



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE GEOGRAFÍA**  
**MAESTRÍA EN ANÁLISIS ESPACIAL Y**  
**GEOINFORMÁTICA**

**TRABAJO TERMINAL DE GRADO**

**“IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE INTERACCIÓN  
ESPACIAL EN SIG LIBRE PARA EVALUAR LA  
RELACIÓN OFERTA-DEMANDA EN EL TERRITORIO”**

**PRESENTA:**

**ADONAI EMMANUEL NICANOR BAUTISTA**

**TUTORES:**

**DR. LUIS RICARDO MANZANO SOLIS**  
**DRA. GIOVANNA SANTANA CASTAÑEDA**  
**DRA. TANIA LILIA CHÁVEZ SOTO**



Toluca, México, octubre de 2024.

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>9</b>
1.1 Planteamiento del Problema .....	9
1.2 Preguntas de Investigación .....	12
1.3 Antecedentes .....	13
1.4 Justificación .....	17
1.5 Objetivos de Investigación .....	19
Resumen .....	19
<b>Capítulo 2: Marco Teórico .....</b>	<b>20</b>
2.1 Sistemas de Información Geográfica .....	20
2.1.1 Conceptualización y los datos geográficos .....	20
2.1.2 Modelos y estructuras de datos .....	23
2.2 Los SIG y los lenguajes de programación .....	29
2.2.1 Principales lenguajes de programación.....	30
2.2.2 QGIS y Python (API).....	33
2.2.3 Desarrollo de Software – Proceso Unificado .....	35
2.3 Interacción Espacial.....	44
2.3.1 Modelos Gravitacionales.....	44
2.3.2 Teoría de Interacción Espacial.....	45
2.4 Oferta y Demanda.....	51
2.5 Justicia Espacial y Distributiva .....	53
2.6 Sistemas de Ayuda a las Decisiones Espaciales .....	56
Resumen .....	58
<b>Capítulo 3: Material y método .....</b>	<b>59</b>
3.1 Inicio/Gestación .....	59
3.1.1 Requisitos .....	60
3.2 Elaboración.....	65
3.2.1 Análisis de los Modelos de Interacción Espacial .....	65
3.2.2 Diseño .....	76
3.3 Construcción.....	88
3.3.1 Implementación .....	89

3.3.2	Pruebas .....	102
3.4	Transición .....	105
3.5	Caso de estudio .....	107
	Resumen .....	113
<b>Capítulo 4: Resultados</b>	.....	<b>114</b>
4.1	Aplicación (plugin).....	114
4.2	Caso de estudio .....	117
4.2.1	Contextualización .....	117
4.2.2	Escenarios .....	129
	Resumen .....	141
<b>Capítulo 5: Discusión</b>	.....	<b>142</b>
	Resumen .....	146
<b>Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones</b>	.....	<b>147</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	.....	<b>150</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: ¿Qué son los SIG?.....	21
Figura 2.2: Modelización de datos en SIG.....	24
Figura 2.3: Formatos vectoriales.....	25
Figura 2.4: Estructura ráster y vectorial.....	27
Figura 2.5: Características del Lenguaje de Programación Python.....	32
Figura 2.6: Características de Python en los SIG.....	33
Figura 2.7: Fases del Proceso Unificado.....	40
Figura 2.8: Fases y flujos de trabajo del Proceso Unificado.....	41
Figura 2.9: Clasificación UML.....	44
Figura 2.10: Ejemplo de Matriz de Interacción Espacial.....	47
Figura 2.11: Equilibrio de la oferta y la demanda.....	52
Figura 2.12: Componentes típicos de un SADE.....	58
Figura 3.1: Fase 1 – Requisitos.....	60
Figura 3.2: Requisitos para la ejecución (General).....	60
Figura 3.3: Aplicabilidad del lenguaje seleccionado.....	62
Figura 3.4: Fase 2 – Requisitos, Análisis y Diseño.....	65
Figura 3.5: Archivo vectorial de polígonos y su tabla de atributos.....	74
Figura 3.6: Archivo vectorial de puntos y su tabla de atributos.....	75
Figura 3.7: Caso de Uso General.....	77
Figura 3.8: Diagrama de Clases (General).....	83
Figura 3.9: Diagrama de Secuencia (General).....	85
Figura 3.10: Diagrama de Actividades.....	86
Figura 3.11: Diagrama de Despliegue.....	87
Figura 3.12: Diagrama de paquetes.....	88
Figura 3.13: Fase 3 – Implementación y Pruebas.....	89
Figura 3.14: Etapas del proceso de implementación.....	89
Figura 3.15: Arquitectura MVC.....	92
Figura 3.16: Prototipo 1, Figura 3.16-A: Ventana principal, Figura 3.16-B: Ventana emergente (restricción en el origen), Figura 3.16-C: Ventana emergente (restricción en el destino), Figura 3.16-D: Ventana emergente (doblemente restrictivo).....	95

Figura 3.17: Prototipo 2, Figura 3.17-A: Ventana principal y pestaña de entradas, Figura 3.17-B: Pestaña de restricciones, Figura 3.17-C: Pestaña de formatos de salida .....	96
Figura 3.18: Archivos vectoriales y capas temáticas .....	97
Figura 3.19: Ejemplo de hoja de cálculo.....	98
Figura 3.20: Ejemplo de reporte HTML .....	98
Figura 3.21: Representación gráfica de los datos evaluados mediante su distribución y su diagrama de caja (Boxplot).....	99
Figura 3.22: InstallSimple.....	100
Figura 3.23: Script de instalación en Bash .....	101
Figura 3.24: Caso de uso de Pruebas .....	103
Figura 3.25: Fase 4 – Pruebas .....	106
Figura 3.26: Despliegue del proyecto en GitHub .....	106
Figura 4.1: Ubicación del plugin en el panel de herramientas .....	114
Figura 4.2: Ubicación del plugin en el área de complementos.....	114
Figura 4.3: Entradas - Interfaz gráfica .....	115
Figura 4.4: Restricciones - Interfaz gráfica .....	116
Figura 4.5: Salidas - Interfaz gráfica.....	117
Figura 4.6: Zona Metropolitana de Toluca.....	120
Figura 4.7: Manzanas urbanas y rurales .....	121
Figura 4.8: Red Vial .....	122
Figura 4.9: Pirámide población.....	123
Figura 4.10: Población de 5 años y más que habla alguna lengua indígena .....	124
Figura 4.11: Índice de Marginación 2020 .....	125
Figura 4.12: Población (Habitantes por Manzana) .....	126
Figura 4.13: Densidad de población.....	127
Figura 4.14: Oferta y Demanda potencial.....	128
Figura 4.15: Escenario RO1 - Fricción de distancia = 0 .....	133
Figura 4.16: Escenario RO2 - Fricción de distancia = 0.5.....	134
Figura 4.17: Escenario RO3 - Fricción de distancia = 1 .....	135
Figura 4.18: Escenario RD1 - Fricción de distancia = 0.....	138

Figura 4.19: Escenario RD2 - Fricción de distancia = 0.5.....	139
Figura 4.20: Escenario RD3 - Fricción de distancia = 1.....	140

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Características geográficas de los datos. ....	22
Tabla 2.2: Descripción del formato vectorial.....	26
Tabla 2.3: Módulos de QGIS.....	34
Tabla 3.1: Requerimientos de Hardware y Software. ....	61
Tabla 3.2: Restricciones de los MIE. ....	73
Tabla 3.3: Descripción general del diagrama. ....	77
Tabla 3.4: Proveer la herramienta MIE.....	78
Tabla 3.5: Solicitar la herramienta MIE.....	78
Tabla 3.6: Solicitar archivos georreferenciados a través de la interfaz gráfica. ....	79
Tabla 3.7: Ingresar datos solicitados a través de la interfaz gráfica.....	79
Tabla 3.8: Ejecutar la herramienta MIE. ....	80
Tabla 3.9: Generar los resultados obtenidos a través de la ejecución de la herramienta MIE. ....	80
Tabla 3.10: Mostrar al usuario las capas temáticas generados a partir de los resultados. ....	81
Tabla 3.11: Interpretación del análisis espacial a partir de las capas temáticas generados.....	81
Tabla 3.12: Glosario de Clases. ....	83
Tabla 3.13: Análisis de datos de entrada. ....	90
Tabla 3.14: Aplicación MVC.....	93
Tabla 3.15: Instaladores.....	100
Tabla 3.16: Prueba general 1 – VE_01. ....	103
Tabla 3.17: Prueba general 2 – CI_01. ....	104
Tabla 3.18: Prueba general 3 – GS_01.....	105
Tabla 3.19: Preparación de insumos.....	107
Tabla 3.20: Variables para la construcción del VIM.....	110
Tabla 3.21: Tipologías y número de turnos. ....	112
Tabla 3.22: Tipología de unidades de consulta externa. ....	112
Tabla 4.1: Criterios para la delimitación de zonas metropolitanas.....	118

Tabla 4.2: Comportamiento del modelo restricción en el origen, Fuente: Elaboración propia.....	130
Tabla 4.3: Comportamiento del modelo restricción en el destino. ....	136



# Capítulo 1: Introducción

## 1.1 Planteamiento del Problema

El gasto público permite a los gobiernos producir y comprar bienes y servicios para cumplir con sus objetivos de desarrollo, la inversión de recursos está destinada en diversas áreas como: protección social, educación y atención médica. La relación que presenta el gasto público entre los países en vías de desarrollo y los países desarrollados, es que estos últimos destinan una mayor cantidad de ingresos económicos (en términos per cápita y PIB) a programas sociales y tienden a centrarse más en la protección social. Los gobiernos de todo el mundo dependen del sector privado para producir y administrar bienes y servicios, donde las asociaciones público-privadas (APP) se han convertido en mecanismos cada vez más populares para que los gobiernos financien, diseñen, construyan y operen proyectos de infraestructura (Ortiz-Ospina y Roser, 2016).

Desde un contexto histórico, a principio del siglo XX las inversiones en gastos públicos que habían realizado los gobiernos alrededor del mundo fueron relativamente bajas, esto permitía cumplir con ciertas condiciones básicas como el mantener el orden y hacer cumplir los derechos de propiedad. Con el surgimiento de la primera y segunda guerra mundial las inversiones aumentaron drásticamente principalmente en aquellos países que participaron en la guerra. Para los años 60's y 70's del siglo XX, los países de primer mundo se habían mantenido en constante crecimiento y con una pronta recuperación ante sus declives. México hasta 1987 había mantenido un aumento de inversión del 46.69%, sin embargo, con la devaluación del peso mexicano, la inversión en gastos públicos no ha podido compararse con respecto a países desarrollados (Ortiz-Ospina y Roser, 2016).

A partir de 1985 y hasta el 2010, México ha destinado desde 1.70 hasta el 7.50% (PIB) al gasto público social siendo una inversión pobre respecto a países de primer mundo como Canadá, Suiza, Reino Unido y Alemania, donde sus inversiones son de 10, 15 o 20 veces más respectivamente. Este gasto público cubre las áreas de salud, vejez, prestaciones de incapacidad, familia, programas de mercado laboral activo, educación, desempleo y vivienda (Ortiz-Ospina y Roser, 2016).

La mala distribución de los gastos públicos principalmente en áreas de salud ha generado una problemática tanto política como económica y social. El Periódico la Jornada en su artículo *“De 394 instalaciones de salud abandonadas, 142 ya funcionan: Insabi”* escrito por Cruz Martínez (2022) expresa que el INSABI (Instituto de Salud para el Bienestar) informó sobre el estado de 394 instalaciones (entre centros de salud y hospitales) que habían sido abandonadas. Para el Estado de México, por otra parte, AD Noticias (2019) expresa que para el año 2019 al menos existían 250 obras (entre hospitales, clínicas y centros de salud) que habían sido abandonados en los municipios de: Acolman, Tepotzotlán, Cuautitlán Izcalli, Zumpango, Zinacantepec, Lerma, Coacalco, Aculco y Chicoloapan.

La limitación de recursos económicos ha influido en la búsqueda de mecanismos que permitan ubicar de manera adecuada a los diferentes servicios de salud, usando estrategias como las que plantea la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2000 y 2016) donde se toma en cuenta distintos criterios como: el tamaño de población en las localidades y el nivel de espacialidad que se requiere, la jerarquía que ocupa (nacional, estatal y municipal), el radio de cobertura que se expresa en distancia (kilómetros) y tiempo (horas y/o minutos), la dotación para cada unidad de acuerdo con la población evaluada, estudios de usos de suelo, red vial, etc. Además, también existe el modelo establecido para la Planeación de Unidades Médicas llamado MIDAS (Modelo Integrador de Atención a la Salud) (2007), el cual parte desde un análisis poblacional, análisis del entorno hasta la toma de decisiones en infraestructura. También, la Secretaría de Salud (1995) a través del Modelo de Atención a la Salud para Población Abierta (MASPA), establece un par de criterios para colocar unidades médicas como: número y tamaño de las localidades, grado de dispersión y concentración de la población en las localidades, condiciones étnicas y socioculturales, disponibilidad de vías de acceso, etc.

Considerando la situación socioeconómica del país, se detecta la necesidad de optimizar los recursos para la prestación de servicios de calidad y, al mismo tiempo, buscar reducir el desperdicio de dichos recursos. Una forma de lograr esta optimización es mediante una adecuada localización de los servicios, lo cual entra

en el ámbito de las ciencias geoespaciales. De forma específica, se puede atender esta problemática mediante la aplicación del análisis espacial y la Geoinformática.

Sin embargo, este tipo de estrategias requieren tener un conocimiento amplio sobre el manejo de Sistemas de Información Geográfica, específicamente trabajar con herramientas que permitan manipular, observar y construir los datos geográficos. En conjunción de la ingeniería de software y la Geoinformática es posible crear herramientas geotecnológicas que permitan obtener el máximo aprovechamiento de datos geográficos a través de implementaciones y automatizaciones. Con estas implementaciones geotecnológicas se busca facilitar las estrategias de planeación a través del cálculo de índices de accesibilidad a bienes o servicios que sean capaces de brindar información relevante sobre el comportamiento que existe entre la oferta y la demanda, bajo el principio de crear herramientas a la medida que involucren las variables necesarias para poder explorar todos los escenarios hipotéticos posibles.

Para lograr esto, es necesario tener presentes algunos conceptos, entre ellos, la accesibilidad, que de acuerdo con Goodall se define como “... *la facilidad con la que se puede alcanzar un cierto sitio (destino), desde otros puntos en el territorio (orígenes), por lo que su medición sintetiza las oportunidades de contacto e interacción entre determinados orígenes y destinos*” (Garrocho et al., 2020, pág. 41). El cálculo de la accesibilidad espacial está dado bajo los términos que dictaminan la interacción espacial, y este concepto se pueden considerar como aquella herramienta que permite generar los índices de accesibilidad. Reilly señala que “*la interacción espacial intenta explicar el comportamiento espacial de consumidores y ofertantes de bienes y servicios, a partir de razonamientos microeconómicos sobre la relación entre costos de transporte, atractividades de las unidades comerciales y la utilidad (satisfacción) de los consumidores*” (Garrocho et al., 2002, pág. 42).

De esta forma, la accesibilidad espacial se entiende como el potencial de interacción espacial (aceptación o rechazo) que existe entre orígenes y destinos ubicados dentro de un espacio geográfico (Garrocho et al., 2020).

Los modelos de interacción espacial que dan origen a los índices de accesibilidad (espacial) están dados bajo dos principales divisiones que, de acuerdo con Santos (1994) son:

- Explicativos (con restricción en el origen o en el destino)
- Predictivos (con restricción en el origen y en el destino)

Al utilizar los modelos de interacción espacial (MIE) como herramientas que i) permitan entender el comportamiento que existe entre oferta y demanda de un bien o servicio específico, ii) brindar información con un alto grado de relevancia para realizar modificaciones en la planeación territorial (distribución espacial) con el fin de mejorar los niveles de accesibilidad que el servicio puede ofrecer a la demanda, es decir, realizar una reducción de costos (distancias, tiempo, esfuerzos, dinero, etc.), mejorar la infraestructura (por ejemplo: aumentar el número de camas en unidades médicas de hospitalización), establecer rutas óptimas de acceso (reducir el tiempo de llegada a través de unidades de emergencia), disponer de más de un servicio (equilibrar la oferta y la demanda) tanto para los sectores privados como públicos, además, permite responder preguntas como: ¿Cuáles son las zonas que no tienen un servicio específico?, ¿En qué regiones de la zona de estudio la prestación del servicio es suficiente? y ¿qué zonas tienen la mayor accesibilidad (pueden acceder a más de un destino)?, entre muchas otras.

Estos modelos se pueden instrumentar utilizando los SIG, sin embargo, en algunos casos se tiene la limitante del pago por la licencia del SIG, su modelación es genérica o no son multiplataforma (limitado a un sistema operativo). Esta situación expone un área de oportunidad para el desarrollo de un módulo de SIG libre que incluya un conjunto de herramientas específicas y, al mismo tiempo que funcione en diferentes sistemas operativos. El problema aquí planteado es el área de oportunidad que se abordará en esta investigación.

## ***1.2 Preguntas de Investigación***

- ¿La automatización en SIG de los Modelos de Interacción Espacial haría más eficiente el cálculo y representación espacial de los indicadores propuestos?

- ¿Cómo es la interacción espacial de los servicios de salud en el caso de estudio?
- ¿Cuál sería el medio más eficiente para difundir la herramienta desarrollada?

### ***1.3 Antecedentes***

Derivado de la disponibilidad de implementaciones que existen referentes a la automatización y desarrollo de modelos de análisis espacial basados en modelos de interacción espacial que tienen relación directa e indirectamente con los sistemas de información geográfica, se describirán a continuación algunas de las herramientas existentes destacando sus principales características. Las herramientas descritas a continuación han sido ordenadas de forma descendente, es decir, desde la implementación más actual hasta la más antigua.

- A. Como primera herramienta se describe a Gravity Model, Gravity Model (2002) es un Toolbox para ArcGIS que se encarga de ejecutar el modelo gravitacional, índices de gravedad, estimación de movimientos y centralidad ponderada. El objetivo de este toolbox es evaluar un conjunto de entidades con respecto a sus pesos para determinar la interacción espacial y el flujo probabilístico entre estas entidades. Requiere licencia para ser utilizado. No incluye información técnica ni de usuario. Está basado en la matriz de interacción espacial (Flater, 2022).
- B. Para el SIG Libre se encuentra Gravity Model of Spatial Interaction in QGIS (2021), este plugin (herramienta desarrollada con model builder) implementa de forma general un modelo gravitacional para representar la interacción espacial. Está aplicado a una región de hospitales en el noreste de Estados Unidos, sin embargo, se puede ejecutar en otros escenarios (otros servicios). Cuenta con documentación técnica de la implementación. No se encontró información de usuario. Hace uso del modelo más básico de interacción espacial (Marshall, 2021).
- C. Huff Model (2020) forma parte del catálogo de ArcGIS, este modelo está basado en la teoría de análisis espacial, busca identificar la probabilidad que un consumidor determinado visite y compre en un sitio específico,

las condiciones a evaluar son la distancia del sitio y al atractivo de lugar, así como de las demás competencias de servicio. El Modelo Huff parte del modelo gravitacional. No contiene información técnica, la documentación de usuario está sujeta a los ejemplos de uso propuestos por ArcGIS (ArcGIS Pro, 2020).

- D. Accessibility Toolbox for R and ArcGIS (2019), es una herramienta desarrollada para ArcGIS la cual calcula índices de accesibilidad con la creación de una matriz de distancias bajo el criterio del modelo más básico de interacción espacial. Implementa 5 funciones de impedancia como: Potencia Inversa, Exponencial Negativo, Gaussiano Modificado y Oportunidades Acumulativas Lineales. Las salidas que genera son capas temáticas y gráficas donde se expresan los diferentes índices. Solo muestra documentación de usuarios, falta la documentación técnica (D. Higgins, 2019).
- E. De las librerías desarrolladas en Python se encuentra ACESO (2018) que es un paquete para medir la accesibilidad espacial. Ha implementado varios modelos de análisis e interacción espacial como el modelo 2SFCA (Two-Step Floating Catchment Area), el modelo 3SFCA (Three-Step Floating Catchment Area) y modelos Gravitacionales (ACESO, 2018). La implementación de estos modelos de análisis espacial que permite realizar las operaciones a través de crear instancias de la clase del modelo a usar, como parámetros recibe únicamente arreglos de n dimensiones, arreglos de una dimensión, valores flotantes y valores booleanos. Para poder hacer uso de alguno de los modelos de análisis espacial es necesario instalar toda la paquetería que incluye ACESO a través de pip (administrador de paquetes de Python), ya que hace uso de otras clases implementadas. Por otro lado, no muestra más información acerca de estos desarrollos y la poca información existente no es de gran ayuda, salvo la de instalación (ACESO, 2018).
- F. FlowMapper (2016) es una herramienta que permite visualizar flujos, es un plugin para QGIS que genera líneas de flujo entre distintos nodos para

representar la interacción espacial existente entre ellos, por ejemplo, migración, tráfico, etc. Hace uso de tres archivos de texto (txt) para alimentar a dicha herramienta. Estos archivos representan el peso de cada nodo, una matriz de distancias y la identificación de cada nodo (nombre). Como salida crea un archivo shape que muestra estas líneas y flujos. Incluye una documentación preliminar del uso de la herramienta, así como algunas capturas de pantalla de su funcionamiento y del resultado final de cada ejecución. No Muestra documentación técnica (Cem GULLUOGLU, 2016).

Las herramientas descritas con anterioridad son un claro ejemplo del grado de desarrollo que tienen los modelos de interacción espacial, todas ellas desarrolladas por la falta de herramientas especializadas a la medida, algunas obteniendo el mayor potencial de los SIG y algunas otras solo explotando los datos a través de los diferentes lenguajes de programación. Sin embargo, la empleabilidad de los modelos de interacción espacial ha contribuido a realizar estudios en diferentes lugares del mundo aún sin el uso de estas implementaciones geotecnológicas.

La literatura internacional describe una variedad de estudios basados en los modelos de interacción espacial para medir la accesibilidad, para explicar fenómenos socioeconómicos (relación oferta-demanda, migraciones, etc.) y para brindar información que permita tomar mejores decisiones con un sustento bien definido gracias a estos modelos, a continuación, se describen algunos ejemplos:

Ahmadzai (2020) expone hacer uso de los MIE para intervenir en temas de uso de suelo urbano y redes de transporte por carretera en Afganistán para realizar una categorización integral de las subdivisiones de las ciudades, la forma de emplear y desarrollar este modelo de interacción espacial es a través de distintas aplicaciones de software como ArcGIS, Excel y SPSS; todo este proceso se ha realizado de forma manual.

González Moreno et al. (2020) utilizan a los MIE para estimar la accesibilidad basado en tiempos de recorrido entre localidades sujetos a la infraestructura de la

zona (calles con y sin pavimentación) para explicar la desigualdad social que existe en el estado de Oaxaca.

Vobruba, Körner y Breitenecker (2016) usan la matriz de interacción espacial propuesta por los MIE para determinar un modelo de migración bajo el principio de los modelos gravitacionales (identificar los lugares con mayor atracción con base a la distancia que los separa), durante la explicación metodológica no describe el hacer uso de procesos automatizados ni del software usado.

