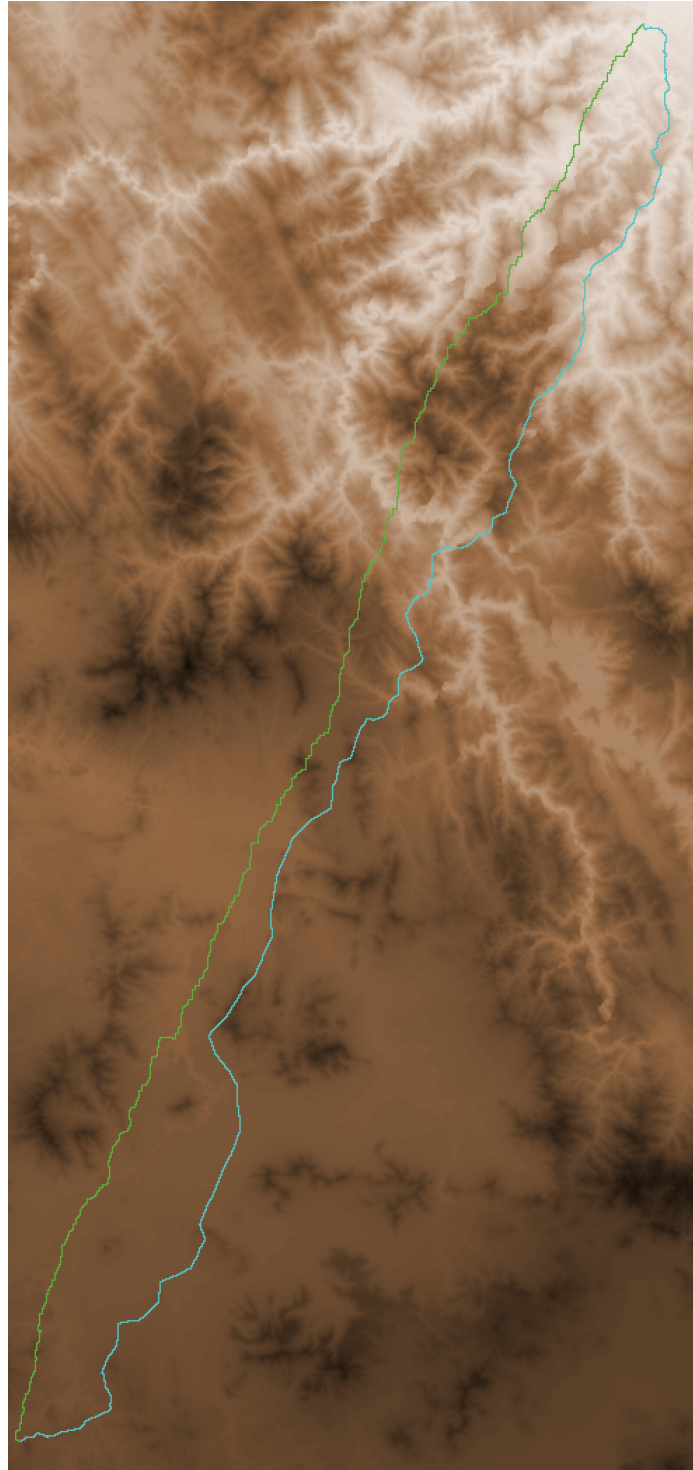


Figura 44. Recorrido óptimo según el modelo vs. recorrido del caso real

La siguiente tabla presenta las especificaciones óptimas para cada uno de los gasoductos:

Concepto	Modelo	Gasoducto real
Longitud	222,7 km.	253,3 km.
Diámetro	0,88 m.	0,81 m.
Presión máxima	5,6 MPa	6,8 MPa
Relación de compresión	1,46	1,46
Cantidad estaciones compresoras	1	1
Cantidad válvulas	8	9
Presión de llegada a P_D	3,8 MPa	4,7 MPa
Costo total	US\$ 346 MM	US\$ 405 MM
Costo de inversión	US\$ 278 MM	US\$ 325 MM
Costo de operación descontado	US\$ 68 MM	US\$ 80 MM

Tabla 9. Cuadro comparativo de gasoductos

Como se puede ver tanto en la figura 44 y en la tabla 9 la ruta seleccionada en el caso real y la obtenida con el modelo son similares aunque presentan diferencias pequeñas en su recorrido, estando la ruta óptima calculada con el modelo unos km al Norte de la ruta del caso real en todo el recorrido del ducto, y en sus especificaciones. En proyectos de estos niveles de costo de inversión y operación esta pequeña desviación en la traza puede representar un ahorro significativo en la inversión inicial y en el flujo de fondos anual del ducto en operación.

Las siguientes figuras presentan un detalle de la información de costos:

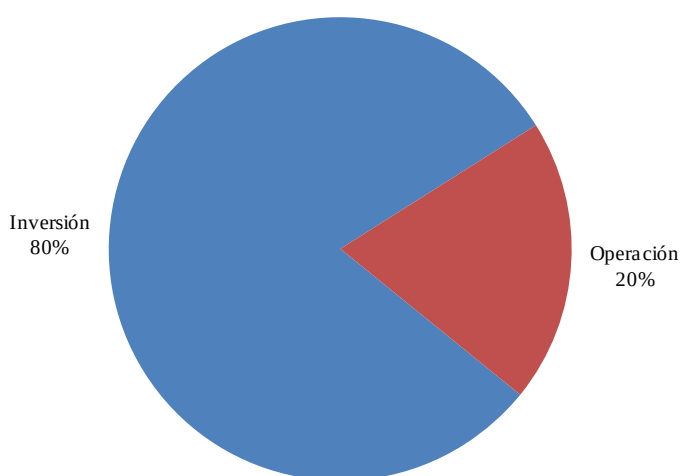


Figura 45. Apertura de costos en inversión y operación

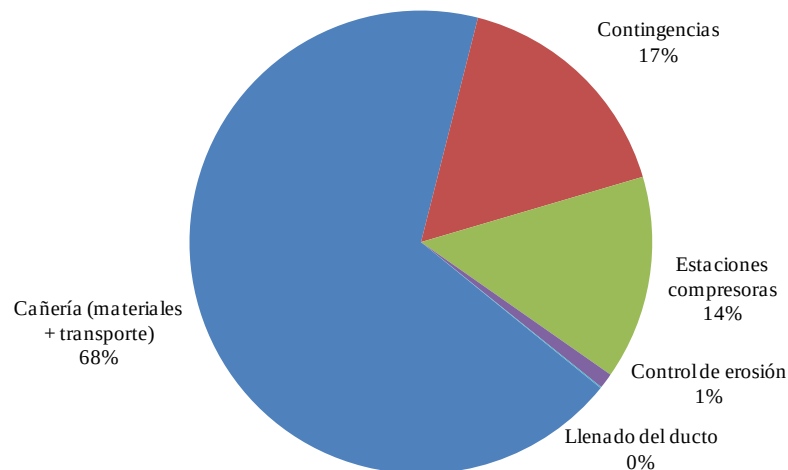


Figura 46. Apertura de costos de inversión

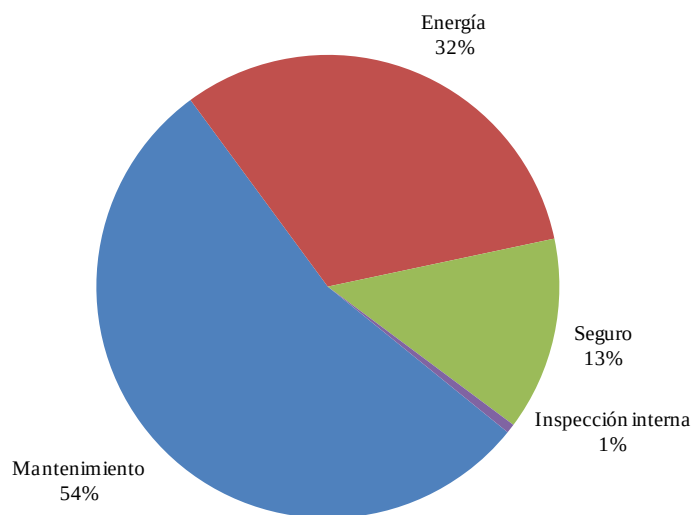


Figura 47. Apertura de costos de operación

Esto implica que el gasoducto encontrado con el modelo ha registrado un costo total que es un 15% (59 MM US\$) menor al costo total del gasoducto del caso real, éste último también determinado con el modelo. El recorrido total también presenta una reducción en su longitud de un 12% respecto al gasoducto del caso real.

