



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

**SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES PARA RESOLVER UN
PROBLEMA DE LOCALIZACIÓN**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ANDREA TAVERA MARÍN

DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS, FACULTA DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. OCTUBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Flores De La Mota Idalia

Secretario: Dra. Balderas Cañas Patricia

Vocal: Dra. Elizondo Cortés Mayra

1 er. Suplente: Dra. Sanchez Larios Herica

2 d o. Suplente: Dr. Ordorica Mellado Manuel

LUGAR O LUGARES DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

Dra. Mayra Elizondo Cortés

FIRMA

Agradecimientos

A Dolores, por la fortaleza y espíritu que pones cada día en este mundo. Gracias por tu ejemplo y amor incondicional.

A la Dra. Mayra Elizondo, con cariño y admiración, por el esfuerzo y la guía para realizar este documento. Gracias por el apoyo desinteresado, por las palabras de aliento, por darme un espacio y luz en días tan lluviosos y oscuros...

A la Dra. Idalia Flores, con gran respeto y admiración.

A Agustín y Susana, padres excepcionales, por apoyarme e incluirme en sus vidas como su otra hija.

A Ale, por no dejarnos arrebatarnos quien somos, tu paciencia infinita, tu valentía y la anacronía que compartimos.

A la vida por la oportunidad de reinventarme cada día.

A Luequelle, por recordar de qué estas hecha...

Índice general

Resumen	1
Abstract	2
Introducción	3
1. El problema de localización	5
1.1. Reseña histórica de la Teoría de localización	6
1.2. Clasificación	7
1.2.1. Conceptos básicos de Teoría de Redes	8
1.2.2. Problemas p -Median, p -MP	9
1.2.3. Problemas p -Center, p -CP	9
1.2.4. Problema de Localización de Servicios Simple, $PLSS$	10
1.2.5. Problemas de Asignación Cuadrática, QAP	11
1.3. Métodos de solución	12
1.3.1. Análisis multicriterio	12
1.3.2. Métodos heurísticos	12
1.3.3. Programación entera	12
1.4. Complejidad computacional	13
1.5. Otros métodos de solución: Simulación	15
1.6. Caso de aplicación	16
1.6.1. Hipótesis de la tesis	17
1.6.2. Ley de Hotelling	17
2. Marco de referencia	18
2.1. Estado del arte	18
2.1.1. Líneas de investigación	20
2.1.2. Ubicación de la tesis en las líneas de investigación y aportaciones	21
2.2. Marco teórico	21
2.2.1. Simulación	22
2.2.2. Modelación basada en agentes	24
2.2.3. Simulación Basada en agentes	26
2.2.4. Ley de Hotelling	27
2.3. Metodología de Investigación de la tesis	30
2.3.1. Etapas de la metodología de Simulación	31

3. Planteamiento del problema y Modelo conceptual	35
3.1. El problema	35
3.2. Modelo conceptual	36
3.2.1. Formulación del modelo	36
3.2.2. Descripción del modelo conceptual	36
3.2.3. Evaluación del modelo conceptual	38
3.2.4. Recolección de información y datos para el modelo conceptual	39
3.2.5. Validación del modelo conceptual	40
4. Simulación con NetLogo y validación	43
4.1. Selección del programa de cómputo	43
4.1.1. NetLogo	44
4.2. El modelo programado	45
4.2.1. Diagrama de flujo del modelo programado	46
4.2.2. Validación del modelo	48
5. Experimentos y Resultados	52
5.1. Experimentos	52
5.1.1. Diseño de experimentos	55
5.1.2. Configuración de escenarios	56
5.1.3. Preguntas de investigación	63
5.2. Ejecución de experimentos y resultados obtenidos	63
5.2.1. ¿Qué tan rápida es la simulación basada en agentes con NetLogo?	63
5.2.2. ¿Qué tan eficiente es para problemas grandes?	64
5.2.3. ¿Cuáles son los beneficios que aporta la simulación basada en agentes usando NetLogo?	66
5.2.4. ¿Qué comprensión se adquiere de simular diferentes escenarios?	66
5.2.5. Probar la reactividad de respuesta de los agentes al desempeño del modelo	68
5.2.6. ¿Cuál es la importancia de evaluar el modelo en distintos momentos en el tiempo?	68
5.2.7. Destacar que este modelo permite localizar cualquier tipo de centro de distribución (benéfico o nocivo)	69
5.2.8. ¿Existen alternativas de <i>software</i> para realizar simulación basada en agentes?	70
Conclusiones y Extensiones	72
Anexos	77

Índice de figuras

1.1. Decisiones estratégicas para éxito de un bien o servicio.	5
2.1. En la simulación basada en agentes, los componentes básicos del sistema real y las interacciones entre ellos están explícita e individualmente representados en el modelo.	26
2.2. Ubicación de 2 tiendas en una calle.	28
2.3. Ubicación mejorada de 2 tiendas en una calle.	29
2.4. Metodología de investigación.	32
3.1. Ubicación óptima de dos centros de distribución.	37
3.2. Simulación de un problema de localización empleando la ley de Hotelling usando NetLogo	40
4.1. Diagrama de flujo del modelo programado de la Ley de Hotelling en NetLogo.	47
4.2. Interfaz gráfica de la Ley de Hotelling en NetLogo.	48
4.3. Simulación de un monopolio.	49
4.4. Dos tiendas en competencia.	50
4.5. Catorce tiendas en competencia.	50
5.1. Botones para configuración hecha por el usuario.	55
5.2. Representación unidimensional del modelo programado.	55
5.3. Representación bidimensional del modelo programado.	56
5.4. Simulación en 50 unidades de tiempo	57
5.5. Simulación en 100 unidades de tiempo	58
5.6. Simulación en 300 unidades de tiempo	58
5.7. Simulación con precios agrupados	59
5.8. Simulación de localización de las tiendas, sin tendencia en el área cubierta por cada tienda.	60
5.9. Evolución sin tendencia definida	61
5.10. Precio y área estable.	61
5.11. Precios diferenciados por zonas.	62
5.12. Precios diferenciados por zonas.	62
5.13. Tiempo para resolver problemas de localización.	65
5.14. Simular localización.	67
5.15. Simular precio.	67
5.16. Simular precio y localización.	68
5.17. Escenario que modifica simulación de precio, localización y precio y localización.	69
5.18. Configuración inicial de dos centros nocivos.	70
5.19. Localización óptima de dos centros nocivos.	70

Resumen

Esta tesis emplea simulación basada en agentes (ABS) como herramienta para resolver problemas de localización, con el objetivo de destacar los beneficios que la simulación brinda en ahorro de recursos y la capacidad de encontrar una buena aproximación a la solución cuando los métodos analíticos son irresolubles o inaccesibles; también enfatiza las ventajas que el enfoque basado en agentes aporta para tratar sistemas complejos: independencia, reactividad y proactividad de los agentes que interactúan en el desempeño del modelo; para ello se define un conjunto de atributos genéricos, acciones y comportamiento para cada agente. El comportamiento simulado de todos los agentes representa el desempeño del sistema que es analizado a fin de brindar elementos sólidos para la toma de decisiones estratégicas. El método seguido en esta tesis corresponde a la metodología convencional para la herramienta de Simulación como parte de la Investigación de Operaciones, utilizando el *software* de distribución libre NetLogo. Se realizan y validan una serie de experimentos bajo un modelo programado, que está apoyado en el principio de mínima diferenciación enunciado por Hotelling (las empresas pueden competir en precios y aún así obtener beneficios positivos en un entorno competitivo) para cumplir el objetivo. Este modelo analiza la ubicación óptima de servicios y los precios a establecer para maximizar los beneficios en términos de cobertura geográfica, precio en un ambiente competitivo y ganancia de cada centro de servicios.

Abstract

This thesis uses agent-based simulation (ABS) as a tool for solving facility location problems in order to highlight the benefits that simulation provides in saving resources or the ability to find a good approximation to the actual solution, when the analytical methods are intractable or inaccessible, it also emphasizes the advantages provided by agent-based approach in complex systems management: independence, reactivity and proactivity of the agents interacting in the model performance, that is why a set of generic attributes, actions and behavior are defined for each agent. The simulated behavior of the agents represents the system performance which is analyzed to provide solid elements for strategic decisions making. The method followed in this thesis is the conventional methodology Simulation, as Operation Research tool, using the *software* NetLogo. Experiments developed and validated using the principle of minimum differentiation, enunciated by Hotelling. This model analyzes the optimal location of services and set prices to maximize the benefits in terms of geographic coverage, price in a competitive environment and benefit of each service center.

Introducción

Esta tesis se deriva del interés de la autora de mostrar el potencial y la nobleza que contiene la técnica de simulación; así como la existencia de herramientas accesibles que permitan alternativas rápidas de solución en problemas complejos de la vida real.

El objetivo de esta tesis es mostrar que la simulación basada en agentes es una alternativa para resolver un problema de localización de manera rápida, económica y sencilla; así como un enfoque que se adapta al manejo de sistemas complejos.

Con dicho objetivo se describe la metodología que toda simulación debe seguir y la importancia que la simulación basada en agentes ha cobrado en los últimos años, derivada del uso de inteligencia artificial gracias al desarrollo que las computadoras han alcanzado. Eso se logró a lo largo de cinco capítulos:

1. El primer capítulo plantea el problema de localización como una necesidad humana para cubrir sus necesidades y satisfacer también sus preferencias; hace una breve reseña que científicos realizaron en preocupación de obtener la mejor localización de algún sitio de interés, hasta llegar al planteamiento del problema de localización bajo el enoche de Investigación de Operaciones como un problema de Teoría de Redes. A partir de dichos planteamientos se exploran las técnicas analíticas y heurísticas más empleadas para resolver el problema, usadas en los últimos años. También se detalla la complejidad computacional de esta clase de problemas y las dificultades que representa; por lo que se propone la simulación como una técnica alternativa de solución bajo un enfoque basado en agentes. Finalmente se expone la existencia de un modelo programado bajo un principio económico que captura la esencia del problema de localización por lograr la mejor ubicación de un sitio de interés evaluando el costo y la distancia para llegar a él.
2. El segundo capítulo evalúa qué aportaciones hace esta tesis como documento de investigación y presenta el marco teórico del enfoque basado en agentes, así como las líneas de trabajo que se han seguido desde 1995 (fecha en la que el término agente se utilizó como alternativa para modelar sistemas complejos). Describe la relevancia de la ley de Hotelling, los principios establecidos en ella que sirven para el modelo empleado para la simulación y sus limitaciones. Finalmente, la autora señala los pasos para llevar a cabo la simulación.
3. El tercer capítulo contiene el planteamiento formal del problema a tratar mediante la simulación, los objetivos y describe a detalle el modelo conceptual a utilizar.
4. La herramienta computacional empleada, sus ventajas y disponibilidad están contenidas en el cuarto capítulo, donde se destaca que es de bajo costo y fácil de emplear. Esta sección también

incluye la descripción del modelo programado y hace precisiones sobre el nivel del detalle en él.

5. Ante la variedad de resultados que el modelo puede producir, el quinto capítulo evalúa las variables que afectan la simulación y la importancia del diseño de experimentos como parte de un estudio cuantitativo. Se analizan diferentes escenarios para medir la influencia en el modelo simulado y se analizan los resultados para tener idea del alcance de la herramienta que pueda cumplir con una función analítica no solo en una aplicación del mundo empresarial sino bajo un enfoque de enseñanza. También se responden las preguntas de investigación elemento central de la investigación cuantitativa y cualitativa de esta tesis.
6. Finalmente se presentan las conclusiones derivadas a lo largo del documento, así como las extensiones factibles de este documento y la bibliografía consultada.

Capítulo 1

El problema de localización

Los problemas de localización han estado presentes en la existencia humana desde sus orígenes: ¿dónde paso la noche?, ¿cuál es el mejor sitio para ubicar una vivienda?, etc.

Adicionalmente, ha habido bienes o servicios necesarios que no están disponibles en el lugar y tiempo deseados. Por ejemplo, la comida era abundante sólo en algunas épocas del año, lo que provocó la necesidad de trasportar y almacenar productos para uso posterior.

Como consecuencia, las personas vivían cerca de los lugares de producción y limitaban el consumo de productos y servicios.

El nivel de servicio deseado para satisfacer las necesidades depende de las siguientes decisiones estratégicas:



Figura 1.1: Decisiones estratégicas para éxito de un bien o servicio.

Fuente: Ballou. Business Logistics Management.

La Investigación de Operaciones aborda este problema con el fin de determinar el número, ubicación y tamaño óptimos de los centros de distribución en función de la demanda del bien o servicio producido.

1.1. Reseña histórica de la Teoría de localización

Como rama de la Investigación de Operaciones, la teoría de localización permite la toma de decisiones estratégicas para encontrar buenas soluciones.

Surge del trabajo de Weber (1909) en el problema planteado por Fermat¹, el cual consistía en determinar la localización óptima de una fábrica que debía abastecer a un solo mercado mediante dos fuentes diferentes de material, minimizando los costos de transporte.

Los primeros trabajos para resolver el problema de localización se remontan a científicos como Fermat, Torricelli, Silvester o Steiner; quienes propusieron métodos algebraicos, geométricos y mecánicos para resolver problemas como los siguientes:

- hallar el punto del plano, tal que la suma de las distancias a tres puntos fijos sea mínima (problema de Fermat - Weber);
- hallar el centro del círculo de mínimo radio que encierra a un conjunto de puntos dado;
- hallar el punto de un polígono fijo tal que sea máximo el radio del círculo con éste como centro y que no contenga en su interior a ninguno de los puntos de un cierto conjunto P ;
- hallar los centros de N círculos contenidos en un cuadrado, que solo coincidan en sus bordes, y que el radio de los discos sea máximo y
- hallar la forma de interconectar N puntos, de modo que se minimice la suma de las longitudes de los segmentos de conexión (árbol de Steiner).

El problema de Fermat - Weber busca localizar un centro de distribución para minimizar el costo total de transporte (en función de la distancia recorrida) a los centros de demanda o destino; el segundo problema de la lista anterior, sirve para ubicar un centro de atención de emergencias, permite que el usuario más alejado esté lo más cerca posible; el tercer problema está enfocado a ubicar un servicio nocivo² en una región dada (poligonal), maximizando la distancia al centro de población más próximo; el cuarto se usa para ubicar N establecimientos (e.g. farmacias, gasolineras, etc.) maximizando la distancia entre ellos para evitar excesiva competencia entre ellos; el problema del árbol de Steiner, ha sido usado en diversas disciplinas, por ejemplo: en las Telecomunicaciones (diseño de conexiones de redes de computadoras) o Bioinformática (árboles filogenéticos).

Cómo tratar numéricamente un problema de localización dependerá, del número de variables (posibles ubicaciones) que tenga el problema. Para un conjunto pequeño de posibles ubicaciones, seguramente la mejor herramienta de resolución es la inspección de todas las posibles soluciones (**enumeración**); tanto para el caso unicriterio como para el multicriterio. Cuando tenemos pocas soluciones posibles, el problema de localización es numéricamente simple. La dificultad está en el caso multicriterio³, cuando el número de soluciones posibles se hace grande (o infinito), la enumeración

¹ *Über en Standort der Indstrien*

² Una planta de desperdicios, un tiradero de basura, etc.

³ Cuando el problema plantea optimizar más de un objetivo.

total de las mismas es inviable, y debemos recurrir a otros algoritmos numéricos que resuelvan el problema.

1.2. Clasificación

Existen varios criterios para clasificar los diferentes tipos de problemas de localización, conocidos como FLP (por sus siglas en inglés: *Facility Location Problem*). A continuación se presentan algunos de estos criterios:

Cuadro 1.1: Clasificación de los *FLP*

Criterio	Categoría
Espacio de solución	Unidimensionales Multidimensionales
Conjunto de soluciones	Discreto Redes Continuos
Número de soluciones	Cobertura P-Median P-Center
Capacidad de servicio	Restringidos, <i>UFLP</i> No restringidos, <i>CFLP</i>
Representación gráfica	Red generalizada Árboles
Por datos de entrada	Estáticos Dinámicos
Sector	Público Privado
Número de objetivos	Objetivo simple Multiobjetivo
Elasticidad de demanda	Elásticos Inelásticos

Fuente: Elaboración propia con base en Pitu, B. y Richardson, L.⁴.

En las siguientes secciones son explicados los cuatro problemas prototipo de localización:

1. Problemas *p-Median*, *p-MP*;
2. Problemas *p-Center*, *p-CP*;
3. Problemas de Localización de Servicios sin restricciones de capacidad, *UFLP*; también conocido como Problema de Localización de Servicios Simple, *PLSS*) y
4. Problemas de Asignación Cuadrática, *QAP*.

⁴*Discrete Location Theory*, John Willy and Sons Inc, 1990.

Con el propósito de explicar los problemas prototipo de localización, a continuación se hace referencia a nociones básicas de la Teoría de Redes.

1.2.1. Conceptos básicos de Teoría de Redes

Una **gráfica** no dirigida⁵ $N(V, A)$ es un conjunto de **nodos** $N = (v_a, v_b, \dots, v_h)$ que están conectados por un conjunto de $A = ([v_a, v_b] \text{ ó } [v_b, v_a], [v_b, v_c] \text{ ó } [v_c, v_b], \dots, [v_g, v_h] \text{ ó } [v_h, v_g])$ de **arcos** que conectan cualquier par de nodos y para los que existe un número real positivo $\alpha(v_i, v_j)$ llamado **longitud** del arco (valor positivo por definición).

Se define como **ruta** a la secuencia de arcos que conecta un par de nodos en la gráfica. La longitud de una ruta es la suma de la longitud de los arcos en ella. Pueden existir muchas rutas entre cada par de nodos, cada una con una longitud propia.

Determinar **la ruta más corta** (de menor distancia) es uno de los problemas de Teoría de Redes que causa mayor interés.

Los *FLP*, (*p-MP*, *p-CP*, *UFLP*) buscan de alguna manera, encontrar la ruta más corta entre los centros de distribución y los de demanda, bajo ciertas condiciones con características similares.

Están caracterizados por:

- m : número de servicios finito; $1, 2, \dots, m$
- n : número de clientes; $1, 2, \dots, n$
- p : número de servicios a establecerse $1 \leq p \leq n$
- f_i : costo de establecer o abrir el servicio i
- c_{ij} : el costo por atender la demanda del cliente j desde el centro i
Puede ser interpretado como $c_{ij} = w_j(h_i + t_{ij})$ donde:
 - w_j : número de unidades demandadas por el cliente
 - h_i : costo por unidad de operar el servicio
 - t_{ij} : costo de transportar desde el servicio i hasta el cliente j
 - d_{ij} : distancia de una ruta desde el servicio i hasta el cliente j

Esta clase de problemas:

1. no imponen restricciones de capacidad,
2. no restringen el número de clientes que cada servicio potencial pueda atender y
3. contienen datos no negativos

Las decisiones de localización están en términos de $Q : Q \subseteq I$, un subconjunto de servicios potenciales a ser abiertos, con cardinalidad $|Q|$ y desde los cuales todos los clientes serán atendidos.

⁵Hay gráficas dirigidas y no dirigidas dependiendo de si los arcos se pueden recorrer en un solo sentido.

1.2.2. Problemas p -Median, p -MP

Suponga que cada nodo es un posible sitio para localizar un centro de distribución y puede producir cualquier cantidad del bien y transportarlo por los arcos. El problema p -MP consiste en establecer p centros en p nodos de la gráfica, para que los centros de distribución puedan satisfacer la demanda de todos los clientes y el costo de hacerlo sea mínimo.

Suponer que todos los clientes tienen una demanda unitaria y que será cubierta por un único centro de distribución (*Single Assignment Property*).

Este tipo de problemas sirve para localizar un número predeterminado de centros de servicio para satisfacer nuevas demandas o para modificar una estructura ya existente.

Los datos requeridos para este tipo de problemas son:

- m : número de servicios finito; $1, 2, \dots, m$
- n : número de clientes; $1, 2, \dots, n$
- p : número de servicios a establecerse $1 \leq p \leq n$

Matemáticamente el objetivo es:

$$p\text{-MP:} \quad \min_{\substack{Q \subseteq I, \\ |Q|=p}} = \sum_{\substack{j \in J, \\ i \in Q}} c_{ij} \quad (1.1)$$

1.2.3. Problemas p -Center, p -CP

Consisten en establecer p centros y asignar cada cliente a sólo uno de ellos, tal que la distancia máxima de uno de estos centros a cualquier cliente asignado es mínima. En estos problemas cualquier punto de demanda se puede lograr desde la distribución más cercana con una distancia/tiempo/costo ponderado. Este tipo de problemas se utilizan para localizar centros de emergencia: ambulancias, patrullas, bomberos, etc.

Esta familia de problemas difiere de los p -MP en:

- criterio para evaluar la calidad de la solución factible,
- el problema p -MP es un problema de minimización, mientras el p -CP es de *minimax*,
- puede ser que el nodo con propiedades de optimalidad no sea precisamente obligatorio⁶, aunque se omite esta característica para simplificar el problema.

Los datos requeridos para este tipo de problemas son:

- m : número de servicios finito; $1, 2, \dots, m$
- n : número de clientes; $1, 2, \dots, n$

⁶Ejemplo: si un servicio da atención a dos clientes con la misma ponderación y el conjunto de localización no restringe cualquiera de los dos nodos, también se incluye cualquier punto sobre el arco que los conecta, el óptimo sería el punto medio del arco que los conecta.

- p : número de servicios a establecerse $1 \leq p \leq n$

Matemáticamente el objetivo es: Matemáticamente el objetivo es:

$$p\text{-MP:} \quad \min_{\substack{Q \subseteq I, \\ |Q|=p}} \{ \max_{j \in J} \{ \min_{i \in Q} c_{ij} \} \} \quad (1.2)$$

1.2.4. Problema de Localización de Servicios Simple, *PLSS*

También conocido como problema de Localización de Servicios sin restricciones de capacidad, *UFLP*. Consiste en ofrecer un bien o mezcla de productos desde un conjunto de posibles centros a un conjunto de m clientes $I = \{1, 2, \dots, m\}$ con demanda establecida. Los centros de distribución tienen capacidad ilimitada para satisfacer la demanda de cada cliente. Esta clase de problemas se aplican para ubicar escuelas, hospitales, silos, componentes eléctricos, centros de producción, almacenes, etc.

Este problema busca minimizar costos de producción/transportación en términos de centros establecidos. Similar a los problemas *p-MP* el problema se ubica en una red bipartita, pero se distingue por:

1. costo no negativo asociado a cada centro de distribución y se incurre en él cuando no está el centro en su ubicación y
2. el número de centros de distribución no está especificado.