Garrocho (2012) en el documento “Estructura funcional de la red de ciudades de México” emplea un MIE como herramienta que permite identificar la estructura funcional de redes de ciudades para potenciar el desarrollo social, generando información estratégica para estimar la oferta y demanda de bienes y servicios públicos y privados en aquellos lugares con segregación espacial.

El desarrollo de las implementaciones geotecnológicas presentadas y la aplicación de los estudios realizados con los modelos de interacción espacial, muestran una variedad de desventajas entre las cuales se destaca lo siguiente:

- Falta de documentación técnica y de usuario.
- Algunas herramientas están ligadas únicamente al SIG comercial lo que trae consigo el adquirir licencias comerciales para poder hacer uso de estas.
- La falta de conectividad de las herramientas entre SIG y Sistemas Operativos es notable.
- Algunos desarrollos carecen de interfaz gráfica lo que dificulta su uso.
- Que las herramientas no estén ligadas a los SIG dificulta el desarrollo y planteamiento de escenarios de estudio.
- Algunos desarrollos han dejado de ser actualizados para las últimas versiones de los SIG por lo que han comenzado a ser obsoletos.
- Se requiere de tener un conocimiento amplio en SIG para poder realizar operaciones y procesos específicos, añadiendo el uso de software externo para realizar cálculos matemáticos.



## ***1.4 Justificación***

Bajo las circunstancias socioeconómicas que se presentan en el país, la limitación de recursos económicos ha forzado a las dependencias públicas y privadas a buscar estrategias que permitan optimizar el uso de recursos, por ejemplo, para ubicar unidades de servicio de salud, con el objetivo de evitar la menor pérdida posible de estos. La integración de las ciencias geoespaciales, el análisis espacial, la Geoinformática y la ingeniería de software logran concebir el desarrollo geotecnológico de herramientas a la medida que permitan sustentar esta toma de decisiones a través de la creación de múltiples escenarios hipotéticos que sean capaces de representar la realidad.

A pesar del avance tecnológico que se vive en la actualidad en un país como México, el desarrollo de herramientas de análisis espacial que aborden temas de accesibilidad a través de los MIE han sido pocos y en su caso muy genéricos, estas implementaciones geotecnológicas en su mayoría han sido desarrolladas e integradas con los SIG de licencia privativa dejando de lado a los SIG libres, siendo esta una de sus principales desventajas, además, también es notable la falta de interoperabilidad, es decir, que este tipo de desarrollos se puedan ejecutar desde cualquier sistema operativo llámese Windows, Linux o MacOS, otro aspecto en común es la falta de documentación de técnica y de usuario ya que dificulta su uso y su replicación y/o mejora de los módulos, limitando a la comunidad de especialistas y desarrolladores a contribuir en este tipo de implementaciones geotecnológicas.

El desarrollo geotecnológico a través de la automatización de los MIE como herramientas de análisis espacial ligadas a SIG libre disminuye de manera significativa los tiempos de ejecución, las automatizaciones hacen que las tareas sean más rápidas y mejoran el tiempo de trabajo, aumentando la eficiencia operativa, existe una reducción de costos (no solo económicos), se logran crear más productos con menos tiempo y se optimiza el trabajo, se mejora el control de los datos e información procesada al realizar tareas de geoprocésamiento, teniendo como ventaja la reducción significativa de cometer errores.

El desarrollo geotecnológico que se propone beneficia a investigadores, estudiantes, planificadores urbanos, especialistas, tomadores de decisiones, sector privado, gobierno, etc., y se presenta para evaluar escenarios socioeconómicos relacionados con accesibilidad e interacción espacial, cuya información generada permita tomar mejores decisiones estratégicas para la ubicación y/o mejora de los servicios evaluados, para mitigar el desperdicio de recursos económicos visualizado a través de planteamientos hipotéticos cada vez más cercanos a la realidad donde los conflictos sociales son cada vez más notables.

Los Modelos de Interacción Espacial se pueden desarrollar a través de una herramienta automatizada para SIG libre, donde el uso de esta implementación dejaría de lado el adquirir una licencia privativa (comercial) y dando paso al licenciamiento GNU/GPL (General Public Licence – Licencia Pública General de GNU) que de forma breve son licencias de software libre copyleft, es decir, son gratis (GNU, 2022) y brindan al usuario la libertad de usar el software, acceder al código fuente, modificarlo y distribuir los cambios realizados en este, siempre bajo la misma licencia (MDN contributors, 2022), además, la implementación sería multiplataforma (disponible para los diferentes sistemas operativos) y donde los usuarios estarían centrados en la construcción y dotación de los insumos sin preocuparse por el procesamiento de estos, contribuyendo en esta área de oportunidad en la que los SIG comerciales se han apropiado.

Para llevar a cabo el desarrollo geotecnológico en el que convergen Modelos de Interacción Espacial en conjunto con los SIG libres, se cuenta con habilidades y conocimientos relacionados con desarrollo de software, gestión, control y manejo de datos espaciales, elementos que se complementarían con aquellos adquiridos en la Maestría, como puede ser el análisis espacial y la Geoinformática aplicados.

Finalmente, la consolidación dada entre los Modelos de Interacción Espacial y los SIG permitirá generar una herramienta altamente potencial pues se pretende que trabaje de forma directa con estos, explotando su potencial al aplicar y desarrollar la automatización del modelo, dando como resultado la generación del componente estadístico (llamase gráficas, hojas de cálculo y capas temáticas) y el

análisis espacial como resultado de su aplicación para mejorar la toma de decisiones.

### ***1.5 Objetivos de Investigación***

- **General:**

1. Implementar un módulo de SIG libre con modelos de interacción espacial que evalúe y exprese la relación oferta-demanda de bienes y/o servicios en el territorio, con la finalidad de ponerlo a disposición de los usuarios del SIG.

- **Específicos:**

1. Identificar los requisitos necesarios para implementar en SIG los modelos de interacción espacial, con la finalidad de delimitar el contexto geoespacial que se necesitará.
2. Construir diagramas que expresen la manera en que se podrían implementar en SIG los modelos de interacción espacial, así como para identificar las entradas necesarias, salidas generadas y la estructura que tendrían estas.
3. Codificar los algoritmos que permitan una eficiente automatización de los modelos de interacción espacial en el ambiente de SIG a emplear.
4. Aplicar un caso de estudio empleando el módulo de SIG para el análisis de servicios de salud, con la finalidad de conocer la accesibilidad de este servicio y proponer su oferta en áreas vulnerables que equilibren la distribución y acceso al mismo.

### ***Resumen***

En este primer capítulo se presentó y ejemplificó cómo los gobiernos de las diferentes partes del mundo realizan la distribución de los recursos económicos para los diferentes servicios básicos, mostrando un panorama general del planteamiento del problema, así mismo, se abordaron las preguntas y objetivos de esta investigación y, además, se exhibieron algunas herramientas de análisis espacial relacionadas con los Modelos de Interacción Espacial. Con el fin de contextualizar dicho trabajo escrito.

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 Sistemas de Información Geográfica

#### 2.1.1 Conceptualización y los datos geográficos

En la literatura existen varias definiciones acerca de un SIG, por ejemplo:

- *“Un SIG es un conjunto de herramientas informáticas que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos geográficos, es decir, información que está referenciada espacialmente y que puede ser representada en un mapa digital”* (Longley et al., 2015, pág. 11).
- *“Es un sistema de ordenador que permite la entrada, el almacenamiento, la recuperación, el análisis y la presentación de datos geográficos”* (Burrough et al., 2015, pág. 3).
- *“Son programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos con algún tipo de componente espacial”* (Chuvienco, 1990, pág. 497).
- *“Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas de apoyo a la toma de decisiones que combinan datos espaciales y alfanuméricos en una base de datos común y los visualizan en mapas interactivos, gráficos y tablas para analizar patrones espaciales, relaciones y tendencias”* (Heywood et al., 2011, pág. 18)

Estas referencias hacen énfasis en el componente de bases de datos y otras enfatizan que se tratan de herramientas de apoyo en la toma de decisiones, sin embargo, todas concuerdan que los SIG son un sistema integrado para trabajar con datos e información geoespacial, que permite el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo de los territorios (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2006).

De acuerdo con Olaya (2020), los SIG permiten realizar operaciones como lectura, edición, almacenamiento, y en términos generales, la gestión de datos geoespaciales. Donde el análisis de los datos va desde consultas sencillas hasta la

elaboración de modelos complejos, y que pueden llevarse a cabo tanto sobre el componente espacial (localización) como sobre el componente temático (valor).

Los SIG permiten unir datos cualitativos o cuantitativos con mapas, integrando datos de ubicación con todo tipo de información descriptiva, además, ayuda a los usuarios a comprender patrones, relaciones y dentro de un contexto geográfico. Entre las grandes ventajas que provee un SIG es la de mejorar la comunicación y eficiencia de la gestión y la toma de decisiones (ESRI, 2021).

Algunos de los principales usos en el territorio empleando SIG son:

- Identificación de problemas
- Supervisión y monitoreo de cambios
- Administración y respuesta a eventos
- Análisis y predicciones
- Selección de prioridades a través de análisis espacial
- Detección y comprensión de tendencias

La Figura 2.1 resume la conceptualización y descripción de los Sistemas de Información Geográfica.

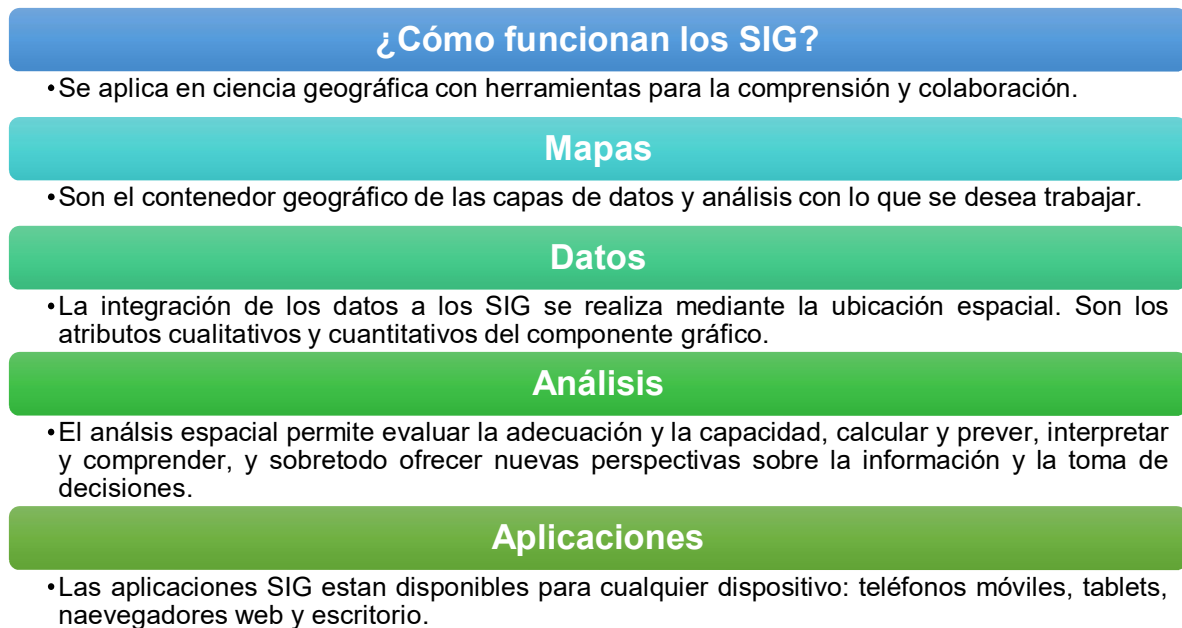


Figura 2.1: ¿Qué son los SIG?, Fuente: Elaboración propia con base en ESRI (2021).

Los datos son la parte fundamental del análisis espacial en los SIG, sin embargo, estos datos deben cumplir una serie de características geográficas como son: la posición, los atributos, las relaciones espaciales y tiempo, y finalmente la temporalidad (INGEOEXPERT, 2019). La Tabla 2.1 describe dichas características.

*Tabla 2.1: Características geográficas de los datos.*

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
<b>Posición</b>	Elemento fundamental de una entidad geográfica
<b>Atributos</b>	Responden a cuestiones como: ¿Qué es?, e identifican las características descriptivas de los elementos geográficos, a lo que se denominan atributos geométricos o descriptivos (cuantitativos y cualitativos).
<b>Relaciones Espaciales</b>	Se determinan las interrelaciones geométricas de las entidades espaciales.
<b>Etapa Temporal</b>	La temporalidad que representan los datos.

*Fuente: Elaboración propia con base en INGEOEXPERT (2019).*

De acuerdo con INGEOEXPERT (2019), los Sistemas de Información Geográfica pueden ser concebidos desde tres puntos de vista distintos:

- Los SIG como software o programas informáticos.
- Los SIG como proyecto y sistema de información orientado a la gestión o planificación territorial.
- Los SIG como ambiente de trabajo de múltiples disciplinas profesionales con orientación al análisis espacial dentro de la ordenación del territorio.

Sin embargo, es importante mencionar que antes de la popularización de las computadoras, los investigadores utilizaban técnicas manuales para elaborar SIG. En general, se basaban en la superposición de capas de acetato o papel en los que representaban las diferentes variables espaciales como: la geología, la topografía o los límites administrativos y territoriales. Cada una de las capas utilizadas contenía información específica como las características del suelo, la elevación del terreno, la presencia de ríos y valles o la ubicación de las ciudades. Posteriormente, se utilizaban luces especiales para proyectar diferentes capas sobre una pantalla para obtener una imagen compuesta que permitirá identificar las interacciones entre

dichas variables, además, también se podía utilizar técnicas de litografía para la creación de mapas temáticos y generar copias impresas (LongLey et al. , 2015).

Estas técnicas eran muy laboriosas, requerían una gran cantidad de tiempo y recursos, por lo que solo eran utilizadas en proyectos de investigación de gran magnitud. Finalmente, con la llegada de las computadoras y el software especializado a partir de los años 60's, los investigadores donde principalmente destacaban los cartógrafos y las agencias de mapeo, buscaban adaptar estos procesos manuales a proceso automatizados para reducir los costos y crear mapas en el menor tiempo posible, lo que ha dado auge a que los SIG cada vez sean más accesibles y fáciles de utilizar para muchos usuarios en la actualidad (LongLey et al. , 2015).

### ***2.1.2 Modelos y estructuras de datos***

Los SIG, hablando estrictamente del software, requieren de estructuras de datos, las cuales se definen brevemente como aquel conjunto finito de datos discretos que son entendibles por dichos programas. Estas estructuras de datos se encargan de representar las entidades y variables, y de contener las instrucciones necesarias para que sean manipuladas por el software (Universidad de Murcia, 2018); sin embargo, antes de abordar estas estructuras de datos es necesario hacer mención del ciclo de la construcción de dichas estructuras (niveles de abstracción) a través de los distintos modelos.

Un modelo de acuerdo con la RAE (2018) es aquel "*Arquetipo o punto de referencia para imitarlo o reproducirlo.*", en cuestiones informáticas, se denomina modelo de datos al conjunto de reglas utilizadas para presentar las diferentes entidades mediante elementos sencillos de comprender (Universidad de Murcia, 2018). Son cuatro los niveles de abstracción y están ilustrados en la Figura 2.2, además, la Universidad de Murcia (2018) expresa a dichos niveles de la siguiente forma:

1. **Realidad:** Nivel propio de los gestores preocupados por problemas de gestión y planificación del espacio. Ejemplo: las montañas, lagos, campos de cultivo, etc.
2. **Modelo conceptual:** Nivel de los científicos que desarrollan, verifican o aplican teorías e hipótesis sobre variables y procesos que tienen lugar en el espacio. Consideran dos elementos importantes de la superficie que son: las variables y las entidades.
3. **Modelo lógico:** Nivel de los técnicos del SIG que utilizan las herramientas del sistema para llevar a cabo las tareas requeridas por los gestores o científicos. La forma en cómo trabajan es bajo representaciones de la realidad que pueden ser de dos tipos: **ráster o vectorial**.
4. **Modelo digital/Estructura de datos:** Nivel informático, asociado a desarrolladores de SIG cuyo propósito es optimizar las estructuras de los datos utilizados para almacenar la información.

Los diferentes niveles de abstracción pueden actuar de forma iterativa como se expresa en la Figura 2.2. Las líneas verdes punteadas expresan que, si alguna de las condiciones evaluadas no satisface al modelo actual, éste puede regresar a cualquiera de los otros hasta compensar dicho nivel de abstracción. Por otro lado, las líneas azules expresan la continuidad de los diferentes modelos una vez que se hayan completado.

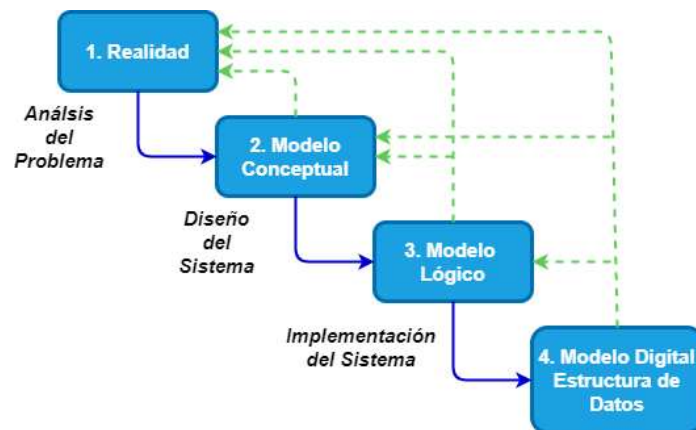


Figura 2.2: Modelización de datos en SIG, Fuente: Elaboración propia con base en Universidad de Murcia (2018, pág. 56).



Retomando que las representaciones de la realidad están dadas bajo el Modelo lógico y que éstas se clasifican en dos grandes vertientes, a continuación, se describe cada una de ellas.

### 2.1.2.1 Modelo lógico

La realidad geográfica debe estar almacenada en un formato que pueda ser reconocido por el equipo de cómputo y además que se pueda emplear en un SIG. Al obtener el Modelo conceptual siguiendo las necesidades de cumplir la extracción y abstracción del mundo real, se debe generar información adecuada de entender, interpretar y manejar. La forma en cómo se presentan digitalmente estos datos geográficos se denominan objetos espaciales y, que en sus propiedades contienen principalmente atributos, dimensiones, ubicación, etc. Además de representar al mundo real tomando en cuenta los grupos de variables discretas y continuas, las cuales se asocian a los formatos vectoriales y ráster (Lozada, 2018).

- **Formato vectorial**

Este formato recoge la variabilidad y características de la realidad mediante entidades geométricas (Olaya, 2020). El uso de formato vectorial ha sido usado principalmente para modelizar aspectos poco variables, generalmente cualitativos (INGEOEXPERT, 2019). La representación de la realidad a través de información geográfica se realiza en base a tres figuras geométricas principales: los puntos, las líneas y los polígonos. La Figura 2.3 muestra la caracterización visual y la Tabla 2.2 la descripción de éstas.

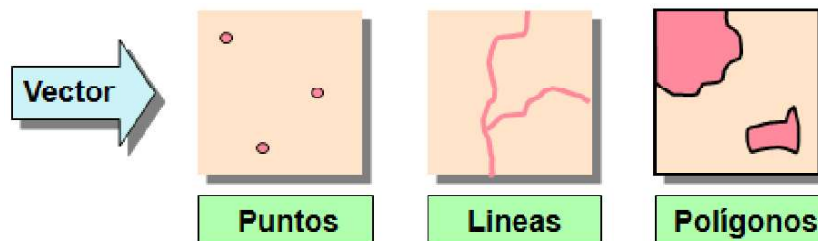


Figura 2.3: Formatos vectoriales, Fuente: Reproducido de CUOM (2013, pág. 2).

Tabla 2.2: Descripción del formato vectorial

GEOMETRÍA	DESCRIPCIÓN
<b>Puntos (<i>Points</i>)</b>	Definen ubicaciones discretas de entidades geográficas referidos por una coordenada “X” y “Y” que los ubica en el espacio, por ejemplo: ubicaciones de pozos, hospitales, escuelas, etc.
<b>Líneas (<i>Lines</i>)</b>	Representan la forma y ubicación de objetos geográficos, son un conjunto de puntos unidos (sin que se cierren), las líneas también son usados para representar las entidades que tienen longitud, pero no área, por ejemplo: las curvas de nivel, calles, arroyos, etc.
<b>Polígonos (<i>Polygons</i>)</b>	Representan la forma y ubicación de objetos geográficos, formados por un conjunto de puntos unidos (cerrados, es decir, mismo punto inicial y punto final). Son áreas cerradas que representan la forma y la ubicación de entidades homogéneas como estados, municipios, países, etc.

Fuente: Elaboración propia con base en (ArcGIS, 2012).

- **Formato ráster**

Este formato divide el espacio en un conjunto regular de celdas (también conocido como malla de píxeles), cada una de estas celdas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto o el valor de una variable (Universidad de Murcia, 2018). El tamaño de cada celda o píxel será el que determine la resolución de la imagen (INGEOEXPERT, 2019). El formato ráster puede ser obtenido de distintas fuentes como fotografías aéreas, modelos digitales de elevación, de satélites y demás fuentes que permitan la digitalización de imágenes (ArcGIS, 2012).

Las propiedades que incluye el formato ráster son: valor para cada píxel, una proyección cartográfica, un sistema de coordenadas, tamaño de la celda y una coordenada de referencia (ArcGIS, 2012).

El formato ráster es utilizado cuando se quiere mostrar información continua de un área y no se puede dividir fácilmente en características vectoriales, por ejemplo, los pastizales que entre sus características tienen una variación de color y densidad de cobertura, para mostrar tendencias de lluvia sobre un área, para representar riesgos de incendio en un paisaje, para realizar un análisis de terreno, entre otros (QGIS, 2015).

Resumiendo, el formato ráster se utiliza principalmente cuando se requiere mostrar información de entidades que no son homogéneas en toda el área de estudio. Por otro lado, el formato vectorial, éste agrega valores iguales a toda la entidad por lo que es difícil diferenciar ciertas características particulares que no se desean perder.

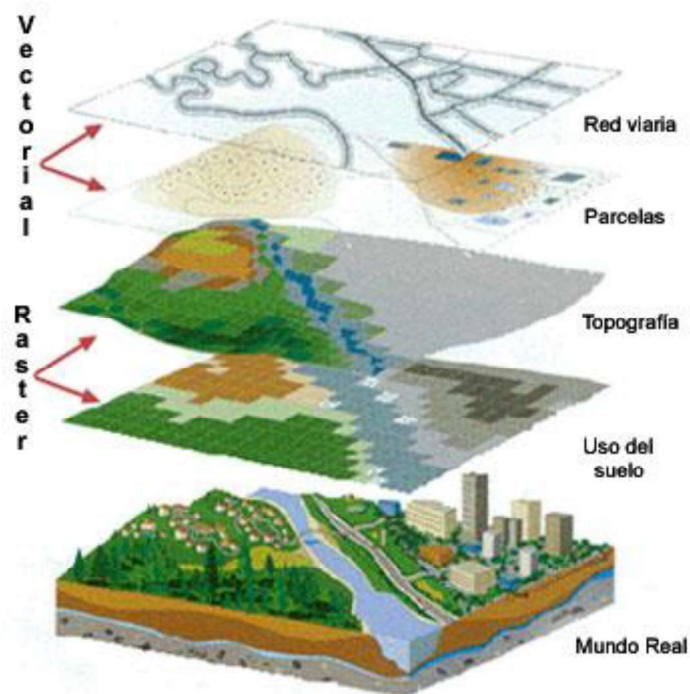


Figura 2.4: Estructura ráster y vectorial, Fuente: Reproducido de ISFRRP (2006).