A continuación se presenta el flujo de fondos de cada gasoducto junto con un cuadro en el que se muestra el ahorro de fondos que presenta el proyecto óptimo del modelo:

	Año inicial	Año operativo (25 años)	Recupero llenado de ducto (último año)
Inversión	(277,5)		
Operación		(8,5)	0,2
VAN	(346,2)		
Tasa de descuento	11,50%		

Tabla 10. Flujo de fondos para el gasoducto según modelo (en MM US\$)

	Año inicial	Año operativo (25 años)	Recupero llenado de ducto (último año)
Inversión	(324,6)		
Operación		(9,9)	0,2
VAN	(405,1)		
Tasa de descuento	11,50%		

Tabla 11. Flujo de fondos para el gasoducto del caso real (en MM US\$)

	Año inicial	Año operativo (25 años)	Recupero llenado de ducto (último año)
Inversión	47,1		
Operación		1,5	(0,0)
VAN	58,9		
Tasa de descuento	11,50%		

Tabla 12. Ahorro de fondos con el modelo

A continuación se muestra un gráfico con la comparación entre los flujos de fondos.

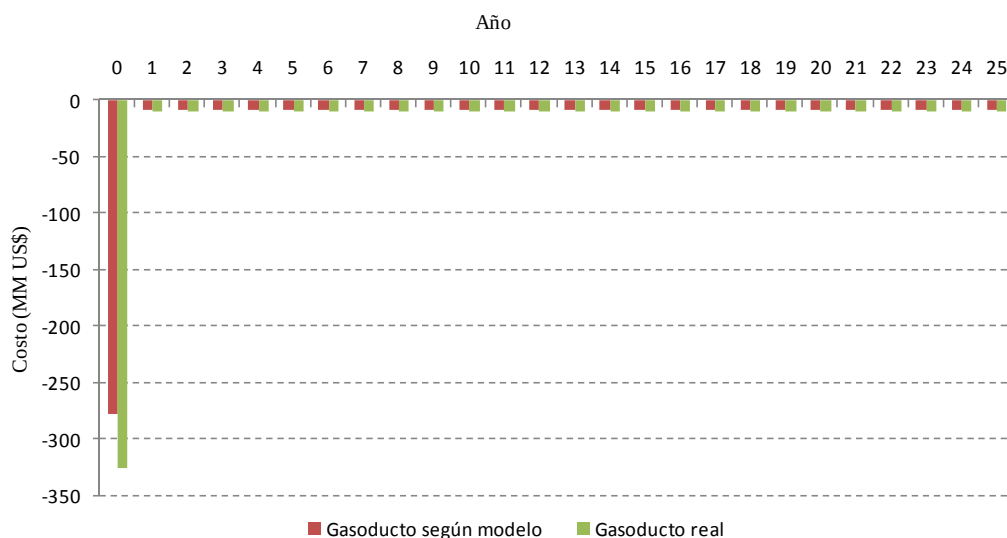


Figura 48. Flujo de fondos del gasoducto según modelo y real

Como se desprende de las tablas anteriores, el proyecto óptimo según el modelo genera un ahorro de US\$ 59 millones en términos de valor presente.

En términos de flujo anual, el proyecto óptimo según el modelo genera un ahorro de US\$ 1,5 millones por año.

8.2 ANÁLISIS DEL CASO BASE

A continuación se presenta el gráfico de la corrida del caso base con el modelo en el que se muestra el costo obtenido por cada AH:

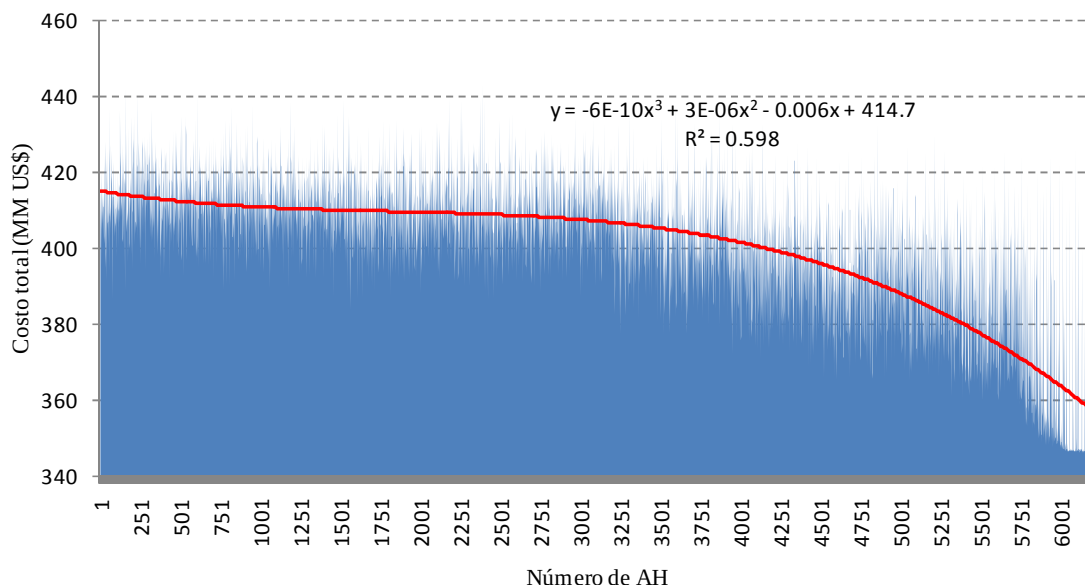


Figura 49. Evolución de la corrida óptima según modelo

Los primeros 700 AH corresponden al período de precalentamiento (warm-up) del modelo. A partir de allí se observa claramente el funcionamiento del aprendizaje de los AH. Los picos que se observan corresponden a los AH_E. Se puede ver como inicialmente los AH obtienen valores superiores a los 400 MM US\$, los cuales decrecen para llegar finalmente al mínimo mencionado de 346.2 MM US\$. La curva roja representa un ajuste del Costo Total de cada AH mediante una curva polinomial de grado 3, con un valor de R² de 0,6 lo cual se consideró aceptable para obtener una noción de la tendencia del comportamiento de aprendizaje por parte de los AH. Vale aclarar que esta curva sufre una pequeña distorsión (sin la cual su R² sería mayor) por la inclusión de los AH_E en su cálculo, ya que éstos no consideran el aprendizaje de hormigas anteriores y se mueven por el terreno sin considerar la feromona dejada por otras hormigas. A pesar de esto, y por mostrar una tendencia, la curva muestra claramente un período de estabilidad con reducciones bajas del coto total y una tendencia claramente decreciente del mismo a partir del AH 3.500 aproximadamente. En caso de no fijar un criterio de terminación de la corrida y permitir la creación de mayor número de AH se vería una asíntota en la cola derecha de esta curva.