Pueden existir asignaciones divididas cuando algunos de los clientes son atendidos por dos o más centros de distribución. Matemáticamente el objetivo es:

$$PLSS: \quad \min_{Q \subseteq I} \left\{ \sum_{i \in Q} f_i + \sum_{\substack{j \in J, \\ i \in Q}} c_{ij} x_{ij} \right\} \quad (1.3)$$

P-Problema de localización de servicios simple (*p-PLSS*)

Es una combinación de los modelos *p-MP* y *PLSS*; es una extensión del problema *p-MP* para el que los costos fijos del *PLSS* están asociados a los servicios potenciales; tiene la restricción adicional de que el número de servicios a establecer es un parámetro preestablecido p .

El problema se escribe como:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i \in I} f_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \\ & \text{s.a. :} \\ & \sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad \forall j \\ & x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i, \forall j \\ & \sum_{i \in I} y_i = p \\ & y_i \in (0, 1), \forall i; x_{ij} \in (0, 1), \quad \forall i, \forall j \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si se abre el centro } i \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el cliente } j \text{ satisface toda su demanda desde el centro } i \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

1.2.5. Problemas de Asignación Cuadrática, *QAP*

El problema de la asignación cuadrática, que se denota por sus siglas en inglés *QAP* (*Quadratic assignment problem*), es un modelo matemático para un conjunto de actividades económicas indivisibles. Se trata de asignar N instalaciones a una cantidad N de sitios en donde se considera un costo asociado a cada una de las asignaciones. Este costo dependerá de las distancias y flujo entre las instalaciones, además de un costo adicional por instalar cierta instalación en cierta locación específica. De este modo se buscará que este costo, en función de la distancia y flujo, sea mínimo.

Sean:

- m : unidades de igual tamaño; $M = 1, 2, \dots, m$,
- n : áreas; $N = 1, 2, \dots, n$; con $n \geq m$,
- A : una matriz simétrica de las distancias rectangulares entre los nodos,
- B : una matriz con las longitudes de los arcos que tenga la gráfica; si no existe el arco la entrada de la matriz correspondiente es igual a 0 y
- $b_{ij}a_{st}$: contribución a la función objetivo si un par de unidades (i, j) se asignan a las áreas (s, t) ; equivalente al término cuadrático $x_{ij}x_{jt}b_{ij}a_{st}$.

$$x_{is} = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad } i \text{ es localizada o ubicada en el área } s \\ 0 & \text{cualquier otro caso} \end{cases}$$

Los *QAP* se escriben como:

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} \sum_{s \in N} \sum_{t \in N} x_{ij}x_{jt}b_{ij}a_{st} \\ \text{s.a. :} & \\ & \sum_{s \in N} x_{is} = 1, \forall i && \text{(cada unidad deberá ser ubicada)} && (1.5) \\ & \sum_{i \in M} x_{is} \leq 1, \forall s && \text{(a lo más una unidad en cada área)} \\ & x_{is} \in (0, 1), \forall i, \forall s \end{aligned}$$

Estas formulaciones matemáticas estimularon el desarrollo de métodos analíticos que permitan encontrar la solución óptima. Los métodos de solución se explican en la siguiente sección.

1.3. Métodos de solución

Un enfoque para resolver los problemas p - MP , p - CP y $UFLP$ implica dos fases:

1. Una fase de localización del espacio factible de soluciones Q , y
2. Una fase de asignación, en la cual cada cliente es asignado a exactamente un servicio abierto y toda la demanda de ese cliente será cubierta desde el servicio que le fue asignado, tal que cierta función objetivo sea minimizada.

1.3.1. Análisis multicriterio

Este tipo de análisis busca satisfacer simultáneamente varios objetivos y es adecuado en muchas situaciones prácticas. Los criterios son introducidos en el modelo como restricciones que imponen algún valor máximo o mínimo, o que son enfocadas por un criterio sustituto (como una distancia).

La imposibilidad de alcanzar simultáneamente todos los objetivos perseguidos, crea la necesidad de innovar el enfoque de dicha selección y convierten a la Decisión Multicriterio en una herramienta complementaria para resolver este tipo de problemas.

Existen métodos de decisión multicriterio estándar propuestos para resolver FLP , como el método Promethee, el AHP; o las metodologías de Punto Ideal.

1.3.2. Métodos heurísticos

Son algoritmos que no garantizan la obtención de una solución óptima para un problema dado, solamente implican resolver un problema en forma aproximada y en un tiempo razonable para la gran mayoría de las aplicaciones reales. Son algoritmos generales de modo que se puedan adaptar a la gran mayoría de problemas de optimización discreta y combinatoria. A partir de los años ochenta ha habido un desarrollo impresionante de investigación y ya existe experiencia en el uso de estos algoritmos para la resolución de problemas complejos y el desarrollo de nuevos esquemas de solución más eficientes.

Por ejemplo, los algoritmos genéticos y de recocido simulado pueden usarse para atacar los FLP y obtener soluciones que no necesariamente son óptimas, pero se puede mostrar un comportamiento muy favorable del método con respecto a las instancias de las que ya se conoce la solución.

1.3.3. Programación entera

La programación lineal surgió en 1947 resultado del trabajo que George Bernard Dantzig⁷ hizo para la Fuerza Aérea de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. Desde entonces el concepto de programación lineal se ha aplicado a muchos de los problemas de optimización planteados mediante un conjunto de funciones lineales: función objetivo y un conjunto de restricciones en términos de variables de las decisión.

La flexibilidad para modelar complejos problemas así como la posibilidad de tener respuestas en un tiempo razonable mediante el método simplex⁸, aunado al desarrollo del microprocesador hacen

⁷Profesor, físico y matemático estadounidense.

⁸También desarrollado por Dantzig en 1949.

que los problemas de localización hayan sido abordados con este enfoque.

Los problemas de localización incluyen variables binarias para determinar los escenarios en caso de existencia o falta de los posibles centros de distribución.

La restricción de que las variables de decisión, incluidas en el problema de localización, sean enteras dificulta encontrar la solución óptima. El campo de investigación para problemas de localización lineales enteros emplea algunas de las siguientes técnicas para resolver el *FLP*:

- El *método de descomposición de Benders*, que separa los problemas de optimización de diferente naturaleza en un problema maestro y en uno o varios subproblemas. El maestro representa la primera etapa y las condiciones necesarias, denominadas cortes, derivadas de la segunda etapa. El subproblema representa la segunda etapa cuando las decisiones de la primera etapa son conocidas. El algoritmo es iterativo alternando la solución entre el maestro y el subproblema. Este método de descomposición se utiliza cuando las variables de la primera etapa complican la solución del problema. Geoffrion & Graves en 1974 fueron los pioneros en aplicar este método a problemas de producción-distribución.
- El *método de ramificación y acotamiento* es una técnica exploratoria que desarrolla un árbol en el cual el espacio de variables enteras se divide de forma sucesiva, dando lugar a sub-problemas lineales que se resuelven en cada nodo del árbol. En el nodo inicial las variables enteras se relajan como variables continuas, de tal forma que se les permite tomar valores fraccionarios. Si la solución de este problema produce de forma natural (una solución en la cual todas las variables toman valores enteros) se habrá alcanzado la solución; en otro caso se comienza una búsqueda en árbol: calcular en cada nodo una cota de los valores de las soluciones situadas por debajo.

Hindi & Basta en 1994 utilizaron esta técnica para trabajar el mismo modelo de Geoffrion & Graves, añadiendo la restricción de capacidad limitada, calculando los límites inferiores a través de transformaciones estructuradas.

- *Relajación Lagrangiana*, consiste en eliminar las restricciones que unen los diferentes dominios de planificación del conjunto de restricciones y añadirlas a la función objetivo. Sin las restricciones que unen los dominios de planificación, el problema queda dividido en N subproblemas que pueden resolverse individualmente. Si el modelo contiene variables binarias el método iterativo puede presentar dificultades para encontrar soluciones globalmente factibles y se suele proceder a métodos heurísticos para arreglar soluciones obtenidas que preserven la factibilidad.
- *Técnicas Primal-Dual*, consisten en la relajación de las condiciones primales mientras se satisfacen todas las condiciones complementarias de holgura. Esto permitió obtener algoritmos de aproximación para diversos *FLP* a partir del trabajo de Jain y Vazirini.

Dependiendo del tamaño del problema (número de variables contempladas) se analiza la cardinalidad de los conjuntos en los problemas de localización y se evalúa la rapidez con la que necesitan ser resueltos en el contexto real. La eficiencia para aplicar las técnicas antes mencionada se analiza, en la siguiente sección, desde el concepto de Complejidad computacional.

1.4. Complejidad computacional

Un **problema** es un conjunto de **instancias** al cual corresponde un conjunto de soluciones, además de una relación que asocia dichas instancias con un subconjunto de soluciones.

Un **algoritmo** es un método para resolver una instancia específica de un problema. La **eficiencia** de un algoritmo se mide de acuerdo al tiempo total de cómputo que consume la resolución del algoritmo o la cantidad de memoria usada. Importa en ello el **tamaño** de la instancia medida en número de operaciones a través de una **función de complejidad**⁹. En función de lo anterior se definen las siguientes clases de problemas:

- **Clase P :** Estos problemas de decisión son relativamente sencillos y se resuelven mediante algoritmos en tiempo polinomial, para ello existen algoritmos eficientes.
- **Clase NP :** Problemas Polinomiales no deterministas¹⁰ que incluyen todos los problemas “razonables” de importancia teórica y práctica. No es necesario resolver el problema; es suficiente con mostrar que tal verificación de la solución existe. Un problema de decisión de A está en la clase NP si existe un polinomio $p(n)$ y un algoritmo a para certificar y revisar la existencia de un algoritmo de solución.

x es una instancia “si” de $A \Leftrightarrow \exists$ una secuencia de símbolos en Σ , la certificación $c(x)$, $|c(x)| \leq p(|x|)$ considerando que si se provee la entrada $x\$c(x)$ al algoritmo a , este alcanza una respuesta si después de a lo más de $p(|x|)$ pasos

Los problemas P pertenecen al conjunto de problemas NP .

- **Clase NP -Duros:** Un problema de decisión A pertenece a esta categoría si para todo problema B que sea NP , existe un algoritmo que funciona en tiempo polinomial, capaz de reinterpretar toda instancia del problema A a una instancia del problema B . Es la categoría de todos los problemas que son al menos tan difíciles como cualquier otro de la **Clase NP** .
- **Clase NP -Completo:**
 1. No pueden resolverse con ningún algoritmo polinomial conocido.
 2. Si existe un algoritmo polinomial (eficiente) para cualquier problema NP -Completo y por tanto existen algoritmos polinomiales para todos los problemas en NP .

Los problemas NP -Completo son la intersección de NP con NP -Duros.

Resumiendo, los problemas de la clase P , se resuelven fácilmente y para los que existe un algoritmo que se resuelve en tiempo polinomial. Sin embargo, muchos problemas de localización (FLP) caen en la clase NP -Completo para los que se cree que no existe algoritmo que se resuelva en tiempo polinomial.

Se “cree” que estos problemas son intratables computacionalmente; significa que no son susceptibles al uso de algoritmos de solución eficientes y en el peor de los casos se requerirá una cantidad de tiempo exponencial para resolverlo, impráctico para todos los problemas salvo a instancias muy pequeñas.

⁹Se incluye el peor caso, siendo la más difícil de todas las instancias.

¹⁰Término acuñado por Stephen Arthur Cook.

1.5. Otros métodos de solución: Simulación

Algunos de los problemas de optimización no se pueden resolver fácilmente de manera analítica; una alternativa a esta problemática es utilizar la simulación. La simulación es una técnica con aplicaciones en distintos campos, utilizada para el análisis y estudio de sistemas complejos.

La simulación es una herramienta de la Investigación de Operaciones (I. de O.) que sirve para analizar problemas de optimización en sistemas donde los recursos son limitados o difíciles de resolver mediante un algoritmo. "Los modelos de simulación dividen el sistema representado en módulos básicos entrelazados por relaciones lógicas¹¹". Es una técnica que construye un modelo, lo más parecido al sistema real bajo estudio, y lo hace funcionar a semejanza del sistema real en condiciones de prueba, para analizar todos los posibles desempeños del sistema.

Es posible aplicar la técnica de simulación para los *FLP*, por pertenecer a la familia de los problemas *NP-Complejos*. Por lo tanto, el diseño de algoritmos aproximados o heurísticos que puedan entregar buenas soluciones en tiempos razonables es crucial¹².

Tanto las áreas nuevas como las tradicionales comparten la propiedad de enfrentar modelos más complejos dado el desarrollo y crecimiento económico, el avance científico-tecnológico y la inestabilidad económica y política mundial.

Simulación basada en agentes

En las últimas décadas, debido en gran parte al desarrollo del microprocesador, han aparecido innovadoras técnicas de modelado de sistemas complejos y simulación dinámica; entre estas técnicas esta la simulación basada en agentes.

La simulación basada en agentes sigue la misma metodología de la simulación, es en el modelo programado donde cada "agente" (parte, sujeto o entidad empleada en la descripción de los actores dinámicos de modelo) actúa de manera independiente y bajo sus propias reglas de acuerdo a la naturaleza del fenómeno descrito.

A pesar de su reciente desarrollo, la Simulación Basada en Agentes (*ABS*) está teniendo un rápido crecimiento. Es posible también aplicar una simulación basada en agentes a los problemas de localización, donde los centros de distribución y de demanda son heterogéneos, interactúan y donde el espacio geográfico es crucial.

Actualmente encontramos diversas opciones de software para implementar *ABS*, construir un modelo basado en agentes *ABM* es una tarea muy compleja si hay que utilizar las técnicas de programación clásicas. NetLogo es una plataforma que ofrece *ABS* permitiendo comparar en tiempo real de ejecución, y dentro de la misma plataforma, un modelo diseñado con un enfoque basado en agentes y otro diseñado bajo la óptica de dinámica de sistemas. NetLogo es apto para modelar sistemas complejos a lo largo del tiempo. Los modeladores pueden dar instrucciones a través de una gran variedad de "agentes" que operen independientemente. Esto permite explorar la conexión a niveles detallados de comportamiento y reflejar patrones a gran escala en su interacción.

¹¹Flores y Elizondo. Apuntes de simulación. Universidad Nacional Autónoma de México. 2007.

¹²Daskin, Mark. *Network & Discrete Location. Models, Algorithms and Applications*, John Wiley & Sons Inc, 1995.

Permite a sus usuarios experimentar con las simulaciones y explorar su comportamiento bajo diferentes condiciones, permite la creación de modelos propios que se pueden modificar interactivamente o a través de código.

1.6. Caso de aplicación

Este documento propone aplicar la simulación basada en agentes utilizando el *software* NetLogo para un problema de localización *FLP* en un ambiente económico competitivo que describa la interacción de los centros de distribución y la satisfacción de la demanda, analizando la apreciación de los servicios que cada centro otorga en un intervalo de tiempo.

Cuadro 1.2: ¿Por qué utilizar Simulación basada en agentes usando NetLogo para resolver un problema de localización?

Técnica empleada	Justificación
Simulación	Rapidez Reduce los costos y el tiempo de análisis Permite evaluar distintos escenarios El <i>FLP</i> es de la clase <i>NP-Completo</i> por lo que para problemas grandes puede ser difícil de resolver a través de métodos exactos. Es un problema dinámico, ya que el momento del tiempo en el que analiza influye su estado.
Simulación basada en agentes	Es de tipo discreto, ya que determina la localización de un conjunto enumerable de centros Capaz de modelar sistemas con unidades independientes Reactividad ante cambios en el sistema Reduce la memoria usada Cada agente es independiente Cada agente responde al estado del sistema Se aplica para ubicar escuelas, hospitales, silos, componentes eléctricos, centros de producción, almacenes, etc.
NetLogo	<i>Software</i> de distribución libre Lenguaje de programación Java Permite participación de distintos programadores para configuración inicial

Fuente: Davidsson, Holmgren, y Persson (2007).

El problema de localización ha sido ampliamente estudiado bajo el enfoque geométrico, de programación lineal entera y técnicas heurísticas.

También están las técnicas heurísticas que resultan particularmente útiles en la resolución de problemas complejos que pertenecen a la clase *NP-Duros*¹³; la simulación basada en agentes *ABS* se ha empleado recientemente como una técnica heurística para problemas de optimización en sistemas complejos y heterógeneos.

La simulación basada en agentes es una de las técnicas más innovadoras para modelar sistemas a través de la interacción de unidades independientes que a lo largo del tiempo reflejan un comportamiento poblacional que aporta conocimiento detallado y verificable del sistema.

¹³Burke & Kendall (2005).

1.6.1. Hipótesis de la tesis

Utilizar un modelo basado en agentes para simular un problema de localización puede proporcionar soluciones rápidas a un gran número de problemas con beneficios sociales y/o económicos. Además, el uso de la plataforma NetLogo permitirá la aplicación desde un enfoque complejo de manera rápida y sencilla.

1.6.2. Ley de Hotelling

El modelo simulado es una representación de la ley de Hotelling (1929) que examina la ubicación óptima para centros de distribución, la cobertura que cada centro hace y el costo que compradores dispuesto a pagar por el bien o servicio.

Hotelling¹⁴ es conocido en el campo de la Estadística, por la distribución T^2 . En Economía hizo la observación, de que en multitud de mercados es racional que los productores hagan productos similares y todos tengan éxito: “Principio de mínima diferenciación”.

Este enfoque contempla que bienes o servicios proporcionados por prestatarios rivales tienden a ser muy similares (en ubicación, precio y tipo de producto ofrecido) de lo contrario pueden perder participación en el mercado.

El modelo empleado en la simulación es una aplicación del publicado por el economista.

¹⁴(1895 - 261973) Matemático, estadístico e influyente economista. Fue Profesor Asociado de Matemáticas en Stanford, miembro de la facultad de la Universidad de Columbia y Profesor de Estadística Matemática en la Universidad de Carolina del Norte.

Capítulo 2

Marco de referencia

En el capítulo anterior se hizo una breve reseña histórica de los trabajos desarrollados para resolver el problema de localización, que aunque no lo hacen de manera exacta, exponen formulaciones de programación lineal entera que hacen viable utilizar métodos de solución para obtener soluciones muy cercanas al óptimo en poco tiempo.

En este capítulo se destaca la relevancia que la simulación basada en agentes ha cobrado en los últimos años, como herramienta para la toma de decisiones, su carácter multidisciplinario, sus características y el potencial para aplicarlo en un problema de localización y considerarla objeto de estudio de esta tesis.

2.1. Estado del arte

Generalmente, los algoritmos de optimización son procedimientos paso a paso para resolver problemas de optimización. Pueden ser exactos si encuentran la solución óptima o heurísticos si logran encontrar una buena solución, no necesariamente la óptima. Son particularmente útiles para resolver problemas complejos, es decir los problemas pertenecientes a la clase de problemas *NP-Duros*.

Como ha señalado Madejski (2007), los modelos basados en agentes para optimización pueden ser diseñados de acuerdo a un esquema de descomposición física o funcional. Para las descomposiciones físicas, los agentes representan entidades físicas (trabajadores, máquinas herramientas, recursos, vehículos) que intervienen en el problema específico a resolver. En el enfoque de descomposición funcional, no existe una relación entre los agentes y entidades físicas, en este caso, los agentes están asignados a algunas funciones (por ejemplo, la programación, la secuenciación, manejo de materiales) sobre la base de algunas reglas destinadas a optimizar comportamientos.

Davidsson, Holmgren, y Persson (2007) clasifican los problemas de optimización de acuerdo con su dimensión, proporcionando una descripción y los elementos deseables del método de solución para cada dimensión.

Cuadro 2.1: Dimensiones de los problemas de optimización

Dimensión	Descripción	Propiedad deseada del método de solución
Tamaño	Número de variables de decisión, parámetros y restricciones.	Baja complejidad computacional.
Modularidad	Posibilidad de identificar claramente sub-dominios y sub-problemas.	Apoyo para la descomposición modular.
Escala de tiempo	¿Con qué frecuencia cambia la estructura?	Capacidad de reaccionar y modificar en un tiempo corto.
Calidad de la solución	Importancia de lograr el óptimo o acercarse.	Capacidad de encontrar soluciones óptimas o cercanas.
Complejidad computacional	Número de operaciones necesarias para resolver el problema .	Menor número de operaciones y tiempos cortos de cálculo.

Fuente: Davidsson, Holmgren, y Persson (2007).

Teniendo en cuenta el tamaño y la modularidad, los modelos basados en agentes soportan mejor la partición del problema en problemas más pequeños. La reducción del tamaño de sub-problemas sencillos podría ayudar en el logro de mejores soluciones.

Dado que los agentes no tienen que tomar decisiones muy complejas, podrían ser capaces de reaccionar rápidamente a los cambios. En particular, si el problema se caracteriza por un alto dinamismo los *ABMs* permiten encontrar soluciones adecuadas en poco tiempo; en contraste con las técnicas de optimización que a menudo requieren más tiempo para responder a cambios en las variables y los parámetros del problema.

Como los *ABMs* se distribuyen, puede ser que no tengan una visión global del estado del sistema; por lo tanto, la calidad de la solución proporcionada por una heurística clásica podría ser mejor. Sin embargo, en algunos problemas que se ajustan a las características de los *ABMs*, se pueden producir resultados competitivos.

Los *ABMs* otorgan un enfoque interesante cuando el tamaño del problema es grande, el dominio es de naturaleza modular y la estructura de dominio cambia frecuentemente. En particular, la mayoría de las aplicaciones se encuentran en proceso de fabricación debido a la complejidad de la búsqueda de espacio con un alto número de variables de decisión, parámetros y limitaciones¹⁵. Desde cierto punto de vista, el uso de estos modelos y de las heurísticas clásicas tienen características complementarias. Por esta razón existe un creciente interés hacia los enfoques que incorporan las técnicas de optimización a un esquema de *ABM*. En la práctica, la integración se puede realizar:

1. Utilizando una técnica de optimización para la planificación y *ABM* estratégica para la re-planificación operativa y táctica, es decir, para realizar ajustes locales del plan inicial;
2. Optimizando los comportamientos de los agentes físicos, mediante la traducción de algoritmos de búsqueda en el comportamiento de los agentes.

Un aspecto crítico que surge con el fin de verificar la eficiencia de los *ABM* es la falta de problemas resueltos mediante otras técnica para comparar resultados. De los artículos evaluados sólo 6 no presentan ninguna validación. En 27 casos, se utiliza el enfoque *ABM* para la solución de problemas del mundo real de diversos sectores y áreas de aplicación. Sólo un trabajo compara los resultados del *ABM* con un enfoque exacto.

¹⁵Shen, Wang, y Hao, 2006.

2.1.1. Líneas de investigación

El concepto de agente se utilizó por primera vez en 1995¹⁶. A partir de una revisión¹⁷ de documentos publicados entre 2000 y 2009 sobre optimización basada en agentes, hay un total de 66 artículos publicados que ha incrementado anualmente.

Cuadro 2.2: Artículos publicados por año

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
7	3	0	5	8	4	7	11	7	14

Fuente: Wooldridge, M., & Jennings, N. (1995).