- **Formato vectorial vs Formato ráster**

De acuerdo con Olaya (2020) las características de ambos son muy notables; sin embargo, cuando se trata de la elección de algunos de estos, es necesario

atender a ciertos aspectos específicos para poder hacer una comparación entre modelos, estos aspectos son:

- a) **Planteamiento:** El formato ráster hace un mayor énfasis en caracterizar el espacio y responde a preguntas del ¿Qué? Y ¿Cómo?, mientras que el formato vectorial da prioridad a la localización y se centra en dar respuesta a la pregunta ¿Dónde?
- b) **Precisión:** El formato ráster tiene una precisión limitada, esto se encuentra sujeto al tamaño de la celda (píxel). Existe una mayor imprecisión de las formas ya que el formato ráster restringe las formas a ángulos rectos, retomando que su unidad principal es el píxel, sobre todo es notorio en ciertas escalas.
- c) **Volumen de almacenamiento:** Para variables discretas, el modelo vectorial resulta ser el más adecuado, para el caso ráster el tamaño de la malla influirá en el tamaño de su archivo.
- d) **Complejidad:** Las capas ráster son sencillas al tratar con algoritmos de análisis espacial pues estas operan dentro de las mallas. Por el contrario, la irregularidad espacial de las capas vectoriales dificulta muchas de las veces la aplicación de los mismos algoritmos de análisis. Aunque el volumen de los datos (atributos y registros para los formatos vectoriales y número de celdas para los formatos ráster) también complican el análisis de estos.
- e) **Tipo de variable o fenómeno a representar:** Algunas variables, en función de su variabilidad y comportamiento espacial serán más adecuadas para el formato vectorial, mientras que otras serán para el formato ráster. Por ejemplo, si se desea sintetizar la zona urbana a través de manzanas y únicamente interesa resaltar la forma de éstas, el formato vectorial es el adecuado. Sin embargo, si se desea observar a la misma zona urbana, pero para identificar su crecimiento a través del tiempo, el formato ráster será el indicado.
- f) **Tipo de análisis:** El uso de las capas temáticas condicionan en gran medida el formato de datos a usar. Por ejemplo, para representar

datos continuos como la temperatura, la precipitación y la elevación, el formato ráster es el indicado ya que permite visualizar la variación continua de los valores a través de las escalas de color. Para datos categorizados o discretos, el formato vectorial es el adecuado ya que está más enfocado en la representación de patrones y en la distribución de los objetos geográficos.

- g) **Contexto de trabajo:** Si se desea trabajar con imágenes, esto automáticamente condiciona a trabajar con capas ráster.

## ***2.2 Los SIG y los lenguajes de programación***

La programación en SIG es una tarea indispensable para simplificar análisis geoespaciales complejos, para integrar software externo y datos, para compartir y visualizar información espacial de forma local o en web, o para desarrollar herramientas específicas y especializadas para propósitos determinados (Estévez, 2018). Al hacer uso de programación para automatizar tareas de geoprocésamiento o para implementar algún algoritmo es porque se ha llegado al “límite” del uso ordinario de los SIG y es donde este tipo de tareas requieren un grado diferente de operaciones, en el cual el problema a resolver requiere de procesamientos y manipulaciones muy concretas que particularmente los SIG no podrían solucionar de forma directa (Geomatas, 2022), también es frecuente enfrentarse a interactuar con el SIG en tareas repetitivas por lo que herramientas que las automaticen facilita el empleo de este.

En estos casos, las diversas tecnologías y lenguajes de programación se han convertido en elementos complementarios que permiten la captura, gestión, análisis, explotación y visualización de información geoespacial (Estévez, 2018). Actualmente los SIG son modulares y brindan al usuario la oportunidad de agregar más módulos cuya única limitante es el lenguaje de programación con el que interactúa.

Además, los SIG del tipo *OpenSource* o código abierto por sus siglas en inglés, han presentado una importante expansión en la actualidad a pesar de que este fenómeno ha estado presente desde 1998. El término *OpenSource* hace

referencia a que cualquier persona pueda descargar, modificar y distribuir el software sin costo. El aumento que han tenido los SIG con este tipo de licenciamiento se debe principalmente a su accesibilidad y nulo costo, en comparación del software comercial, y además de la facilidad de incorporar *plugins* personalizados gracias al acceso de librerías y módulos de programación (Ramos, 2017).

Dentro de las principales ventajas que ofrecen los SIG libres (*OpenSource*) son la gran flexibilidad que ofrecen, la adaptabilidad para cada usuario, la facilidad de integrarse con otros sistemas, la transparencia y confianza que brinda su usabilidad, y las grandes comunidades que contribuyen a su mejora (FISOTEC, 2022).

Dentro de los principales SIG libres se encuentra QGIS y es uno de los sistemas *OpenSource* más usados por los usuarios debido a su amigable interfaz, a la amplia variedad de *plugins* y al constante apoyo que recibe por parte de la comunidad de usuarios, desarrolladores y especialistas que conjuntamente colaboran para mejorar el software (Ramos, 2017).

### ***2.2.1 Principales lenguajes de programación***

- **SQL (*Structured Query Language*)**

El lenguaje estructurado de consultas (o SQL por sus siglas en inglés), es un lenguaje para recuperar y manipular datos en una base de datos del tipo relacional. SQL permite realizar consultas sencillas hasta complejas sobre datos (ya sean espaciales o no) almacenados en una base de datos para operar con ellos y realizar análisis puntuales y a gran profundidad (Estévez, 2018). Actualmente, una de las bases de datos del tipo libre en el mercado es *PostgreSQL* con su complemento *PostGIS* que permite procesar componentes espaciales dentro de la base de datos (Morales, 2022).

- **JavaScript**

*JavaScript* es un lenguaje de programación orientado a los entornos web. Permite brindar y extender las funcionalidades e interacciones de la página web con

el usuario, también permite establecer conexiones con servidores. Es muy utilizado para proyectos del tipo *web mapping* donde se requiere una gran interacción entre los navegadores web, la página web y el usuario (Estévez, 2018). Algunos especialistas SIG, refieren que *JavaScript* es un análogo a la relación que existe entre Python y los SIG de escritorio, además de ser utilizado por los principales clientes de mapas web como: *Google Maps*, la API de *ArcGIS*, *OpenLayers*, *Leaflet* o *MapBox GL JS* (Morales, 2022).

- **Java**

*Java* es uno de los lenguajes principales empleado para desarrollar bajo el paradigma de programación orientado a objetos (*POO*), está dirigido al desarrollo de aplicaciones de escritorio como una alternativa para *C/C++* o *C#*, sin embargo, *Java* ha resaltado por ser un lenguaje útil para la utilización de servidores de mapas, por ejemplo: *GeoServer*, *GeoTools*, *ArcGIS Runtime SDK*, *gvSIG*, *OpenJump* (Geomatas, 2022).

Además, ofrece una gran flexibilidad porque permite acceder a una gran variedad de APIs, extensiones y posee una enorme comunidad que brinda soporte (Estévez, 2018).

- **R**

El propósito principal de *R* es el análisis, procesamiento y visualización de datos desde un punto de vista estático (Estévez, 2018). Aunque el núcleo principal de *R* es pequeño, la comunidad ha compartido una multitud de bibliotecas para explotar aún más su potencial, tal es el caso de las que son orientadas a SIG, la ciencia de datos y *big data*. *R* se puede integrar a los SIG y es especialmente útil para explotar grandes conjuntos de datos (minería de datos) (Morales, Lenguajes de programación para GIS, 2022).

- **Python**

*Python* es uno de los lenguajes de programación más populares hoy en día, pues se trata de un lenguaje de alto nivel cuya sintaxis es fácilmente legible lo que propicia su aprendizaje (Estévez, 2018), y además es multiparadigma, es decir, no

solo permite escribir scripts sino también permite la programación orientada a objetos.

Python permite automatizar tareas de geoprocésamiento lo que conlleva a ahorrar tiempo y mejorar la precisión de los resultados (Morales, 2022). Cuenta con una excelente documentación y, una amplia gama de librerías para todo tipo de procesamiento de datos (Geomatas, 2022), ya sea para ciencia de datos, ráster, vectoriales, geoprocésamientos, minería de datos, redes, seguridad, *hacking*, *machine learning* y *deep learning*, etc.

Python se caracteriza por cuatro principales puntos: es multiplataforma, es interactivo, tiene una sintaxis clara y puede ser orientado a objetos (Netec, 2018). La Figura 2.5 resume estos cuatro puntos.

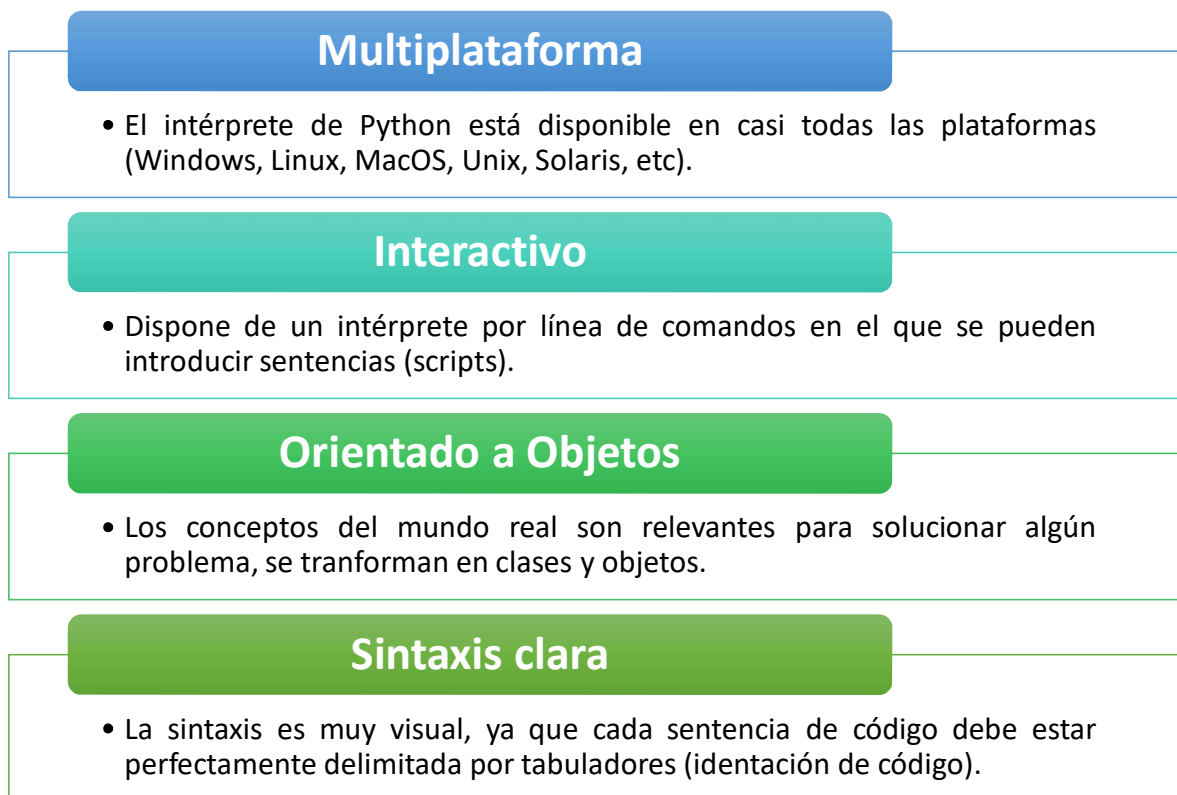


Figura 2.5: Características del Lenguaje de Programación Python, Fuente: Elaboración propia con base en Netec (2018).

Actualmente la mayoría de los SIG de escritorio utilizan este lenguaje para extender y ampliar el uso, crecimiento y desarrollo de herramientas que sean capaces de ser ejecutadas en dichos ambientes, además, los SIG permiten la



creación de scripts que ayudan y facilitan la ejecución de bloques de código a través de la instancia del REPL (*Read-Eval-Print-Loop*) de Python, donde se pueden introducir distintas estructuras de control, se puede realizar el procesamiento de información de forma rápida sobre archivos vectoriales o ráster sin la necesidad de elegir una herramienta específica y además, el uso y manipulación de estos archivos está dada bajo las propias librerías (API) del SIG, con las que se pueden realizar un sinnúmero de procesos y scripts que facilitan y extienden aún más su uso del propio SIG.

Finalmente, Python sobresale de entre todos los lenguajes de programación vinculados a los SIG, gracias a la filosofía que éste posee y los principios básicos que cubre en ellos, la Figura 2.6 describe estos puntos clave:

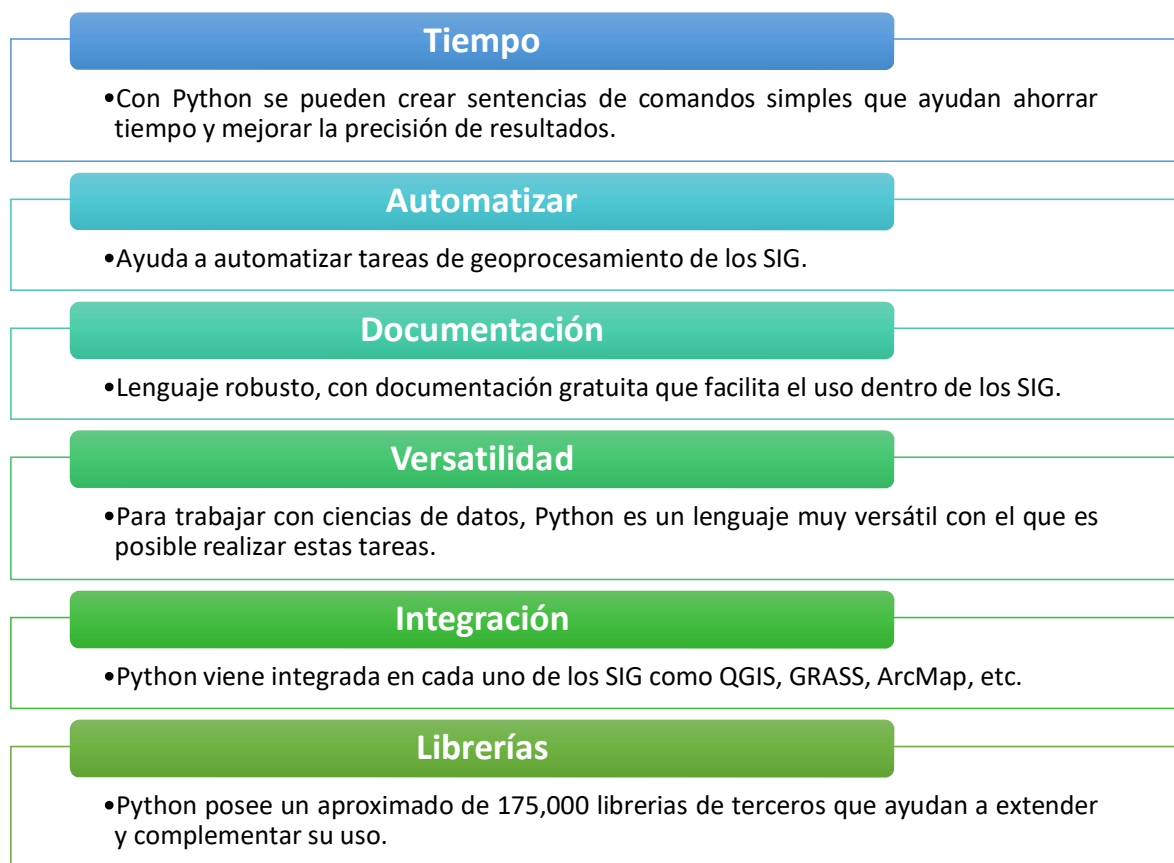


Figura 2.6: Características de Python en los SIG, Fuente: Elaboración propia con base en Morales (2019).

### 2.2.2 QGIS y Python (API)

QGIS es un Sistema de Información Geográfica libre y de código abierto, fácil de usar y que se puede ejecutar en entornos Linux, Unix, MacOS y Windows. QGIS

admite formatos vectoriales (*ESRI ShapeFile*), ráster (*GeoTiff*) y bases de datos (QGIS, 2023).

La API de QGIS es un conjunto de herramientas de programación que permiten a los desarrolladores crear complementos personalizados y aplicaciones que se integren con QGIS. La API está basada en Python y C++, y proporciona una amplia variedad de funciones y clases para manipular datos geoespaciales, interactuar con la interfaz gráfica de usuario de QGIS, crear mapas y visualizaciones, realizar análisis geoespaciales, y más (QGIS, 2018).

La facilidad de acceso a la API de QGIS permite a los desarrolladores crear complementos que extienden la funcionalidad de QGIS, por ejemplo: el desarrollo de nuevos algoritmos de procesamiento, herramientas de edición personalizadas o funciones de análisis muy específicas y particulares. Además, la API permite tener acceso a funciones que trabajan con una amplia variedad de formatos de datos geoespaciales como: *Shapefile*, *GeoJSON*, *GML*, entre otros, lo que la vuelve muy flexible para trabajar con diferentes fuentes de datos (QGIS, 2023).

Los módulos de la API de QGIS están divididos en siete partes importantes, cada uno de estos módulos contiene una gran variedad de clases, métodos y atributos que facilitan la automatización, manejo, procesamiento de los datos geoespaciales, así como también para el desarrollo de interfaces gráficas que proporcionan la interacción con el usuario. La Tabla 2.3 describe cada uno de los módulos:

Tabla 2.3: Módulos de QGIS

MÓDULO	DESCRIPCIÓN
<i>Core Library</i>	Contiene toda la funcionalidad SIG básica. Incluyen las librerías necesarias para el manejo de los diferentes tipos de datos.
<i>GUI Library</i>	Este módulo está construido sobre la librería “Core” y agrega <i>widgets</i> de Interfaz Gráfica (GUI) reutilizables.

<b><i>Analysis Library</i></b>	Basado en la librería “Core” proporciona herramientas de alto nivel para el análisis espacial tanto en datos vectoriales como en ráster.
<b><i>Server Library</i></b>	Construida sobre la librería “Core”, agrega componentes de servidor de mapas a QGIS.
<b><i>3D Library</i></b>	Se basa en la librería “Core” y el marco Qt 3D.
<b><i>Plugin Classes</i></b>	Contiene clases relacionadas con la implementación de complementos para QGIS.
<b><i>QgsQuick Library</i></b>	Basada en la librería “Core” y el marco Qt Quick/QML.

*Fuente: Elaboración propia con base en (QGIS, 2023).*

### ***2.2.3 Desarrollo de Software – Proceso Unificado***

Las metodologías de desarrollo de software son marcos o enfoques para planificar, diseñar, construir y mantener software de manera efectiva y eficiente. Se basan en una serie de prácticas, procesos y herramientas que se utilizan para mejorar la calidad del software, reducir el tiempo de desarrollo y minimizar el riesgo. Las metodologías de desarrollo de software a menudo se adaptan a las necesidades específicas del proyecto y del equipo de desarrollo (Santander Universidades, 2020).

De esta forma, el marco o modelo de referencia debe abarcar el proceso general de construcción de software, el cual se rige a través de cuatro procesos básicos:

- Análisis y especificación de los requisitos.
- Diseño y arquitectura de solución.
- Programación.
- Pruebas.

Dentro de estos procesos se incluyen características que son comunes entre las metodologías de desarrollo de software (Rootstack, 2022) y son las siguientes:

- Enfoque estructurado y organizado en el desarrollo del software.

- Proceso iterativo e incremental para mejorar la calidad y la retroalimentación.
- Documentación y seguimiento de los procesos y resultados.
- Trabajo en equipo y colaboración entre los desarrolladores y otros miembros del equipo.
- Adopción de estándares y buenas prácticas en el desarrollo de software.
- Flexibilidad para adaptarse a las necesidades y requerimientos del proyecto.

Proceso Unificado es una metodología de desarrollo de software ampliamente conocida, también es llamada como *Rational Unified Process* (RUP). Se basa en una arquitectura orientada a objetos y se centra en la iteración, la colaboración y la mejora continua. Provee un enfoque interdisciplinario en la asignación de tareas y responsabilidades dentro de una organización de desarrollo de aplicaciones. Su meta es asegurar la producción de software de alta calidad, que satisfaga las necesidades de los usuarios finales, dentro de un calendario y presupuesto predecible (Kanjilal, 2022).

Proceso Unificado también se enfoca en la gestión de riesgos, la planificación y el monitoreo del proyecto, y la gestión del cambio. Una característica clave del Proceso Unificado es su enfoque en los casos de uso como una forma de capturar los requisitos del proyecto y guiar el desarrollo (Janse, 2019).

Proceso Unificado también se centra en la gestión de riesgos y en la definición clara de los requisitos del proyecto, y utiliza una serie de artefactos y herramientas, como modelos UML, diagramas de casos de uso, iteraciones, prototipos y pruebas. El Proceso Unificado es muy flexible y puede adaptarse a diferentes proyectos y equipos de desarrollo (Janse, 2019).

Jacobson et al. (2000) menciona que el Proceso Unificado se caracteriza por tres aspectos sumamente importantes, Jansen (2019) y Kanjilal (2022) resumen lo siguiente:

## **1. Manejado por casos de uso**

- Un caso de uso es una descripción detallada de cómo los usuarios interactúan con el sistema y qué funcionalidades debe proporcionar el sistema en respuesta a esas interacciones.
- Cuando se dice que Proceso Unificado está guiado por casos de uso, significa que los casos de uso son la base para el diseño, la implementación y las pruebas del software.
- Los casos de uso se utilizan para definir los requisitos del sistema y para guiar el diseño e implementación del software.
- Los casos de uso también son la base para las pruebas del software, ya que se utilizan para verificar que el software cumple con los requisitos del usuario.

## **2. Centrado en la arquitectura**

- La arquitectura de software es la estructura o el marco que define la organización y las relaciones entre los diferentes componentes del software.
- La arquitectura es considerada como una parte crucial del proceso de desarrollo de software. Esto significa que se dedica una gran atención a la definición de la arquitectura y a la toma de decisiones en materia de diseño de software que se derivan de ella.
- Proceso Unificado considera que la arquitectura es la base sobre la cual se construye el software. Por lo tanto, se enfoca en la definición y el diseño de una arquitectura sólida que pueda soportar los requisitos actuales y futuros del software.
- Proceso Unificado centrado en la arquitectura también promueve una perspectiva de sistemas en la que se considera el software como parte de un sistema más grande. Esto significa que la arquitectura se diseña no solo para satisfacer los requisitos de la aplicación en sí misma, sino también para

integrarse adecuadamente en el entorno de sistemas más amplio en el que se utilizará.