El modelo necesitó de 6.228 AH para converger, lo que demandó un tiempo aproximado de unos cuarenta minutos. El siguiente gráfico muestra la evolución del criterio de convergencia, el cual es definido como el porcentaje de AH_T, dentro de los últimos 200 creados cuyo Costo Total se encuentra en un rango de +/- 1% respecto del mínimo encontrado al momento de llegada de cada AH_T al P_D. Es interesante observar cómo funciona la convergencia: cuando el modelo encuentra un camino óptimo la convergencia es acelerada (lo cual se puede ver a partir del AH 5.400 aproximadamente).

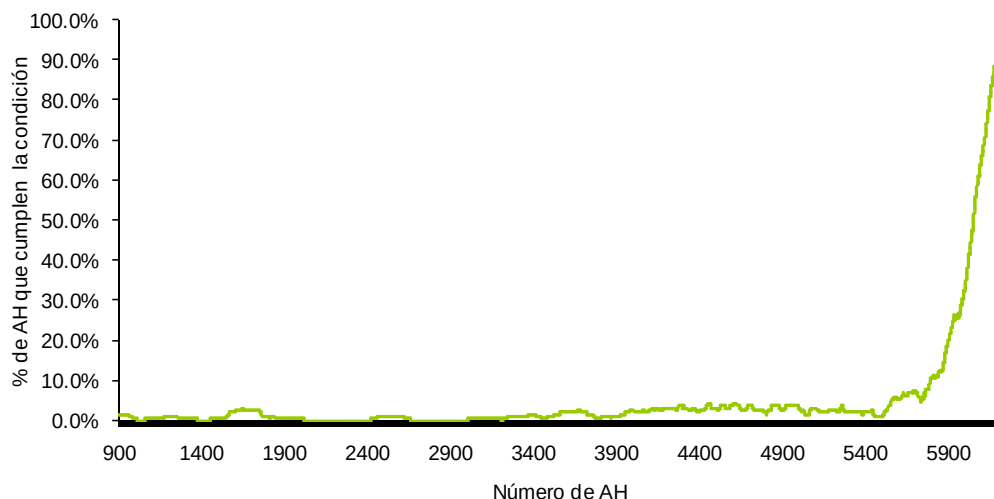


Figura 50. Criterio de convergencia del modelo

En el siguiente gráfico se realiza un segundo análisis de convergencia, en el mismo se muestra la evolución de la media móvil para los últimos 100 AH_T del diferencial del Costo Total de cada AH_T que llega a P_D respecto al costo total mínimo encontrado hasta el momento. Se observa el mismo comportamiento de convergencia acelerado del gráfico anterior.

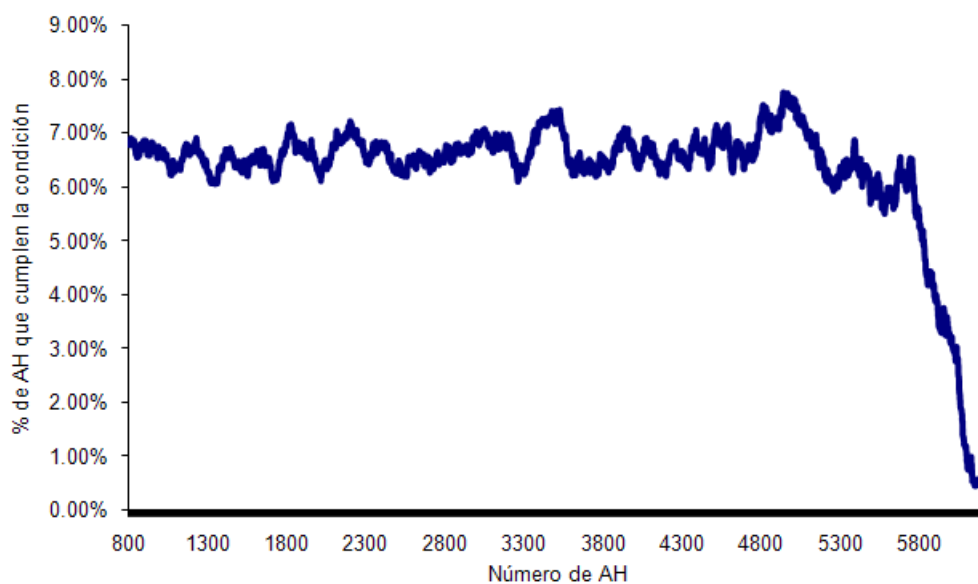


Figura 51. Validación mediante un nuevo criterio de convergencia

Por último, se realiza una validación del parámetro k , el cual actualiza la distribución de probabilidades de los puntos del terreno. La siguiente tabla muestra algunos resultados del parámetro, demostrando que están en línea con lo que se había planteado en la teoría del capítulo anterior:

Parámetro	Valor
Promedio k después de warm-up	2,87
Desvío estándar k después de warm-up (% prom)	40,3%
K máximo después de warm-up	6,50
K mínimo después de warm-up	2,33

Tabla 13. Análisis del parámetro k

8.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizaron algunos análisis de sensibilidad para el caso base. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

	Caso base	Sensibilidad 1	Sensibilidad 2
Variación costos unitarios de inversión respecto a caso base	0%	20%	-20%
Variación costos unitarios de operación respecto a caso base	0%	20%	-20%
Costo total (MM US\$)	345	414	276
Longitud del camino recorrido (km.)	223	223	223

Tabla 14. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad para los casos 1 y 2 han demostrado valores lógicos. Incrementar todos los costos unitarios del modelo en un 20% dio como resultado el mismo incremento en el costo total del gasoducto. De igual forma, reducir todos los costos unitarios del modelo en un 20% dio como resultado la misma reducción en el costo total del gasoducto. Más interesante es observar que el camino óptimo encontrado resultó ser exactamente el mismo en todos los casos, lo cual también tiene sentido que suceda.

Se podría esperar una diferencia en la longitud del ducto y en su ruta óptima en caso de que la variación de los costos de inversión y los de operación tengan una variación de signo contrario (variación positiva de costos de inversión y negativa de los de operación y viceversa). Sin embargo este caso no fue analizado por ser considerado de ocurrencia poco probable ya que existe una dependencia entre ambos costos principalmente por dos motivos:

- Fuerte dependencia de los costos de operación con los de inversión ya que, entre los de operación, el mantenimiento y el seguro son un porcentaje de la inversión inicial.
- Los costos tienen una relación con la demanda mundial de construcción de ductos por lo que si aumenta la demanda de construcción en el futuro esto se verá reflejado como un aumento en la demanda de operación y mantenimiento de los mismos.

9 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo planteado al comienzo de este trabajo fue el de encontrar una solución que permita encontrar en forma automática la traza que debe seguir un gasoducto, minimizando el valor presente del costo total de su operación e inversión, cumpliendo con requerimientos comerciales, medioambientales, legales, sociales, etc. Utilizando la teoría de algoritmos basados en comportamientos de enjambre, la simulación como herramienta y recurriendo a la mecánica de fluidos y a desarrollos matemáticos, se ha logrado construir una herramienta de análisis que mejora diversos aspectos de las metodologías aplicadas en la actualidad, que está basada en la generación de alternativas de recorridos dentro del laboratorio y luego validarlas con diversos análisis y recorridos en campo.

Los resultados obtenidos a través de las corridas de simulación han encontrado una ruta que presenta una reducción del costo total de un 15%, con las siguientes características:

- reducción de longitud.
- 80% de costo de inversión y 20% de costo de operación descontado.

Adicionalmente a estos resultados, existen otros aspectos que se han beneficiado a través de la utilización de la herramienta:

En primer lugar, la herramienta provee soporte analítico y computacional a la técnica implementada en la actualidad. De esta forma, la herramienta facilita el análisis de alternativas, obteniendo una mayor certeza sobre el camino óptimo encontrado. La decisión final a tomar sobre la traza tendrá mayor sustento analítico.