Entre los países que mantienen el mayor interés en este tipo de investigación están China y Gran Bretaña:

Cuadro 2.3: Artículos publicados por país

País	Número de artículos
China	9
Gran Bretaña	8
Estados Unidos	6
Canadá	6
Alemania	6
Taiwan	5
Japón	5
Francia	3
Nueva Zelanda	3
Corea del Sur	3
Singapur	2
Italia	2

Fuente: Wooldridge, M. & Jennings, N. (1995).

Los artículos explorados se clasifican por el campo de aplicación como sigue:

Cuadro 2.4: Por campo de aplicación

Campo de aplicación	Número de artículos
Calendarización	33
Transporte y logística	13
Planeación de cadena de suministros	12
Planeación general	3
Problemas de localización	3
Problemas binarios de embalaje	2

Fuente: Wooldridge, M., & Jennings, N. (1995).

¹⁶Wooldridge, M. & Jennings, N. (1995). Intelligent agents: *Theory and practice*. *Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115 a 152.

¹⁷M. Barbati a, G. Bruno a, A. Genovese. *Applications of agent based models for optimization problems: A literature review*. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, 2012.

Artículos sobre el problema de localización

Sobre el *FLP* se tienen los siguientes trabajos:

- Kaihara (2003) desarrolla un enfoque basado en el agente para la resolución de los problemas de asignación de productos dentro de una cadena de suministro basado en el mercado virtual. El enfoque se basa en un protocolo de distribución de los recursos que se rige por la interacción de los agentes en el mercado, donde los agentes representan a las empresas dentro de la cadena de suministro.
- Arentze y Timmermans (2007) desarrollan un marco basado en agentes para hacer frente a la planificación de viajes que también involucra cuestiones de ubicación. El modelo representa a individuos (que expresa la demanda de viajes) y las empresas (que expresan la oferta de viaje) con los agentes, en busca de la configuración óptima.
- Sirikijpanichkul, van Dam, Ferreira y Lukszo (2007) desarrollan un modelo integral para la evaluación de carreteras ferroviarias intermodales como decisiones de localización, usando cuatro agentes dominantes. Se introduce un enfoque de modelado basado en agentes para permitir que dicha negociación suceda con el fin de lograr un objetivo global.
- Uno, Katagiri, y Kato (2008) explotan las características de los sistemas basados en agentes para el desarrollo de un método de búsqueda de soluciones Stackelberg en problemas de localización de instalaciones con dos niveles.

En problemas donde hay un duopolio y una de las empresas es seguidora y la otra es líder; la solución es el punto de equilibrio donde ambas empresas maximizan su beneficio.

2.1.2. Ubicación de la tesis en las líneas de investigación y aportaciones

El estudio desarrollado en esta tesis pretende demostrar la utilidad del enfoque de los *ABMs* para abordar problemas de la clase *NP-Complejos* mediante la técnica de Simulación aplicado a un problema ya ampliamente estudiado, el de localización de servicios (*FLP*) y que ha tenido buenos resultados con técnicas de optimización heurística.

Como ya se mencionó, este novedoso enfoque permite tiempos de respuesta eficientes a los cambios dentro del sistema que pueden traducirse en mejorar el proceso de toma de decisiones en problemáticas institucionales, empresariales o inclusive gubernamentales.

2.2. Marco teórico

Terminología básica

Un **sistema** es una colección de entidades que actúan e interactúan hacia la realización de algún fin lógico.

Sin embargo, en la práctica esta definición por lo general tiende a ser más flexible. La descripción exacta de los sistemas normalmente depende de los objetivos del estudio de la simulación. Por ejemplo, lo que podría ser un sistema para un estudio particular podría ser un subconjunto del sistema global de otro.

Los sistemas generalmente tienden a ser dinámicos, cambian con el tiempo. Para describir este estado, se utiliza el concepto del estado de un sistema. El **estado** de un sistema es el conjunto de variables necesario para describir el estatus del sistema en algún momento determinado.

Para describir los cambios en el estatus de sistema, se requiere un conjunto de variables conocidas como **variables de estado**. Por ejemplo el número de servidores ocupados, el número de clientes en el banco, el tiempo de llegada del siguiente cliente y el tiempo de salida de los clientes en servicio, juntos describen cada cambio posible en el estatus del sistema. En un sistema, un objeto de interés se llama **entidad**, y las propiedades de una entidad se llaman **atributos**.

2.2.1. Simulación

No todos los problemas del mundo real se pueden representar de manera adecuada en las formas de modelos analíticos; para poder lograrlo muchas veces se requiere un conjunto de simplificaciones que hacen que las soluciones se vuelvan difíciles de implementar. En estos casos, es común que la manera alternativa de modelado y análisis disponible para la toma de decisiones sea la simulación.

La simulación se podría ver como un experimento de muestreo en el sistema real, donde los resultados son los puntos muestrales. Por ejemplo, para obtener la mejor estimación de la medida de desempeño, se promedian los resultados muestrales. Resulta evidente que mientras más repeticiones se generen, mejor será la estimación. Sin embargo, otros factores, como las condiciones iniciales de la simulación, la longitud del periodo que está siendo simulado, la exactitud del modelo en sí, inciden en qué tan buena será la estimación final.

La simulación tiene ventajas y desventajas. La principal ventaja de la simulación es que la teoría es relativamente directa. En general, los métodos de simulación son más fáciles de aplicar que los métodos analíticos.

La simulación también puede ser costosa. No obstante, con el desarrollo de lenguajes de simulación de aplicación específica, disminución del costo computacional y avances en las metodologías de simulación, el problema del costo es cada vez menos importante.

La **simulación** se podría definir como una técnica que imita la operación de un sistema del mundo real a medida que evoluciona con el tiempo. Esto normalmente se hace desarrollando un modelo de simulación.

Un **modelo de simulación**, por lo general, toma la forma de un conjunto de suposiciones acerca de la operación del sistema, expresado como relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos de interés en el sistema. A diferencia de las soluciones matemáticas exactas disponibles con la mayor parte de los modelos analíticos, el proceso de simulación tiene que ver con ejecutar el modelo a través del tiempo, por lo común en una computadora, para generar muestras representativas de las medidas de desempeño.

Si bien los modelos analíticos podrán requerir que se hicieran muchas suposiciones simplificadas, los modelos de simulación tienen pocas restricciones de este tipo, así que dan mayor flexibilidad para representar el sistema real. Una vez construido el modelo, se puede usar una y otra vez para analizar diferentes políticas, parámetros o diseños. Se debe remarcar que la simulación no es una técnica de optimización. La mayoría de las veces se utiliza para analizar preguntas del tipo “qué pasa

sí”.

Los modelos de simulación se pueden utilizar para representar la importancia de interacciones de los elementos de un sistema. La construcción y validación de estos modelos ha funcionado correctamente para explicar el comportamiento de los sistemas. Además, es más factible experimentar en el modelo de simulación para proyectar diferentes escenarios, que experimentar en la realidad, por costo o tiempo. La simulación permite también evaluar largos periodos de manera inmediata (con ayuda de los datos históricos que ya existen).

La simulación se utiliza cuando las condiciones del sistema analizado dificultan la experimentación: ante condiciones peligrosas o irrealizables, incluso si la construcción de un modelo físico resulta complicada y la solución analítica del modelo matemático no existe, o es poco realista, o muy difícil de encontrar. Además, es más sencillo controlar o modificar las condiciones de un modelo de simulación que de un sistema real, se pueden probar condiciones que ni siquiera se presentan en la realidad. También permite analizar el desempeño del sistema en largos periodos de manera rápida, es decir la evolución del modelo a lo largo del tiempo.

Dependiendo de la naturaleza del sistema los modelos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Simulación Continua VS Simulación Discreta

Los modelos de simulación discretos y continuos, se definen de manera análoga a los sistemas discretos y continuos respectivamente. Pero un modelo discreto de simulación no siempre se usa para modelar un sistema discreto. La decisión de utilizar un modelo discreto o continuo para simular un sistema en particular, depende de los objetivos específicos de estudio. Por ejemplo: un modelo de flujo de tráfico en una autopista, puede ser discreto si las características y movimientos de los vehículos en forma individual es importante. En cambio si los vehículos pueden considerarse como un agregado en el flujo de tráfico entonces se puede usar un modelo basado en ecuaciones diferenciales presentes en un modelo continuo.

Simulación Determinística VS Simulación Estocástica

Si un modelo de simulación no considera ninguna variable importante, comportándose de acuerdo con una ley probabilística, se le llama un modelo de simulación determinista. En estos modelos la salida queda determinada una vez que se especifican los datos y relaciones de entrada al modelo, tomando una cierta cantidad de tiempo de cómputo para su evaluación. Sin embargo, muchos sistemas se modelan tomando en cuenta algún componente aleatorio de entrada, lo que da la característica de modelo estocástico de simulación.

Estos modelos producen salidas de carácter aleatorio que deben ser tratadas únicamente para estimar las características reales del modelo, esta es una de las principales desventajas de este tipo de simulación

Ejemplos: sistema de inventarios de una fábrica o sistema de líneas de espera de una fabrica.

Simulación Estática VS Simulación Dinámica

Un modelo de simulación estática, se entiende como la representación de un sistema para un momento en particular o bien para representar un sistema para el que el tiempo no es importante;

en cambio un modelo de simulación dinámica representa a un sistema en el que el tiempo es una variable de interés, como por ejemplo en el sistema de transporte de materiales dentro de una fábrica, una torre de enfriamiento de una central termoeléctrica, etc.

Ejemplo: simulación Montecarlo.

Considerando que los *FLP* son de tipo *NP-completo*, la simulación puede ser utilizada para encontrar buenas soluciones del problema; especialmente cuando la cardinalidad de los clientes y centros de distribución dificulten encontrar una solución mediante enumeración.

Siempre se inicia con la formulación del problema y se termina con la elaboración del documento escrito sobre los resultados de la simulación, sin embargo se puede regresar a cualquier etapa de la metodología tantas veces como sea necesario, de acuerdo a los descubrimientos en cada parte del análisis. La metodología de la simulación incluye los pasos mostrados en el siguiente diagrama de flujo.

2.2.2. Modelación basada en agentes

La unión de los autómatas celulares con la teoría de juegos, en los años noventa, en un ambiente impulsado por el uso de las computadoras, permitió desarrollar múltiples usos para ciencias sociales. El enfoque de modelación basada en agentes surgió del campo de la Inteligencia Artificial¹⁸. Como ejemplo de esta técnica es el juego de la vida de Conway¹⁹, que tiene cuatro reglas muy simples a partir de las que se consigue construir un sistema de autómatas celulares que simula la vida de una sociedad de organismos complejos que interactúan entre sí.

No existe un lenguaje estándar o único para aplicar modelación basada en agentes (ABM). Entre las generalidades se incluyen:

- Arquitectura basada en objetos;
- Contador de tiempo (puede ser continuo a discreto);
- Dimensión especial;
- Redes y vínculos entre agentes;
- Comunicación entre agentes y entre agentes y su entorno;
- Creación y destrucción dinámica de agentes;
- Descripción estadística de agentes poblacionales.

La simulación basada en agentes (*ABS*) es similar a la programación orientada a objetos, para la que se define una **clase** como el conjunto de objetos similares llamadas **instancias** que son creadas hasta la ejecución, así que los agentes solo existen mientras se ejecuta la simulación. Los agentes de una misma clase tienen estructura y comportamiento similares pero se caracterizan y diferencian por su **información de estado**.

La **interfaz** de un agente es el conjunto de características y partes extremas del modelo que podemos

¹⁸Se denomina inteligencia artificial a la ciencia que desarrolla procesos que imitan a la inteligencia de los seres vivos.

¹⁹Gardner, 1970.

ver y mediante las que se interactúa con él. También existe la **implementación** para cada agente, definida como el conjunto de características internas e inaccesibles para el usuario.

La distinción entre los agentes permite desarrollo modular modificando su implementación sin afectar a otros agentes.

De acuerdo a la definición de Wooldridge and Jennings (1995), un **agente** es un sistema computacional que interactúa con su ambiente caracterizado por:

1. Independencia: Cada agente actúa sin control directo de un ser humano u otro dispositivo;
2. Reactividad: Los agentes responden de manera particular a las señales que emite su medio ambiente; tienen la habilidad de “aprender”, proceso mediante el cual el agente es capaz de modificar su comportamiento como respuesta a una serie de experiencias o resultado de la interacción que tiene con otros agentes;
3. Proactividad: Los agentes están dotados de comportamientos dirigidos a metas específicas y toman la iniciativa con el propósito de alcanzarlas.

Los **modelos basados en agentes** o sistemas multi agentes (*ABM*, por sus siglas en inglés *Agent based Models*) son conjuntos de elementos caracterizados por algunos atributos, que interactúan entre ellos mediante reglas definidas en un ambiente. Este tipo de modelos sirve para reproducir sistemas relacionados a lo económico y ciencias sociales que se pueden formular mediante redes²⁰.

Son modelos en donde los procesos dinámicos requieren repeticiones en un intervalo de tiempo.

Los *ABM*s capturan la riqueza de los modelos matemáticos y permiten pronosticar y explorar posibles futuros escenarios, experimentando posibles decisiones alternativas, estableciendo distintos valores para las variables de decisión y analizando los efectos de estos cambios²¹. Ayudan a comprender propiedades generales y patrones de todo el escenario que no se deducen al observar cada agente, debido a las complejas interacciones de los elementos del sistema.

El desarrollo de los *ABM* requiere una descripción detallada para definir claramente:

- El objeto de la simulación, cuál es el fenómeno a reproducir definiendo el espacio donde la simulación tomará lugar;
- La población de agentes, donde los agentes pueden estar agrupados en distintas categorías de acuerdo a sus características, reproduciendo los componente del sistema;
- La capacidad de adaptación de cada categoría de agentes: cada categoría tendrá una capacidad de adaptación diferente, un grado diferente de reactividad y proactividad;
- Interacción con agentes de la misma o distinta categoría, en este contexto los agentes pueden ser competitivos si sus objetivos son distintos. Los paradigmas de interacción se clasifican²² en:
 1. Paradigma cooperativo, cuando existe una relación coordinada entre los agentes no competitivos;

²⁰Billari, Fent, Prskawetz & Scheffran, 2006; Conte, Hegselmann & Terna, 1997.

²¹Axelrod, 1997.

²²Weiss, 1999.

2. Paradigma competitivo, en el que algunas reglas para la competitividad ya están definidas.

Para lograr sus objetivos, los agentes deben interactuar y comunicarse. Las capacidades de comunicación incluyen la habilidad de recibir y enviar mensajes. Esto asegura los mecanismos de coordinación entre los agentes, evitando conflictos para que cada uno logre sus objetivos.

Los enfoques que aseguran lograr el objetivo global son:

1. Enfoque distribuido, en el que agentes están dotados de normas de auto organización para la distribución de recursos en función de lograr su objetivo;
2. Enfoques centralizados, en los que se asigna un agente mediador con la tarea de regular y supervisar las conductas de los agentes.

La implementación de un paradigma basado en la competencia significa reproducir formas de negociación entre los agentes sin mediador. En este caso, cada agente es auto-interesado, lo que significa que la solución final puede ser la mejor para el agente único implicado, pero no para el grupo como un todo. Dadas sus particularidades en el tratamiento de la representación y la simulación de sistemas complejos, los *ABMs* se han aplicado recientemente (combinados con otras técnicas de optimización) para resolver problemas de optimización cuyos dominios presentan componentes interrelacionados en un entorno distribuido y heterogéneo²³.

2.2.3. Simulación Basada en agentes

La simulación basada en agentes ha demostrado ser útil para modelar sistemas complejos, especialmente sistemas sociales a lo largo del tiempo. Reconoce que los sistemas complejos son producto de comportamientos individuales y de sus interacciones.

En este tipo de simulación los componentes básicos del sistema real están representados individualmente en el modelo del sistema real y las interacciones que tienen lugar entre los componentes básicos del sistema real se corresponden con las interacciones que tienen lugar entre los agentes del modelo. Esta correspondencia directa aumenta el realismo y el rigor científico de los modelos formales así construidos. Los sistemas basados en agentes se caracterizan por ser autónomos, heterogéneos

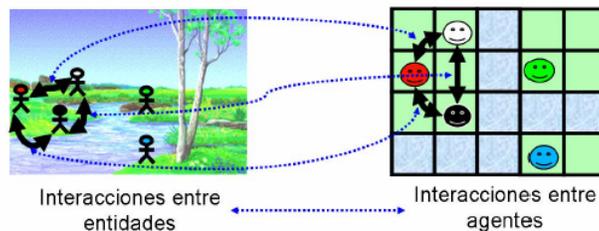


Figura 2.1: En la simulación basada en agentes, los componentes básicos del sistema real y las interacciones entre ellos están explícita e individualmente representados en el modelo.

e independientes, muestran cada uno sus propias metas y objetivos y generalmente son capaces de interactuar entre sí y con su entorno. En ocasiones, son sistemas caracterizados por la existencia

²³Weiss, 1999 ; Wooldridge, 2002.

de un número grande de agentes relativamente simples, que pueden evolucionar a lo largo del tiempo para adaptarse a nuevas condiciones del entorno o a nuevos objetivos. Es relevante en:

- Sistemas con componentes individuales heterogéneos; sistemas reales en los que los individuos son heterogéneos;
- Sistemas adaptativos, los componentes individuales del sistema son capaces de aprender o bien pueden ser seleccionados y reemplazados de acuerdo con algún criterio;
- Sistemas en los que el espacio geográfico puede tener una influencia significativa;
- Sistemas en los que existen redes sociales de interacción;
- Sistemas en los que se desea analizar en profundidad la relación existente entre los atributos y comportamientos de los individuos frente a las propiedades globales del grupo.

Los métodos basados en agentes facilitan el estudio y modelado de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiendo construir modelos experimentales de la realidad desde un punto de vista diferente al tradicional: desde lo más simple hacia lo más complejo.

2.2.4. Ley de Hotelling

Después del trabajo del Profesor F. Y. Edgeworth no hay mucho que pueda ser dicho sobre la teoría de la competencia entre pocos competidores, cuando alguno de los oferentes aumenta el precio, disminuye el volumen de sus ventas.

Piero Sraffa²⁴ afirma que el mercado generalmente se divide en subregiones dentro de las cuales sólo un vendedor tiene una posición cuasi monopolística y que así como el vendedor establece el precio de venta, el comprador establece el precio que está dispuesto a pagar.

Las condiciones de duopolio donde hay dos competidores fueron tratadas por A. Cournot (1838); su teoría fue retomada por Walras²⁵, Bertrand hizo una revisión de ambos trabajos²⁶ y Edgeworth extendió este último trabajo en su tratado *Giornale degli Economisti*²⁷. Todos estos autores sostienen que además de la similitud entre los competidores, existe una inestabilidad esencial en duopolio. El equilibrio se puede perder bajo algunas condiciones, convirtiéndolo ligeramente en algo similar a un monopolio o en una guerra de precios que termina por eliminar a alguno de ellos.

El equilibrio se logra cuando el sistema de ecuaciones simultáneas sobre la cantidad que ofrece cada competidor se resuelve. Sin embargo, una ligera reducción de precio por parte de uno de los competidores le otorga ventaja competitiva.

Más aún, Bertrand objetó que para un duopolio donde la demanda para cada competidor está correlacionada, no existe una solución definitiva, para tener preferencia natural de un competidor sobre otro.

De acuerdo al Professo Sraffa, si un vendedor aumenta su precio demasiado, gradualmente pierde

²⁴ *The Laws of Return Under Competitive Conditions*, Economic Journal, Vol XXXVI, pp. 535-550 (Diciembre 1926).

²⁵ *Théorie Mathématique de la Richesse Sociale*

²⁶ *Journal des Savantes* (1883), pp. 499-508.

²⁷ 1897.

posición frente a sus rivales y los compradores que pierde los gana su competidor; no pierde posición cuando el incremento de precio es ligero ya que quizás la ubicación es una ventaja que se equilibra en la diferencia de precios o porque sus opciones de venta son más atractivas, venden productos adicionales o porque conocen a un familiar o amigo, tiene mejor servicio; alguna de las razones anteriores o una combinación de ellas.

El supuesto generalizado en su trabajo es que todos los trabajadores prefieren al vendedor que ofrece el precio más bajo como una función continua de las diferencias de precios entre los competidores; este principio señala que no existe un solo precio en el tiempo²⁸. Como sucede en el cuerpo: la temperatura no es la misma en cada parte del cuerpo.

En 1929, Hotelling expone en su artículo *Stability in Competition* cómo las empresas pueden competir en precios y aún así obtener beneficios positivos en un entorno competitivo:

Supongamos que hay dos tiendas compitiendo, ubicadas en la misma calle que corre de norte a sur. El dueño de cada tienda quiere localizar su negocio de forma que se maximice su penetración en el mercado atrapando el mayor número de clientes. En este ejemplo ofrecen la misma calidad y precio. Los clientes están repartidos equitativamente a lo largo de la calle; por tanto, teniendo en cuenta que los precios son exactamente los mismos, cada cliente siempre elegirá la tienda más cercana.

Para una sola tienda, la ubicación óptima es cualquier lugar a lo largo de la calle. El dueño de la tienda es completamente indiferente a la ubicación de la tienda, ya que atraerá a todos los clientes porque no hay competencia. Sin embargo, desde el punto de vista de una función de bienestar social que trata de minimizar la suma de los cuadrados de las distancias que las personas tienen que caminar, la localización óptima está a medio camino a lo largo de la calle.

La ley de Hotelling predice que una calle con dos tiendas también encontrará tiendas contiguas justo a la mitad de camino. Cada tienda servirá a la mitad del mercado: uno será atraer a los clientes desde el norte, los otros clientes todos los del sur²⁹.

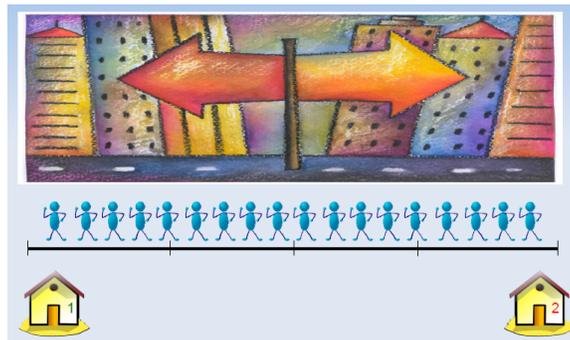


Figura 2.2: Ubicación de 2 tiendas en una calle.

Fuente: http://pareto.uab.es/xvila/Master_in_Computing/Blank_files/Master-ETSE-UAB.pdf

²⁸El bien o servicio proporcionado está absolutamente estandarizado en su mercado.

²⁹Para otro ejemplo ver sección 3.2.1.