### **3. Iterativo e Incremental**

- El enfoque iterativo e incremental del Proceso Unificado implica que el proceso de desarrollo de software se divide en iteraciones, cada una de las cuales es un ciclo completo de planificación, análisis, diseño, implementación y pruebas. Cada iteración produce un incremento del software que se entrega al cliente y se utiliza para obtener retroalimentación y evaluar el progreso del proyecto.
- El Proceso Unificado utiliza el enfoque iterativo para desglosar el proyecto en partes manejables. Cada iteración se enfoca en una parte específica del software y permite que el equipo de desarrollo se concentre en los requisitos y objetivos específicos de esa parte. Al final de cada iteración, se obtiene un producto funcional que se puede entregar al cliente.
- El enfoque iterativo e incremental permite la adaptación y flexibilidad a medida que se obtiene retroalimentación del cliente y se descubren nuevos requisitos o cambios en los requisitos existentes. En lugar de tener que volver a planificar todo el proyecto para adaptarse a estos cambios, el Proceso Unificado puede ajustar y agregar requisitos a las iteraciones futuras.

Proceso Unificado se conforma de cuatro fases principales: inicio, elaboración, construcción y transición, entendiendo por fase al intervalo de tiempo entre dos hitos importantes del proceso de desarrollo durante el cual se satisface un conjunto bien definido de objetivos, se completan artefactos y se toman las decisiones sobre si pasar a la siguiente fase (Jacobson et al., 2000). Jansen (2019) y Kanjilal (2022) describen estas fases de la siguiente forma:

## Fases

- 1. Inicio/Gestación del Proyecto:** Se define el alcance del proyecto y se establecen los objetivos de este. Se realiza un análisis de factibilidad y se establecen los recursos y la planificación necesarios para llevar a cabo el proyecto.
- 2. Elaboración:** Se realiza un análisis detallado de los requisitos del proyecto y se diseña la arquitectura del sistema. Se elabora un plan detallado para las iteraciones restantes del proyecto y se identifican los riesgos del proyecto. Además, se especifican en detalle la mayoría de los casos de uso del producto y se diseña la arquitectura del sistema. La relación entre la arquitectura del sistema y el propio sistema es primordial.
- 3. Construcción:** Se construye el software de acuerdo con la arquitectura definida en la fase de Elaboración. Se realizan iteraciones regulares de desarrollo y pruebas para construir el software de manera incremental. En esta fase, la línea base de la arquitectura crece hasta convertirse en el sistema completo, la descripción evoluciona hasta convertirse en un producto preparado para ser entregado a la comunidad de usuarios.
- 4. Transición:** Se realiza la transición del software desarrollado al entorno de producción. Se realizan pruebas finales y se documentan los resultados. Se realiza la capacitación del usuario final y se realiza la entrega final del software.

Las fases del Proceso Unificado se resumen en la Figura 2.7:



Figura 2.7: Fases del Proceso Unificado, Fuente: Elaboración propia con base en Torossi (2004, pág. 5).

Por otro lado, Proceso Unificado consta de cinco flujos de trabajo principales, es importante mencionar que estos flujos pueden aumentar de acuerdo con las necesidades de la organización (Jacobson et al., 2000).

- **Flujos de trabajo**

1. **Requisitos:** Se enfoca en la identificación, análisis, documentación y gestión de los requisitos del sistema. Se definen los objetivos y funcionalidades del sistema, se identifican los usuarios y las interacciones que tendrán con el sistema, y se elabora la documentación que define los requisitos del software. Este flujo de trabajo también implica la validación y verificación de los requisitos para asegurar su corrección, integridad y coherencia.
2. **Análisis:** Se realiza un análisis detallado de los requisitos del sistema y se define la arquitectura del software.
3. **Diseño:** Se realiza el diseño detallado del sistema y sus componentes. Este flujo de trabajo involucra la elaboración de modelos y diagramas que representan la estructura, comportamiento y funcionalidad del sistema.
4. **Implementación:** Se enfoca en el desarrollo de los componentes del software y su integración en el sistema. Se desarrolla el código fuente y se integran los componentes en el sistema. También se lleva a cabo



la documentación necesaria para facilitar el mantenimiento y la evolución del software.

5. **Test o Pruebas:** Se planifican y ejecutan las pruebas del sistema para asegurar la calidad del software. Se realizan pruebas funcionales, de integración, de rendimiento y de seguridad para asegurarse de que el sistema funciona de acuerdo con los requisitos definidos. También se realiza la documentación de las pruebas y se entregan los informes correspondientes.

Finalmente, la Figura 2.8 resume las relaciones existentes entre los flujos de trabajo y las fases que conforman al Proceso Unificado.

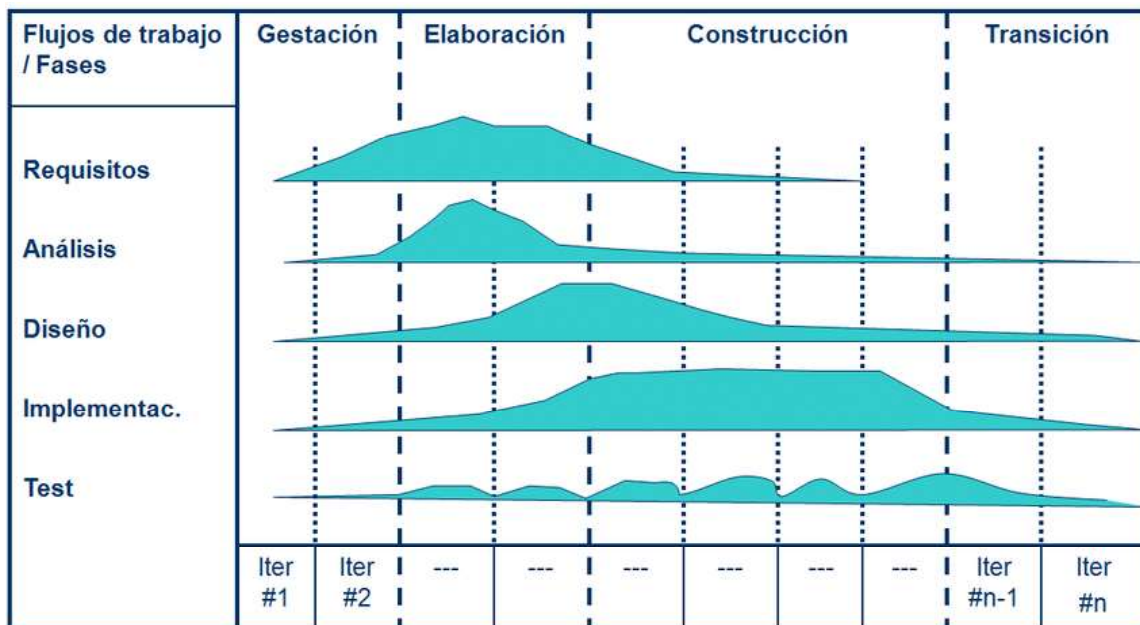


Figura 2.8: Fases y flujos de trabajo del Proceso Unificado, Fuente: Reproducido de Santana Núñez (2011, pág. 36).

### 2.2.3.1 Lenguaje Unificado de Modelado (UML)

UML (*Unified Modeling Language*) es un lenguaje gráfico utilizado para modelar sistemas de software. UML es una herramienta de modelado que permite a los desarrolladores de software visualizar, especificar, construir y documentar sistemas de software de manera efectiva. Utiliza diagramas para representar diferentes aspectos de un sistema, como la estructura, el comportamiento y las interacciones entre los componentes. Los diagramas UML son una forma

estandarizada de representar diferentes aspectos de un sistema y son utilizados por los desarrolladores de software en todas las etapas del proceso de desarrollo de software, desde la concepción hasta la implementación y mantenimiento del sistema (Jacobson et al., 2000).

La finalidad de estos diagramas es presentar diversas perspectivas de un sistema, a esta entidad se le conoce como modelo. Este modelado permite comunicar la estructura de un sistema complejo, especificar el comportamiento del sistema, comprender lo que se va a construir, descubrir oportunidades de simplificación y reutilización de código (Booch et al., 2004).

*“En UML se crean modelos independientes de plataforma y luego se experimentan varios niveles de transformación para eventualmente transformarse a código fuente para una plataforma específica”* (Pressman, 2010, pág. 714).

Los modelos tienen una representación gráfica a través de diagramas, en UML existe una clasificación para cada diagrama y esta clasificación es la siguiente:

- **Diagramas de Estructura:** Se utilizan para representar la estructura estática de un sistema de software. Estos diagramas se enfocan en los elementos estáticos del sistema, como las clases, interfaces, paquetes, objetos y sus relaciones, y son utilizados para modelar la arquitectura de un sistema y sus componentes (UML, 2018).

Los diagramas de estructura en UML incluyen los siguientes:

- **Diagrama de clases:** Se utiliza para representar las clases y sus relaciones en un sistema de software. La definición de las clases candidatas se realiza a través de técnicas como el análisis de sustantivos o las tarjetas CRC (*Class-Responsibility-Collaboration*) donde se identifican las actividades que realizará dicha clase y su relación con las demás clases.
- **Diagrama de objetos:** Se utiliza para representar los objetos y sus relaciones en un momento específico en el sistema.

- **Diagrama de componentes:** Se utiliza para representar los componentes físicos y lógicos de un sistema y sus relaciones.
- **Diagrama de despliegue:** Se utiliza para representar la arquitectura física de un sistema y cómo se distribuyen los componentes en los nodos de hardware.
- **Diagrama de paquetes:** Se utiliza para mostrar cómo los elementos de un sistema están agrupados en paquetes y cómo se relacionan entre sí. Los paquetes son contenedores lógicos que agrupan elementos relacionados, como clases, interfaces y otros paquetes.
- **Diagramas de Comportamiento:** Se utilizan para representar la parte dinámica del sistema y cómo los objetos interactúan entre sí. Estos diagramas se enfocan en los elementos dinámicos del sistema, como el comportamiento, la interacción y la comunicación entre objetos (UML, 2018).

Los diagramas de comportamiento UML incluyen los siguientes:

- **Diagrama de casos de uso:** Se utiliza para representar los diferentes casos de uso de un sistema y cómo los usuarios interactúan con el sistema.
- **Diagrama de actividades:** Se utiliza para modelar el flujo de trabajo en un proceso empresarial o en un algoritmo.
- **Diagrama de secuencia:** Se utiliza para representar la interacción entre los objetos a lo largo del tiempo, mostrando la secuencia de mensajes que se envían y reciben entre ellos.

Aunque existen más diagramas UML, únicamente se mencionan los que son relevantes y los que serán usados en el apartado del **Capítulo 3: Material y método** de este documento. Para finalizar, la Figura 2.9 muestra la clasificación de los diagramas UML.

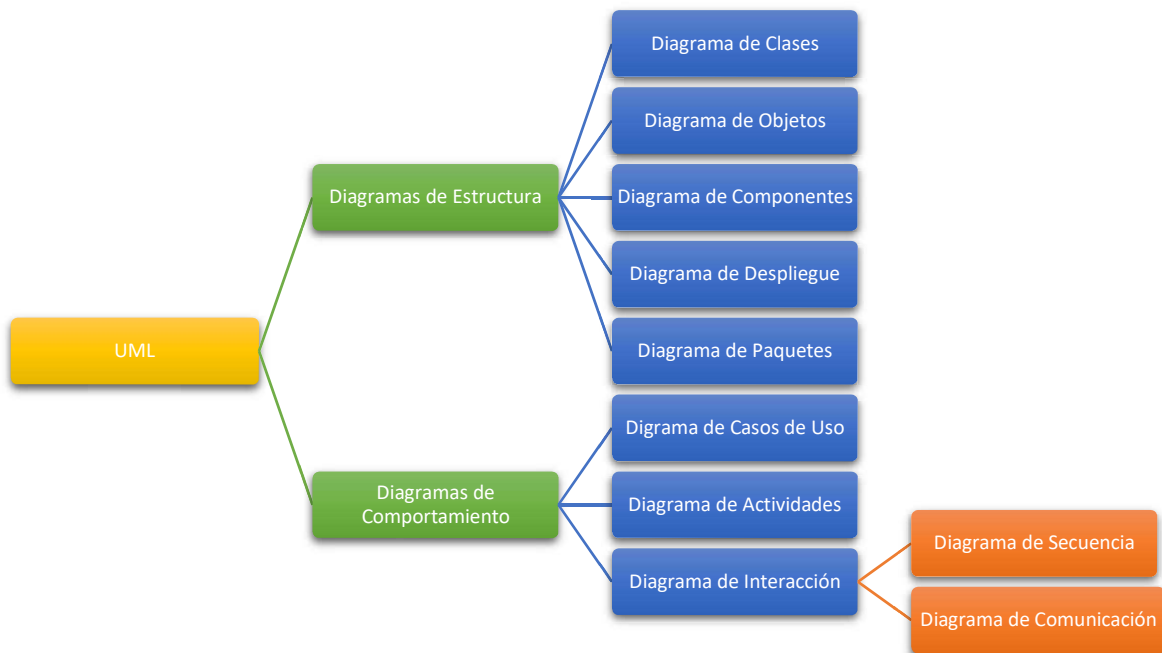


Figura 2.9: Clasificación UML, Fuente: Elaboración propia con base en (UML, 2018).

## 2.3 Interacción Espacial

Antes de abordar la conceptualización de los Modelos de Interacción Espacial, es necesario describir uno de sus principales enfoques y las bases que los han convertido en elementos puntuales para la toma de decisiones espaciales además de considerarlos como herramientas que permiten expresar el dinamismo espacial. A continuación, se detallarán los Modelos Gravitacionales como antecedente a estos y posteriormente se abordarán a detalle los distintos MIE.

### 2.3.1 Modelos Gravitacionales

Los Modelos Gravitacionales son modelos matemáticos que han sido utilizados en la geografía para analizar y predecir la interacción o flujos entre lugares de acuerdo con su proporción ya sea a través de la población o de su impacto económico en la zona y la distancia que existe entre estos. Estos modelos tienen como base la formulación de la ley de gravitación universal o ley de gravedad de Isaac Newton, la cual describe lo siguiente: “*La fuerza con que se atraen dos objetos es proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa*” (SEP, 2022), lo cual se resume en la siguiente fórmula matemática (Ecuación 2.1):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Ecuación 2.1

Donde:

- $F$ : Es la fuerza de atracción resultante ejercida entre los cuerpos.
- $G$ : Constante de gravitacional universal, que equivale a  $6.67 * 10^{-11} \frac{Nm^2}{Kg^2}$ .
- $m_1$ : Masa del cuerpo 1.
- $m_2$ : Masa del cuerpo 2.
- $r^2$ : Distancia que existe entre los dos cuerpos.

Hernández (2012) expresa que los Modelos Gravitacionales tienen un enfoque cuantitativo que busca identificar patrones o regularidades que puedan ser expresados matemáticamente y que brinden explicaciones universales. Estos modelos se aplican para comprender la relación entre el movimiento de personas, bienes o información, y la distancia que los separa entre sí. Dando origen a la siguiente expresión: *“El movimiento (interacción) entre dos ciudades es directamente proporcional al producto de sus poblaciones e inversamente proporcional a la distancia que las separa”* (Hernández, 2012, pág. 85).

Gracias a la ley de gravitación universal, algunos modelos de análisis espacial han adoptado y ajustado la ecuación original, donde principalmente destacan los elementos de distancia y masas que en términos geográficos han sido adoptadas y adaptadas como orígenes y destinos, para identificar principalmente la interacción que existe entre estos.

### ***2.3.2 Teoría de Interacción Espacial***

Garrocho et al. (2002, pág. 42) expresa que *“La Teoría de la Interacción Espacial, es aquella en la que la magnitud de los flujos de consumidores que atrae una unidad comercial es inversamente proporcional a los costos de transporte que*

*los consumidores deben sufragar para acceder a ella, y directamente proporcional a lo atractiva que les resulte*". En la expresión anterior, se retoma que uno de los enfoques que tiene la teoría de interacción espacial está dado bajo la influencia de los modelos gravitacionales.

La Teoría de la Interacción Espacial ha contribuido en gran medida en la formulación de planeación urbana y en la localización de puntos clave para la colocación de sectores/servicios, pues gracias a estos modelos es posible obtener patrones que ayudan a comprender el movimiento (los flujos) entre el origen y el destino, y permiten dar respuesta a preguntas como: ¿Cuáles son las zonas que no tienen un servicio específico?, ¿En qué regiones de la zona de estudio el servicio es deficiente? y ¿Qué zonas tienen la más alta accesibilidad (pueden acceder a más de un destino)?, entre muchas otras preguntas.

Sin embargo, para que ocurra una interacción espacial, Rodrigue et al. (2013) expresa que se deben de cumplir tres condiciones interdependientes:

- **Complementariedad:** Hace referencia a la existencia de una oferta y una demanda que son complementarias entre dos o más lugares. Es decir, la existencia de un elemento crea una demanda para otro elemento en otro lugar y viceversa.
- **Intervención:** Hace referencia a la capacidad para intervenir en la distancia y superar cualquier barrera espacial o geográfica. Expresa por qué algunas zonas pueden tener mayor interacción, mientras que las otros pueden tener una interacción menor o inexistente.
- **Transferibilidad:** Hace referencia a la facilidad con la que los elementos puedan ser transportados o transferidos entre dos o más lugares. Entre más fácil y económico resulte el transporte de los elementos y los lugares, habrá una probabilidad mayor de que se genere una interacción.

Rodrigue et al. (2013) menciona que cada interacción espacial se expresa como una analogía de un conjunto de movimientos entre orígenes y destinos, cuya

representación se hace a través de una matriz donde las filas hacen referencia a los orígenes y las columnas a los destinos. Esta matriz se conoce como matriz origen/destino o matriz de interacción espacial, donde  $O$  representa a los orígenes,  $D$  a los destinos,  $T_j$  es la suma de las interacciones dadas en los destinos y  $T_i$  es la suma dada en los orígenes. Las matrices de interacción espacial ayudan a comprender las magnitudes y patrones de los flujos entre lugares, identificar tendencias y patrones de movilidad, y tomar decisiones informadas en la planificación y gestión de espacios y recursos. La Figura 2.10 ejemplifica la matriz de interacción espacial.

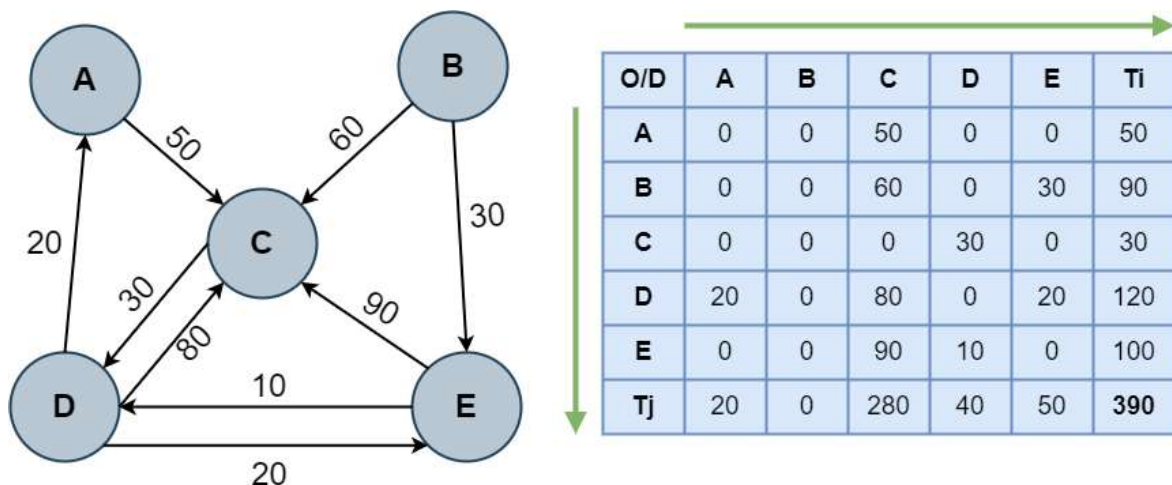


Figura 2.10: Ejemplo de Matriz de Interacción Espacial, Fuente: Elaboración propia con base en Rodrigue et al., (2013, pág. 342).

Los modelos de interacción espacial manifiestan el comportamiento de los individuos o grupos sociales, a través de la magnitud alcanzada por determinados movimientos o flujos interactivos, donde, se identifica el incremento de los flujos de relación originados por los diferentes subsistemas de actividad que buscan dar respuesta a explicaciones o predicciones de algunos de los principales problemas planteados en procesos geográficos.

Algunas de sus aplicaciones son: migraciones (interregionales o interurbanas), redes de transporte, localización de servicios en la ciudad para minimizar costos y distancias, y dentro de las ciencias sociales tales como la antropología, la geografía, la salud pública, la sociología, economía, arqueología, entre otras, pues ayudan a simular y describir ciertos comportamientos existentes

que dan origen a la interacción entre los orígenes y los destinos (Santos, 1994). Santos (1994) expresa dos tipos de modelos de interacción espacial los cuales buscan formalizar las relaciones existentes en el mundo real y los clasifica en modelos explicativos y modelos predictivos.

**MIE Explicativos:** Su objetivo es la estimación/calibración de parámetros; buscan una correspondencia de la información empírica respecto a la formulación teórica del modelo y se dividen en modelos con:

- 1. MIE con restricción en el origen:** El conjunto de los totales de las filas  $O_i$  es conocido, es decir, la suma de interacciones que da origen a  $O_i$  corresponde a una fila y supone el flujo total emitido por cada lugar de origen.

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i O_i W_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Siendo:

$$A_i = \frac{1}{\sum_i W_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos.
- $O_i$ : Flujo total emitido por cada lugar de origen.
- $W_j$ : Atractividad o tamaño de cada unidad de servicio  $j$ .
- $A_i$ : Factor de balance.
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ .



- $b$ : Fricción de distancia.

**2. MIE con restricción en el destino:** El conjunto de los totales de las columnas  $D_j$  es conocido, es decir, la suma de interacciones que da origen a  $D_j$  corresponde por columna y supone el flujo total recibido en cada lugar de destino.

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = B_j D_j W_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Siendo:

$$B_j = \frac{1}{\sum_j W_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos.
- $D_j$ : Flujo total recibido por cada lugar de destino.
- $W_j$ : Atractividad o tamaño de cada unidad de servicio  $j$ .
- $B_j$ : Factor de balance.
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ .
- $b$ : Fricción de distancia.

**MIE Predictivos:** Plantea la deducción de flujos de interrelación a partir de los factores repulsivos o atractivos ya conocidos.

**1. MIE doblemente restringidos:** Los totales para las filas (orígenes) y columnas (destinos)  $O_i$  y  $D_j$  son conocidos. Estos modelos son usados

principalmente para describir las interacciones entre orígenes y destinos, es decir, las relaciones existentes entre cada par de zonas evaluadas, ya que, al conocer la oferta y la demanda, el modelo se centra en describir estas relaciones.

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Siendo:

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Además,  $B_j$  permite que se cumplan las siguientes condiciones del modelo:

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Y

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos.
- $O_i$ : Flujo total emitido por cada lugar de origen.

- $D_j$ : Flujo total recibido por cada lugar de destino.
- $A_i$ : Factor de balance para  $O_i$ .
- $B_j$ : Factor de balance para  $D_j$ .
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ .
- $b$ : Fricción de distancia.