En segundo lugar, la herramienta reduce notablemente los tiempos de procesamiento de información. En efecto, tal como ya se ha explicado, la determinación actual de la traza involucra personal de distintas áreas de las empresas dado que por lo general el área de ingeniería y construcción y el área de costos se encuentran separadas. Al involucrar más recursos se generan reuniones, pedidos de información, demoras, análisis conjuntos, etc. lo que suele demorar un tiempo considerable. Con la herramienta, sólo es necesario averiguar los datos necesarios y esta tarea puede estar a cargo de una única área que sea la responsable de realizar la estimación inicial de la traza. Posteriormente, cuando se ingrese en una etapa de análisis detallado, sí es necesario el involucramiento de expertos en la materia y de las distintas áreas involucradas, pero ya a esta altura la determinación inicial de la traza ha sido realizada. Otro aspecto relacionado con el involucramiento de distintos sectores de una empresa es el costo de los recursos, que finalmente se traslada al cliente. Reduciendo el personal involucrado y el tiempo de procesamiento de la información permiten reducir los costos no sólo para las empresas constructoras sino también para los clientes de las mismas.

Adicionalmente se ha elaborado un modelo que resuelve un problema de camino crítico en tres dimensionados, tema que está muy poco desarrollado y sobre el que prácticamente no se encuentran referencias bibliográficas, por lo que es una base para otras aplicaciones.

La herramienta no sólo tiene una interfaz simple que puede ser rápidamente aprendida sino que también tiene incorporada una herramienta de análisis que permite generar distintos escenarios variando uno o más parámetros al mismo tiempo o en secuencia y obtener todos los resultados que se deseen para analizar. Además, la lógica del modelo se ha codificado de tal forma que una persona con conocimientos sobre el programa y su codificación puede realizar las modificaciones que desee.

En lo que respecta a las futuras líneas de investigación, se pueden mencionar dos focos de análisis principalmente: investigación sobre la herramienta e investigación sobre la implementación de la herramienta.

Investigación sobre la herramienta

El modelo desarrollado en este trabajo ha demostrado resultados sólidos y verificables con la realidad. Las diversas pruebas realizadas sobre el mismo han permitido validar su funcionamiento a través de numerosas corridas. Sin embargo, a continuación se proponen algunas líneas para continuar con la investigación de la herramienta, dado que existen otros enfoques y algoritmos que podrían implementarse y testearse.

- Alterar el vector de movimiento de forma tal de que todas las direcciones de movimiento sean equiprobables. El tiempo de convergencia es bastante alto, cuestión que podría resolverse con un ordenador más potente y mayor disponibilidad de tiempo.
- Distintas lógicas de actualización de probabilidades pueden ser planteadas, según los distintos algoritmos ACO desarrollados en el capítulo 4. Por ejemplo, podría probarse que cada AH que regrese al P_0 modifique las probabilidades de los puntos por los que pasa: si la solución es buena la actualización será más pronunciada y si es mala será poco significativa o incluso podría ser decreciente para dichos puntos. A priori parecería que esta solución no es la más conveniente dado que podría descartar tramos de caminos que podrían formar parte de un camino óptimo.
- Distintos algoritmos de optimización del dimensionamiento del ducto podrían plantearse, por ejemplo el algoritmo de Bellman-Ford y Dijkstra, un sistema de ecuaciones para hallar mínimos absolutos en ecuaciones de costos, aunque parecería ser complejo de implementar.
- La herramienta es fácilmente reprogramable para otros ductos: oleoductos, acueductos, etc. u otros problemas de camino crítico en tres dimensiones. Si bien en todos los casos el objetivo es encontrar la ruta óptima entre dos puntos

geográficos, cada uno de ellos requieren considerar algunos aspectos distintos (por ejemplo, cavitación en líquidos, altura, compresibilidad, etc.).

- Reducir el valor del parámetro k promedio.
- Utilizar NetLogo en tres dimensiones.

Investigación sobre la implementación de la herramienta

Para aprovechar al máximo su potencial, es importante investigar sobre la integración de esta herramienta con otros programas que participan del proceso de construcción de un ducto, por ejemplo, con herramientas de ingeniería de detalle y de simulación hidráulica y herramientas CAD. De esta forma, la herramienta podría comercializarse como un módulo independiente que tenga integración con otros programas o dentro de un gran paquete de herramientas para construcción de ductos.

La inteligencia de enjambre es una disciplina relativamente nueva. Los científicos e investigadores han elaborado rigurosos modelos matemáticos para describir el comportamiento de los insectos sociales y en estos últimos años han comenzado a aplicar estas técnicas a cuestiones de negocios. Sin embargo, a pesar de los casos de éxito en reconocidas compañías multinacionales, su divulgación y uso aún hoy en día es baja.

La construcción y tendido de ductos es una actividad sumamente importante para la actividad comercial y humana por lo que su optimización resulta de suma importancia. La actividad de tendido de ductos está en crecimiento constante. A continuación se presentan algunos proyectos de ductos en Latinoamérica, los cuales se podrían ver beneficiados por el uso de la herramienta:

Referencia en el mapa	Interconexión	Gasoducto	Longitud (Km)	Capacidad (MMPCD)
1	México-Guatemala-El Salvador	Salina Cruz-Guatemala-San Salvador	950	n/a
2	El Salvador-Nicaragua	San Salvador-Managua	613	n/a
3	Nicaragua-Costa Rica-Panamá	Managua-San Jose-Colon	1	n/a
4	Uruguay-Brasil	Cruz del Sur (fase II) Montevideo-Porto Alegre	900	530
5	Argentina-Brasil	Uruguayana-Porto Alegre	600	530
6	Argentina-Bolivia-Paraguay	Tarija-Asunción-Rosario	1,5	710
7	Perú-Chile	Pisco-Tocopilla	1,2	1.060
8	Venezuela-Brasil-Uruguay-Argentina	Gasoducto del Sur	8	5.000
9	Perú-Bolivia	Camisea-Carrasco	900	1.400
10	Venezuela-Colombia	Paraguana-Maicao	330	210

Tabla 15. Principales proyectos de gasoductos en Latinoamérica



Figura 52. Principales proyectos de gasoductos en Latinoamérica

10 ANEXOS

10.1 FACTOR DE DISEÑO

Clase de localización	Factor de diseño
Clase de localización 1, división 1	0,80
Clase de localización 1, división 2	0,72
Clase de localización 2	0,60
Clase de localización 3	0,50
Clase de localización 4	0,40

Tabla 16. Cálculo del factor de diseño

Facilidad	Clase de localización				
	Div. 1	Div. 2	2	3	4
Ductos, principales y líneas de servicio	0,80	0,72	0,60	0,50	0,40
Cruce de caminos, vías férreas sin revestimiento:					
(a) Caminos privados	0,80	0,72	0,60	0,50	0,40
(b) Caminos públicos no mejorados	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40
(c) Caminos, autopistas o calles públicas, con superficie dura y vías férreas	0,60	0,60	0,50	0,50	0,40
Cruce de caminos, vías férreas con revestimiento:					
(a) Caminos privados	0,80	0,72	0,60	0,50	0,40
(b) Caminos públicos no mejorados	0,72	0,72	0,60	0,50	0,40
(c) Caminos, autopistas o calles públicas, con superficie dura y vías férreas	0,72	0,72	0,60	0,50	0,40
Usurpación paralela de ductos y principales sobre caminos y vías férreas:					
(a) Caminos privados	0,80	0,72	0,60	0,50	0,40
(b) Caminos públicos no mejorados	0,80	0,72	0,60	0,50	0,40
(c) Caminos, autopistas o calles públicas, con superficie dura y vías férreas	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40
Ensamblados fabricados	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40
Ductos en puentes	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40
Facilidades y medidores de control de presión y flujo	0,60	0,60	0,60	0,50	0,40
Cañería de estación de compresión	0,50	0,50	0,50	0,50	0,40
Cerca de concentraciones de personas en clases de localización 1 y 2	0,50	0,50	0,50	0,50	0,40