Sería mejor si las tiendas se separaran y se trasladaran a una cuarta parte del camino a lo largo de la calle para que los clientes tuvieran que recorrer menos distancia. Sin embargo, ninguna tienda estaría dispuesta a hacer esto de manera independiente, ya que le otorga al competidor la posibilidad de reubicar su tienda y capturar más de la mitad del mercado.

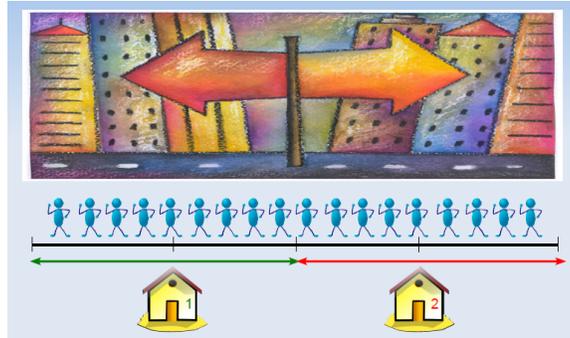


Figura 2.3: Ubicación mejorada de 2 tiendas en una calle.

Fuente: http://pareto.uab.es/xvila/Master_in_Computing/Blank_files/Master-ETSE-UAB.pdf

La calle es una metáfora de la diferenciación de los productos (ubicación). El ejemplo se puede generalizar a todos los otros tipos de diferenciación o características físicas del producto.

El modelo original supone que cada consumidor adquiere un número mínimo de ventas en las tiendas, y que el precio de estos bienes es fijado por una autoridad externa. Cuando no se cumplen estos supuestos, las empresas tienen incentivos para diferenciar sus productos. Cuando los precios no son fijos, las empresas pueden modificar sus precios para lograr ventaja y por tanto mayores ventas que sus competidores.

Ventajas y desventajas del modelo

- Versiones más realistas de este tipo de diferenciación espacial nos harán entender los factores que influyen en las decisiones de localización en tiendas, bares, restaurantes, hoteles, etc, lo cual es determinante en una empresa.
- Este modelo también nos ayuda a entender las opciones de los grandes partidos políticos prediciendo que ganará el partido que se desplace hacia el centro, pero que si las diferencias entre elegir a uno u otro desaparecen se desatará una guerra de precios, digamos de ofertas electorales, y el equilibrio no será posible.
- Puede no existir equilibrio en este modelo reducido ya que no se impone ningún tipo de restricción a la localización de empresas por lo cual las empresas tendrían dos opciones:
 1. situarse en la posición media, lo que se conoce como principio de mínima diferenciación o
 2. si todas coincidieran en el mismo lugar, y la diferenciación de productos desapareciera, entrarían en una guerra de precios sin salida que las llevaría a perder sus beneficios extraordinarios.

La conclusión básica del modelo de Hotelling es el principio de equilibrio el cual consiste en que las empresas minimizan sus diferencias para que el consumidor sea indiferente ante su elección. Esta mínima diferencia entre los productos ofrecidos está supeditado a fuerzas como la que se da cuando las empresas pueden querer estar donde está la demanda (en el centro) o en caso de llegar a un acuerdo a localizarse en el centro y repartirse el mercado a medias. **En un ambiente de mercados racionales todos los prestatarios de bienes y servicios consiguen maximizar su ganancia mientras ofrezcan productos con características muy similares, si los precios son similares o regulados por una entidad, la única variable que pudiera afectar la elección del comprador es la ubicación de cada centro de distribución participante.**

De esta manera, el modelo de la ley de Hotelling puede ser utilizado bajo el enfoque de simulación basada en agentes para el propósito de esta tesis ya que el problema señalado en el principio de mínima diferenciación compara varias tiendas (agentes) que actúan de manera independiente, mostrando adaptabilidad al mercado en competencia (reactividad) y buscando mejorar su posición de líder entre los competidores (proactividad). Además, el modelo programado permite hacer configuraciones de manera que se aproxime lo más posible al problema de la vida real.

2.3. Metodología de Investigación de la tesis

“La metodología representa la manera de organizar el proceso de la investigación, de controlar los resultados y de presentar posibles soluciones al problema que nos llevará a la toma de decisiones³⁰.”

Existen diversos tipos de investigación:

- Investigación exploratoria es el diseño de investigación que tiene como objetivo primario facilitar una mayor penetración y comprensión del problema que enfrenta el investigador³¹.
- Investigación descriptiva es el tipo de investigación que tiene como objetivo principal la descripción de características o funciones del problema en cuestión³².

La investigación inició como investigación exploratoria y terminó como descriptiva. El estudio exploratorio al inicio, permitió entrar en contacto con el tema, para después obtener datos suficientes para realizar una investigación a mayor profundidad. Posteriormente, se hace una investigación descriptiva para explicar el modelo empleado, así como los beneficios de utilizar la técnica de simulación basada en agentes.

Un buen diseño de la investigación, asegura que el proyecto se realizará de manera efectiva y eficiente.

Para llevar a cabo esta tesis se siguieron los siguientes pasos.

- Determinar el tipo de investigación a realizar;
- Planteamiento del problema;
- Determinar las fuentes de datos a recolectar;
- Exponer las herramientas analíticas existentes;

³⁰Zorrilla y Torres (1992).

³¹Malhotra (1997), p. 87.

³²Malhotra (1997), p. 90.

- Evaluar la técnica de simulación basada en agentes;
- Seguir la metodología de la simulación y
- Analizar resultados y obtener conclusiones.

Se parte de un *FLP* de tipo discreto, con el fin de localizar un número predeterminado de centros de servicio para satisfacer nuevas demandas o para modificar una estructura ya existente.

Se evalúa la interacción de los centros de servicio en un ambiente de competencia, analizando la cobertura de cada uno, así como la apreciación que los interesados o clientes manifiestan en cada centro de distribución.

La simulación a realizar, analiza la evolución de las interacciones entre los centros de servicio en distintos instantes de una línea de tiempo por lo que es una simulación discreta.

2.3.1. Etapas de la metodología de Simulación

La metodología para la simulación de un sistema real es una actividad que dependerá en gran medida del ingenio del simulador, de las habilidades para representar adecuadamente (lo más apegado a la realidad sin caer en complicaciones innecesarias) la realidad mediante lenguaje matemático (variables, ecuaciones, relaciones de orden) y de la destreza en el uso de la probabilidad y estadística.

La siguiente es una serie de pasos de la metodología de la simulación apoyada por varios autores:

1. Formulación del problema;
2. Conceptualizar el sistema;
3. Recolección de información y datos para la construcción del modelo conceptual;
4. Validación del modelo conceptual;
5. Desarrollo y verificación del programa de cómputo;
6. Validación del modelo programado;
7. Diseño, ejecución y análisis de experimentos;
8. Presentación y documentación de los resultados de la simulación.

La metodología de investigación llevada a cabo para esta tesis, así como la metodología de la simulación están contenidos en la figura 2.2. También se explica a continuación en qué consisten cada uno de los pasos que se llevarán a cabo para realizar la simulación basada en agentes.

Formulación del problema

Debe estar claramente definido el problema a resolver y los objetivos del estudio. El objetivo es la razón de ser del estudio, debe ser realista y alcanzable en el plazo y términos establecidos. Los objetivos pueden ser de:

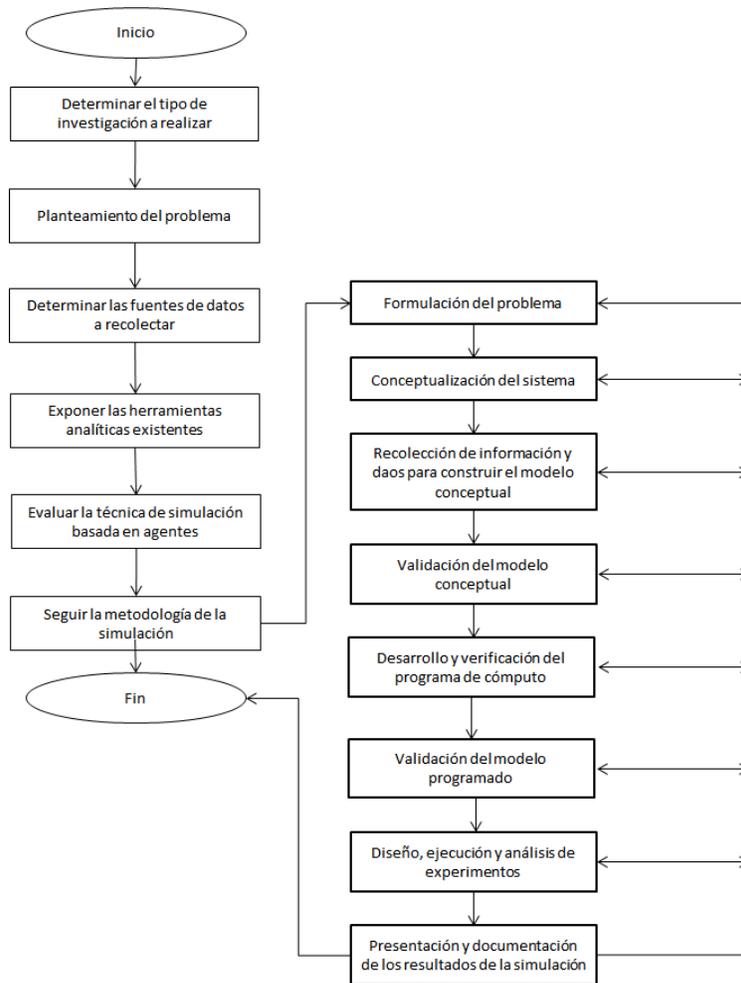


Figura 2.4: Metodología de investigación.

Fuente: Elaboración propia con base en base a Flores y Elizondo³³.

- Desarrollo de un análisis para responder preguntas del sistema real que se está simulando;
- Análisis de restricciones y capacidad para analizar estados extremos del sistema;
- Comparación de configuraciones;
- Optimización;
- Análisis de sensibilidad;
- Visualización.

Puede ser que la simulación a realizar tenga más de un objetivo, también es importante saber el uso que se dará al modelo.

Conceptualizar el sistema

En esta etapa se representa el sistema en estudio mediante relaciones lógica-matemáticas, se establecen las simplificaciones que puedan hacerse, según los objetivos del modelo, como también se definen los componentes que constituirán el modelo, individualizando las interacciones que existen entre ellos.

Recolección de información y datos para la construcción del modelo conceptual

En esta etapa se recogen los datos en terreno de todas aquellas variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Es decir, se debe disponer de los datos que describen el sistema, que representen su comportamiento y su eficiencia actual, como también recoger los datos que describan las alternativas que se van a evaluar. Los datos que describen el sistema son aquellos que están vinculados con la estructura del sistema, con los componentes individuales del sistema, con la interacción entre ellos, y con las operaciones que se realizan en el sistema. Con esta información se genera la descripción de los estados del sistema. La cantidad de veces en que se realizará el muestreo depende de cada sistema a estudiar, dependiendo de la variabilidad de la información recolectada. Normalmente se definen tres periodos de muestreo: muestreo de las variables externas al sistema; muestreo de información propia del sistema en estudio y datos que se usarán en la comparación con los resultados que entrega el modelo; finalmente recolección de la información necesaria para complementar la información anterior, o bien para ratificar las mediciones anteriores.

Validación del modelo conceptual

Se comprueba que la simulación del modelo es una representación razonable del sistema. Se comparan las operaciones del sistema con las operaciones del modelo. Se revisa cada uno de los componentes y sus interrelaciones.

Desarrollo y verificación del programa de cómputo

Teniendo bien definido el modelo conceptual, la construcción del modelo programado y el lenguaje que se utilizará, dependerá de los objetivos del modelo. Para ello debe evaluarse las posibilidades: ya sea utilizar un lenguaje de propósito general o utilizar un software comercial.

Aunque un lenguaje de propósito general permite construir un modelo con mayor detalle y tener mayor control sobre el programa; un software comercial reduce el tiempo de programación aunque requiere mayor cuidado para detectar errores.

Validación del modelo programado

Para hacer la validación de un modelo programado, vale la pena hacer pruebas estadísticas, para tener confianza en el modelo y emplearlo en la experimentación, con resultados aplicables al problema real.

Diseño, ejecución y análisis de experimentos

La simulación y el proceso experimental asociado, tienen como objetivo producir un sistema que satisfaga ciertas especificaciones. El diseñador puede seleccionar y planear cómo deben ser las componentes del sistema y concebir la combinación ideal de componentes y relaciones que determinan el sistema propuesto. El diseño se acepta cuando las previsiones se ajustan adecuadamente a los

comportamientos deseados, en caso contrario se hacen las modificaciones pertinentes y se repite el proceso.

Presentación y documentación de los resultados de la simulación

La presentación de los resultados deben estar contenidos en un documento escrito donde se incluyan las metas del proyecto, diagrama de flujo del sistema, descripciones detalladas de cada subsistema y la interacción de cada uno de ellos, los supuestos hechos para la simplificación de un modelo, especificaciones del proceso de validación, resumen de datos de entrada, así como las fuentes de información y la descripción detallada del programa de cómputo, los resultados y las conclusiones del estudio actual.

Este documento propone aplicar la simulación basada en agentes utilizando el *software* NetLogo para un problema de localización en un ambiente económico competitivo que describa la interacción de los centros de distribución y la satisfacción de la demanda, en distintos momentos.

Capítulo 3

Planteamiento del problema y Modelo conceptual

El reto del modelador es tomar los aspectos conocidos y construir una formulación que permita extraer nuevos resultados y comprenderlos

KATTA MURTY

3.1. El problema

Como se mencionó en el Capítulo 1, este documento propone aplicar la simulación basada en agentes utilizando el *software* NetLogo para un problema de localización *FLP* en un ambiente económico competitivo, cada centro de distribución compite por satisfacer el mayor número de clientes o demandantes posibles dependiendo del costo: la distancia a recorrer para llegar a cada centro más cualquier otro tipo de valor para acceder al bien o servicio.

Por ello el modelo simulado será capaz de que describir la interacción de los centros de distribución y la satisfacción de la demanda, analizando la cobertura que hace cada centro de distribución y el costo que los demandantes están dispuestos a cubrir en cada centro de distribución.

El problema a simular, bajo un enfoque basado en agentes consiste en **encontrar la ubicación óptima para un conjunto de centros que proporciona bienes o servicios** y puede pertenecer a la clase *p-CP*, *p-MP* o *PLSS*, dependiendo de la configuración del escenario a simular³⁴.

Sabemos que los problemas de localización (*FLP*) pertenecen a la clase *NP-Completo*s y por tanto resultan difíciles de resolver a través de métodos exactos y que en algunas ocasiones no se pueden resolver en tiempo polinómico; así el **objetivo de simular a través de un *ABM* el *FLP* es demostrar la flexibilidad de esta técnica, probando distintos escenarios y las posibilidades de obtener buenas aproximaciones a la solución en poco tiempo.**

³⁴Ver detalle en sección 4.2: *p-CP* cuando se simule localización de cada centro de distribución y *p-MP* o *PLSS* cuando se simule costo de acceder a cada centro de distribución

3.2. Modelo conceptual

En la sección 1.2.4 se explicó el problema de localización, que se modelará como un *ABM*. Consiste en ofrecer un bien o mezcla de productos desde un conjunto de posibles centros a un conjunto de m clientes $I = \{1, 2, \dots, m\}$ con demanda establecida. Los centros de distribución tienen capacidad ilimitada para satisfacer la demanda de cada cliente. Se aplican para ubicar escuelas, hospitales, silos, componentes eléctricos, centros de producción, almacenes, etc.

3.2.1. Formulación del modelo

El modelo conceptual a utilizar está basado en la Ley de Hotelling; si los productos que ofrece cada competidor son similares y se perciben como sustitutos por el consumidor; no existe una diferenciación en las características que pudieran resultar más atractivas al comprador, ni siquiera en precio (*Principio de diferenciación mínima*); sólo la ubicación del centro de distribución puede afectar la decisión del comprador.

La ubicación óptima, mostrada en las figuras:

- Para un solo centro, es en cualquier lugar a lo largo de la calle. No importa la ubicación del centro de distribución porque es el único y cubrirá toda la demanda. Sin embargo, bajo el criterio de minimizar la suma de cuadrados de las distancias que la gente necesita recorrer, indica que el punto óptimo es a la mitad a lo largo de la calle.
- Para dos centros de distribución, la ubicación óptima es que se localizan uno al lado del otro. Cada centro de distribución servirá a la mitad del mercado; uno extraerá a los clientes desde el norte, los otros clientes todos desde el sur.

Otro ejemplo es pensar en dos carritos de comida en la playa. Asume que uno comienza en el extremo sur de la playa y el otro comienza en el norte. Otra vez asumiendo un consumo racional y equitativa distribución a lo largo de la playa, cada carro obtendrá el 50% de los clientes, divididos a lo largo de una línea invisible equidistante de los carros. Pero, cada propietario de carro estará tentado a empujar su carro ligeramente hacia el otro, para mover la línea invisible que abarca más del 50% de la playa. Finalmente, los operadores de carro de empuje terminan uno junto al otro en el centro de la playa.

El modelo original asume que cada consumidor tiene una demanda fija y que el precio lo establece una autoridad externa. Cuando los precios no son fijos, las empresas mantienen la intención de diferenciarse para obtener ventaja competitiva sobre el promedio.

3.2.2. Descripción del modelo conceptual

Este modelo examina la localización óptima de los centros de distribución y los costos que los demandantes están dispuestos a cubrir con el fin de maximizar el beneficio. En el documento original de Hotelling, las tiendas estaban confinadas a una sola dimensión. Este modelo se replica y extiende, permitiendo que las tiendas puedan moverse libremente en un plano. El espacio para ubicar los centros de distribución se puede dividir en subregiones, dentro de las cuales cada centro de distribución disfruta de una posición cuasi-monopolística.

En este modelo, varios centros de distribución tratan de maximizar sus beneficios mediante el movimiento y el cambio de sus precios. Cada consumidor elige su tienda de preferencia basada

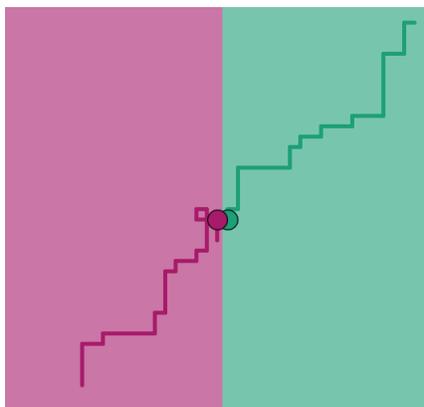


Figura 3.1: Ubicación óptima de dos centros de distribución.

Fuente: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

en la distancia a la tienda y el precio de los bienes que ofrece.

Cada consumidor evalúa el precio y la distancia a cada centro de distribución. A continuación elige ir al centro que más le convenga de acuerdo con su evaluación. En caso de empate, el consumidor elige al azar. Los centros o bienes pueden ser restringidos a una sola dimensión, en cuyo caso todas las tiendas trabajan en una línea, o pueden ser colocados en un plano.

Bajo la regla normal, cada centro intenta moverse al azar en los cuatro puntos cardinales para ver si se puede obtener una mayor cuota de mercado, si no, no se mueve. Entonces cada almacén comprueba si se puede obtener un mayor beneficio al aumentar o disminuir el precio de sus productos, si no, no cambia el precio. Esta decisión se toma sin ningún conocimiento de las estrategias de sus competidores. También es posible ejecutar este modelo cambiando los precios o modificando su localización.

La estructura del modelo conceptual se detalla en la siguiente tabla:

Cuadro 3.1: Estructura del modelo conceptual

Elemento	Nomenclatura	Descripción
Variables	d_{ij} $I = \{1, 2, \dots, m\}$ $J = \{1, 2, \dots, n\}$ $p_j, j \in J$ $a_j, j \in J$ $u_j, j \in J$ $c_{ij}, i \in I, j \in J$	demanda establecida de cada cliente m clientes n centros de distribución precio establecido por centro de distribución área cubierta por centro de distribución utilidad por centro de distribución el costo para el cliente i al centro j
Parámetros	$p_j(a_j)$ $u_j(p_j, a_j)$	Precio en función del área cubierta por centro de distribución Utilidad en función del precio establecido y área cubierta por centro de distribución
Interrelación de variables	$p_j(a_j)$ $u_j(p_j, a_j)$	Precio en función del área cubierta por centro de distribución Utilidad en función del precio establecido y área cubierta por centro de distribución

Fuente: Elaboración propia en base a Ottino, B., Stonedahl, F. and Wilensky, U. (2009). NetLogo Hotelling's Law model.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Este modelo:

1. Es de tipo discreto;
2. Tiene un número definido de centros de distribución;
3. Permite variar el número de centros de distribución al inicio de cada corrida;
4. No determina el número óptimo p de centros de distribución a ubicar;
5. Contempla que el precio por cada centro de distribución es el mismo al inicio de cada corrida;
6. Permite localizar a cada centro de distribución en cualquier punto en el plano, no vértices de una red como en el problema de localización.

3.2.3. Evaluación del modelo conceptual

En este modelo, la información es libre, pero esto no es una hipótesis realista. Podrían agregarse variables, al modelo programado, para añadir los precios que los centros de distribución proporcionan.

En este modelo, las tiendas siempre buscan incrementar sus ganancias de inmediato en lugar de mostrar ninguna capacidad de planificar. También son incapaces de predecir lo que los competidores podrían hacer.

Los consumidores son pasivos. ¿Hay una manera de incluir las limitaciones de los consumidores en su poder adquisitivo o capacidad de desplazamiento? Si todas las tiendas cobran demasiado o están demasiado lejos ¿el consumidor puede negarse a ir a cualquier tienda?

3.2.4. Recolección de información y datos para el modelo conceptual

Para el análisis de un problema es indispensable contar con datos que reflejen adecuadamente el sistema representado en un modelo matemático. Los datos se refieren a los valores de entrada para el modelo.

Es necesario especificar estos datos como fase inicial para el análisis del modelo, la calidad de la información que se proponga como condición inicial del modelo determina la capacidad de obtener resultados cercanos a la realidad. Cuando no existen datos del sistema real disponibles, se puede utilizar el conocimiento del proceso y la opinión de los expertos.

Cuando se utilizan datos recolectados previamente se pueden presentar las siguientes situaciones:

- Los datos pueden haberse guardado en un orden distinto al de su observación, afectando por ejemplo la autocorrelación;
- Los datos se pueden haber registrado con un nivel de precisión insuficiente;
- Los valores de los datos pueden ser representativos de un proceso del mundo real diferente.

Cuando los datos se recogen específicamente para un estudio de simulación, se hacen las siguientes sugerencias³⁵:

- Cuando sea posible, recoger entre 100 y 200 observaciones. Con menos datos la calidad del análisis baja significativamente;
- Intentar registrar los datos reales con una o dos cifras decimales significativas;
- Si se sospecha que el comportamiento del mundo real depende de la hora, del día o de la temporada del año recoger un número de datos significativos de diferentes periodos de tiempo.