En todas las ecuaciones se presenta el parámetro de fricción de distancia, Valdivia López et al. (2010) refiere que la distancia asociada al tomar una decisión, por ejemplo, ir de un punto “A” a un punto “B”, la decisión está condicionada por varios factores entre ellos el esfuerzo, la energía o el costo para realizar dicha trayectoria, y no solo las barreras físicas sino también económicas, sociales o culturales que afectan la movilidad o interacción entre lugares que incluso pueden estar geográficamente cerca pero no ser accesibles. Esto se resume en como la distancia puede afectar la interacción entre dos lugares.

## ***2.4 Oferta y Demanda***

Uno de los principios básicos de la oferta y la demanda, es la llamada Ley de la oferta y la demanda, la cual se expresa de forma técnica como aquel principio básico sobre el que se basa una economía en el mercado. Este principio refleja la relación existente entre la demanda de un producto y la cantidad ofrecida de ese producto teniendo en cuenta al precio que se vende (Sevilla, 2020).

La ley de la oferta y la demanda se compone por dos leyes:

- **Ley de la oferta:** Refleja la relación entre la cantidad ofrecida de un bien y su precio de venta en el mercado. Habitualmente la relación existente entre esta cantidad y la variable del precio será directa o positiva.
- **Ley de la demanda:** La ley de demanda refleja la relación entre la demanda que existe de un bien en el mercado y la cantidad de este que es ofrecido en base al precio que se establezca.

Dentro de un mercado de competencia se busca equilibrar la oferta y la demanda, es decir, identificar el punto que define hasta donde los consumidores están dispuestos a pagar por un producto determinado y a las empresas a producir para obtener un beneficio (Peña y Rodríguez, 2020).

Sevilla (2020) expresa que para alcanzar un punto de equilibrio, se tienen dos situaciones de exceso:

- El primero hace énfasis en el exceso de la oferta, y enuncia que el precio de los productos al que se están ofreciendo es mayor que el precio de equilibrio, por lo tanto, la cantidad ofrecida es mayor que la cantidad que se demanda.
- El segundo hace énfasis en el exceso de la demanda, y enuncia que cuando existe escasez de productos, significa que el precio del bien ofrecido es menor que el equilibrio, por lo tanto, la cantidad de demanda es mayor que la cantidad ofrecida.

La Figura 2.11 muestra el comportamiento esperado entre la relación de la oferta y la demanda hasta llegar al punto de equilibrio. La forma en cómo funciona es través de los precios y las cantidades de equilibrio, el precio de equilibrio será el punto donde se corta la curva de oferta y la de demanda, por lo tanto, se iguala la demanda en relación con la cantidad de oferta (Peña y Rodríguez, 2020).

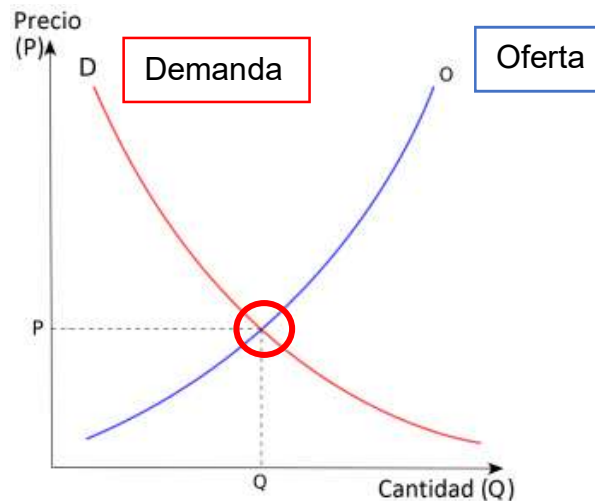


Figura 2.11: Equilibrio de la oferta y la demanda, Fuente: Reproducido de Sevilla Arias (2020).

Sin embargo, trasladando la ley de la oferta y la demanda en servicios como los servicios de salud, esto no sucede así, hablando estrictamente en términos espaciales. Es aquí donde la justicia espacial y la justicia distributiva juegan un papel muy importante.

## ***2.5 Justicia Espacial y Distributiva***

La justicia espacial se describe como aquel interés intencional por conocer y dar solución a las manifestaciones espaciales de la justicia y la injusticia, que iniciaría con la distribución del espacio, los recursos y las oportunidades de acceso a éstos (Toscana Aparicio, 2017). Este concepto está presente en geografía, sociedad, economía, ambiente, política, innovación y arte. Parte del derecho de la ciudad a dar un ordenamiento en contra de las injusticias sociales como discriminación, inseguridad y segregación e independientemente de su ubicación geográfica tienen el derecho al acceso a recursos y oportunidades de manera justa y equitativa (Sedaño y Chung-Alonso, 2022).

Además, se preocupa por analizar y abordar todas aquellas desigualdades que existen en el acceso a servicios básicos como vivienda, transporte, educación, atención médica, empleo y otros recursos que son necesarios para una vida digna equitativa (Sedaño y Chung-Alonso, 2022). La dimensión espacial de la justicia involucra una variedad de problemáticas entre las que destacan: la composición interna de los lugares, la distancia que los separa, los vínculos e interfases que los conecta, es decir, todos aquellos parámetros que contribuyen a la estructuración de los sistemas espaciales. De forma general, las políticas de justicia espacial se observan desde dos formas complementarias: la reglamentación del uso social de los recursos espaciales y la intervención directa del poder gubernamental en la organización del espacio social, estas modalidades son lo que comúnmente se denomina como “ordenamiento de territorios” (Brennetot, 2017).

Soja (2014) expresa cinco puntos importantes que aborda la justicia espacial:

- Distribución justa de recursos: Se debe garantizar que los recursos y los beneficios se encuentren distribuidos de manera justa en el

espacio, no solo en un entorno local sino también a grandes escalas, cuyo fin es abordar las disparidades económicas y sociales que existen en las diferentes áreas geográficas.

- Acceso equitativo a oportunidades: Asegurar que todas las personas, sin importar su ubicación tengan acceso a oportunidades educativas, empleo, atención médica y cualquier otro tipo de servicio que sea esencial para el bienestar y la calidad de vida.
- Empoderamiento de grupos marginalizados: Resaltar la importancia de las comunidades y grupos marginados, con el fin de incluir su participación en cuestiones políticas y en la toma de decisiones.
- Reconocimiento de la división cultural: Reconocer la diversificación cultural y étnica que están presentes en las diferentes áreas geográficas, incentivando a la lucha contra la discriminación y la marginación de estos grupos minoritarios.
- Transformación social y espacial: Implica la transformación de las estructuras sociales y espaciales cuyo objetivo es crear entornos equitativos y sostenibles.

Por otro lado, la justicia distributiva se basa en el modo en como los servicios primarios se encuentran distribuidos en la sociedad donde el principal objetivo es una justicia igualitaria, una justicia según la necesidad, una justicia según el mérito, y los principios de identificar y diferenciar las desigualdades que se pueden justificar basadas en beneficiar solo a los que concentran una mayor desventaja. Busca asegurar que los recursos y beneficios de una sociedad sean repartidos de manera justa y que las desigualdades injustas sean mínimas o eliminadas (Martínez Quintero, 2019).

Wolff (2007) describe a la justicia distributiva como una distribución equitativa de bienes, recursos y oportunidades en una sociedad. Destaca por la importancia de que cada uno de los miembros pertenecientes a dicha sociedad tengan igualdad de oportunidades para desarrollar sus capacidades y tener una vida digna. Enfatiza en que la distribución de los bienes y recursos, puedan ser accedidos por todos de

forma justa lo que permite florecer y alcanzar el potencial de las sociedades. Esto implica a factores como la educación, la atención médica y el acceso oportuno a los recursos básicos. Denotando la importancia de garantizar que todas las personas tengan las mismas oportunidades para alcanzar sus objetivos y no solo centrarse por tener una igualdad material.

Además, Robeyns (2005) comparte una opinión muy similar a Wolff, ya que enfatiza en priorizar el aprovechamiento de las oportunidades reales de las personas por tener una vida de calidad, que va más allá de medir la distribución de los recursos materiales. Esto implica abordar las desigualdades en el acceso a los servicios básicos como son: la atención médica y la educación, así mismo eliminar las barreras que impiden el desarrollo de las personas. Sin embargo, este desarrollo pleno no solo se centra en los servicios básicos, sino que también busca que las personas tengan una mayor participación en el empleo y en la política, cuyo objetivo es que la sociedad tenga las capacidades reales para aprovechar estas oportunidades.

Dieterlen (2015) explica desde un enfoque filosófico los problemas que enfrenta la distribución de los servicios de salud en México, cuyo análisis surge a partir del estudio de diferentes enfoques que tiene la justicia de la salud propuestos por distintos autores. Plantea las ideas necesarias para repensar las condiciones, limitantes y posibilidades del sistema de salud a través de distintos puntos como la igualdad, los criterios de distribución, la teoría de la justicia equitativa, el igualitarismo de la suerte, la salud como un elemento del bienestar, y la protección de la salud como un mínimo decente y como un derecho básico.

Rawls (en Dieterlen, 2015) a través del análisis de la justicia como equidad, expresa que la desigualdad en el acceso a los servicios de salud se ve influenciado por factores como la ubicación geográfica, el nivel socioeconómico y la pertenencia a grupos marginados.

Otro punto importante es la discusión que aborda Cohen y Sen (en Dieterlen, 2015), haciendo referencia a la desigualdad de los recursos económicos, ya que es

evidente que en México la asignación de éstos no es equitativa, esto repercute en las disparidades de la infraestructura, el personal médico, los medicamentos y la tecnología entre las distintas regiones y grupos de población.

Daniels (en Dieterlen, 2015) enuncia la teoría de la justicia desde un enfoque que promueve y protege la salud de sus miembros, sin embargo, la fragmentación del sistema de salud en diferentes instituciones y esquemas de aseguramiento dificulta el acceso oportuno y adecuado a los servicios médicos, especialmente para aquellos que no están afiliados a un sistema de seguridad social.

Finalmente, analizando los puntos propuestos por Segall (en Dieterlen, 2015), el sistema de salud en México tiene un enfoque mayoritario en la atención curativa y no preventiva, esto también afecta de manera directa la distribución de los recursos, ya que la prevención de las enfermedades y la promoción de la salud son elementos fundamentales para lograr una distribución justa y equitativa.

Es importante recalcar que Dieterlen (2015) aborda a la salud como una problemática de la desigualdad desde la perspectiva de la distribución de recursos económicos y hace un énfasis reflexionar sobre mejorar las políticas y compromisos éticos de justicia distributiva.

## ***2.6 Sistemas de Ayuda a las Decisiones Espaciales***

Un Sistema de Ayuda a las Decisiones Espaciales (SADE) es un conjunto de elementos y herramientas, tanto de carácter físico (hardware) como lógico (programas, datos y procedimientos) que proporcionan un entorno adecuado para la toma racional de decisiones sobre problemas espaciales. Estas decisiones pueden ser adoptadas por personas o grupos de personas que no tienen que ser específicamente expertos en equipos de cómputo ni en informática sino buenos conocedores del problema planteado, y que por lo tanto usan a los SADE como herramientas de fácil manejo (ALTAGUAX, 2014).

Los sistemas de soporte para la toma de decisiones son cada vez más utilizados como herramientas para la planeación estratégica, ya que utilizan una



combinación de Sistemas de Información Geográfica para obtener de manera visual en base a cartografía, datos de numerosas fuentes de información georreferenciada, es decir, con una ubicación espacial (CIMAV, 2017).

En el proyecto ALTAGUAX (2014) se describe que los SADE deben ser capaces de proporcionar herramientas que permitan desarrollar las tres fases para la toma de decisiones y son:

- **Exploración:** Se explora el problema a tratar, con la finalidad de conocer adecuadamente las complejidades y facilitar la formulación de la hipótesis que lo pueda resolver.
- **Diseño:** Se plantean numerosas alternativas y soluciones desde los diferentes ángulos y puntos de vista, donde intervienen los distintos grupos de interés que están implicados en la cuestión espacial.
- **Evaluación:** Una evaluación precisa, cuantitativa o que jerarquice las alternativas que fueron diseñadas con anterioridad, teniendo en cuenta un amplio conjunto de criterios de valoración y las preferencias expresadas por los grupos de interés.

Los SADE son cada vez más utilizados en gobiernos y centros de investigación como herramientas de planeación estratégica (Hinojosa de la Garza et al., 2019). Y también abarca áreas como planificación urbana, gestión del territorio, planificación del transporte, gestión de recursos naturales, gestión del medio ambiente, gestión de riesgos, etc.

Bosque Sendra et al., (2000) describe que los SADE tienen una estructura general definida como lo muestra la Figura 2.12 y se describen como:

- **Generador de gráficos:** Sistema capaz de elaborar gráficos estadísticos que permita la exploración de las características del problema.
- **Generador de informes:** Elaborar informes y resultados.

- **SGDB:** Sistema de gestión de bases de datos, tanto de datos espaciales como de los temáticos asociados a ellos.
- **SGMD:** Sistema de gestión de modelos matemáticos. Pensados para generar alternativas y soluciones a diferentes problemas tratados por el SADE.
- **Interfaz de Usuario:** Mecanismo que permite la comunicación sencilla e intuitiva entre el usuario y el sistema.
- **SIG:** Se basa en un SIG ya existente y amplía sus capacidades para convertirlo en un verdadero SADE.

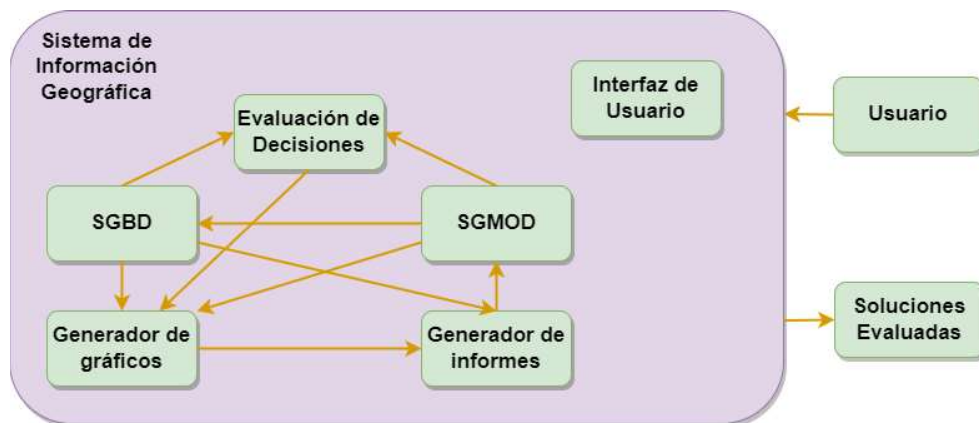


Figura 2.12: Componentes típicos de un SADE, Fuente: Elaboración propia con base en Bosque Sendra et al. (2000, pág. 570)

## Resumen

En este Capítulo 2 se presentó el Marco Teórico, donde se abordaron temas como los Sistemas de Información Geográfica que incluyen desde su conceptualización hasta los datos geográficos que manejan, así mismo, los lenguajes de programación que son soportados por la mayoría de los SIG y esencialmente hablando de Python y su estricta relación con el SIG QGIS. También, se incluyeron temas como el desarrollo de software y el marco de desarrollo llamado Proceso Unificado. Además, también se contextualizó a los Modelos de Interacción Espacial, así como sus tipos y las distintas variables que alimentan a dichos modelos. Se incluyó un apartado que hace referencia a la oferta y demanda en un ambiente adecuado y a la discusión filosófica de la Justicia Espacial y Distributiva. Finalmente, se describió lo que es un SADE (Sistemas de Ayuda a las Decisiones Espaciales) y los elementos que lo conforman.

## Capítulo 3: Material y método

La construcción e implementación del *plugin* para automatizar los Modelos de Interacción Espacial se desarrollará bajo la guía propuesta por Proceso Unificado a través de sus diferentes fases y flujos de trabajo. Es importante acotar que se pretende desarrollar una herramienta (*plugin*) que automatice un grupo de Modelos de Interacción Espacial y se vincule a los Sistemas de Información Geográfica, particularmente a QGIS que permita plantear escenarios de evaluación y apoyar en la toma de decisiones espaciales.

Proceso Unificado es una guía para el desarrollo de software y se conforma por cuatro fases i) inicio, ii) elaboración, iii) construcción y iv) transición. En su interior, cada fase se conforma por varias iteraciones. También se enmarca en cinco flujos de trabajo fundamentales que son: requisitos, análisis, diseño, implementación y pruebas. En cada una de las fases destacan de manera prioritaria 5 flujos de trabajo fundamentales que de manera transversal en cada una de las fases desarrollan un conjunto de tareas en las que están implicados perfiles de trabajadores y piezas de software como resultado de su intervención en cada una de las fases.

A continuación, se describirá de manera general la metodología de desarrollo de software empleada y se planteará un conjunto de modelos de software para desarrollar la aplicación.

### 3.1 *Inicio/Gestación*

En la fase de Inicio/Gestación que plantea Proceso Unificado, el primer flujo de trabajo consiste en el levantamiento de requisitos tal como lo muestra la Figura 2.8. Es una de las fases con mayor importancia, pues en esta parte se definen las necesidades del proyecto, así como también las restricciones de éste.

Inicia con la identificación de requisitos que deberá satisfacer el software a desarrollar. Existen distintas clasificaciones de los requisitos, a continuación, se describen de manera detallada algunas de estas clasificaciones.

La Figura 3.1 muestra la fase y los flujos de trabajo actuales de acuerdo con el marco de trabajo de Proceso Unificado.

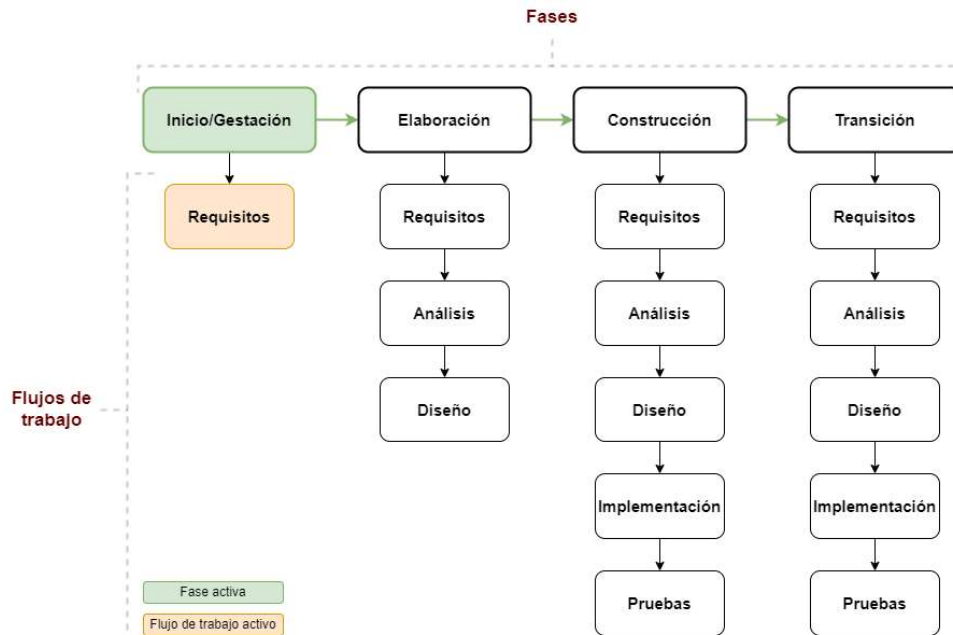


Figura 3.1: Fase 1 – Requisitos, Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1 Requisitos

- **De ejecución:** La automatización de los Modelos de Interacción Espacial requiere de dos elementos fundamentales para su ejecución, el primero que funge como base (sistema operativo) y el segundo que complementa a la ejecución y es el SIG (QGIS).



Figura 3.2: Requisitos para la ejecución (General), Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la Figura 3.2, es importante destacar que se deben cumplir ciertas condiciones específicas tanto de software como de hardware, mismas que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Requerimientos de Hardware y Software.

COMPONENTES DEL SISTEMA	MÍNIMOS	RECOMENDADOS
Procesador	Core i3 2.7 GHz	Core i7 3.5 GHz
Memoria RAM	2 Gb	8 Gb o más
Disco Duro	500 Gb SATA	256 Gb de SSD o más
Tarjeta Gráfica	1 Gb	2 Gb o más
Sistema Operativo	Windows 8-11. MacOS o Linux	Windows 8-11. MacOS o Linux
<b>SOFTWARE GENERAL</b>		
Visualizador de textos	Microsoft Word, LibreOffice Writer	
Visualizador PDF	Adobe Reader, Nitro PDF, etc.	
Visualizador de imágenes	Por defecto viene incluido en el sistema operativo (aunque también se puede utilizar, por ejemplo: GIMP)	
Procesamiento de hojas de calculo	Microsoft Excel, LibreOffice Calc.	

Fuente: Elaboración propia con base en (Anamelechi, 2022).

- **Generales:** A partir de los requisitos de ejecución, los requisitos generales corresponden al desarrollo propio del software y son los siguientes:
  - a) Automatización de los modelos de interacción espacial (modelos descriptivos y predictivos).
  - b) La automatización de estos modelos de interacción espacial debe ser capaz de interactuar con el SIG libre QGIS.
  - c) La conexión entre SIG y automatización debe ser a través de una interfaz gráfica sencilla y amigable para el usuario.
  - d) Entre los insumos que el usuario debe proveer a la interfaz gráfica, destaca principalmente el uso de información georreferenciada (*Shapefiles*).
  - e) Los insumos de entrada deben permitir generar salidas (de distintos tipos, tanto espacial como no espacial).
  - f) La instalación de la automatización debe estar disponible para los diferentes sistemas operativos, es decir, para Windows, Linux y MacOS.
- **Selección del lenguaje:** Python es uno de los lenguajes más usados en los SIG debido a su flexibilidad y potencia. El desarrollo se basa en la API (PyQGIS) para QGIS y el desarrollo de la interfaz gráfica con PyQt, ésta

última contiene las librerías necesarias para el desarrollo visual de la herramienta (interfaz), es decir, lo que se le muestra al usuario. La Figura 3.3 resume la selección del lenguaje.

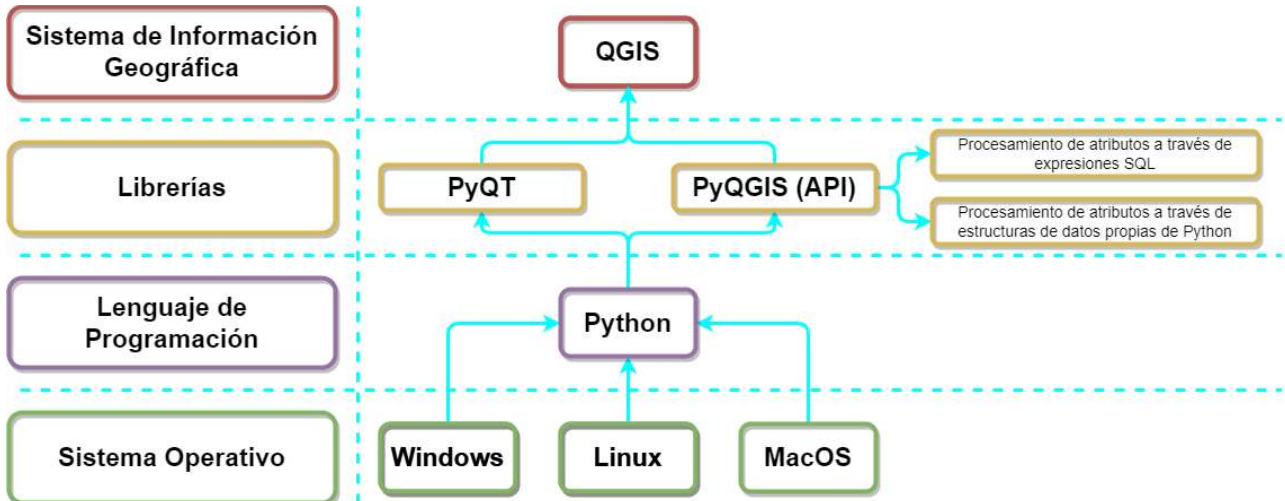


Figura 3.3: Aplicabilidad del lenguaje seleccionado, Fuente: Elaboración propia.