Tabla 17. Cálculo del factor de diseño según tipo de accidente

10.2 PROGRAMAS DE SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
ABLE (Agent Building and Learning Environment)	Construcción de agentes inteligentes utilizando aprendizaje y razonamiento de máquinas	Código abierto (gratis para uso académico y no comercial)	Able Rule Language (ARL)	OS/2; Windows 95; Windows 98; Windows NT; y UNIX (cualquier Java 2 JVM)	FAQ; tutorial; ejemplos; foros de discusión; correo electrónicos a desarrolladores; publicaciones seleccionadas; API; documentación	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Adaptive Modeler	Modelo de simulación de mercado basado en agentes para proyectar precios de acciones y otros activos	Propietario, evaluación gratis disponible para investigación y experimentación (algunas limitaciones pero sin expiración)	No requiere conocimientos de programación. Una forma adaptativa de programación genética es utilizada para crear las reglas de trading. El usuario puede seleccionar las funciones a ser utilizadas por el programa.	Windows 2000, NT 4.0, XP o Vista o cualquier otra plataforma que soporte Microsoft .Net 2.0 o superior	FAQ, documentación, foro, soporte por correo electrónico	Desconocido	Desconocido	No tiene gráficos 3D reales pero las propiedades de hasta 3 agentes pueden ser visualizadas utilizando gráficos en 2D y color (en tiempo real).
ADK (Tryllian Agent Development Kit)	Aplicaciones distribuidas a gran escala, agentes móviles (distribuidos)	Licencia doble: aceptar la Licencia Pública General Reducida o contactar Tryllian para adquirir la licencia de fuente cerrada.	Java	Windows; Unix; Big Iron IBM mainframes4; donde se pueda ejecutar el Java Standard Edition version 1.4; Sun Java Runtime Environment version 1.3.1 o 1.4; JDK 5.05; cualquier plataforma donde Sun haya puesto disponible un JVM; Windows 2000; Windows XP; Solaris; GNU/Linux; Adicionalmente, el ADK ha sido testeado en OS/400 y OS/370. No soporta Mac OS X, pero parte del desarrollo del ADK es realizado en Mac OS X.	FAQ; reporte de errores; documentación; lista de correo; guía de acceso rápido; ejemplos; correo electrónico para soporte adicional; API	Sí	Desconocido	Desconocido
AgentBuilder	Sistemas de agentes múltiples para propósitos generales	Propietario; Licencias académicas con descuento disponibles	Knowledge Query y Manipulation Language (KQML); Java; C; C++	Windows NT; Windows 2000; Windows XP; Linux; Sun Solaris; cualquier plataforma con Java Virtual Machine	Consultoría; capacitación; ejemplos; FAQ; manuales de usuario; reporte de errores; lista de correo	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
AgentSheets	Simulación educativa para los grados K-12 en ciencias sociales, matemáticas, y ciencias.	Propietario	Visual AgenTalk; puede ser exportado a Java.	Windows; Mac OS X; debería funcionar en cualquier Java Virtual Machine	Manuales; videos tutoriales; FAQ; lecturas recomendadas sobre programación y simulación; contacto personal con desarrolladores; capacitación escolar; guías para profesores	Desconocido	Desconocido	Desconocido
AnyLogic	Basado en agentes para propósitos generales; simulaciones distribuidas	Propietario	Java; UML-RT (UML para tiempo real)	Los modelos AnyLogic 6 son aplicaciones Java (o applets) y corren en cualquier plataforma habilitada para Java o cualquier browser habilitado para Java con la siguiente versión de JRE (Java Runtime Environment): JRE 1.5.0 o superior; Java plug-in (necesario para correr modelos en el browser) se instala opcionalmente con el JRE; Windows Vista, x86-32; Windows XP, x86-32; Mac OS X 10.4.1 o superior, Universal; SuSE Open Linux 10.2 o superior, x86-32; Ubuntu Linux 7.04 o superior, x86-32	Demos; capacitación; consultoría; base de conocimientos; foro online; preguntas; documentación; referencias seleccionadas	Desconocido	Cualquier edición profesional de AnyLogic 6 incluye funcionalidad GIS. Formato Shapefile está soportado.	Editor 3D no incluido, pero es posible usar Java para animar modelos en 3D.
Ascape	Modelo para propósitos generales basado en agentes.	BSD	Java	Windows; Macintosh; Unix; Linux; web	Foro online (lista de correos); referencias seleccionadas; documentación; API	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Brahms	Medio ambiente de agentes múltiples para simular procesos organizacionales	Gratis, pero únicamente disponible para investigación o fines no comerciales	Lenguaje Brahms (lenguaje orientado al agente)	Windows 2000; Windows XP; Linux; Sparc/Intel Solaris; y Mac OS X	Documentación; API; tutoriales; foros de discusión; contactos de email	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Breve	Construir simulaciones 3D de sistemas de agentes múltiples y vida artificial.	GPL	Lenguaje simple orientado al objeto llamado Steve; comportamiento de los agentes puede ser escrito en python	Mac OS X; Linux; y Windows	Correo electrónico al desarrollador; tutoriales; FAQ; foros; sección de defectos; API; documentación	Desconocido	Desconocido	Sí