Esta tesis muestra la utilidad de la simulación basada en agentes, así como la relevancia que ha adquirido en los últimos años, que ha permitido el desarrollo de *software* de tipo comercial, como NetLogo. Se enfatiza la utilidad y accesibilidad para modelar sistemas complejos que evolucionan a lo largo del tiempo.

Los escenarios a realizar contrastan el desempeño de la simulación basada en agentes frente al enfoque analítico como una estrategia eficiente y rápida.

Los resultados de la simulación deberán ser tales que se puedan comparar con una ubicación factible del problema real, por lo que es necesario tener disponible datos reales para poder implementar la solución.

Considerando que entre las ventajas de la *ABS* están resolver problemas *NP-Complejos* y probar distintos escenarios, resulta interesante variar el número de centros de distribución, desde pocos centros de distribución, que podrían ser resueltos de manera exacta mediante enumeración; hasta muchos centros de distribución, para los que el problema sea difícil de resolver o de mostrar un algoritmo que lo resolviese en tiempo polinomial.

³⁵Banks, Jerry. *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, Wiley, 1998.

3.2.5. Validación del modelo conceptual

Las ventajas de este modelo, son que nos permite entender cuáles son los factores que influyen en las decisiones de localización y demuestra la ventaja que obtendrá un centro de distribución si se desplaza al centro del espacio geográfico también y demuestra que no se logrará el equilibrio.

Si dos o más centros son idénticos desde el punto de vista del consumidor, el consumidor elige al azar uno ellos. Si los centros son ligeramente diferentes para el consumidor ¿es posible hacer que el consumidor vaya a cualquiera de los dos?

De lo anterior, concluimos que el modelo empleado es una representación sencilla, que reduce tiempo y costos para ubicar centros de distribución en cualquier punto en el espacio; no es una red que tenga ubicaciones elegibles determinadas para localizar centros de distribución (nodos), esta característica agrega restricciones y por tanto precisión al problema, para lo que se requiere más tiempo para resolverlo.

Desempeño

Las medidas de desempeño para el sistema analizado, son:

- Precio en función del área cubierta por centro de distribución y
- utilidad en función del precio establecido y área cubierta por centro de distribución.

Estos datos se van graficando en la interfaz de NetLogo para ver el alcance de cada centro de distribución y la eficiencia de su presencia.

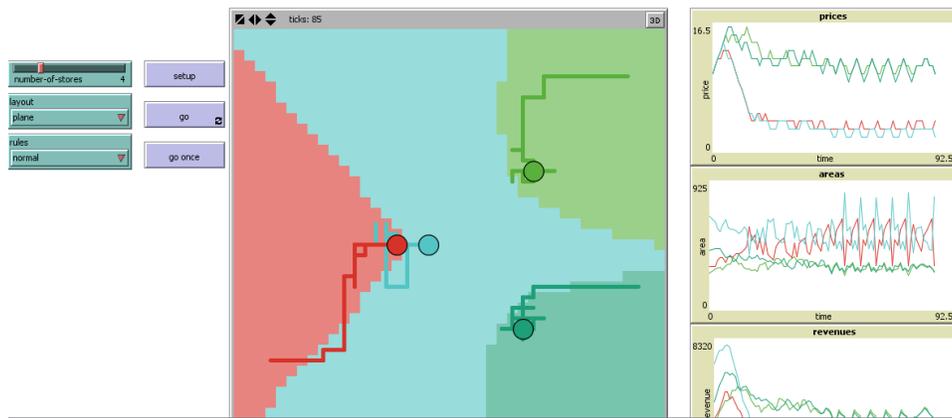


Figura 3.2: Simulación de un problema de localización empleando la ley de Hotelling usando NetLogo

Fuente: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Escenarios de simulación

Los escenarios de simulación se definen a partir de los valores de los parámetros y las variables de estado o niveles y las formas particulares de las no-linealidades y los multiplicadores. Ya que la

simulación permite tomar decisiones de manera virtual, aprender de los errores y de los aciertos, y luego volver atrás tantas veces como sea necesario, permiten evaluar diferentes estrategias y estudiar sus efectos en el entorno para extrapolar conclusiones. Se adquiere experiencia con costos bajos y evitando el riesgo de enfrentar potenciales consecuencias adversas.

Definir los escenarios de simulación es una tarea necesaria para optimizar los recursos empleados en una simulación.

A partir de un modelo conceptual adecuado y de los objetivos de la simulación es necesario:

- Imaginar futuros posibles;
- Pensar en implicaciones y acciones de cada escenario y
- Realizar un seguimiento y establecer criterios con la finalidad de poder ir modulando las acciones.

El planteamiento de escenarios permite:

- Analizar la situación actual;
- Analizar el entorno;
- Rediseñar el modelo conceptual acerca de la realidad;
- Mantenerse atento a los cambios y
- Planear un curso de acción a medio y largo plazo.

Un **escenario** es la descripción de una situación que pudiese presentarse como resultado de una acción o por una dinámica evolutiva en el tiempo. La construcción de escenarios implica el diseño y elaboración de un número de visiones consistentes internamente de futuros posibles, combinando la información disponible y las posibilidades de futuro.

Los escenarios tienen que ver con “precisar” lo que va a pasar, como consecuencia de una acción determinada en un proceso de naturaleza esencialmente incierto.

La inteligencia en la toma de decisiones se entiende como la capacidad de reunir y analizar datos para crear conocimiento, los escenarios son herramienta de estudio de los futuros plausibles, para encontrar el más favorable y probable.

Los escenarios propuestos en esta tesis buscan:

1. Probar escenarios en distintos intervalos de tiempo (50 unidades, 100 unidades, 300 unidades) para determinar si el tiempo juega un papel influyente en la efectividad de la localización de los centros de distribución, si después de un intervalo de tiempo se modifica la solución.
2. Evaluar los resultados con distintos números de centros de distribución (5, 10, 20, 50, 100) para evaluar la eficiencia del modelo y su simulación, que mediante técnicas analíticas sería muy difícil de resolver mediante un algoritmo ya que como se mencionó en el capítulo 1; hasta cierto número de centros de distribución, el problema puede resolverse mediante enumeración; sin embargo, para más centros de distribución es difícil de resolver ya que los problemas de localización pertenecen a la clase *NP-Completo*.

¿Cuántas y qué tan largas deben ser las corridas?

El tiempo de una simulación, marca los puntos en que los valores que afectan al sistema cambian de configuración. Es muy importante saber cómo y en qué estado iniciará la simulación y observar cómo evoluciona el sistema. El modelador debe determinar: las reglas de inicio, las condiciones iniciales apropiadas, cuánto debe durar una ejecución y si se debe detener en un tiempo determinado o si debe detenerse cuando algo específico suceda.

Es importante pensar en esto y hacer suposiciones consistentes con lo que se esté modelando; estas decisiones pueden tener un gran efecto en los resultados.

El modelador debe también identificar el momento en que el sistema muestre un comportamiento estable, es decir, obtenga resultados similares en distintas corridas. A esto se le llama convergencia de resultados. Los resultados de cada corrida para una simulación mostrarán un comportamiento común en una ventana similar de tiempo. En este momento es pertinente detenerse y analizar el conjunto de resultados para generar una conclusión del sistema.

El número de réplicas en un estudio de investigación afecta la precisión de las estimaciones de las medidas de los tratamientos y la potencia de las pruebas estadísticas para detectar las características relevantes del sistema, sin embargo, el costo de conducir estudios de investigación depende del número de réplicas que está restringido únicamente por las condiciones prácticas del problema.

Capítulo 4

Simulación con NetLogo y validación

El desarrollo de la teoría y las aplicaciones de los *ABMs* utilizados en los últimos años aportan una nueva perspectiva sobre el modelado de sistemas económicos complejos. Esta forma de modelado se utilizó en primer lugar en Física en el siglo *XVIII*³⁶ y se extendió poco a poco en otras disciplinas, como la economía.

4.1. Selección del programa de cómputo

Después de construir el modelo conceptual se necesita un modelo programado que permita la simulación del sistema en estudio mediante una computadora. Para ello hay dos clases de herramientas:

1. Lenguajes de programación: lenguajes especiales para simulación;
2. Software comercial que identifica modelos útiles en diversas áreas de estudio, lo que permite la creación de modelos de simulación apoyados en interfaces gráficas.

La siguiente tabla compara ventajas y desventajas de elegir uno y otro:

Lenguaje de programación	Software comercial
Casi todas las situaciones pueden ser modeladas.	Se limita a las áreas de aplicación de cada paquete de simulación.
Existe mayor familiaridad con el lenguaje.	Reduce el tiempo de programación y por tanto del proyecto.
Se detalla el modelo programado.	Permite construir un modelo clara y rápidamente.

La mayoría de los sistemas analizados en las Ciencias Sociales (incluyendo la economía) son sistemas dinámicos complejos. Los *ABMs* representan un enfoque alternativo de los sistemas complejos que complementan a los modelos analíticos.

³⁶Tuvo sus comienzos con las ecuaciones diferenciales y algo más tarde con los procesos estocásticos (Troitzsch, 1997).

La creciente utilización de sistemas dinámicos ha permitido el desarrollo de nuevas herramientas; existen distintas alternativas de paquetes computacionales para análisis de sistemas dinámicos. Los modelos computacionales para estudiar el entorno económico son desarrollados en condiciones experimentales controladas.

4.1.1. NetLogo

NetLogo es la herramienta empleada para llevar a cabo las simulaciones analizadas en esta tesis. Es un ambiente de *ABMs* programable para fenómenos de dinámica poblacional y social.

Fue creado en 1999 por Uri Wilensky y se ha mantenido en constante desarrollo a través del Centro para Aprendizaje en Conexión y Modelación computacional, de la Universidad de Northwestern en Illinois, Estados Unidos. NetLogo está escrito en lenguaje Java y puede ejecutarse en todas las plataformas (Mac, Windows, Linux, etc.) Además, los modelos individuales se pueden ejecutar dentro de páginas *web*. NetLogo es de distribución libre y se puede descargar desde la siguiente dirección web: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.

Netlogo utiliza tres tipos de agentes:

1. Las **tortugas** son **agentes** que se mueven dentro del mundo;
2. Los **parches** constituyen el mundo como una red bidimensional;
3. El **observador** no tiene ubicación específica, lo podemos imaginar como una entidad que percibe el mundo formado por las tortugas y los parches.

Cuando NetLogo se ejecuta por primera vez, el espacio donde se lleva a cabo la simulación está integrada por parches, no hay tortugas (agentes); solamente el observador (simulador) y los parches pueden crear nuevas tortugas.

Los parches y las tortugas tienen coordenadas determinadas por las variables $xcor$ y $ycor$ respectivamente; los parches tienen coordenadas $pxcor$ y $pycor$. Las coordenadas se ubican en un plano cartesiano con centro en el parche (0,0) llamado origen. El número total de parches está determinado por los parámetros $min - pxcor$, $max - pxcor$, $min - pycor$ y $max - pycor$.

En NetLogo, los comandos y los reporteros les dicen qué pueden hacer a los agentes. Un comando es una acción que un agente debe ejecutar. Un reportero calcula un resultado y lo informa.

NetLogo utiliza los siguientes tipos de variables:

1. Variables globales: puede ser accedida por cualquier tipo de agente;
2. Variables de tortugas y variables de parches: pueden ser accedidas por el agente que las creó;
3. Variables de sistema: tipo de variables es predefinido por NetLogo.

Ejemplos:

- `color`: establece el color de la tortuga;
- `pcolor`: establece el color del parche y

- título: establece la orientación en el espacio de las tortugas.

NetLogo tiene una biblioteca de modelos, pueden añadirse otros modelos a los ya los existentes o pueden crearse nuevos modelos. La interfaz de NetLogo fue diseñada para satisfacer todas estas necesidades. La interfaz se divide en dos partes principales: menú NetLogo y la ventana principal de NetLogo. La ventana principal se divide en “Interfaz”, “Procedimientos” e “Información”. Sólo una ficha a la vez puede ser visible:

1. La ficha “Interfaz” es donde se puede observar el funcionamiento del modelo. Tiene herramientas que pueden ser utilizadas para inspeccionar y alterar lo que está pasando dentro del modelo;
2. Los códigos de instrucciones que se desean observar, modificar o guardar están en la ficha “Procedimientos”;
3. “Información” contiene una introducción al modelo y una explicación de cómo usarlo.

4.2. El modelo programado

El modelo programado de la ley de Hotelling en NetLogo determina la localización óptima de una tienda (centro de distribución) o tiendas (centros de distribución). Las tiendas son agentes heterogéneos del modelo que actúan de manera independiente.

El simulador buscar localizar x centros de distribución en un área, el modelo programado le permite 3 tipos de simulación:

1. Sólo localización: el modelo se ocupa únicamente de buscar que la localización de cada tienda cubra la mayor demanda posible, los compradores eligen la tienda únicamente en función de la distancia.

Ejemplos: centro de vacunación, centros de distribución con precio único para todos (estaciones de metro, gasolineras) y centros de atención de emergencias (estación de bomberos, de policías, centros públicos de salud, etc.). Son problemas de la clase p -Center.

2. Sólo precio: La localización de las tiendas se mantiene constante, el modelo simula los cambios en los precios y la cobertura de demanda de cada tienda.

Ejemplos de esta clase de problemas son establecimientos fijos, que otorgan bienes o servicios que compiten por otorgar el precio más competitivo: restaurantes, peluquerías, tiendas, almacenes, etc. Estos problemas que están en las clases p -MP y $PLSS$ ³⁷.

3. Localización y precios: el modelo reubica las tiendas y ajusta los precios en un ambiente competitivo; un conjunto de centros ofrece bienes o servicios a un conjunto de clientes y tienen la posibilidad de reubicarse dependiendo de la respuesta que tengan los compradores. Ejemplos: comercios ambulantes, móviles, ferias, camiones de helados, etc.

El modelo programado esta estructurado de la siguiente manera³⁸:

1. Fase de configuración inicial

³⁷En la sección 1.2.4 se establecieron las diferencias entre ambas clases de problemas

³⁸Ver código del modelo programado en Anexo.

- a) Reinicializa el modelo;
 - b) Define a los agentes (tiendas);
 - c) Define a los consumidores.
2. Rutina de ejecución por unidad de tiempo
- a) Cambiar ubicación de las tiendas;
 - b) Cambiar el precio que ofrece cada tienda;
 - c) Recalcular el área que cada tienda tiene cubierta (por elección de los consumidores);
 - d) Incrementa una unidad de tiempo al contador.
3. Procedimientos
- a) De las tiendas
 - Definir nueva ubicación;
 - Cobertura de área en cada una de las nuevas posibles ubicaciones;
 - Analiza los escenarios de utilidad en función de las nuevas posibles ubicaciones;
 - Definir nuevo precio.
 - b) Del consumidor
 - Elegir tienda.

Cada ejecución del modelo consta de una fase de configuración inicial (primer punto) y en cada ejecución por unidad de tiempo realiza las rutinas del segundo punto; en esta parte se llaman los procedimientos definidos en el tercer punto, las tareas que los agentes son capaces de realizar. Ver diagrama de flujo en la siguiente sección.

4.2.1. Diagrama de flujo del modelo programado

Algunas de las ventajas de los *ABMs* están en el diagrama de flujo: un conjunto de procedimientos ya están definidos y cada agente los realiza de manera independiente cuando es necesario como parte de la fase de ejecución por unidad de tiempo, eso se hace tantas unidades de tiempo como el usuario lo necesite, guardadas en un contador de tiempo (variable que incrementa una unidad en cada ejecución).

El modelo programado permite que las tiendas cambien de ubicación y el precio de los bienes o servicios que ofrecen; pero permite al usuario deshabilitar alguna de las dos opciones, señalándole a cada agente que cambie únicamente de ubicación o que ajuste los precios en respuesta a su entorno sin cambiar la ubicación de la tienda asociada.

Cada agente se encarga de guardar sus atributos y al final de cada ejecución, actualiza los resultados en la interfaz gráfica: contador de tiempo, representación gráfica, gráficas de precios otorgados, área cubierta y utilidades por cada tienda.

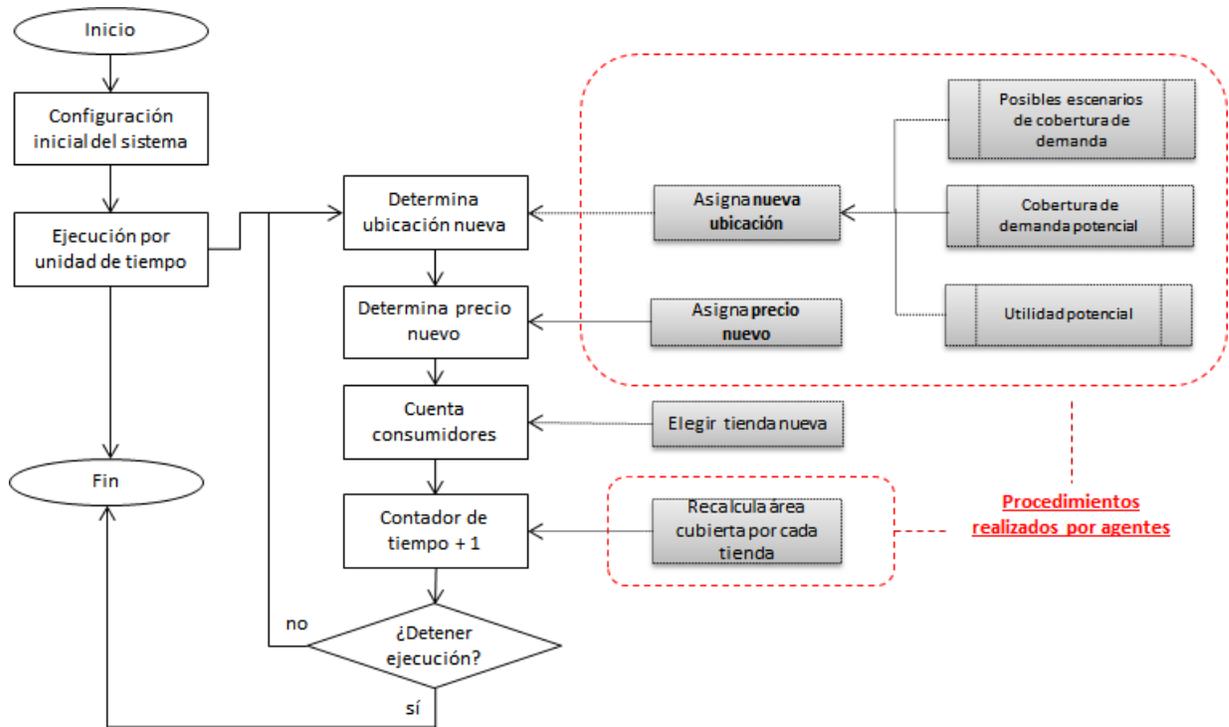


Figura 4.1: Diagrama de flujo del modelo programado de la Ley de Hotelling en NetLogo.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

La interfaz gráfica

La interfaz gráfica del modelo programado contiene:

1. Botones interactivos con el usuario para que defina: número de tiendas, representación gráfica unidimensional o bidimensional; y opción de que el modelo simule los cambios en el precio y/o los cambios en la localización para cada tienda.
2. Botones para ejecutar:
 - *setup*: la configuración inicial del sistema;
 - *go once*: la ejecución de los procedimientos en solo una unidad de tiempo y
 - *go*: inicio o alto para ejecución de los procedimientos indefinidamente.
3. Representación gráfica en un espacio unidimensional (línea recta) o bidimensional (plano cartesiano). En la que se ubican las tiendas (agentes), localización en función de los precios y demanda que tienen cubierta.
4. Gráficas de línea para mostrar las variaciones en los precios, área (demanda cubierta) y utilidades de cada tienda (agente).

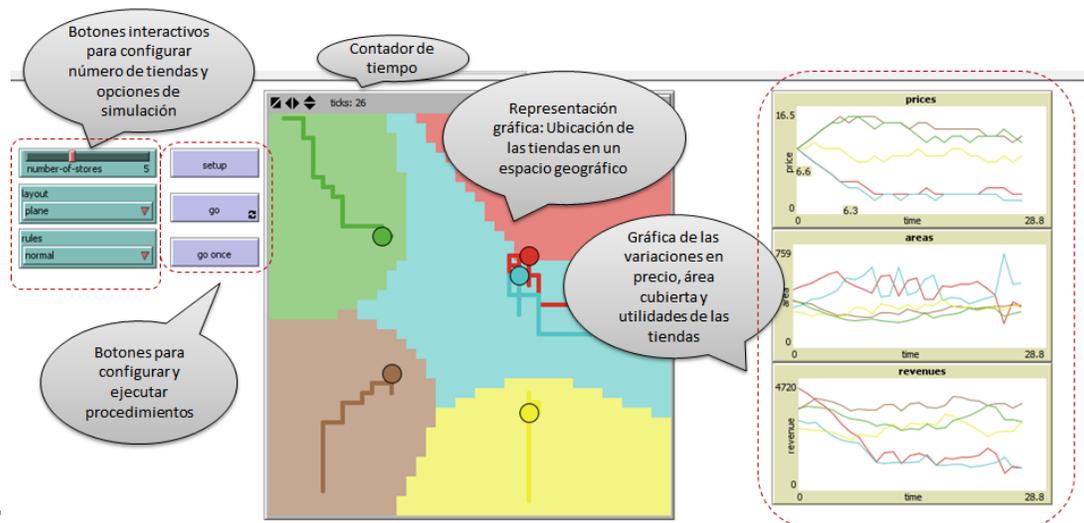


Figura 4.2: Interfaz gráfica de la Ley de Hotelling en NetLogo.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

La interfaz gráfica es una animación del modelo que facilita el análisis del sistema. En cada inicialización del modelo programado se limpian todas las variables y gráficas devolviéndolos a sus valores iniciales. La definición del espacio físico para la animación parte de que todas las tiendas tienen el mismo precio y son colocadas aleatoriamente en el espacio.

Es posible modificar la opción de que las tiendas cambien de ubicación y/o precio durante la simulación, es decir, sin detener el contador se puede activar la opción de que solo cambien los precios, o solo cambien las ubicaciones de las tiendas o que cambien los dos; esto se logra eligiendo la configuración deseada del menú "rules". Lo que no se puede modificar es el número de tiendas en competencia.

Si el objetivo es medir el impacto de incluir una o varias tiendas a un conjunto de tiendas, deberían correrse simulaciones con diferente número de tiendas por separado para evaluar en los resultados.

4.2.2. Validación del modelo

El principio de mínima diferenciación planteado por Hotelling (1929) supone que los participantes competidores están completamente informados de las condiciones de demanda del mercado en el que están inmersos. La ley de Hotelling y el principio de mínima diferenciación ha sido ampliamente estudiado y ha sido punto de partida para estudiar el comportamiento de mercados en competencia.