- **Requisitos funcionales del sistema**

Un requisito funcional es una declaración de cómo debe comportarse un sistema. Define lo que el sistema debe hacer para satisfacer las necesidades o expectativas del usuario. Los requisitos funcionales se pueden considerar como características que el usuario detecta.

**a) Requisitos funcionales de entrada.**

- Lectura de dos archivos georreferenciados en formato vectorial, es decir, un archivo de puntos con los datos necesarios para identificar la oferta/destino y otro de polígonos para identificar a la demanda/origen. La lectura de los archivos vectoriales para su tratamiento se hace a través de las extensiones “.shp” para las geometrías y la extensión “.dbf” para el acceso a los atributos, adicionalmente la proyección y los índices (*shape index* y *spatial index*) son extraídos implícitamente por el archivo de geometrías (.shp).
- Lectura de parámetros solicitados a través de la interfaz gráfica necesarios para la ejecución del modelo.

**b) Requisitos funcionales de proceso.**

- Validación que admita únicamente utilizar archivos vectoriales del tipo polígono y puntos.
- Validar que los archivos vectoriales estén georreferenciados en la proyección adecuada, es decir, que los archivos a utilizar cuenten con la misma proyección cartográfica, en caso contrario se le notificará al usuario.
- Calcular las zonas potenciales de los destinos (oferta) para los distintos orígenes (demanda) en función de las restricciones (restricción en el origen, en el destino y doblemente restringidos), la atractividad de los destinos y finalmente el factor de fricción de distancia.
- Generar estadísticas a través de los resultados obtenidos por el cálculo de las zonas potenciales y las técnicas propias de la interacción espacial en base a las distintas restricciones, así como de las técnicas de localización/distribución y asociación espacial.
- Generar capas con atributos de identificación para aquellos datos relevantes arrojados por el modelo, tanto para orígenes como destinos, es decir, para aquellos valores sobresalientes en la matriz de interacción espacial.
- Generar capas con atributos de conexiones entre los orígenes y destinos de los datos que resultaron relevantes para el modelo, es decir, aquellos valores sobresalientes en la matriz de interacción espacial.
- Generar capas temáticas en base a las capas obtenidas previamente, para facilitar el análisis y visualización de los resultados, las capas temáticas posibles serán de conectividad (líneas) y graduados (polígonos).

### **c) Requisitos funcionales de salida.**

- Crear una estructura de carpetas para almacenar la información obtenida por la herramienta, con el propósito de organizar los distintos archivos que se generarán.
  - Almacenar los cálculos estadísticos en distintos formatos que van desde los archivos vectoriales con extensión “.shp” y todos sus archivos auxiliares, CSV (*Comma-Separated Values*), ODS (*OpenDocument Spreadsheet*), XLS (*Excel Spreadsheet*) y en bases de datos geoespaciales con *Spatialite (SQLite)*. Con la finalidad de proveer al usuario una amplia variedad de formatos que puedan ser usados dentro y fuera del SIG libre.
  - Almacenar gráficas en formato PNG (*Portable Network Graphics*), ya que es uno de los formatos de imagen con menor pérdida de datos.
  - Almacenar las capas temáticas (estilos) generadas de forma automática por la herramienta en formato QML (*Quantum Markup Language*), ya que es el formato utilizado por QGIS para guardar la simbología y los estilos de capa.
- **Requisitos no funcionales del sistema**

Define cómo debe funcionar internamente el sistema (p. ej., rendimiento, seguridad, etc.)

#### **a) Usabilidad**

- El desarrollo de la automatización deberá contar con información detallada sobre el manejo y uso del complemento (plugin), es decir, se deberá contar con información técnica y de uso (manual técnico y manual de usuario).
- El complemento deberá incluir las validaciones correspondientes para evitar que la ejecución se lleve a cabo de manera errónea.



- El *plugin* sería colocado en un repositorio (*GitHub*) para que los usuarios puedan acceder a la descarga de éste y posteriormente realicen su instalación, además, se espera que se pueda colocar dentro de los *plugins* que ofrece QGIS en su repositorio oficial.

### 3.2 Elaboración

Segunda fase del Proceso Unificado, en esta sección se profundiza en el análisis y diseño de la arquitectura que tendrá el software, se clarifican y detallan los requerimientos, se identifican y establecen las bases necesarias para el desarrollo de la herramienta.

La Figura 3.4 muestra la fase y los flujos de trabajo actuales de acuerdo con el marco de trabajo de Proceso Unificado.

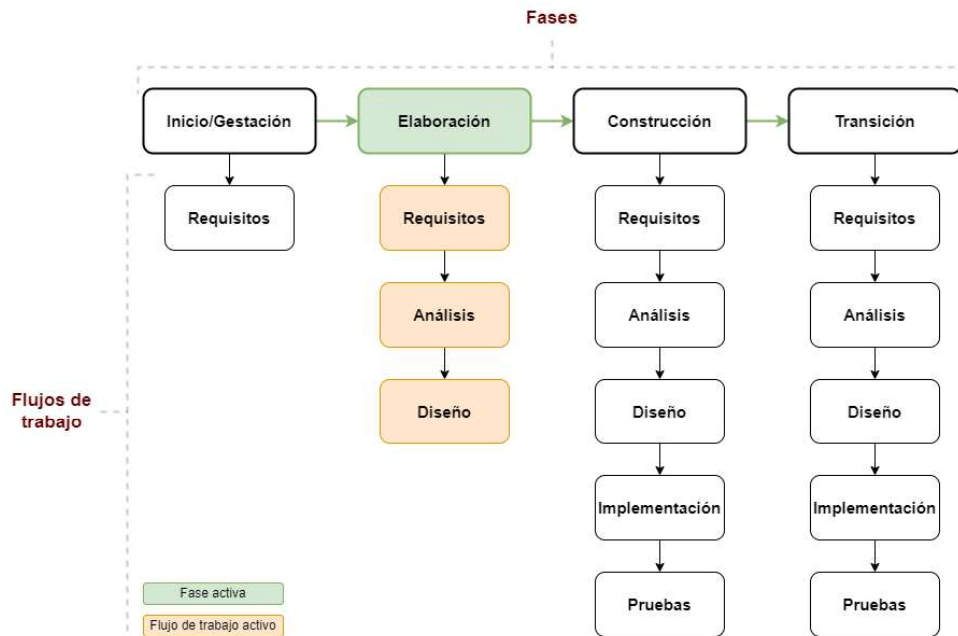


Figura 3.4: Fase 2 – Requisitos, Análisis y Diseño, Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2.1 Análisis de los Modelos de Interacción Espacial

Antes de comenzar a plantear el desarrollo de los Modelos de Interacción espacial es necesario entender el funcionamiento de estos, analizando cada componente del modelo, su clasificación y sus respectivas restricciones.

Retomando de la sección 2.3, donde se mencionan a los MIE, estos están agrupados bajo dos vertientes que son: los explicativos y los predictivos.

**Explicativos:** Estimación/calibración de parámetros; buscan una correspondencia de la información empírica respecto a la formulación teórica del modelo.

- 1. Restricción en el origen:** El conjunto de los totales de las filas  $O_i$  es conocido, es decir, la suma de interacciones que da origen a  $O_i$  corresponde a una fila y supone el flujo total emitido por cada lugar de origen.

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i O_i W_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Siendo:

$$A_i = \frac{1}{\sum_i W_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos, es decir, la interacción entre consumidores de la zona de origen  $i$  y las unidades de servicio  $j$ .
- $O_i$ : Flujo total emitido por cada lugar de origen. Número de consumidores potenciales en la zona de origen  $i$ .
- $W_j$ : Atractividad o tamaño de cada unidad de servicio  $j$ , por ejemplo: número de consultorios, cajones de estacionamiento, matrícula disponible de una escuela, etc.

- $A_i$ : Factor de balance, que asegura que  $O_i$  sea el número de consumidores potenciales de la zona de origen  $i$ .
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ . Este valor está dado a través de la matriz de interacción espacial.
- $b$ : Fricción de distancia, exponente para calibrar el modelo. También se toma como referencia el comportamiento espacial observado entre los consumidores y las unidades de servicio.

Las restricciones en el origen están sujetas a tres posibles combinaciones, es decir:

- Cuando la restricción en el origen muestra un comportamiento de **una distancia mayor a** para la matriz de interacción espacial (distancias).
- Cuando la restricción en el origen muestra un comportamiento de **una distancia menor a** para la matriz de interacción espacial (distancias).
- Cuando la restricción en el origen muestra un comportamiento de **una distancia dentro de un rango de valores** para la matriz de interacción espacial (distancias).

**2. Restricción en el destino:** El conjunto de los totales de las columnas  $D_j$  es conocido, es decir, la suma de interacciones que da origen a  $D_j$  corresponde por columna y supone el flujo total recibido en cada lugar de destino.

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij}$$

*Ecuación 3.4*

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = B_j D_j W_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Siendo:

$$B_j = \frac{1}{\sum_j W_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos, es decir, la interacción entre consumidores de la zona de origen  $i$  y las unidades de servicio  $j$ .
- $D_j$ : Flujo total recibido por cada lugar de destino. Número de consumidores potenciales captados por cada unidad de servicio  $j$ .
- $W_j$ : Atractividad o tamaño de cada unidad de servicio  $j$ , por ejemplo: número de consultorios, cajones de estacionamiento, matrícula disponible de una escuela, etc.
- $B_j$ : Factor de balance, que asegura que  $D_j$  sea el número de consumidores potenciales captados por cada unidad de servicio  $j$ .
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ . Este valor está dado a través de la matriz de interacción espacial.
- $b$ : Fricción de distancia, exponente para calibrar el modelo. También se toma como referencia el comportamiento espacial observado entre los consumidores y las unidades de servicio.

Las restricciones en el destino están sujetas a tres posibles combinaciones, es decir:

- Cuando la restricción en el destino muestra un comportamiento de **un flujo mayor a** para la matriz de interacción espacial (flujos).
- Cuando la restricción en el destino muestra un comportamiento de **un flujo menor a** para la matriz de interacción espacial (flujos).
- Cuando la restricción en el destino muestra un comportamiento de **un flujo dentro de un rango de valores** para la matriz de interacción espacial (flujos).

**Predictivos:** Plantea la deducción de flujos de interrelación a partir de los factores repulsivos o atractivos ya conocidos.

**2. Doblemente restrictivo:** Los totales para las filas (orígenes) y columnas (destinos)  $O_i$  y  $D_j$  son conocidos. Estos modelos son usados principalmente para describir las interacciones entre orígenes y destinos, es decir, las relaciones existentes entre cada par de zonas evaluadas, ya que, al conocer la oferta y la demanda, el modelo se centra en describir estas relaciones.

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i B_j O_i D_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Siendo:

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Además,  $B_j$  permite que se cumplan las siguientes condiciones del modelo:

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Y

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos, es decir, la interacción entre consumidores de la zona de origen  $i$  y las unidades de servicio  $j$ .
- $O_i$ : Flujo total emitido por cada lugar de origen. Número de consumidores potenciales en la zona de origen  $i$ .
- $D_j$ : Flujo total recibido por cada lugar de destino. Número de consumidores potenciales captados por cada unidad de servicio  $j$ .
- $A_i$ : Factor de balance, que asegura que,  $O_i$  sea el número de consumidores potenciales de la zona de origen  $i$ .
- $B_j$ : Factor de balance, que asegura que  $D_j$  sea el número de consumidores potenciales captados por cada unidad de servicio  $j$ .
- $d_{ij}$ : Distancia o costo de viajar entre  $i$  y  $j$ . Este valor está dado a través de la matriz de interacción espacial.
- $b$ : Fricción de distancia, exponente para calibrar el modelo. También se toma como referencia el comportamiento espacial observado entre los consumidores y las unidades de servicio.
- *Nota*: Las ecuaciones muestran que  $A_i$  incluye a  $B_j$ , mientras que  $B_j$  incluye a  $A_i$ . Esto significa que el cálculo de la ecuación debe

iniciar con  $A_i$  y luego calcular  $B_j$ , cuando  $B_j$  sea calculado, volver a calcular  $A_i$ . Este proceso se repetirá tantas veces sea necesario hasta igualar  $A_i$  con  $B_j$  para estabilizar el modelo.

Los doblemente restrictivos están sujetos a nueve posibles combinaciones, es decir:

- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento **de una distancia mayor a y un flujo mayor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia mayor a y un flujo menor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia mayor a y un flujo dentro de un rango de valores** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia menor a y un flujo mayor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia menor a y un flujo menor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia menor a y un flujo dentro de un rango de valores** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia dentro de un rango de valores a y un flujo mayor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).
- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia dentro de un rango de valores a y un flujo menor a** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).

- Cuando la doble restricción muestra un comportamiento de **una distancia dentro de un rango de valores a y un flujo dentro de un rango de valores** en la matriz de interacción espacial (distancias y flujos).

Resumiendo, el comportamiento de las distintas restricciones posibles de los MIE se ilustra en la Tabla 3.2, donde:

- **R.:** Hace referencia al número de restricción y al tipo, donde, las restricciones en el origen y en el destino cuentan con tres combinaciones posibles y para los doblemente restrictivos cuentan con un total de 12.
- **R. O. (Restricción en el Origen):** Verifica si el tipo de restricción aplica o no al origen.
- **R. D. (Restricción en el Destino):** Verifica si el tipo de restricción aplica o no al destino.
- **Comp. en el origen:** Comportamiento lógico que puede adquirir la restricción en el origen.
- **Comp. en el destino:** Comportamiento lógico que puede adquirir la restricción en el destino.
- **Descripción:** Resumen del tipo de restricción respecto al comportamiento lógico que ésta puede adquirir.



Tabla 3.2: Restricciones de los MIE.

R.	R. O.	R. D.	Comp. En el origen	Comp. En el destino	Descripción	
1	R. en el Origen	SI	NO	Distancia > a	N/A	Origen con distancia mayor a "n"
2		SI	NO	Distancia < a	N/A	Origen con distancia menor a "n"
3		SI	NO	Rango	N/A	Origen con distancias entre "a" y "b"
4	R. en el Destino	NO	SI	N/A	Flujo > a	Destino con flujo mayor a "n"
5		NO	SI	N/A	Flujo < a	Destino con flujo menor a "n"
6		NO	SI	N/A	Rango	Destino con flujos entre "a" y "b"
7	Doblemente Restrictivos	SI	SI	Distancia > a	Flujo > a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias mayores a "n" y flujos mayores a "m"
8		SI	SI	Distancia > a	Flujo < a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias mayores a "n" y flujos menores a "m"
9		SI	SI	Distancia > a	Rango	Doblemente restrictivo, en origen con distancias mayores a "n" y flujos entre "a" y "b"
10		SI	SI	Distancia < a	Flujo > a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias menores a "n" y flujos mayores a "m"
11		SI	SI	Distancia < a	Flujo < a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias menores a "n" y flujos menores a "m"
12		SI	SI	Distancia < a	Rango	Doblemente restrictivo, en origen con distancias menores a "n" y flujos entre "a" y "b"
13		SI	SI	Rango	Flujo > a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias entre "a" y "b" y flujos mayores a "m"
14		SI	SI	Rango	Flujo < a	Doblemente restrictivo, en origen con distancias entre "a" y "b" y flujos menores a "m"
15		SI	SI	Rango	Rango	Doblemente restrictivo, en origen con distancias entre "a" y "b" y flujos entre "c" y "d"

Fuente: Elaboración propia.

Para la automatización de los MIE se plantea el uso de dos archivos vectoriales (que representan la oferta y demanda en el modelo), ambos archivos deben de tener la misma proyección cartográfica (Cónica conforme de Lambert, Transversa de Mercator, Coordenadas Geográficas, entre otras). Estas

proyecciones permiten obtener la matriz de distancia necesaria para el cálculo estadístico de los MIE.

El primer archivo vectorial corresponde a la demanda, este archivo contiene los elementos (polígonos) que representan la demanda de los servicios a ser analizados. La estructura mínima que debe tener es la siguiente:

- **ID:** Identificador o clave única correspondiente para cada polígono. Este atributo es obligatorio y es del tipo alfanumérica.
- **Nombre:** Además del ID, cada polígono puede contener un nombre que permite el elemento geográfico (por ejemplo: manzanas, AGEB, distritos electorales, etc.). Este atributo es opcional y es de texto.
- **Demanda:** Valor numérico entero mayor que o igual que cero, que muestra la cantidad total de la demanda que hay dentro del polígono, ya sea AGEB (Área geoestadística básica), manzana, etc. Este atributo es obligatorio. Es importante mencionar que la demanda no solo se centra en la población, sino también en vehículos, personas, animales, etc.

La Figura 3.5 muestra lo descrito anteriormente.

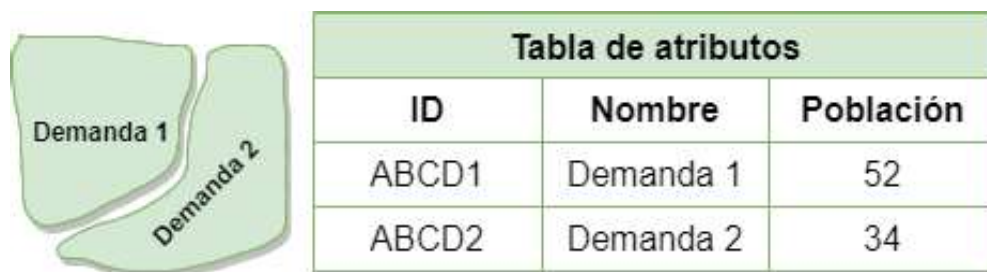


Figura 3.5: Archivo vectorial de polígonos y su tabla de atributos, Fuente: Elaboración propia.

El segundo archivo corresponde a la oferta, este archivo es de tipo punto y su estructura más básica es la siguiente:

- **ID:** Identificador o clave única correspondiente para cada punto. Este atributo es obligatorio y alfanumérico.

- **Nombre:** Además del ID, cada punto puede contener un nombre, este nombre puede ser el del establecimiento, el nombre de la unidad médica, etc. Este atributo es opcional y del tipo texto.
- **Capacidad:** Valor numérico entero mayor que cero, que muestra la capacidad total que tiene cada unidad de servicio, ya sea el número disponible de camas en un hospital, el número de lugares disponibles en una escuela, etc. Este atributo es obligatorio.

La Figura 3.6 muestra lo descrito anteriormente.



Figura 3.6: Archivo vectorial de puntos y su tabla de atributos, Fuente: Elaboración propia.

Nota: En la sección de **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** “Manual técnico” se muestra la operación de los modelos a través de un sencillo ejemplo.

Como se mencionó con anterioridad, a partir de los archivos de oferta y demanda se genera una matriz de distancias entre orígenes y destinos. Además, parte del análisis también considera el conocimiento detallado sobre las fórmulas que permiten implementar las distintas variantes de los MIE y el bosquejo de las salidas como: tablas de estadísticas, mapas temáticos y gráficas de análisis espacial.

**Nota:** El índice resultante de la accesibilidad es un valor que regularmente es alto debido a las unidades en las que fue calculada la matriz de distancias (ya sea metros, kilómetros, millas, yardas, pies, etc.). Sin embargo, para mejorar la interpretación de estos valores se realizó la normalización entre 0 y 1, además, también esta normalización se aplicó a los valores que hacen referencia a la demanda, con el objetivo de poder comparar dicho índice.

Para el caso de la accesibilidad espacial, los valores cercanos a 1 indican una mejor accesibilidad al servicio, para el caso de la demanda, los valores cercanos a 1 indican una mayor demanda.

### **3.2.2 *Diseño***

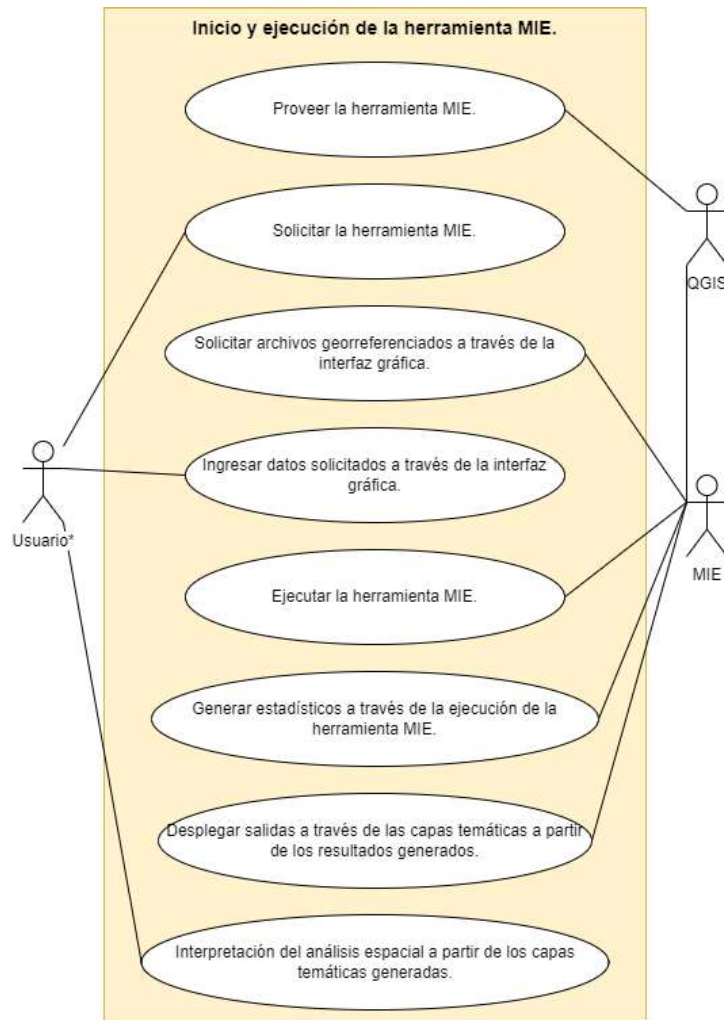
Flujo de trabajo que se destaca principalmente por diseñar los componentes del sistema, incluye la arquitectura del software, los módulos y las interfaces de usuario, también se seleccionan las tecnologías y herramientas a usar.

La arquitectura y el diseño del software se modela a través de UML tanto en la parte estructural como de también de la parte asociada al comportamiento de sistema haciendo uso principalmente de los diagramas de casos de uso, diagramas de clases, diagramas de secuencia, diagramas de paquetes, diagramas de actividades y diagramas de despliegue.