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
Construct	Modelo multi-agente de comportamiento grupal y organizacional	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Cormas (Common-pool Resources and Multi-Agent Systems)	Manejo de recursos naturales, desarrollo rural y ecología	Libre para modificar pero no para distribuir la versión modificada	Smalltalk (requiere VisualWorks para ejecutarse)	Linux; Macintosh; Unix; Windows	Capacitación, referencias seleccionadas; ejemplos; foro online; correo electrónico a desarrolladores; documentación	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Cougaar	Sistemas multi-agentes; altamente distribuidos, escalable, confiable, aplicaciones sobrevivientes; dominio independiente; distribuido a gran escala, complejo, intensivo en datos (puede ser configurado para aplicaciones de pequeña escala)	Licencia de código abierto Cougaar (COSL) es una versión modificada de la OSI approved BSD License	Java	Windows 98; Windows NT; Windows XP; Linux; Mac OS X; y PDAs con Java-1.4	FAQ; tutoriales; presentaciones; documentación; referencias seleccionadas; soporte por correo electrónico; foros públicos; listas de correo	Desconocido	Desconocido	Desconocido
DeX	Desarrollando, analizando y visualizando simulaciones dinámicas "multi-body" y basadas en agentes, aplicaciones paralelas.	Gratis (código abierto)	C++; dML (Lenguaje deX Modeling): un lenguaje específico basado en C++; python	X86 o x86_64 Linux	Manual para el usuario; demo; API; contacto entre usuarios; soporte del autor	Desconocido	Desconocido	Desconocido
D-OMAR (Distributed Operator Model Architecture)	Entorno de simulación para propósitos generales	Gratis (código abierto)	Java (OMAR-J); lisp (OMAR-L)	Windows; Unix; Linux	API; soporte técnico de los autores	Desconocido	Desconocido	Desconocido
ECHO	Modelos ecológicos	Gratis (código abierto)	C	Estaciones Unix; Desarrollado en arquitectura Sun Sparc usando Sunos 4.1.3;	Algunas publicaciones seleccionadas; una publicación desactualizada acerca de cómo compilar y utilizar Echo	Desconocido	Desconocido	Desconocido
ECJ	Computación evolucionaria, programación genética	Licencia académica gratis - código abierto	Java	Cualquier plataforma Java	Tutoriales; ejemplos; API; documentación; lista de correos online	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
FAMOJA (Framework for Agent-based MOdelling with JAva)	Resource flow management, ciencia de sistemas teóricos, sistemas aplicados, análisis de sistemas ambientales	LGPL	Java	Instalación JDK	Tutorial; API; wiki; documentación;	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Framsticks	Simulaciones 2D/3D de sistemas de agentes múltiples y vida artificial	Depende del módulo: GPL/LGPL/Propietario	FramScript (similar a JavaScript)	Windows; Linux; *nix; Mac OS X	Correo electrónico del desarrollador; tutoriales; manual; FAQ; foros; API; documentación; publicaciones; ejemplos	Desconocido	Sí	Sí
GPU Agents	Modelo de simulación basado en agentes en el GPU	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
GROWlab	Kit de herramientas ABM del International Conflict Research Group en el ETH Zurich	Gratis	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
iGen	Motor de inteligencia artificial; modelos de performance humana; agentes cognitivos incrustables	Propietario (varios precios para Licencia del Desarrollador; Licencia del Modelador; Licencia Runtime y licencias académicas)	Lenguaje de ejecución COGNET (CEL); C++; C; Java	Windows 95, 98, 2000, NT, XP	Consultoría; capacitación; publicaciones; (foro de usuarios y documentación en construcción, no se encuentra disponible aun)	Desconocido	Desconocido	Desconocido
JADE	Aplicaciones distribuidas compuestas de entidades autónomas	LGPL version 2	Java	Cualquier plataforma Java	FAQ; lista de correos; lista de defectos; tutoriales; API; documentación	Sí	Desconocido	Desconocido
JAS	Propósito general, basado en agentes	LGPL; licencias asociadas de terceros (usualmente no propietarias)	Java	Cualquier plataforma Java version 1.5 o superior	API; documentación; tutoriales; correo electrónico a autores	Sí	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
JASA (Java Auction Simulator API)	Economía computacional; economía computacional basada en agentes	GPL	Java	Cualquier plataforma Java	Foro público, no muy bien utilizado; API; pequeña selección de lecturas; documentación limitada	Desconocido	Desconocido	Desconocido
JCA-Sim	Automata celular automata; simulador de propósito general	Gratis (código cerrado)	Java; Lenguaje de Descripción Celular (CDL) (para input de la simulación)	Cualquier plataforma Java	Ejemplos; documentación; API; un contacto	Desconocido	Desconocido	Desconocido
jES (Java Enterprise Simulator)	Una sola empresa o un sistema de empresas	Licencia académica gratis	Java	Cualquier plataforma Java	Documentación limitada	Desconocido	Desconocido	Desconocido
jEcho	Modelación ecológica usando principios orientados al objeto	Gratis, código abierto	Java	Cualquier plataforma Java	Documentación limitada; el auto tiene tiempo limitado para trabajar con clientes	Desconocido	Desconocido	Desconocido
JESS	Motor de reglas y ambiente de escritura	Propietario; gratis para uso académico	Java/Jess/JessML (declarative xml rule language)	Java Virtual Machine	FAQ; documentación; lista de correo; ejemplos; plug ins de terceros y bibliotecas; wiki	Desconocido	Desconocido	Desconocido
LSD (Laboratory for Simulation Development)	Lenguaje para modelos de simulación, ciencias sociales	GPL	C++; LSD	Windows; Unix; Macintosh	Documentación; algunos ejemplos; 2 contactos on la página web	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Madkit (Multi Agent Development Kit)	Plataforma genérica, altamente customizable y escalable, de propósito general con simulación basada en agentes	LGPL para bibliotecas básicas; GPL para desarrollo y aplicaciones no comerciales	Java; MadKit puede ser desarrollado en todos los lenguajes que son compilados en Java; por el momento, MadKit viene con 4 lenguajes que son ejecutados en la Java Virtual Machine: Scheme (Kawa), Jess (lenguaje basado en reglas), BeanShell (interpretado en Java) and Python (jython). Usando la técnica JNI (Java Native Interface), debería ser posible desarrollar agentes escritos en C o C++. También es posible incrustar agentes Java en aplicaciones C/C++ utilizando la misma técnica, usando JNI como nexo entre los dos mundos.	JVM (Java 2)	FAQ; documentación; foro online; ejemplos; lista de defectos	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
MAGSY	Sistemas multi-agente basados en reglas	Gratis (código cerrado)	Magsy (lenguaje de producción)	UNIX, LINUX, SunOS y sistemas Solaris.	Documentación limitada; algunos ejemplos (dentro del paquete de instalación); no tiene grupos de apoyo a usuarios; ninguno contacto	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MAML (Multi-Agent Modeling Language)	Ciencia social; lenguaje de programación de dominio específico para desarrollar modelos basados en agentes	El compilador se descarga gratuitamente para propósitos de evaluación (código abierto). Posteriormente el sistema estará bajo licencia GNU.	Lenguaje MAML; C; interfase de programación visual	PC; Linux	Tutorial; ejemplos; papers de referencia; contacto con desarrolladores	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MASON	Propósito general; complejidad social, modelación física, modelación abstracta, aprendizaje inteligencia artificial/máquina	Licencia académica gratis (código abierto)	Java	Cualquier plataforma Java (1.3 o superior)	Lista de correo; documentación; Tutoriales; extensiones de terceros; papers de referencia; API	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MAS-SOC (Multi-Agent Simulations for the Social Sciences)	Simulación social	Contactar autores para disponibilidad	AgentSpeak(XL), una extensión de Agentspeak(L) y (Environment Description Language for Multi-Agent Simulation); ELMS, un lenguaje para modelar entornos donde se sitúan agentes cognitivos. Trabajo futuro para implementar Java.	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MATLAB	Enseñanza de técnicas de programación de simulación para estudiantes nuevos a la simulación, matemática científica e ingeniería y computación, análisis de datos, exploración y visualización	Propietario	MATLAB es un lenguaje de alto nivel que incluye estructuras basadas en matrices, sus propios tipos de datos internos, un catálogo extenso de funciones, un entorno en el cual desarrollar funciones y guiones propios, la habilidad de importar y exportar muchos tipos de archivos de datos, capacidades de programaciones orientadas al objeto, e interfaces a tecnologías externas como COM, Java, programas escritos en C y Fortran, y dispositivos de puertos seriales	Windows; Linux; Solaris; Macintosh	Capacitación; consultoría; documentación; productos y servicios de terceros; grupos de soporte múltiples; reportes de defectos	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
MIMOSE (Micro-und Multilevel Modelling Software)	Ciencias sociales, educación	Gratis (código cerrado)	Un lenguaje descriptivo (derivado de paradigmas funcionales)	Versión cliente/server en Sun/Solaris/ y Linux; cliente basado en Java en Windows NT, Solaris, y Linux	Manual de usuario	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Moduleco	Plataforma multi agente	GPL	Java	Windows; Linux; Macintosh	API; documentación mínima	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MOOSE (Multimodeling Object-Oriented Simulation Environment)	Propósito general, basado en agente (modelado desde SimPack)	Desconocido	C++	IBM PC con DOS/Windows o Version de Unix (tal como Linux o BSD); Unix Workstations (SUN, SGI)	Referencias seleccionadas; manual de usuario	Desconocido	Desconocido	Desconocido
OBEUS (Object Based Environment for Urban Simulation)	Simulación urbana	Gratis (código cerrado)	Lenguajes Microsoft.net .NET – C#, C++, o Visual Basic	Windows	Manual de usuario	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Omonia (previously Quicksilver)	Inteligencia artificial, ciencias sociales	LGPL	Java	Instalación JDK	Ejemplos; poca documentación	Desconocido	Desconocido	Desconocido
oRIS	Enseñando, programando con objetos concurrentes, sistemas multi agente, realidad virtual distribuida, control adaptativo.	Propietario - (gratis para instituciones académicas)	Lenguaje Oris; Muy cercano a C++ y Java (lenguaje dinámico e interpretado por agentes múltiples)	IA32 Linux; PPC Linux; SGI Irix; y Windows	Documentación; ejemplos en francés; API	Desconocido	Desconocido	Desconocido
PS-I (Political Science-Identity)	Fenómenos políticos	GPL	No requiere programación; Scripting TCL/TK para aplicar efectos	Plataforma cruzada con binarios disponibles para win32; Windows; Linux; PS-I no está por el momento disponible para usuarios Macintosh excepto vía emulación de un entorno Windows NT, o Linux.	Documentación; publicaciones seleccionadas	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Repast	Ciencias sociales	BSD	Java (RepastS, RepastJ); Python (RepastPy); Visual Basic, .Net, C++, J#, C# (Repast.net)	Versión Java 1.4, aunque una versión 1.3 para Mac OS X está disponible. Para correr las simulaciones de demostración, se requiere un entorno Java Runtime (RepastS, RepastJ); plataforma independiente (RepastPy); Windows (Repast.net)	Documentación; lista de correo; lista de errores; papers de referencia; herramientas externas; tutoriales; FAQ; ejemplos	Desconocido	Sí	Sí