Algunas de los enfoques son:

- Los costos de transporte para los consumidores pueden ser definidos como diferentes funciones de distancias lineales (d'Aspremont *et al.*, 1979), lineal-cuadrática (Anderson, 1988), cuadrática (Zauner y Meagher, 2004) o la función de energía (Economides, 1986).

- Meagher y Zauner (2004) sostienen que el papel de los costos de transporte cuadráticos garantiza la existencia de equilibrio puro en la estrategia de precios para cada par de centros de distribución mediante el cálculo de la media y la varianza de la incertidumbre.
- La incertidumbre de la demanda se define para cada empresa después de la localización pero antes de la determinación de precios (Meagher y Zauner, 2004).

El modelo de Hotelling en condiciones de certeza tiene el efecto positivo del aumento de los precios de equilibrio (efecto estratégico) y el efecto negativo de la reducción de la demanda de la empresa (efecto demanda). El principio de mínima diferenciación de Hotelling es una herramienta sencilla para describir la adaptación de los precios en función de la distancia de los centros de distribución y los consumidores³⁹:

1. Cada tienda puede desplazarse en cualquier dirección (arriba, derecha, abajo e izquierda) por unidad de tiempo cuando haya decidido qué opción le conviene, el usuario solo ve el movimiento final, aunque el agente que se movió se haya desplazado en las cuatro direcciones para evaluar los posibles resultados;
2. Cada tienda dibuja la trayectoria de su desplazamiento acorde al color de la configuración inicial;
3. En los procedimientos de reprecitación y relocalización para una tienda, se toman en cuenta los valores históricos y su orden para no hacer cambios de precio o ubicación en caso de empate;
4. ¿Qué pasa cuando solo hay una tienda (monopolio)? El modelo programado observa que no importa la ubicación, cubrirá toda la demanda y al no tener competencia, fija el precio que quiere y solo genera utilidades. Ver figura 4.3.

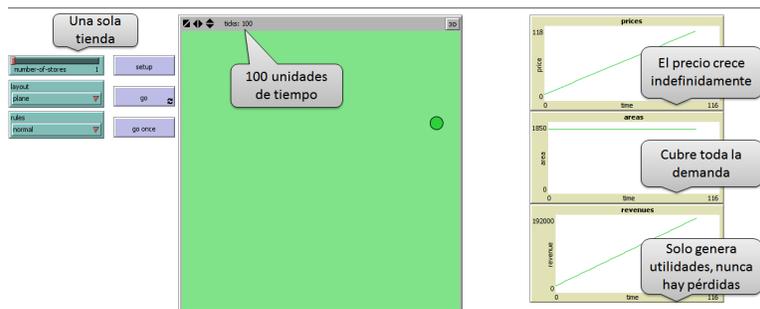


Figura 4.3: Simulación de un monopolio.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

5. En la sección 3.2.1, se señaló que de acuerdo a la ley de Hotelling: para dos centros de distribución, la ubicación óptima es que se localicen uno al lado del otro. Cada centro de distribución servirá a la mitad del mercado; uno extraerá a los clientes desde el norte, los otros clientes todos desde el sur;



Figura 4.4: Dos tiendas en competencia.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Como se mencionó en la sección 3.2.1 en el ejemplo de los dos carritos de comida en la playa, cuando dos centros de distribución empiezan en puntos extremos, bajo el supuesto de un consumo racional y equitativo, cada centro de distribución obtendrá el 50 % de los clientes. Este porcentaje crecerá a favor de uno de los centros con un detalle de diferenciación provocando que ambos centros de distribución se localicen al centro del área, uno junto al otro;

6. También se prueba el modelo para 14 tiendas y se observa que se el área se divide en sub-regiones donde se obtiene el mismo resultado que para dos tiendas por zona. Ver figura 4.5;

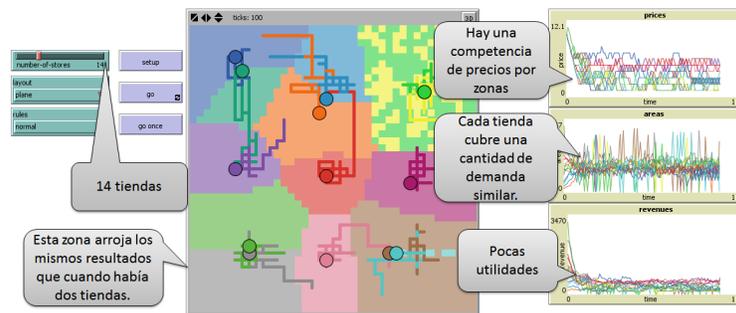


Figura 4.5: Catorce tiendas en competencia.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

7. El precio inicial asignado es 10 para todos los agentes, aunque existe la opción de crear un campo de entrada para que el usuario fije el precio (como si el gobierno fijará los precios del bien o servicio, como en el caso de las gasolinera).

³⁹Reynolds, Douglas & Jungho Baek (2011).

8. El costo de llegar a cada tienda es la integración de la distancia y el precio. Puede interpretarse el precio como el beneficio de cada centro de distribución y podría fijar un precio para cada tienda, que reflejará el beneficio que aporta cada tienda. También podría considerarse un precio muy elevado por cada tienda si se estuviera modelando la localización de instalaciones nocivas (basureros, cárceles, zonas de peligro etc.)

El modelo programado obtiene resultados acorde al marco teórico, es una simplificación del modelo que captura la elección de cada centro de distribución de precios y servicios en función del costo asociado a él. El enfoque basado en agentes otorga independencia de los centros siempre sujetos a una optimización general. La flexibilidad que NetLogo tiene mediante el código permite adecuar el modelo programado para el caso de análisis.

El siguiente capítulo realiza el diseño de experimentos e incluye diferentes corridas para el modelo, a fin de obtener resultados para encontrar alternativas de solución posibles.

Capítulo 5

Experimentos y Resultados

El término “Experimento” se refiere a la creación y preparación de lotes de prueba que verifiquen la validez de las hipótesis establecidas sobre las causas de un determinado problema o defecto, objeto de estudio.

Los investigadores realizan experimentos en todos los campos del saber, generalmente para descubrir algo acerca de un proceso o sistema en particular.

Un experimento es una **prueba** o **ensayo**. Un **experimento diseñado** es una prueba o serie de pruebas, en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

En cualquier experimento, los resultados y conclusiones que pueden obtenerse dependen en gran parte, de la forma en que los datos sean recopilados.

Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el **desarrollo de procesos** y en la **depuración de procesos** para mejorar el rendimiento. En muchos casos, el objetivo puede ser desarrollar un proceso consistente o robusto; es decir, un proceso afectado mínimamente por fuentes de variabilidad externa.

5.1. Experimentos

Los métodos de diseño experimental tienen amplia aplicación en muchas disciplinas. En efecto, es posible considerar a la experimentación parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la manera en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general, este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas acerca de un proceso. realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, que llevan a realizar nuevos experimentos, y así sucesivamente.

Los tres principios básicos en el diseño de experimentos son el de **obtención de réplicas, aleatorización y análisis por bloques**.

- La **réplica** se refiere a una repetición del experimento básico.
- La **aleatorización** es el hecho de que tanto la asignación del material experimental como el orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos, se determinan aleatoriamente. Además el aleatorizar adecuadamente el experimento se ayuda a cancelar los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.
- El **análisis de bloques** es una técnica que se usa para incrementar la precisión del experimento. Un bloque es una posición del material experimental que sea más homogénea que el total del material. Al realizar un análisis por bloques se hacen las comparaciones entre las condiciones de interés del experimento dentro de cada bloque.

Se pueden realizar experimentos de tipo comparativo, para que se determinen circunstancias críticas en el experimento y se comparen las respuestas a las diferencias circunstanciales. Este es el tipo de experimento que esta tesis empleó para entender los puntos más relevantes del sistema en estudio.

Se llama tratamientos a los diferentes procesos cuyos efectos van a ser medidos y comparados (experimentos). En la definición de tratamientos es importante definir claramente cada uno de ellos y entender los objetivos de llevar a cabo distintos experimentos.

- Diseñar corridas para dar luz a alternativas de solución posible.
- Considerar el costo.
- Debe incluir una multitud de consideraciones:
 - Administrativas: recursos y tiempo.
 - Técnicas: distribuciones de probabilidad, tamaño de la muestra.
- Variables
 - Entrada o exógenas.
 - Salida o endógenas.
- Experimentos (Unifactoriales y Multifactoriales).
 - Determinar el tamaño óptimo del número de corridas para que los resultados sean analizados.
 - Análisis de varianza.
 - Metodología de superficies de respuesta.
 - Técnicas de búsqueda de puntos óptimos.
- Utilizar intervalos de confianza para medir el desempeño del modelo.

El diseño de experimentos incluye diseñar las diferentes corridas que se quieran hacer con el modelo, para obtener resultados que al ser analizados, orienten sobre las alternativas de solución posibles.

El número de corridas a realizarse en los experimentos debe definirse por dos razones:

1. El costo para correr el modelo puede ser tal que limite el número de corridas.

2. Aún cuando el costo no sea una limitante, debe ponerse cuidado en el número de corridas que puedan hacerse para evitar que la masa de resultados sea de tal magnitud que dificulte el análisis o la extracción de conclusiones.

Contar con información acerca del efecto de cada una de las variables, factores y respuestas no es sencillo, inclusive puede ser caro para modelos grandes.

La buena planeación ayuda a organizar las tareas necesarias para un estudio de investigación, la consulta frecuente de un documento previene las omisiones graves; también será útil para insertar notas y cualquier alteración relacionada con los detalles específicos del plan original.

Los experimentos deben limitarse a investigaciones que establezcan un conjunto particular de circunstancias, bajo un protocolo específico para evaluar las implicaciones de las observaciones resultantes. El investigador determina y controla los protocolos del experimento para evaluar y probar algo que en su mayor parte no se conoce hasta ese momento.

A continuación se ofrece una guía del procedimiento recomendado:

1. Comprensión y planteamiento del problema. Este punto pudiera parecer obvio; sin embargo no es sencillo darse cuenta de que existe un problema que requiere experimentación, ni diseñar un planteamiento claro y aceptable del mismo.
2. Elección de factores y niveles. El experimentador debe elegir los factores que variarán en el experimento, los intervalos de dicha variación y los niveles específicos a los cuales se hará el experimento.
3. Selección de la variable de respuesta. Al seleccionar la respuesta o variable dependiente, el experimentador debe estar seguro de que la respuesta que se va a medir realmente provea información útil acerca del proceso de estudio.
4. Elección del diseño experimental. Si los tres pasos anteriores se han seguido de manera correcta, este paso debe ser sencillo. Para elegir el diseño es necesario considerar el número de repeticiones, seleccionar un orden adecuado para los ensayos experimentales, y determinar si hay implicado bloqueo u otras restricciones de aleatorización.
5. Realización del experimento. Cuando se realiza el experimento, es vital vigilar el proceso cuidadosamente para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado. Los errores en el procedimiento suelen anular la validez experimental. La planeación integral es decisiva para el proceso.
6. Análisis de datos. Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos, de modo que los resultados y conclusiones sean objetivos más que apreciativos. Sin embargo, los experimentos de esta tesis se hacen con un modelo económico, ampliamente estudiado y revisado que ya está validado⁴⁰, por lo que no es necesario hacer un análisis estadístico; sólo debe validarse que la localización de cada centro de distribución sea factible en la realidad, ya que NetLogo réplica correctamente el modelo económico que ya está validado.
7. Conclusiones y recomendaciones. Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe extraer conclusiones prácticas de los resultados y recomendar un curso de acción. En esta

⁴⁰Ver sección 2.2.4.

fase a menudo son útiles los métodos gráficos, es especial al presentar los resultados a otras personas. También deben realizarse corridas de seguimiento y pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento.

5.1.1. Diseño de experimentos

La primera etapa para llevar a cabo el análisis de experimentos consiste en identificar cuáles son los parámetros que se pueden afectar en el modelo programado. En el sección 4.2.1 se explicó la interfaz gráfica del modelo, donde se señaló que existen 3 botones interactivos para configurar número de tiendas y opciones de simulación. Ver figura 5.1 a continuación:

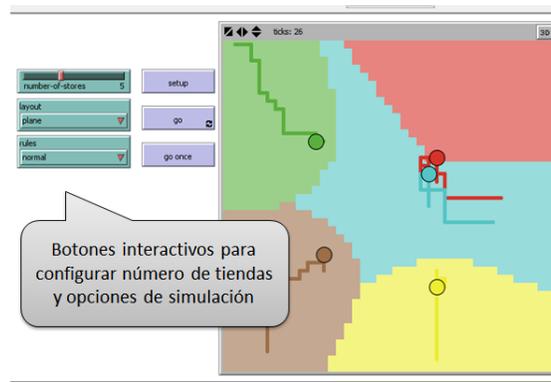


Figura 5.1: Botones para configuración hecha por el usuario.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

El modelo programado permite afectar:

1. El número de tiendas: $I = 1, 2, \dots, 126$.
2. Representación gráfica:
 - una línea (Ver figura 5.2)

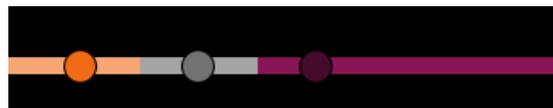


Figura 5.2: Representación unidimensional del modelo programado.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

- un plano cartesiano (Ver figura 5.3).

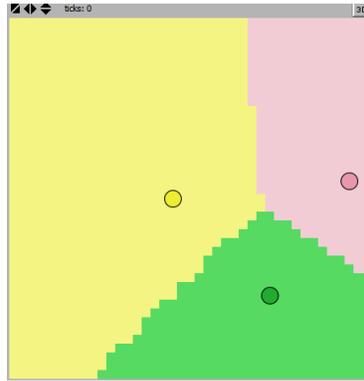


Figura 5.3: Representación bidimensional del modelo programado.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

3. Simular movimiento de localización de tiendas y/o precios en ellas, como se explicó en la sección 4.2⁴¹. Saber si simular el precio y/o la localización de los centros de servicio depende del tipo de problema que esta siendo modelado: donde los precios pueden entenderse como costos producidos por cada centros de distribución, o pueden ser precios establecidos por una entidad regulatoria, ubicar centros que pueden cambiar su ubicación en respuesta al estado del sistema, centros con ubicación fija o centros donde el costo asociado a ellos cambia.

5.1.2. Configuración de escenarios

Con el propósito de resolver un problema de localización y considerando la descripción de la sección anterior; se configuraron todas las simulaciones en un espacio bidimensional (plano cartesiano), analizando los efectos de simular precios y/o localización de cada centro de distribución.

Para saber cuántos centros de distribución es pertinente incluir en las simulaciones se analiza el comportamiento de experimentos con grupos de 5, 10 y 20 centros de distribución⁴².

Se realizan tres repeticiones de cada corrida.

Para entender el comportamiento del sistema se efectuaron corridas para distintos intervalos de

⁴¹4.2 El modelo programado.

⁴²El número de centros de distribución se determino después de realizar distintas ejecuciones del modelo programado, en la sección 4.2.2 de este capítulo se probó con una, dos y catorce tiendas; y se observó que a mayor número de tiendas mayor interacción y agrupación de comportamientos.

tiempo (50 unidades, 100 unidades, 300 unidades)⁴³ para determinar si el tiempo juega un papel influyente en la efectividad de la localización de los centros de distribución y si después de un intervalo de tiempo se modifica la solución.

También se evalúan los tres tipos de simulación (simulación de precios, simulación de localización y simulación de precios y localización).

Los precios simulados muestran un comportamiento similar para los grupos de 5, 10 y 20 centros de distribución, todos parten de un precio de 10 unidades que tiende a aumentar en el intervalo inmediato del tiempo y después logra estabilizarse de manera agrupada por centros de distribución, precios diferenciados por zonas.

Tiempo

Para 50 unidades de tiempo no se aprecia la estabilización de precios y áreas cubiertas por cada centro de distribución (Ver figura 5.4); 300 unidades de tiempo no contiene variaciones del área cubierta y los precios que establece cada centro de distribución (Ver figura 5.5) y escenarios de 100 unidades de tiempo muestran estabilizaciones de precio y área cubierta por cada centro de distribución (Ver figura 5.6).

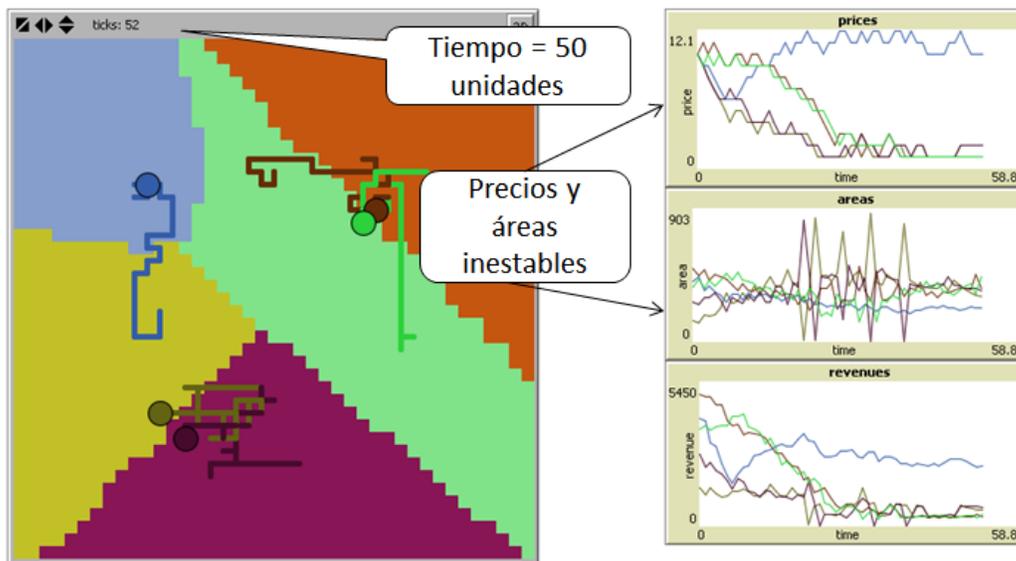


Figura 5.4: Simulación en 50 unidades de tiempo

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

⁴³Estos intervalos de tiempo se propusieron arbitrariamente, considerando que a mayor número de repeticiones el sistema logrará estabilizarse y de acuerdo a *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, que señala recoger entre 100 y 200 observaciones, ya que con menos datos la calidad del análisis baja significativamente (Ver sección 3.2.4).

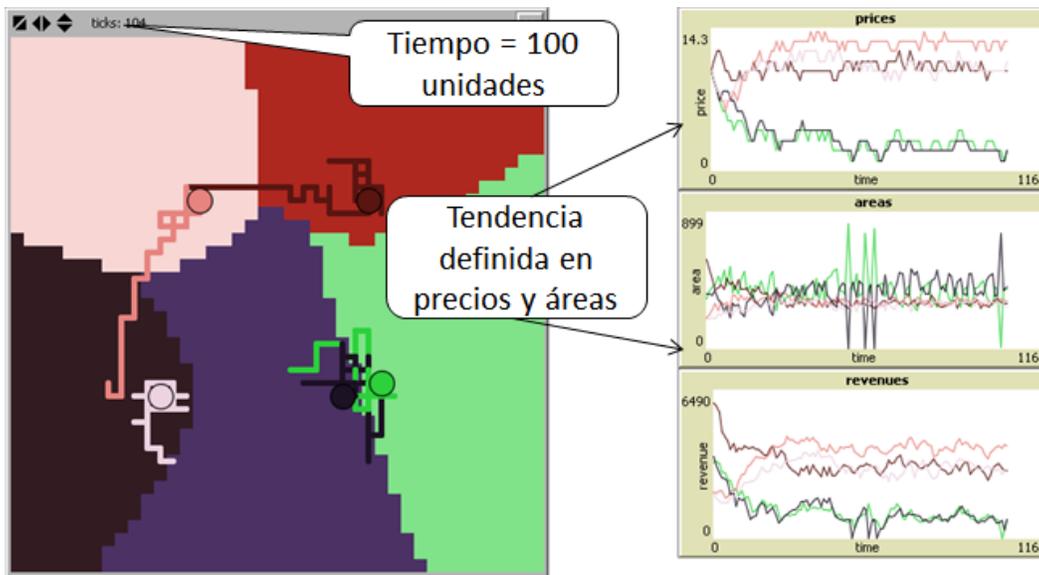


Figura 5.5: Simulación en 100 unidades de tiempo

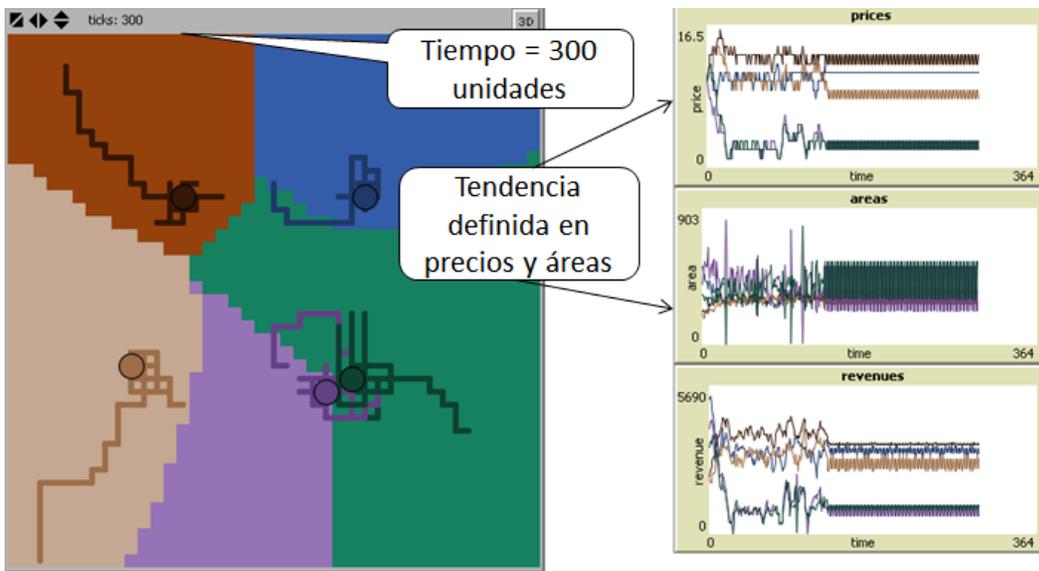


Figura 5.6: Simulación en 300 unidades de tiempo

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Debe recordarse que la ley de Hotelling favorece que los centros encuentren ubicaciones contiguas;

ello permite que haya precios agrupados de manera que cada zona tenga precios diferentes.

Cuando se simulan precios y localización, los precios simulados tienen un ligero incremento al inicio y después se agrupan por zonas (Ver figura 5.7.), reforzando la ley de Hotelling donde los competidores buscan diferenciarse y el equilibrio se rompe ya que cada centro de distribución actúa de manera independiente y busca mejorar su posición entre los competidores más cercanos.