Los diagramas son representaciones gráficas de un conjunto de elementos, representado como un grafo conexo de nodos (elementos) y arcos (relaciones) (UML, 2018).

#### **3.2.2.1 *Diagrama de Casos de Uso (General)***

Este diagrama representa un conjunto de casos de uso (que atienden uno o varios requisitos) y actores y sus relaciones. Este diagrama representa una vista estática del sistema (UML, 2018).



\*Usuario: Alumno, Investigador, Especialista, Técnico, General

Figura 3.7: Caso de Uso General, Fuente: Elaboración propia.

- **Descripción general de diagrama.**

Tabla 3.3: Descripción general del diagrama.

Nombre del diagrama	Inicio y ejecución de la herramienta MIE.
Propósito	Describir de manera general el uso de la herramienta automatizada MIE.
Descripción general	El diagrama muestra desde la parte de la inicialización de la herramienta, hasta la parte final de su ejecución, incluyendo de manera general la captura de los datos, la ejecución de la herramienta y la generación de archivos finales.

Fuente: Elaboración propia.

- Descripción de los casos de uso contenidos en el diagrama “Inicio y ejecución de la herramienta MIE”.

Tabla 3.4: Proveer la herramienta MIE.

Caso de uso	Proveer la herramienta MIE.
Actores	QGIS.
Propósito	Proveer la herramienta al actor Investigador/Especialista para que pueda hacer eso de ella.
Resumen	Debe mostrarse la herramienta como un <i>plugin</i> más de QGIS, este puede estar localizado en la barra de herramienta o en el menú vectorial.
Precondiciones	El usuario debe solicitar la herramienta a través del icono identificable o por el nombre dentro del menú vectorial.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La herramienta debe estar perfectamente instalada para que sea mostrada.</li> <li>2. Si el icono no aparece, probablemente no este habilitado y sea necesario habilitarlo.</li> <li>3. Verificar la existencia de la herramienta en el menú vectorial.</li> <li>4. Hacer clic sobre alguna de las dos opciones anteriores e inicializar la herramienta MIE.</li> </ol>
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si el icono no se visualiza o el nombre del <i>plugin</i> no existe en el menú vectorial, pudo existir un error de instalación por lo que será necesario reinstalar.</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.5: Solicitar la herramienta MIE.

Caso de uso	Solicitar la herramienta MIE.
Actores	Usuario*
Propósito	Inicializar la herramienta MIE para su ejecución.
Resumen	Al dar clic en el icono identificativo de la herramienta, ésta debe ser mostrada al usuario a través de una interfaz gráfica.
Precondiciones	La herramienta debe estar previamente instalada en el SIG de manera correcta.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Localizar el icono que identifica a la herramienta y hacer clic sobre este.</li> <li>2. La herramienta será mostrada al usuario.</li> </ol>
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si el icono no se visualiza pudo existir un error de instalación por lo que será necesario reinstalar.</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.6: Solicitar archivos georreferenciados a través de la interfaz gráfica.

Caso de uso	Solicitar archivos georreferenciados a través de la interfaz gráfica.
Actores	QGIS y MIE.
Propósito	Pedir al usuario introducir la información necesaria para ejecutar la herramienta.
Resumen	Debe mostrarse la interfaz gráfica de manera correcta, los campos deben estar perfectamente definidos para solicitar la información al usuario.
Precondiciones	El usuario debe solicitar la herramienta a través del icono o seleccionando el nombre a través del menú vectorial.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Todos los campos solicitados deben ser mostrados y distribuidos correctamente en la interfaz.</li> <li>2. Cada campo debe estar perfectamente identificado como opcional o requerido.</li> </ol>
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si la herramienta no muestra todos los campos o existe algún error en ellos, será necesario reiniciar la interfaz gráfica, se debe cerrar y volver a solicitar.</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7: Ingresar datos solicitados a través de la interfaz gráfica.

Caso de uso	Ingresar datos solicitados a través de la interfaz gráfica.
Actores	Usuario*
Propósito	El usuario debe introducir la información solicitada.
Resumen	Al mostrarse la interfaz gráfica, el usuario debe capturar la información solicitada, debe introducir los archivos georreferenciados además de parámetros adicionales (como la selección de una de las restricciones) que permitirán la ejecución de la herramienta.
Precondiciones	La interfaz gráfica de la herramienta debe estar disponible para el usuario.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El usuario debe introducir los archivos georreferenciados en los campos solicitados, debe ser un archivo de puntos y otro de polígonos.</li> <li>2. Debe llenar todos los campos solicitados en la interfaz gráfica.</li> </ol>
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. En caso de introducir algún dato erróneo, la interfaz notificará al usuario a través de un mensaje de error.</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8: Ejecutar la herramienta MIE.

Caso de uso	Ejecutar la herramienta MIE.
Actores	QGIS y MIE.
Propósito	Ejecutar la herramienta en base a los datos introducidos en la interfaz.
Resumen	Una vez introducidos los datos correctamente en la interfaz gráfica y al dar clic en aceptar, comenzará la ejecución de toda la herramienta MIE realizando cálculos y procesos para generar los resultados deseados.
Precondiciones	La captura de datos y parámetros debe estar realizada de manera correcta.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La herramienta comenzará con la ejecución de la herramienta MIE.</li> <li>2. Se realizarán las validaciones necesarias a los archivos vectoriales, las validaciones son desde el tipo de geometría como la identificación de la proyección de éstos.</li> <li>3. Realizará una copia en memoria de los archivos introducidos para evitar manipular los datos originales de entrada.</li> <li>4. Se seleccionará el tipo de restricción a usar.</li> <li>5. Se brindarán los parámetros necesarios.</li> <li>6. Procesará la información.</li> <li>7. Generará las capas temáticas y los estadísticos resultantes.</li> </ol>
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si la herramienta encuentra algún error en los parámetros introducidos, esta abortará el proceso notificando el error.</li> </ol>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9: Generar los resultados obtenidos a través de la ejecución de la herramienta MIE.

Caso de uso	Generar estadísticos a través de la ejecución de la herramienta MIE.
Actores	QGIS y MIE.
Propósito	Generar la información estadística a través de la herramienta MIE en base a la restricción seleccionada y además esté disponible para ser almacenada en físico.
Resumen	Una vez culminado el proceso de ejecución de la herramienta MIE, los archivos resultantes deben ser guardados en disco o base de datos para que el usuario pueda disponer de ellos más tarde o para generar un histórico de los estudios realizados con este modelo.
Precondiciones	Ejecución satisfactoria de la herramienta MIE.



<b>Flujo principal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Al terminar la ejecución de la herramienta MIE y con la generación de la información estadística esta debe ser almacenada en disco.</li> <li>2. Los archivos almacenados en memoria deben ser ahora archivos físicos para el usuario.</li> <li>3. Los archivos deben estar disponibles en la ruta elegida por el usuario o en una base de datos, ya sea nueva o existente.</li> </ol>
<b>Subflujos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si se registró un error durante la ejecución de la herramienta, se debe repetir este proceso.</li> </ol>

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 3.10: Mostrar al usuario las capas temáticas generados a partir de los resultados.*

<b>Caso de uso</b>	<b>Desplegar salidas a través de las capas temáticas generados a partir de los resultados.</b>
<b>Actores</b>	QGIS y MIE.
<b>Propósito</b>	Mostrar las capas temáticas generadas por la herramienta MIE en el espacio de trabajo de QGIS.
<b>Resumen</b>	Con los datos almacenados en físico dentro de la ruta dada por el usuario o en la base de datos, se deben construir las capas temáticas que resuman de manera visual los resultados generados por este modelo, identificados las zonas con alta o baja accesibilidad espacial.
<b>Precondiciones</b>	Archivos almacenados correctamente en físico dentro del disco o en una base de datos.
<b>Flujo principal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Con los datos generados al terminar la ejecución de la herramienta, se deben construir las capas temáticas, es decir, una representación visual de valores con los datos introducidos por el usuario.</li> <li>2. Las capas temáticas serán agrupadas de forma automática por la herramienta para mantener una correspondencia adecuada.</li> </ol>
<b>Subflujos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si los datos almacenados en disco o en la base de datos no fueron correctos, las capas temáticas mostrados no será los esperados o simplemente no se mostrarán.</li> </ol>

*Fuente: Elaboración propia.*

*Tabla 3.11: Interpretación del análisis espacial a partir de las capas temáticas generados.*

<b>Caso de uso</b>	<b>Interpretación del análisis espacial a partir de las capas temáticas generadas.</b>
<b>Actores</b>	Usuario*
<b>Propósito</b>	Permitir al usuario obtener un análisis espacial objetivo a partir de las capas temáticas generados.

<b>Resumen</b>	Con las capas temáticas generadas, el usuario debe obtener conclusiones claras, precisas y objetivas con la representación visual de los valores obtenidos en la ejecución de la herramienta.
<b>Precondiciones</b>	Capas temáticas generadas y almacenadas correctamente en disco o en una base de datos.
<b>Flujo principal</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. El usuario debe ser capaz de interpretar los valores representados de manera visual (por medio de colores).</li> <li>2. Las capas temáticas permiten obtener un análisis claro y conciso de los valores generados.</li> <li>3. El usuario puede modificar la capa temática a su preferencia para mejorar el análisis espacial.</li> </ol>
<b>Subflujos</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Si los datos almacenados en disco o en la base de datos no fueron correctos, las capas temáticas mostrados no serán los esperados, por lo tanto, el análisis espacial será deficiente. En otras circunstancias, las capas temáticas no serán visualizados.</li> </ol>

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2.2.2 Diagrama de Clases (General)

El diagrama de clases muestra un conjunto de clases, interfaces y colaboraciones y sus relaciones. Los diagramas de clases cubren la vista de análisis/ diseño estático de un sistema (UML, 2018).

Para identificar las clases candidatas en la automatización de los Modelos de Interacción Espacial se empleó la técnica de análisis de sustantivos y posteriormente se propusieron las tarjetas CRC (Clase-Responsabilidad-Colaboración) para detallar las clases e identificar sus relaciones. En el anexo “Manual técnico” se muestran dichas propuestas que dan pie al desarrollo del diagrama de clases.

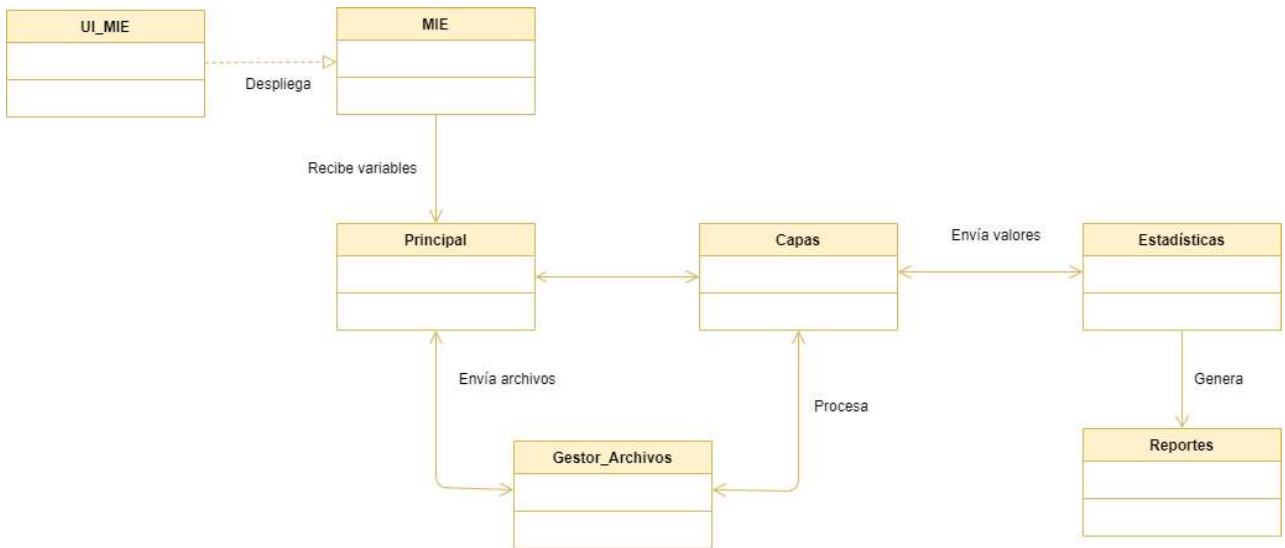


Figura 3.8: Diagrama de Clases (General), Fuente: Elaboración propia.

- **Glosario de Clases**

Tabla 3.12: Glosario de Clases.

CLASE	DESCRIPCIÓN
UI_MIE	Clase que contiene únicamente los componentes visuales, es decir, la interfaz gráfica de la herramienta.
MIE	Clase que contiene las validaciones pertinentes para la interfaz gráfica, esta clase se encarga de controlar las acciones de entrada y las interacciones que tendrá el usuario, el objetivo principal es recibir la información capturada y proporcionarla a la clase Principal (Main) para que sea procesada.
Principal (Main)	Clase que recibe todas las variables obtenidas a través de la clase MIE, una vez aquí, cada una de las variables y parámetros introducidos serán procesados para iniciar con el cálculo de los MIE. En resumen, se encarga de coordinar la ejecución completa de los MIE.
Capas	Clase encargada de realizar las tareas relacionadas con la manipulación de los archivos vectoriales. Entre las tareas que puede realizar es el cálculo de centroides para establecer la matriz de interacción espacial, el aplicar las capas temáticas, mostrar dichas capas en el espacio de trabajo del SIG, etc.
Gestor_Archivos	Clase que se encarga de realizar tareas de sistema, es decir, se encarga de trabajar con las capas vectoriales en memoria, crear copias de las capas y ponerlas a disposición de ser manipuladas (clonación de capas vectoriales), realiza tareas

	de administración como eliminar los archivos temporales y liberar memoria y demás procesos que sean utilizados durante la ejecución de la herramienta.
<b>Estadísticas</b>	Clase encargada de calcular, procesar y almacenar las estadísticas de los Modelos de Interacción Espacial, esta información además de ser almacenada en las propias capas vectoriales también será almacenados en archivos de hojas de cálculo para su procesamiento externo a los SIG.
<b>Reportes</b>	Clase cuyo objetivo principal es el generar y almacenar distintos tipos de reportes (HTML y hojas de cálculo) con los datos obtenidos (estadísticas) de los MIE.

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3.2.2.3 Diagrama de Secuencia (General)

Los diagramas de secuencia son un tipo de diagrama de interacción que describen el comportamiento dinámico de un sistema a través de la secuencia de mensajes intercambiados entre objetos. Estos diagramas se representan de forma bidimensional, con el tiempo representado en el eje vertical y los objetos en el eje horizontal, resaltando la ordenación temporal de los mensajes (UML, 2018).

Los diagramas de secuencia son una herramienta útil para comprender cómo se relacionan los objetos en un sistema y cómo interactúan entre sí (UML, 2018). Se utilizan para una variedad de propósitos, como:

- Documentar y observar el comportamiento del sistema
- Identificar posibles patrones y problemas de diseño

- Prototipar el sistema

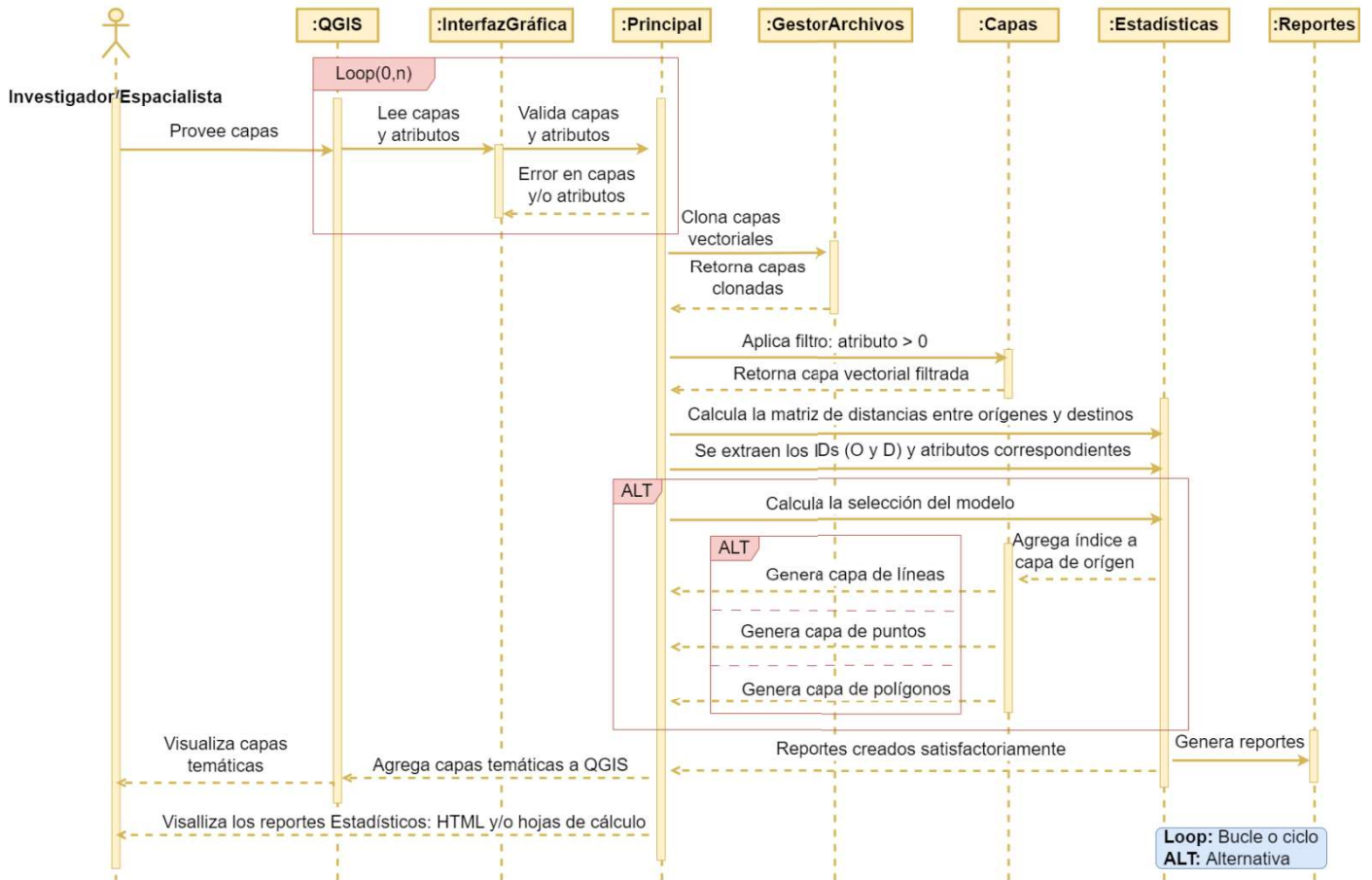


Figura 3.9: Diagrama de Secuencia (General), Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.4 Diagrama de Actividades (General)

Los diagramas de actividades muestran el flujo de control y datos entre actividades. Muestran una vista dinámica del sistema (UML, 2018).

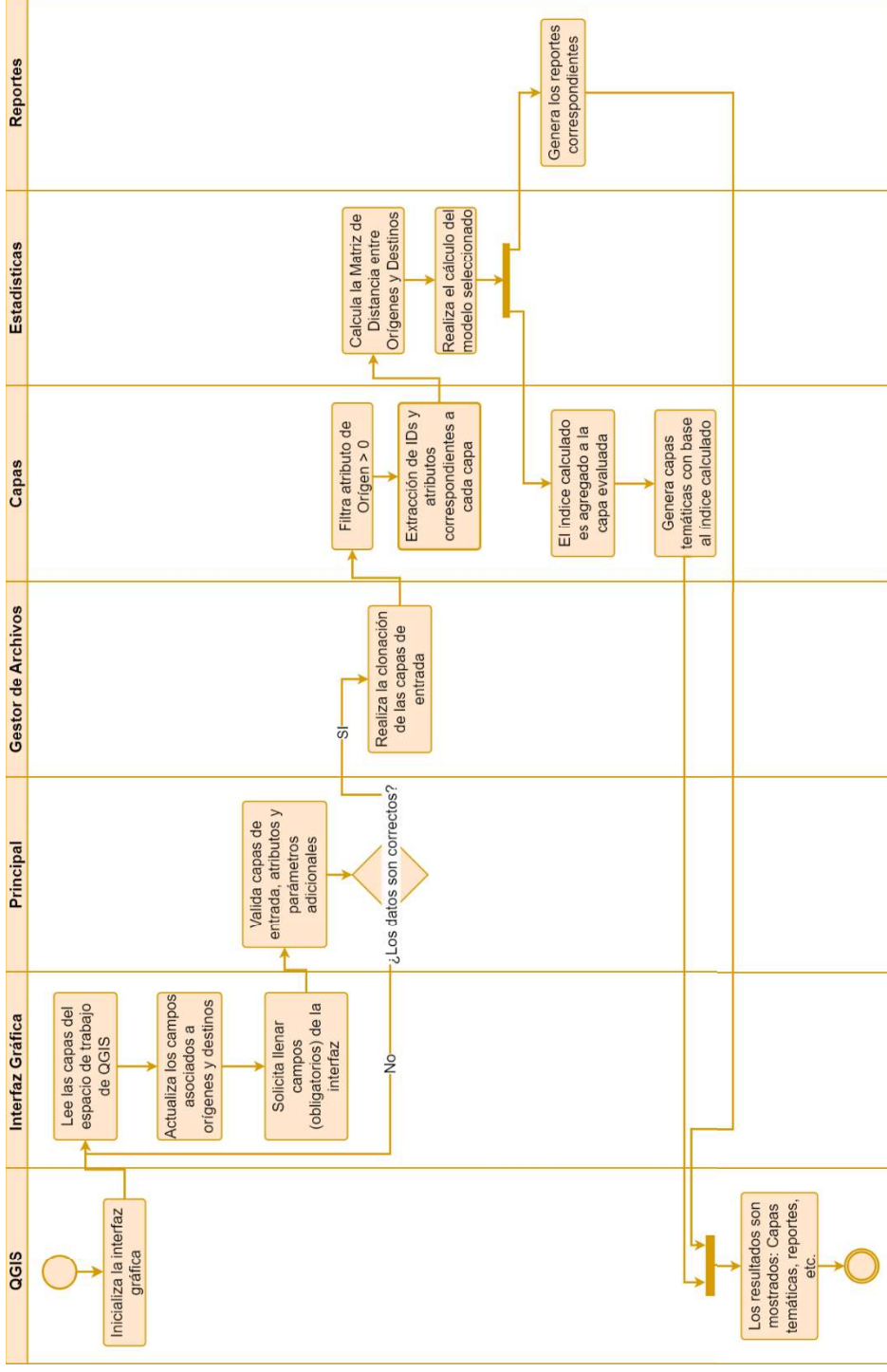


Figura 3.10: Diagrama de Actividades, Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.5 Diagrama de Despliegue

Los diagramas de despliegue son una herramienta de modelado UML que representan la arquitectura física de un sistema. Muestran la configuración en tiempo de ejecución de los nodos de procesamiento y los componentes que residen en ellos. (UML, 2018).