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
SDML (Strictly Declarative Modeling Language)	Sistemas multi-agente (con racionalidad limitada)	GPL; licencia de terceros (para VisualWorks)	Smalltalk release 5i.2 Non-Commercial	Windows 3.1; Windows 95; Windows 98; Windows 2000; Windows NT; Linux; Intel; PowerMac; Unix; ADUX/AIX/HPUX/ SGI/Solaris	Lista de correos; tutorial; referencias seleccionadas; documentación limitada incluida con el paquete del software	Desconocido	Desconocido	Desconocido
SEAS (System Effectiveness Analysis Simulation)	The US Air Force's Multi-Agent Theater Operations Simulation	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
SeSAM (Shell for Simulated Agent Systems)	Propósito general (basado en agente); enseñanza	LGPL	SeSAM-Impl y SeSAM-UML; Programación visual	Java 5.0 o superior; Windows; Linux; Mac OS X	Tutoriales; lista de correos; FAQ; wiki; contacto con el autor	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Jade's sim++	Simulación paralela; simulaciones aplicadas; planeamiento de redes; CAD electrónico; simulación de comunicación en tiempo real	GPL version 2	C++	Disponible para Meiko y sistemas multi-computer BBN y puede ser usado en red con Sun3, Sun 4, y estaciones HP 9000	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido
SimPlusPlus	Testing Base24 applications	GPL	Completamente programable con cualquier lenguaje que pueda soportar componentes activeX (ej C, C++, VB, VBA, Java, y otros), pero no se requiere programación	Sim++ puede ser utilizado con código C o código C++, pero uno debe poseer un compilador C++. DOS; Windows (como una aplicación DOS) o OS2 (como una aplicación DOS). El software SimPack está siendo revisado para utilizar exclusivamente C++; sin embargo, va a seguir siendo posible utilizar programas C para acceder a las rutinas C++.	Contactar autores	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
SimAgent (también sim_agent)	Investigación y enseñanza relacionado con el desarrollo de agentes que interactúan en medio ambientes de varios grados y tipos de complejidad; investigación exploratoria en agentes de inteligencia de tipo humana; sistemas involucrando gran número de agentes "pequeños" altamente distribuidos; principalmente diseñadas para soportar el diseño e implementación de agentes muy complejos, cada uno compuesto de componentes muy diferentes interactuando (como una mente humana) donde todo está incrustado en un ambiente que puede ser una mezcla de objetos físicos y otros tipos de agentes	Gratis (código abierto); licencia MIT/XFREE86 (para bibliotecas poplog); puede ser luego reemplazado por GPL	Pop-11, como Common Lisp, es un poderoso lenguaje multi-propósito que soporta paradigmas múltiples. Dentro del ambiente Poplog, Pop-11 también soporta programas escritos en Prolog, Common Lisp o Standard ML	Al menos prolog version 15; Windows; Mac OS X; Linux; Unix	Tutoriales; documentación; publicaciones seleccionadas; ejemplos; contacto con el autor	Desconocido	Desconocido	Desconocido
SimBioSys	Simulaciones basadas en agente para biología y ciencias sociales	Artistic License Agreement	C++	Cualquier plataforma que soporte C++	Ninguno	Desconocido	Desconocido	Desconocido
SimPack	Propósito general, basado en agente, enseñanza de simulación en computadoras a nivel universitario (senior) y graduados	GPL	C++; (no se mantienen más las librerías C); Java	Cualquier plataforma que soporte C++; Tecnicamente, el ambiente de procesamiento es supuestamente chequeado para Java 1.4 pero Java 1.5 funciona bien. Simpackj ha sido testeado con 1.5 y no presenta problemas. El SDK es preferido por sobre el JRE, ya que esto puede ser útil para ciertos tipos de código Java que uno puede estar escribiendo. El SDK incluye un JRE	Publicaciones seleccionadas; lista de correo; manual de usuario	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
SME (Spatial Modeling Environment)	Economía ecológica, modelación de ecosistemas	LGPL	No se requieren conocimientos de programación	Unix	Documentación; lista de correo	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Soar	Inteligencia artificial de propósito general; modelar rendimiento humano; enseñanza (incluyendo enseñanza basada en explicaciones)	BSD	Soar 1 to 5 in Lisp; Soar 6 in C; Java, C++, TCL	Windows 98; Windows ME; Windows 2000; Windows XP; Linux; Mac OS X	Documentación; FAQ; publicaciones seleccionadas; lista de defectos; extensiones de terceros; lista de correos; contactar autores; tutorial; ejemplos; wiki	Desconocido	Desconocido	Desconocido
StarLogo	Ciencias sociales y naturales; educadores; para estudiantes para modelar el comportamiento de sistemas descentralizados; "amigable" para estudiantes K-12	Gratis (código cerrado) - Licencia Clearthought Software, Version 1.0	StarLogo (una extensión de Logo)	Mac OS X v10.2.6 o superior con Java 1.4 instalado; Windows; Unix; Linux (StarLogo parece no ser compatible con Java 5/1.5 en Solaris)	Lista de correo; tutoriales; FAQ; lista de errores; documentación; contactos con el desarrollador	Desconocido	Desconocido	Desconocido
MacStarLogo	Ciencias sociales y naturales; educadores; para estudiantes para modelar el comportamiento de sistemas descentralizados; amigable para estudiantes K-12	Gratis (código cerrado)	MacStarLogo	Macintosh	Descarga disponible para página web StarLogo, pero no desarrollado activamente	Desconocido	Desconocido	Desconocido
OpenStarLogo	Ciencias sociales y naturales; educadores; para estudiantes para modelar el comportamiento de sistemas descentralizados; amigable para estudiantes K-12	Gratis para uso y distribución para fines no comerciales (código abierto)	StarLogo (una extensión de Logo)	Mac OS X v10.2.6 o superior con Java 1.4 instalado; Windows; Unix; Linux (StarLogo parece no ser compatible con Java 5/1.5 en Solaris)	FAQ; defectos; líneas de soporte online; ejemplos y documentación	Desconocido	Desconocido	Desconocido
StarLogoT	Ciencias sociales; educación; redes descentralizadas	Gratis (código cerrado)	StarLogoT	Macintosh	Tutoriales; API; documentación; lista de defectos; contacto con autores	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
StarLogo TNG	Ciencias sociales y naturales; enseñanza de técnicas de programación básicas	StarLogo TNG Licencia v1.0 - (código cerrado) - el código se puede liberar eventualmente. El StarLogo original aparentemente va a ser lanzado bajo una licencia de código abierto dentro de poco	Lenguaje StarLogo TNG – un lenguaje de programación gráfico y un entorno 3d	Macintosh y Windows	Tutoriales; FAQ; documentación; listas de correo; API	Desconocido	Desconocido	Desconocido
NetLogo	Ciencias sociales y naturales; Ayuda a usuarios principiantes a iniciarse en la creación de modelos	Gratis, no código abierto; Uso ilimitado (incluido uso comercial), pero hay algunas restricciones a la redistribución y/o modificación (salvo que se contacte a Uri Wilensky para arreglar condiciones distintas)	NetLogo	Cualquier Java Virtual Machine, version 1.4.1 o posterior, es instalada. Version 1.5.0_12 o posterior es preferible.	Documentación; FAQ; referencias seleccionadas; tutoriales; extensiones de terceros; lista de defectos; listas de correo	Desconocido	Sí	Sí
Sugarscape	Social sciences; educación	GPL	Java	Java 2 SDK o (Internet Explorer 5.x o superior Y Java 2 Runtime Environment (JRE))	API	Desconocido	Desconocido	Desconocido
Swarm	Propósito general basado en agente	GPL	Java; Objective-C	Windows; Linux; Mac OS X	Wiki; tutoriales; ejemplos; documentación; FAQ; publicaciones seleccionadas; listas de correo	Desconocido	Desconocido	Desconocido
VisualBots	Simulador multi-agente en Microsoft Excel	Desconocido	Visual Basic	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido	Desconocido