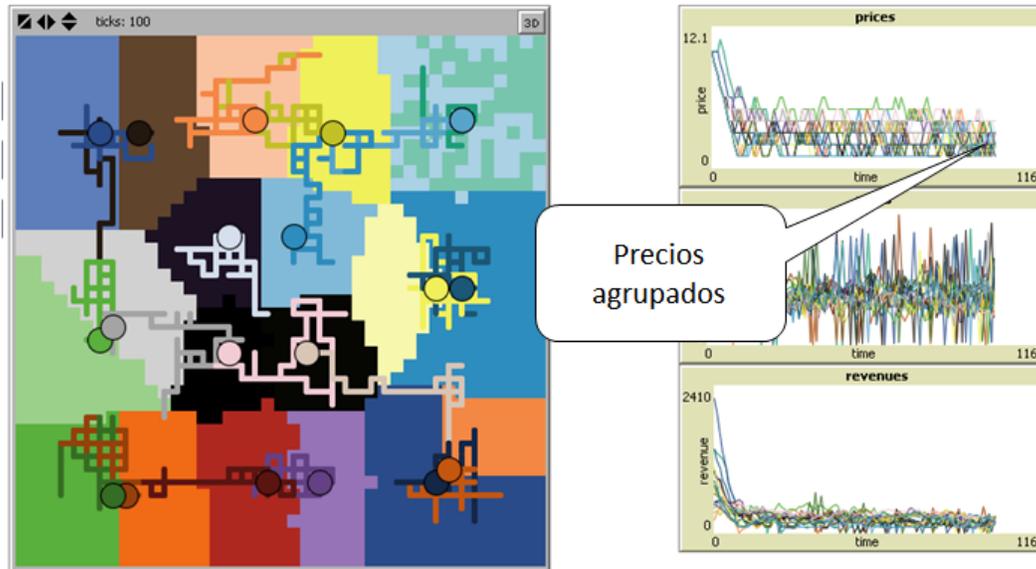


Figura 5.7: Simulación con precios agrupados

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Además 100 unidades de tiempo son aceptables según lo mencionado en la sección 3.2.4: "... recoger entre 100 y 200 observaciones. Con menos datos la calidad del análisis baja significativamente...;". Lo anterior se puede observar en las siguientes imágenes: la figura 5.8 es en un intervalo de 50 unidades de tiempo, en donde la gráfica que describe el área cubierta por cada tienda no tiene un comportamiento estable.

Por lo tanto los experimentos a realizar se hacen en intervalos de 100 unidades de tiempo.

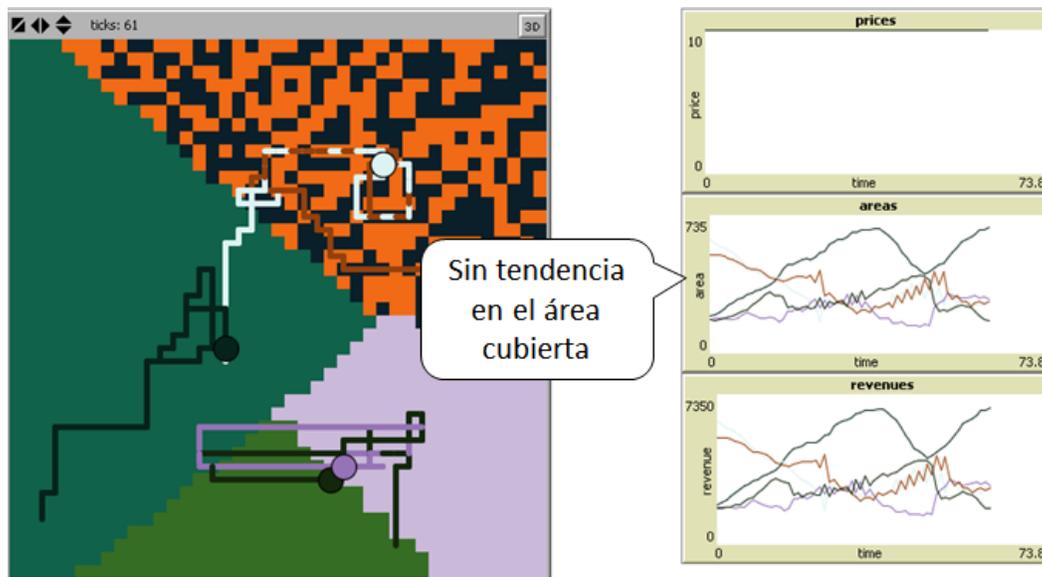


Figura 5.8: Simulación de localización de las tiendas, sin tendencia en el área cubierta por cada tienda.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Número de centros de distribución

Del primer grupo de experimentos se observa que la simulación requiere más tiempo conforme más tiendas se vayan a ubicar, 5 tiendas no producen gráficas que muestren la zonificación de precios tampoco la cobertura de demanda (Ver figura 5.9).

Cuando la simulación solo se realiza sobre los precios, el comportamiento es muy estable, un ligero despunte inicial en los precios con una estabilización casi inmediata de los precios y áreas cubiertas (Ver figura 5.10).

10 tiendas a localizar muestran pequeños grupos centralizados por áreas que replican el comportamiento en pares mencionado en la explicación de los carritos de helados. Cada pareja de tiendas mantiene a competir por la mitad del área, una tienda centralizada mantiene independencia del resto y autonomía por lo que no es necesario que reduzca su precio o muestre ventaja competitiva (especie de monopolio). Este efecto permite determinar una estrategia de precios por áreas geográficas para establecer acuerdos con los compradores; las diferencias pueden estar causadas por la accesibilidad a cada área geográfica, al número de competidores en ella, la necesidad del producto, la actividad económica de la zona, el nivel de aceptación, etc. (Ver figura 5.11).

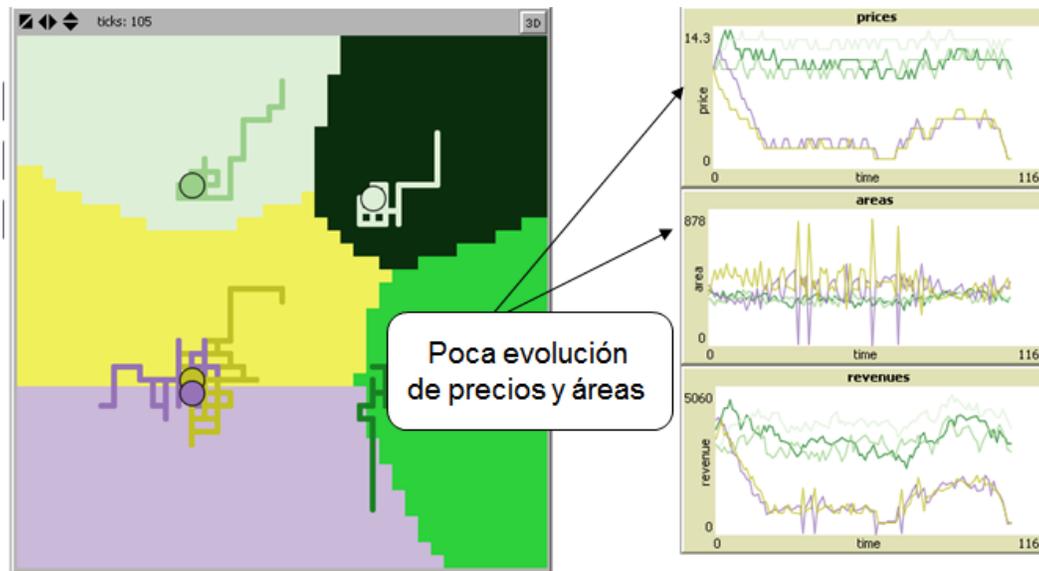


Figura 5.9: Evolución sin tendencia definida

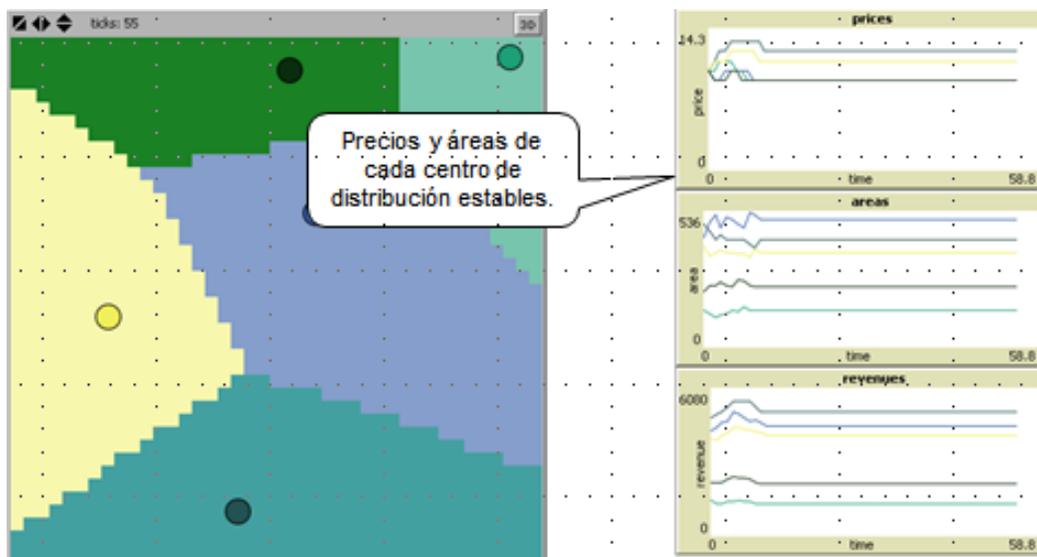


Figura 5.10: Precio y área estable.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

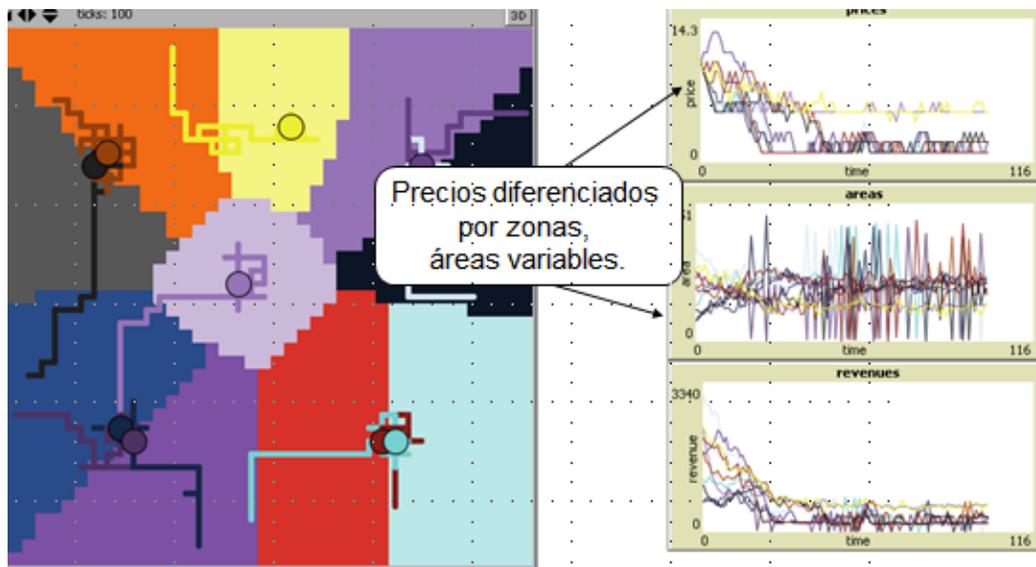


Figura 5.11: Precios diferenciados por zonas.

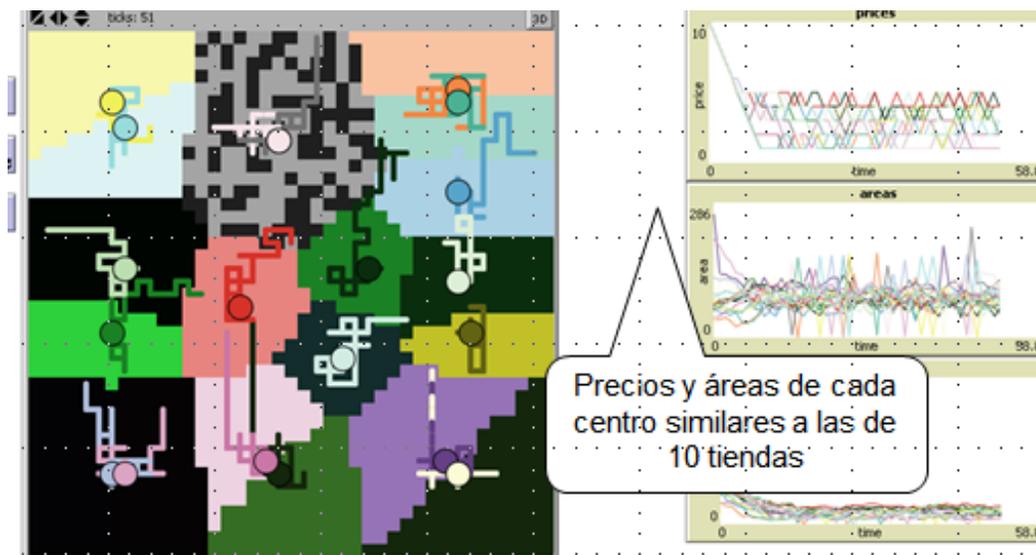


Figura 5.12: Precios diferenciados por zonas.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

20 tiendas a localizar muestran comportamiento similar a simulaciones hechas para 10 tiendas (figura 5.12).

Se simularon escenarios con al menos 10 tiendas para obtener conclusiones razonables.

5.1.3. Preguntas de investigación

Esta tesis busca responder las siguientes inquietudes:

1. ¿Qué tan rápida es la simulación basada en agentes con NetLogo?;
2. ¿Qué tan eficiente es para problemas grandes?;
3. ¿Cuáles son los beneficios que aporta la simulación basada en agentes usando NetLogo?;
4. ¿Qué comprensión se adquiere de simular diferentes escenarios?;
5. Probar la reactividad de respuesta de los agentes al desempeño del modelo;
6. ¿Cuál es la importancia de evaluar el modelo en distintos momentos en el tiempo?;
7. Destacar que este problema es una generalización para cualquier tipo de centro de distribución (benéfico o nocivo).
8. ¿Existen alternativas de *software* para realizar simulación basada en agentes?

5.2. Ejecución de experimentos y resultados obtenidos

De acuerdo a lo observado en la sección 5.1.2, los escenarios simulados tienen la siguiente configuración:

- Espacio bidimensional;
- Experimentos en 100 iteraciones (unidades de tiempo) y
- Al menos 10 centros de distribución.

A continuación se realizan experimentos con el propósito de responder las preguntas de investigación:

5.2.1. ¿Qué tan rápida es la simulación basada en agentes con NetLogo?

El experimento a continuación evalúa cuánto tiempo requiere NetLogo para resolver un *FLP* con grupos de centros de distribución de distinta cardinalidad. este experimento es importante porque los *FLP* pertenecen a la clase de los problemas *NP-Complejos* por lo que en algunas ocasiones no es fácil estimar cuánto tiempo llevará resolver un problema de este tipo. A continuación se muestra una tabla del tiempo necesario para llevar a cabo 100 iteraciones con grupos de centros de distinta cardinalidad.

Cuadro 5.1: Tiempo requerido por NetLogo para resolver problemas de localización.

Número de centros de distribución	Tiempo
10	8.22"
20	25.30"
40	1'25"
60	3'15"
80	5'33"
100	7'53"
120	11'48"

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Cuando el número de soluciones posibles se hace grande (o infinito), la enumeración total de las mismas es inviable, y debemos recurrir a algoritmos numéricos que resuelvan el problema. Afortunadamente hay un buen número de programas (como NetLogo), tanto comerciales como de uso abierto, que permiten resolver problemas de optimización para muchos centros de distribución en tiempo razonable.

5.2.2. ¿Qué tan eficiente es para problemas grandes?

A partir del trabajo de Drezner & Drezner⁴⁴ en el que se compara el uso de 5 técnicas heurísticas para resolver problemas de la clase p -MP muestra los tiempos que tardan en ser resueltos problemas de localización para distintos números de centros de distribución (2, 3, ..., 20)

Cuadro 5.2: Mejor tiempo requerido por 5 heurísticas (Drezner & Drezner).

Números de centros de distribución	Tiempo (segundos)
2	0.49
3	0.92
4	1.55
5	2.52
6	3.76
7	5.27
8	7.1
9	9.36
10	12.08
11	15.18
12	18.82
13	23.06
14	27.86
15	33.32
16	39.22
17	46.07
18	53.51
19	61.69
20	70.84

⁴⁴Drezner, Tammya, Zvi Drezner & Said Salhi (2001). *Solving the multiple competitive facilities location problem*, *European Journal of Operational Research*, 142, pp. 138 - 151.

Fuente: Drezner, Tammya, Zvi Drezner & Said Salhi (2001). *Solving the multiple competitive facilities location problem*, *European Journal of Operational Research*, 142, pp. 138 - 151.

La cardinalidad máxima de los problemas resueltos mediante heurísticas en el artículo es de 20 centros de distribución, mientras que esta tesis evaluó soluciones para problemas de hasta 120 centros de distribución. El mejor tiempo obtenido por las técnicas heurísticas fue de 70.84 segundos, mientras que usando NetLogo fue de 25.30 segundos; que representa casi un tercio del tiempo requerido por las heurísticas.

Podemos decir que NetLogo es más eficiente en tiempo para resolver un problema de 10 y 20 centros de distribución. Más aún, las heurísticas analizadas por Drezner & Drezner no analizan los tiempos para problemas de más de 20 centros de distribución por ser problemas muy grandes. Ver figura 5.13.

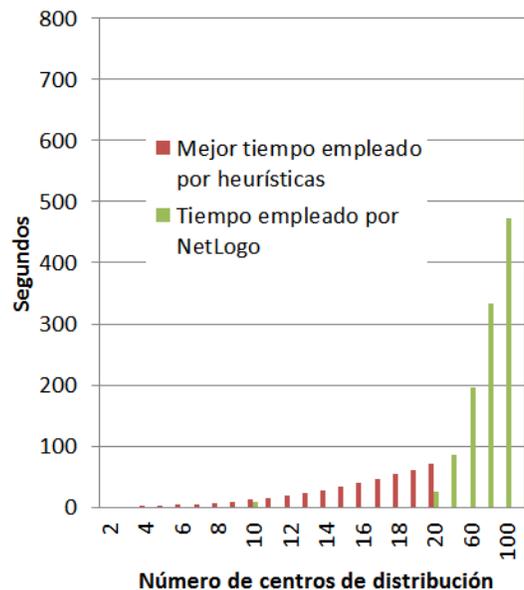


Figura 5.13: Tiempo para resolver problemas de localización.

Fuente: Elaboración propia con base en: Drezner, Tammya, Zvi Drezner & Said Salhi (2001). *Solving the multiple competitive facilities location problem*, *European Journal of Operational Research*, 142, pp. 138 - 151.

Las técnicas heurísticas empleadas parten de una solución obtenida mediante la técnica de ramificación y acotamiento (Ver sección 1.3.3): técnica exploratoria que desarrolla un árbol en el cual el espacio de variables enteras se divide de forma sucesiva, dando lugar a sub-problemas lineales que se resuelven en cada nodo del árbol. Si bien no es una técnica enumerativa exhaustiva, los tiempos de solución pueden extenderse entre más grande sea el problema, lo que no garantiza la solución del problema en tiempo polinomial. Por ello, una simulación siempre obtendrá soluciones en menos tiempo.

5.2.3. ¿Cuáles son los beneficios que aporta la simulación basada en agentes usando NetLogo?

Utilizar simulación basada en agentes utilizando NetLogo aporta todos los beneficios que proporciona la simulación como técnica de Investigación de Operaciones:

- Resolver problemas donde los recursos son limitados;
- Simplifica sistemas complejos;
- Incluye un sistema semejante al real;
- Reduce tiempos de solución, etc.

El enfoque basado en agentes es una novedosa técnica que permite trabajar con sistemas complejos, donde los participantes son independientes y muestran capacidad de adaptación a su entorno para responder ante cualquier evento y mejorar su condición con fin de lograr un objetivo común.

El beneficio observado, en tiempo, para un problema de 20 centros de distribución es de casi 2/3 respecto a las técnicas heurísticas, que no tiene porque ser lineal ante problemas de mayor cardinalidad; aunque intuitivamente el autor supone una mejora significativa para más centros de distribución por ser problemas de la clase *NP-Complejos*.

El beneficio económico de que NetLogo sea un *software* de distribución libre es el alcance que logra desde el ámbito académico al empresarial, permitiendo reducir costos si el personal clave entiende su funcionamiento.

5.2.4. ¿Qué comprensión se adquiere de simular diferentes escenarios?

Además de los experimentos hechos para determinar el número pertinente de centros de distribución y las unidades de tiempo necesarias para poder hacer un análisis sólido, se realizaron escenarios para simular solo precio, escenarios para simular solo localización y escenarios para simular localización y precio. Lo anterior permite entender el alcance del modelo y tener la sensibilidad necesaria de acuerdo al problema que se le presente. Como se mencionó en la sección 4.2 simular precio y/o localización permite modelar problemas de distinta naturaleza (*p-Center*, *p-MP* y *PLSS*), que al ya estar ampliamente estudiados brindan conocimiento teórico y elementos para validar los resultados obtenidos.

Al simular solamente localización; problemas para localizar centros de vacunación, estaciones de metro, gasolineras o centros de atención de emergencias, se tiene mayor preocupación por atender la mayor cobertura que cada centro pueda realizar (Ver figura 5.14).

Simular solamente precio problemas para localizar establecimientos fijos y comerciales lucrativos que estén inmersos en un ambiente competitivo; en este tipo de simulación se hace evidente la necesidad que cada tienda tiene de adaptarse a los cambios económicos producidos por el mercado (Ver figura 5.15).