Plataforma	Dominio primario	Licencia	Lenguaje de programación requerido	Sistema operativo requerido	Soporte al usuario	Aprobación de la fundación para agentes físicos inteligentes	Aptitudes GIS	Aptitudes 3D
VSEit	Ciencias sociales; educación	Gratis (código cerrado)	Java	Para correr simulaciones: un navegador habilitado para Java como Netscape Navigator o Microsoft Explorer. VSEit se ejecuta bajo Netscape Navigator 4.06 o superior, en Windows 95/98 y Windows NT; para desarrollar simulaciones: cualquier plataforma Java platform soportando Java 1.1.7.	Ejemplos; guías de usuario; lista de defectos	Desconocido	Desconocido	Desconocido
ZEUS	Simulaciones multi-agente distribuidas	Código abierto (leer licencia)	Editores visuales y generadores de códigos	Windows 95; Windows 98; Windows NT; Windows 2000; Windows XP; Linux; BSD; UNIX-like OSes; Solaris	Documentación; contacto con el autor	Sí	Desconocido	Desconocido

Tabla 18. Programas de modelización basada en agentes

11 BIBLIOGRAFÍA

1. Dorigo, M., Birattari, M., Stützle, T. 2006. Ant Colony Optimization: artificial ants as a computational intelligence technique. IEEE Computational Intelligence Magazine.
2. Birattari, M., Pellegrini, P., Dorigo, M. 2007. On the invariance of Ant Colony Optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 11.
3. Dorigo, M., Krzysztow, S. 2006. An Introduction to Ant Colony Optimization. IRIDIA – Technical Report Series.
4. Marshall, J., Kovacs, T., Dornhaus, A., Franks, N. Simulating the Evolution of Ant Behaviour in Evaluating Nest Sites.
5. Bonabeau, E., Meyer, C. 2001. Swarm Intelligence: A whole New Way to Think About Business. Harvard Business Review.
6. White, T. 1997. Swarm intelligence and problem solving in telecommunications. Canadian Artificial Intelligence Magazine.
7. White, T. 2005. Expert Assessment of Stigmergy: A Report for the Department of National Defence.
8. Werfel, J. 2002. Autonomus multi-agent construction.
9. Dorigo, M., Maniezzo, V., Colomi, A. 1991. Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process.
10. Dorigo, M., Krzysztow, S. 2006. Ant Colony Optimization for continuous domains. IRIDIA – Université Libre de Bruxelles.
11. Dorigo, M., Birattari, M. 2007. Swarm Intelligence. Scholarpedia.
12. Rennard, Jean-Philippe. 2003. Social insects and self-organization.
13. Pfeil, Jonas. 2006. Swarm Intelligence. Communication and Operating System Group, Berlin University of Technology.
14. Bonabeau, E., Théraulaz, G. 2000. Swarm Smarts. Scientific American.
15. Maniezzo, V., Gambardella, L. M., de Luigi, F. Ant Colony Optimization. 5.
16. Lewis, T. 1974. The Lives of a Cell: Notes of a Biology Watcher. The Viking Press, Inc.
17. Holland, O., Melhuish, C. 1999. Stigmergy, self-organisation, and sorting in collective robotics. Intelligent Autonomus Systems Engineering Laboratory.
18. Grassé, P. P. 1959. La reconstruction du nid et les coordinations interindividuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. La theorie de la stigmergie : Essai d'interpretation des termites constructeurs. Ins. Soc. citado por Owen Holland
19. Beckers, R., Holland, O. E. and Deneubourg J_L (1994). "From Local Actions to Global Tasks: Stigmergy in Collective Robotics," in R. Brooks and P. Maes eds. Artificial Life IV, Cambridge, Mass.: MIT Press, 181-9. citado por Franklin en Coordination without communication.
20. Franklin Coordination without communication...
21. Sitios web:
 - a. <http://www.stigmergicsystems.com>

- b. <http://www.swarmintelligence.org/>
 - c. <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/HomePageDorigo/>
 - d. <http://www.aco-metaheuristic.org/>
 - e. <http://www.antoptima.com/>
22. Théraulaz, G., Bonabeau, E. 1999. A Brief History of Stigmergy.
 23. Bonabeau, E., Dorigo, M., Théraulaz, G. 1999. Swarm Intelligence : From Natural to Artificial System. Oxford University Press, New York.
 24. Deneubourg, J.-L., Aron, S., Goss, S., Pasteels, J.-M. 1990. The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant. Journal of Insect Behaviour.
 25. Abraham, A., Grosan, C., Ramos, V. 2006. Swarm Intelligence in Data Mining. Publisher: Springer-Verlag New York, LLC
 26. Dorigo, M., Di Caro, G., Gambardella, L. 1999. Ant Algorithms for Discrete Optimization. Artificial Life.
 27. Banks, J., Carson II, J., Nelson, B., Nicol, D. 2005. Discrete-Event System Simulation. Fourth Edition. Prentice Hall.
 28. Winston, W. 2005. Investigación de Operaciones. Aplicaciones y algoritmos. Cuarta edición. Thomson.
 29. Agosti, D., and N. F. Johnson. Editors. 2005. Antbase. World Wide Web electronic publication. antbase.org, version (05/2005).
 30. Bert Hölldobler + Edward O. Wilson. The Ants. 1990
 31. Fernández F. (ed.). 2003. Introducción a las Hormigas de la región Neotropical. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia.
 32. Bonabeau, E., G. Theraulaz, J.L. Deneuborg, S. Arona y S. Camazine. 1997. Self-Organization in social insects. Tree 12(5):188-193.
 33. Streeter, V., Wylie, B. y Bedford, K. 1999. Mecánica de fluidos. Editorial McGraw Hill.
 34. Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University, Evanston, IL.
 35. W.J. Gutjahr. 2006. "On the finite-time dynamics of ant colony optimization," Methodology and Computing in Applied Probability, vol. 8, no. 1, pp. 105–133,.
 36. Bonabeau, E. 2002. Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems.
 37. Srbljinovic, A. Skunca, O. 2003. An introduction to agent based modelling and simulation of social processes. Interdisciplinary description of complex systems.
 38. Plane, M. Proyecto de trazado de conducciones de fluidos y tuberías de transporte. 1988. Revista de obras públicas.