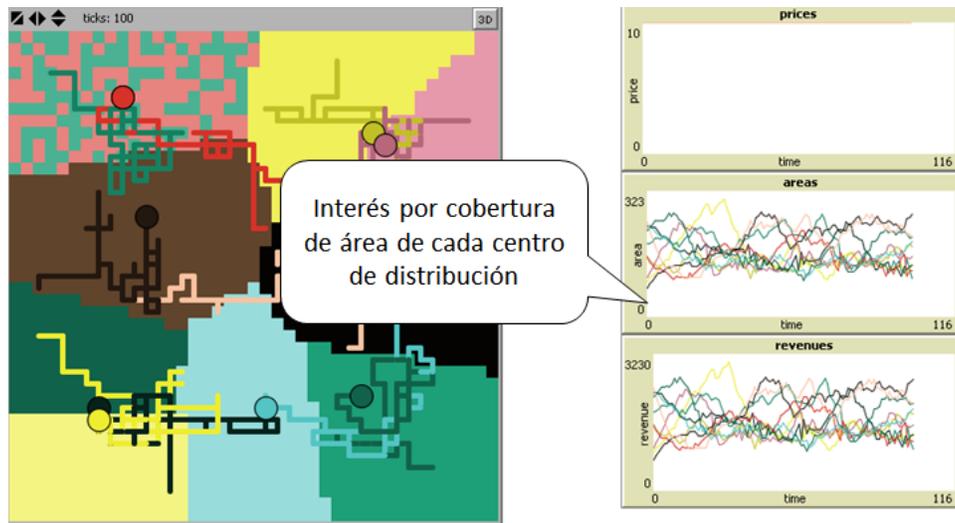


Figura 5.14: Simular localización.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

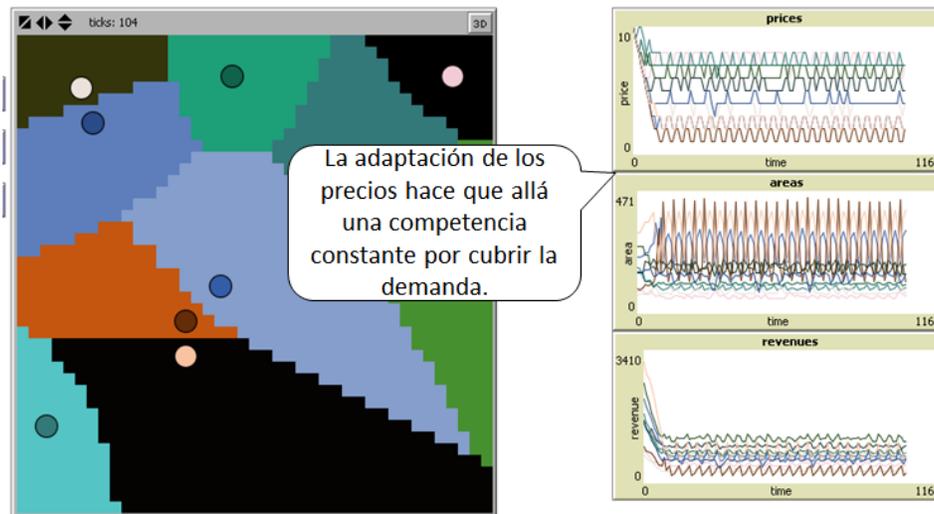


Figura 5.15: Simular precio.

Simular precio y localización permite analizar la reacción competitiva de sistemas como los que establece Hotelling en el principio de mínima diferenciación donde los competidores se agrupan por precio y zona geográfica (Ver figura 5.16).

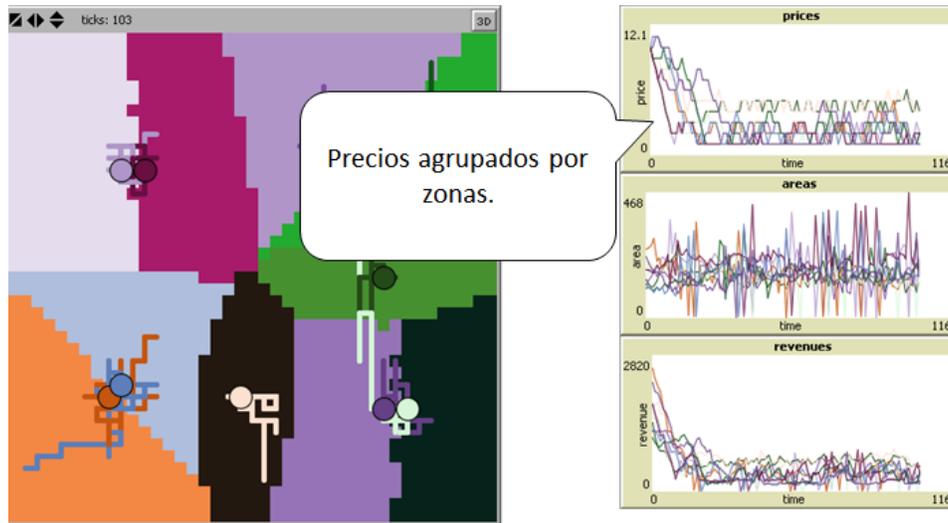


Figura 5.16: Simular precio y localización.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Simular diferentes escenarios permite hacer un mejor trabajo de optimización ya que se logra mayor entendimiento del sistema y con ello se logra una buena solución.

5.2.5. Probar la reactividad de respuesta de los agentes al desempeño del modelo

El simulador tiene la posibilidad de modificar que simule precio, localización o precio y simulación a semejanza de alguna condición de la vida real en que las posibilidades de simular precio quedarán anuladas como producto de alguna ley o no poder simular la localización de los centros de distribución y evaluar el éxito de alguno de ellos para tomar decisiones estratégicas de seguir o abandonar al mercado. Para evaluar la reactividad de los agentes se planteó una simulación en la que durante las 100 primeras unidades de tiempo el modelo simuló precio y localización de cada centro de distribución; las siguientes 100 unidades de tiempo se simuló solo localización y las 100 últimas solo precio (Ver figura 5.17).

5.2.6. ¿Cuál es la importancia de evaluar el modelo en distintos momentos en el tiempo?

Considere que la reactividad de respuesta de los agentes hacen que un escenario modificado por cuestiones inherentes al problema o surgimiento de nuevas políticas, modifican el comportamiento esperado a lo largo del tiempo (ver párrafo anterior), por ello es de suma importancia poder evaluar el sistema en distintos momentos del tiempo.

Y considerando que la simulación basada en agentes contempla que los agentes tienen independencia,

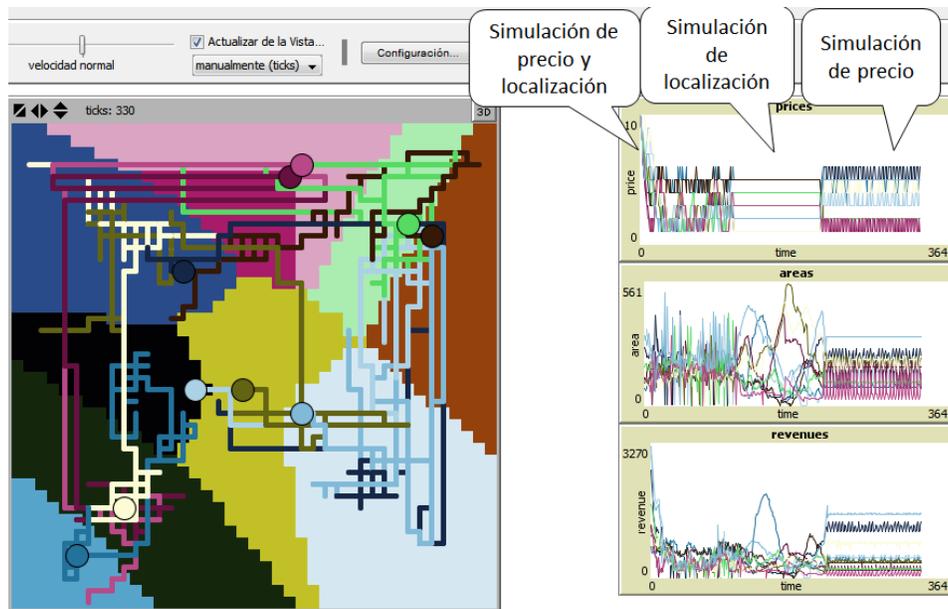


Figura 5.17: Escenario que modifica simulación de precio, localización y precio y localización.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

reactividad y proactividad, la evolución del sistema a lo largo del tiempo proporciona información diferente al momento de la configuración, en intervalos de tiempo cortos (10, 20 unidades de tiempo) a lo que se observa a 100, 200 y 300; el tiempo permite que los agentes interactúen y se adapten al escenario. El apartado **Tiempo** de la sección 5.1.2 hace este análisis para 50, 100 y 300 unidades de tiempo (Ver figuras 5.4, 5.5 y 5.6).

5.2.7. Destacar que este modelo permite localizar cualquier tipo de centro de distribución (benéfico o nocivo)

Es factible poder localizar centros que se desea que estén lo más alejado posibles (nocivos). Ejemplos: basureros, plantas contaminantes, etc. Para ello se modificó el código del modelo programado y se plantearon escenarios donde se desea que el centro de distribución este lo más alejado posible⁴⁵.

La simulación muestra que para dos centros nocivos:

1. Inicialmente, se localizan en cualquier lugar del espacio (Ver figura 5.18.).
2. La simulación los ubica en los extremos del espacio, lo más alejada posible para hacerla lo más inaccesible posible (Ver figura 5.19).

⁴⁵Modificación de la penúltima línea del código. Consultar Anexo: Modificación para centros nocivos, empleada en escenario de la sección 5.2.7.

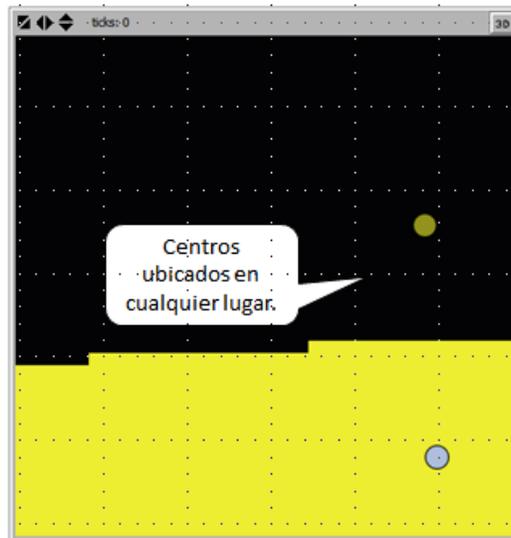


Figura 5.18: Configuración inicial de dos centros nocivos.

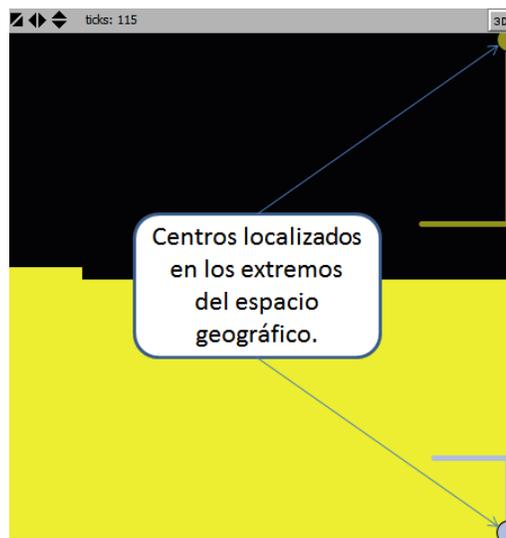


Figura 5.19: Localización óptima de dos centros nocivos.

Fuente: Elaboración propia con base en: Ottino, B., Stonedahl, F. y Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

5.2.8. ¿Existen alternativas de *software* para realizar simulación basada en agentes?

Además de NetLogo existen diferentes *softwares* para realizar simulación basada en agentes. Una buena opción es *AnyLogic*.

- La principal ventaja de AnyLogic es que se programa por completo con Java; aunque NetLogo tiene un entorno de desarrollo en *Java*, su lenguaje interno de modelado es *Logo*⁴⁶, que tiene un enfoque orientado a procedimientos.
- NetLogo trabaja en un eje coordenado y funciona bien en los modelos simples, pero no en los modelos detallados; AnyLogic mantiene el detalle en el espacio continuo y en el discreto.
- En NetLogo el tiempo es discreto, trabaja con contadores; AnyLogic permite analizar eventos en cualquier momento del tiempo.
- La gran ventaja de NetLogo sobre AnyLogic, considerada relevante para realizar esta tesis es que es un *software* de distribución libre, lo cual lo hace accesible a un mayor número de modeladores y usuarios.

⁴⁶Lenguaje de programación de alto nivel, en parte funcional, en parte estructurado; de fácil aprendizaje. Diseñado con fines didácticos, puede usarse para enseñar la mayoría de los principales conceptos de la programación, ya que proporciona soporte para manejo de listas, archivos, entrada y salida.

Conclusiones

Se cumplió el objetivo de la tesis planteado en la introducción: “mostrar que la simulación basada en agentes es una alternativa para resolver un problema de localización de manera rápida, económica y sencilla; así como un enfoque que se adapta al manejo de sistemas complejos”, al mostrar la accesibilidad que tiene el enfoque de modelación basada en agentes y la eficiencia de la simulación basada en agentes como herramientas que tienen amplia flexibilidad ante sistemas complejos donde interaccionan los elementos que participan en el sistema.

Para ello la autora describió el problema de localización, la relevancia y las herramientas de la Investigación de Operaciones que hasta ahora han sido empleadas para resolverlo; considerando que los problemas de localización *FLP* son de la clase *NP-completos*. A partir de ello utilizó una simulación basada en agentes mediante NetLogo como herramienta accesible y sencilla para el problema de localización siguiendo la metodología de simulación.

Considerando que el problema de localización ha sido ampliamente estudiado mediante técnicas de resolución analíticas y la incorporación de mejoras mediante técnicas heurísticas, esta tesis mostró un modelo conceptual y programado sencillo, que compensó la simplificación de los modelos analíticos con un modelo lógico, estructurado, ampliamente estudiado desde un enfoque económico a fin de lograr una solución rápida.

Se realizaron distintos experimentos con el propósito de medir los tiempos y la factibilidad de resolver problemas con un número dado de centros de distribución que mediante técnicas analíticas se complicaría por la complejidad computacional del problema.

Modelar sistemas complejos y analizarlos de manera eficiente y rápida representa un reto cotidiano en el ámbito empresarial; diariamente nos enfrentamos a una realidad donde contar con herramientas y tiempo para resolver analíticamente los problemas se vuelve una limitante. Esta tesis mostró una alternativa eficiente y de amplia comprensión para extensiones futuras de trabajo, con distintas problemáticas: propagación de enfermedades, comportamiento de grupos, dinámicas poblacionales, dispersión de rumores, fractales, partículas de gas, experimentos con dados, ilusiones ópticas, fuegos artificiales, desarrollo de tumores, virus, propagación de tumores, difusión de calor, propagación, dinámicas de polímeros, etc.

Los modelos programados pueden ser alterados ya que están escritos en lenguaje de programación Java, así que pueden ser configurados para sistemas reales y adaptados conforme a lo que sea necesario. Así, el modelo programado podría ser alterado a fin de comparar una solución analítica de un problema de localización y la solución generada mediante NetLogo.

Es también una herramienta didáctica de simulación y del enfoque basado en agentes, accesible por ser de distribución libre e interactiva.

Bibliografía

- [1] Ballou, Ronald H (1999). *Business Logistics Management: planning, organizing and controlling the supply chain*, Prentice Hall, 4a. edición, New Jersey.
- [2] Barbati M., G. Bruno, A. Genovese (2012). *Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review*, Expert Systems with Applications, No. 39, pp.6020-6028.
- [3] Beecham, J.A., G.H. Engelhard (2007). *Ideal free distribution or dynamic game An agent-based simulation study of trawling strategies with varying information*, Physica, No. 384, pp.628-644.
- [4] Bosque, Joaquín y Franco Sergio, (1995). *Modelos de localización-asignación y evaluación multicriterio para la localización de instalaciones no deseables*, Serie Geográfica, No. 5, pp.97-112.
- [5] Carrizosa, E. (2005). *Algunas aportaciones de la investigación operativa a los problemas de localización* GeoFocus, No. 5, pp. 268-277.
- [6] Chaturvedi, Alok, Shailendra Mehta, Daniel Dolk, Rick Ayer (2005). *Agent based simulation for computational experimentation: Developing an artificial labor market*, European Journal of Operational Research, No. 166, pp. 694-716.
- [7] Copas, Adelia Guadalupe (2000). *Solución del problema de localización de servicios multiobjetivo*, Tesis de maestría en Investigación de Operaciones, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [8] Damaceanu, Romulus-Catalin (2008). *An agent-based computational study of wealth distribution in function of resource growth interval using NetLogo*, Applied Mathematics and Computation, No. 201, pp. 371-377.
- [9] Drezner, Tammya, Zvi Drezner & Said Salhi (2001). *Solving the multiple competitive facilities location problem*, European Journal of Operational Research, No. 142, pp. 138-151.
- [10] Daskin, Mark S. (1995). *Discrete Location Theory*, Wiley-Interscience, New York.
- [11] Flores de la Mota, Idalia y Mayra Elizondo (2003). *Apuntes de Simulación*, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.
- [12] Ge, Yuanzheng, Liang Liu, Bin Chen, Xiaogang Qiu, Kedi Huang (2011). *Agent-Based Modeling for Influenza H1N1 in Artificial Classroom*, Systems Engineering Procedia, No. 2, pp. 94-104.
- [13] Hillier, F. y Lieberman, G. (2001). *Investigación de Operaciones*, Ed. McGrawHill, 7a ed. México, D.F.

- [14] Hotelling, Harold (1929). *Stability in Competition*, The Economic Journal, Vol. 39, No. 153, pp. 41-57.
- [15] Izquierdo, Luis R., José M.Galán, José I. Santos y Ricardo del Olmo (2008). *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*, EMPIRIA. Revista de Metodología de Ciencias Sociales. No. 16, pp. 85-112.
- [16] Janssen, Marijn y Alexander Verbraeck (2005). *An agent-based simulation testbed for evaluating internet-based matching mechanisms*, Simulation Modelling Practice and Theory, No. 13, pp.371-388.
- [17] Jaskold, Jean, Jacques-François Thisse y Masahisa Fujita. (1986). *Location Theory (Fundamentals of Pure and Applied Economics: Regional and Urban Economics)*, J. Hood, Booksellers, Baldwin City.
- [18] Jennings, Nicholas y Wooldridge, Michael (1998). *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- [19] Jiménez, Adela, (2010). *Ubicación de áreas verdes en la Ciudad de México, mediante la solución de un modelo multiobjetivo de localización discreta y el uso de un sistema de información geográfica*, tesis de maestría en Ingeniería en Sistemas, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [20] Lecanda, Mauricio (2013). *Programación entera: el problema de localización de plantas*, tesis de licenciatura en Actuaría, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [21] Lee, Jung Man Lee y Young Hoon Lee, (2012). *Facility location and scale decision problem with customer preference*, Computers & Industrial Engineering, 63, pp. 184-191.
- [22] Mirchandani, Pitu y Richard L. Francis (1990). *Discrete Location Theory*, Wiley-Interscience, New York.
- [23] Montgomery, Douglas C. (1991). *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamérica, México
- [24] Murty, Katta G. (1995). *Operations research: deterministic optimization models*. Prentice Hall, New Jersey.
- [25] Osman, Hesham (2012). *Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities*, Automation in Construction, No. 28, pp. 45-57.
- [26] Ottino, B., Stonedahl, F. and Wilensky, U. (2009). *NetLogo Hotelling's Law model*, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.
- [27] Puerto, J., A.B.Ramos, A.M.Rodríguez-Chia, (2011). *Single-allocation ordered median hub location problems*, Computers & Operations, 38, pp. 559-570.
- [28] Sanchez, Herica (1998). *Un algoritmo para resolver el problema de localización de servicios simple*, tesis de maestría en Investigación de Operaciones, México, Universidad Nacional Autónoma de México.

- [29] Villareal, José Antonio (2011), *Algoritmo basado en agentes para la simulación computacional de un modelo simple de morfogénesis*, tesis de licenciatura en Ciencias de la Computación, México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [30] Wilensky, U. (1999). *NetLogo*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.
- [31] Winston, Wayne L.(2005). *Investigación de Operaciones, Aplicaciones y Algoritmos* CEN-GAGE, 4a. Ed. México.

Anexos

Código del modelo programado

En este anexo se muestra el código del modelo programado de la Ley de Hotelling utilizado; en lenguaje Java de programación y extraído de NetLogo. Para mayor referencia consultar:

- Ottino, B., Stonedahl, F. and Wilensky, U. (2009). NetLogo *Hotelling's Law model*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Hotelling'sLaw>. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.
- Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

```

turtles-own [ price area-count ]
patches-own [ preferred-store ]
globals [ consumers ]

to setup
clear-all
setup-consumers
setup-stores
recalculate-area
reset-ticks
end

to setup-consumers
set consumers ifelse-value (layout = line)
[patcheswith[pxcor = 0]]
[patches]
end

to setup-stores
foreach n-of number-of-stores base-colors [
ask one-of consumers [
sprout 1 [
set color ? ; use the color from the list that we are looping through
set shape Circle (2)
set size 2
set price 10
set pen-size 5 ] ] ] end

to go let location-changes ifelse-value (rules = "pricing-only")
[[list]]
[[new - location - task]ofturtles]
let price-changes ifelse-value (rules = "moving-only")
[[list]]
[[new - price - task]ofturtles]
foreach location-changes run
foreach price-changes run
recalculate-area
tick
end

to recalculate-area
ask consumers [
set preferred-store choose-store
set pcolor ([ color ] of preferred-store + 2) ]
ask turtles [ set area-count count consumers with [ preferred-store =myself ] ]
end

```

```

to-report new-location-task
let possible-moves shuffle sort (neighbors4 with [ member? self consumers ])
if area-count >0 [ set possible-moves fput patch-here possible-moves ]
let moves-with-market-shares
sort-by [ last ?1 <last ?2 ]
map [ list ? (market-share-if-move-to ?) ] possible-moves
let chosen-location first first moves-with-market-shares
let store self
report task [ ask store [ pen-down move-to chosen-location pen-up ] ] end

```

```

to-report market-share-if-move-to [ destination ] ; turtle procedure
let current-position patch-here
move-to destination
let market-share-at-destination potential-market-share
move-to current-position
report market-share-at-destination
end

```

```

to-report potential-market-share
report count consumers with [ choose-store =myself ]
end

```

```

to-report new-price-task
let possible-prices fput price shuffle list (price - 1) (price + 1)
let prices-with-revenues
sort-by [ last ?1 <last ?2 ]
map [ list ? (potential-revenue ?) ] possible-prices
let all-zeros? (not member? false map [ last ? =0 ] prices-with-revenues)
let chosen-price ifelse-value (all-zeros? and price <1)
[price - 1]
[firstfirstprices - with - revenues] ; in any other case, we pick the price with the best potential
revenues
let store self
report task [ ask store [ set price chosen-price ] ]end

```

```

to-report potential-revenue [ target-price ]
let current-price price
set price target-price
let new-revenue (potential-market-share * target-price)
set price current-price
report new-revenue
end

```

```

to-report choose-store
report min-one-of turtles [(price) + (distancemyself)]
end

```

Copyright 2009 Uri Wilensky.

Modificación para centros nocivos, empleada en escenario de la sección 5.2.7.

Empleada para escenario en la sección 5.2.

La sección:

```
to-report choose-store  
report min-one-of turtles [(price) + (distancemyself)]  
end
```

es remplazada por:

```
to-report choose-store  
report min-one-of turtles [(price) - (distancemyself)]  
end
```