Estos diagramas muestran cómo el hardware y el software de un sistema se distribuyen en el entorno de ejecución. Proveen la identificación de problemas como la falta de recursos, compatibilidad y escenarios de ejecución. Muestran la arquitectura física de comunicación entre sistema, desarrolladores y usuarios finales (UML, 2018).

En la Figura 3.11 se describe el alojamiento, descarga y uso del *plugin* MIE para QGIS, donde el usuario interactúa con las diferentes etapas.

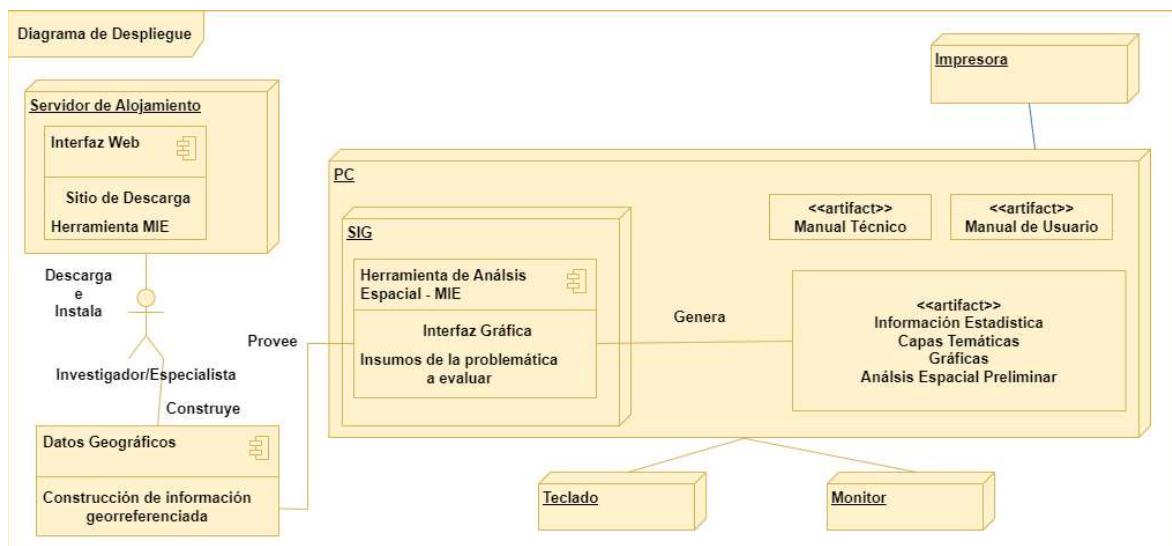


Figura 3.11: Diagrama de Despliegue, Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2.6 Diagrama de Paquetes

Los diagramas de paquetes son una herramienta de modelado UML que representan la organización y disposición de los diferentes elementos de un modelo en forma de paquete. Un paquete es una agrupación de elementos relacionados, como diagramas, documentos, clases o, incluso, otros paquetes.

Estos diagramas tienen el propósito de documentar y organizar la estructura del sistema pues proporcionan una visión general de las relaciones entre los

diferentes elementos. Identifican dependencias entre elementos lo que permite ayudar a identificar posibles problemas de diseño o rendimiento y finalmente, ayuda a organizar el desarrollo del sistema (UML, 2018).

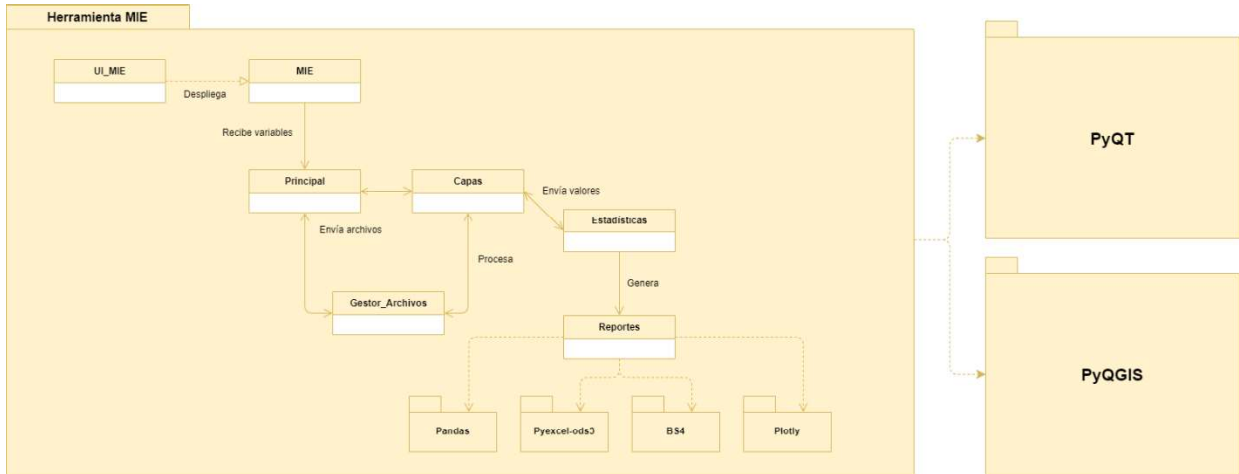


Figura 3.12: Diagrama de paquetes, Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Construcción

Tercera fase en el Proceso Unificado, en esta etapa se desarrolla el software en estricto sentido. Permite transitar desde una base arquitectónica ejecutable básica hasta el punto en el que el software está listo para ser transferido (UML, 2018). Se lleva a cabo la implementación del sistema de acuerdo con los requisitos y el diseño establecido en la fase anterior. Es una de las etapas más extensas del proceso de desarrollo.

La Figura 3.13 muestra la fase y los flujos de trabajo actuales de acuerdo con el marco de trabajo de Proceso Unificado.



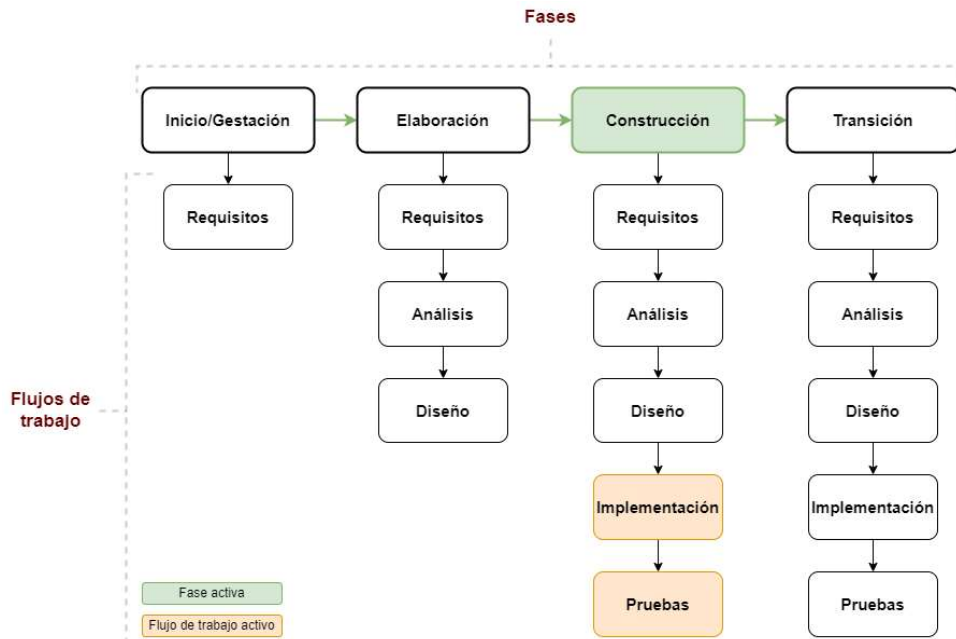


Figura 3.13: Fase 3 – Implementación y Pruebas, Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1 Implementación

Una vez planteado el diseño del sistema a través del diagrama de clases, diagrama de secuencia, diagrama de actividades, diagrama de paquetes y diagrama de despliegue, y además de haber realizado un análisis del flujo de los datos y de las variables a usar, comienza la parte de la implementación. Esta fase consiste en traducir el diseño del sistema a código fuente. El desarrollo de dicha implementación se abordará a partir de cuatro puntos importantes y son:

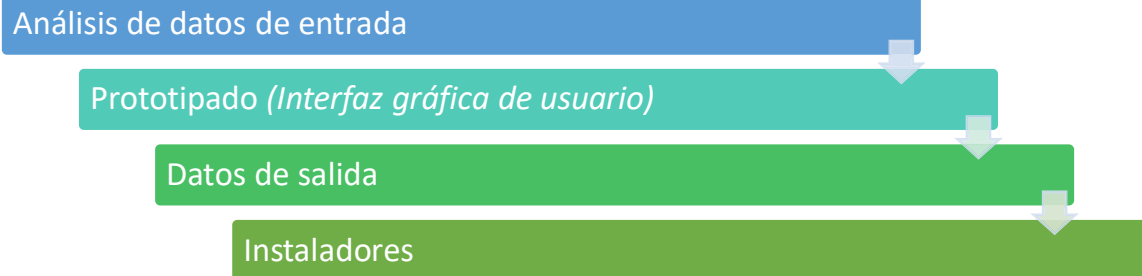


Figura 3.14: Etapas del proceso de implementación, Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.1.1 Análisis de los datos de entrada

El análisis de datos de entrada permite identificar todos aquellos elementos clave que ayudan a ejecutar el modelo, estos datos sirven como insumo y son parte esencial del modelo. Es importante mencionar que dicho análisis recopila la

información mostrada en la sección 3.2.1 y así como la incorporación de nuevos elementos necesarios para la construcción de la interfaz gráfica.

Tabla 3.13: Análisis de datos de entrada.

Archivo/Variable/Opción	Descripción
Archivo - Vectorial de polígonos/puntos	<p>Archivo vectorial con extensión “.shp”, representa el origen/demanda. La estructura básica de este archivo debe contener al menos 3 campos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>ID:</b> Identificador único de cada polígono/punto que compone el archivo vectorial.</li> <li>• <b>Nombre:</b> Cada polígono/punto además de tener un identificador único, también debe tener un nombre propio, este nombre ayuda a identificar de manera rápida cada una de las regiones que compone el archivo vectorial.</li> <li>• <b>Población:</b> Valor numérico que muestran la cantidad de población a evaluar correspondiente a cada polígono/punto.</li> </ul>
Archivo - Vectorial de puntos	<p>Archivo vectorial con extensión “.shp”, representa el destino/oferta. La estructura básica de este archivo debe contener al menos 3 campos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>ID:</b> Identificador único de cada punto que compone el archivo vectorial.</li> <li>• <b>Servicio:</b> Cada punto además de tener un identificador único, también debe tener el nombre del establecimiento, este nombre ayuda a identificar de manera rápida el servicio que se desea evaluar.</li> <li>• <b>Disponibilidad del Servicio:</b> Valor numérico que muestran la cantidad total de unidades que brinda el servicio, puede ser número total de empleados, número de camas disponibles, etc.</li> </ul>
Opción - Tipo de restricción	<p>Retomando que los MIE se clasificación en 3 tipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Restricción en el origen</li> <li>• Restricción en el destino</li> <li>• Doblemente restrictivos</li> </ul>
Opción - Unidades de medida (distancias)	<p>El cálculo de la matriz de distancia puede ser evaluado a través de metros, kilómetros, millas, pies o yardas.</p>

<b>Variable - Fricción de distancia</b>	Valor numérico que representa cómo la distancia física entre dos lugares puede afectar la probabilidad de que ocurra una interacción (positiva o negativa) entre ellos. Esta fricción puede deberse a factores como el esfuerzo, la energía o el costo requerido para viajar entre los dos lugares, así como a barreras económicas, sociales o culturales.
<b>Variable - Comportamiento de las restricciones (filtros)</b>	Dependiendo del tipo de restricción del modelo a utilizar, esta tiene un comportamiento que va desde “un valor mayor a”, “un valor menor a” y “un rango de valores” de acuerdo con la <i>Tabla 3.2: Restricciones de los MIE</i> .
<b>Opción - Reportes</b>	La generación de reportes tanto estadísticos como gráficas puede generarse de forma automática o a través de la selección del usuario.
<b>Opción - Formatos de salida (vectoriales)</b>	Una vez culminada la ejecución del modelo, la información obtenida por éste podrá ser almacenada en distintos formatos como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• SQLite</li> <li>• GeoJSON</li> <li>• Geopackage</li> <li>• Shapefile</li> </ul>
<b>Opción – Formatos de salida (estadísticas)</b>	Si se requiere realizar un análisis con mayor detalle, pero fuera del SIG, la información generada por el modelo podrá ser almacenada en diferentes formatos de hojas de cálculo como: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato “.xls”</li> <li>• Formato “.csv”</li> <li>• Formato “.ods”</li> </ul>
<b>Variable - Prefijo</b>	Para realizar diferentes escenarios de ejecución se brindará la opción de introducir un prefijo para cada una de las ejecuciones realizadas, esto evitará la pérdida de información.
<b>Opción - Proyectos actuales</b>	Con la finalidad de aprovechar proyectos previos creados en QGIS, se espera utilizar la ruta de almacenamiento de éstos para guardar la información generada por el modelo.
<b>Variable - Ruta de almacenamiento</b>	Lugar destinado dentro del gestor de archivos del sistema operativo para almacenar toda la información generada a partir de la ejecución del modelo. Esta

ruta contendrá la información agrupada y ordenada a través de carpetas para evitar la mezcla de los diferentes tipos de archivos creados.

*Fuente: Elaboración propia.*

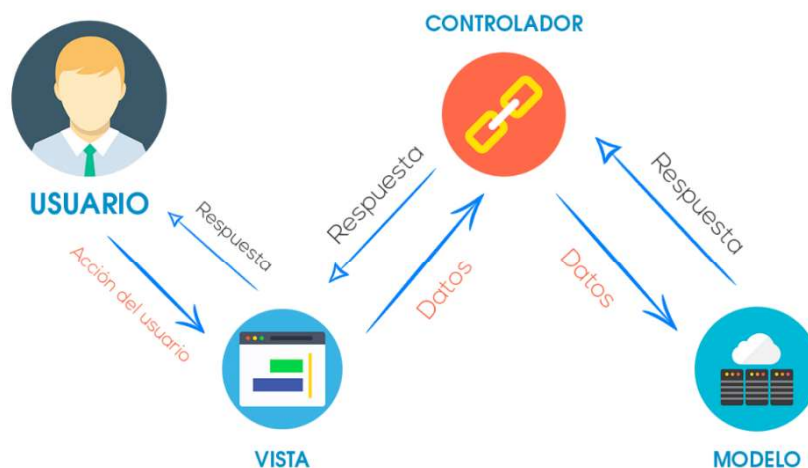
### 3.3.1.2 Arquitectura de diseño Modelo-Vista-Controlador (MVC)

El diseño de software debe ser capaz de adaptarse a los cambios. Para ello, es necesario utilizar un enfoque modular que permita separar los diferentes componentes del diseño. El patrón MVC (Modelo-Vista-Controlador) divide una aplicación de software en tres componentes principales: el modelo, la vista y el controlador (Domingo, 2023).

Domingo (2023) define a cada uno de los componentes como:

- **Modelo:** Se encarga de gestionar los accesos a la información, tanto consultas como actualizaciones.
- **Vista:** Es la parte de la aplicación que se comunica con el usuario. Presenta los datos y la lógica de negocio del modelo en un formato adecuado para interactuar con el usuario.
- **Controlador:** Es la parte de la aplicación que responde a las acciones del usuario. Cuando el usuario realiza alguna acción, el controlador invoca al modelo para realizar la operación correspondiente.

La Figura 3.15 muestra de forma sencilla como interactúa la arquitectura MVC.



*Figura 3.15: Arquitectura MVC, Fuente: Reproducido de Alfaro (2019).*

Aplicando la arquitectura MVC al desarrollo de la herramienta MIE y aprovechando las bondades que brinda PyQt para la creación de interfaz gráficas se plantea lo siguiente:

Tabla 3.14: Aplicación MVC.

MVC – QGIS	
<b>Modelo</b>	Archivo que debe ser creado por el desarrollador que permita crear una conexión entre el Controlador para actualizar la Vista.
<b>Vista</b>	Archivo proporcionado por PyQt, en primera instancia el archivo contiene la extensión “.ui” que posteriormente al ser compilado se creará un nuevo archivo con la extensión “.py”.
<b>Controlador</b>	Archivo proporcionado por PyQt, éste archivo contiene por default los métodos de carga y ejecución de la interfaz gráfica, es decir, hace un llamado a la Vista.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.1.2.1 Prototipado (Diseño de interfaz gráfica de usuario)

Un prototipo es una representación física o funcional de un producto que se utiliza para probar su concepto y funcionamiento. Se puede utilizar para validar una idea, identificar problemas y recopilar comentarios de los usuarios (López, 2022).

Además, López (2022) expresa que las utilidades del prototipado son las siguientes:

- Comprobar si el diseño propuesto tiene lógica.
- Detectar y probar errores.
- Ayuda a visualizar el diseño en un formato más real.
- Generar diferentes propuestas de diseño y validar la más adecuada.

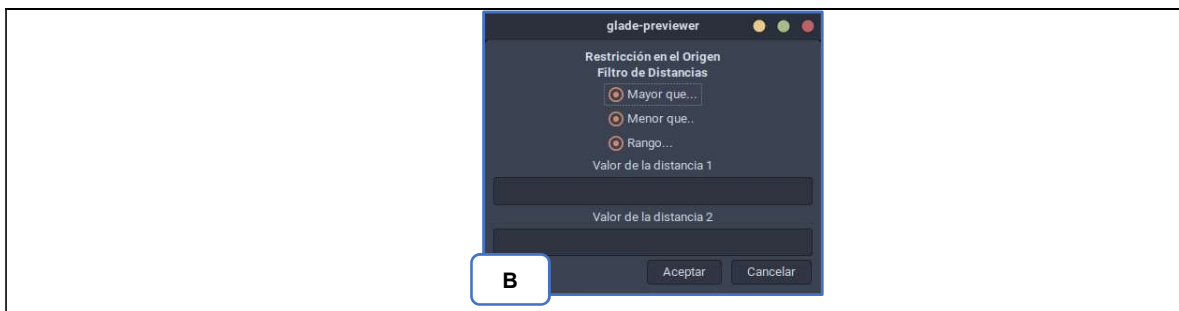
Para el caso del desarrollo de software, el prototipado estará dado bajo la implementación de la interfaz gráfica de usuario, sin embargo, es necesario definir qué es.

La interfaz gráfica de usuario es una herramienta tecnológica que permite a las personas interactuar con un sistema informático de una manera más intuitiva y natural. Además, es importante recalcar que el desarrollo de interfaces gráficas debe tomar en cuenta las capacidades físicas y mentales del usuario final, es decir, proporcionar elementos (visuales) uniformes, conservar el mismo diseño de botones y menús, colores, tipografías, ubicación de los elementos, conservar la familiaridad con otras interfaces con previa utilización del usuario, que sea guiada a través de mensajes de ayuda, entre otros (Albornoz, 2014).

Actualmente existe una variedad de software que permiten realizar diseños de interfaces, ya sea privativas o gratis. Glade (*Interface Designer*) es una herramienta para el diseño de interfaces gráficas de usuario gratuita y de código abierto, basada en el lenguaje de programación Python, y disponible para Linux, Windows y MacOS. Permite el desarrollo versátil de las interfaces gráficas sin necesidad de escribir código (GNOME, 2020). El desarrollo de las interfaces gráficas de usuario tiene un diseño muy apegado a lo que se genera en PyQt, por lo que brinda una idea clara y precisa de lo que se creará como producto final.

Con Glade se propone dos tipos de interfaz gráfica de usuario que estén disponibles para su uso en QGIS.

- Prototipo 1 (Figura 3.16): Propuesta a través de menús lineales y ventanas emergentes.



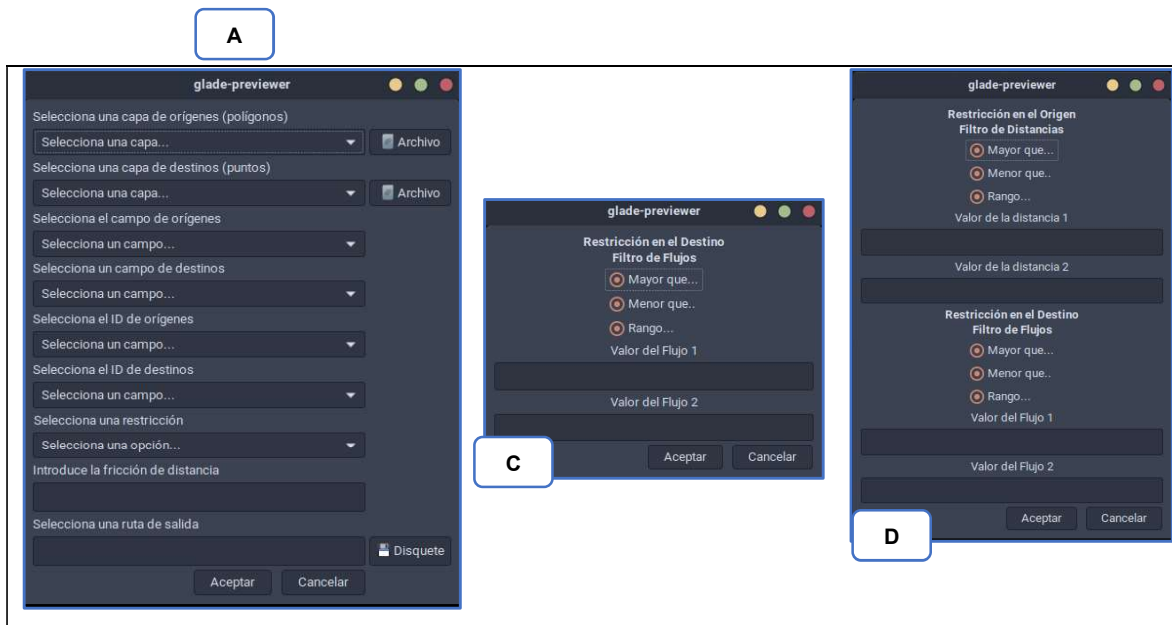


Figura 3.16: Prototipo 1, Figura 3.16-A: Ventana principal, Figura 3.16-B: Ventana emergente (restricción en el origen), Figura 3.16-C: Ventana emergente (restricción en el destino), Figura 3.16-D: Ventana emergente (doblemente restrictivo), Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.16-A muestra la pantalla principal del prototipo 1, en esta sección el usuario alimenta la interfaz con los archivos vectoriales de polígonos y/o puntos, así como con los atributos de cada uno de éstos. Esta propuesta de interfaz requiere el uso de ventanas emergente ligadas a la selección del tipo de restricción a utilizar. Si el usuario elige la opción “restricción en el origen”, se mostrará la ventana de la Figura 3.16-B. Si el usuario requiere elige la opción “restricción en el destino”, se mostrará la ventana de la Figura 3.16-C. Finalmente, si el usuario elige la opción “doblemente restrictivo”, se mostrará la ventana de la Figura 3.16-D

- Prototipo 2 (Figura 3.17): Propuesta a través de una sola ventana y el uso de pestañas.



Figura 3.17: Prototipo 2, Figura 3.17-A: Ventana principal y pestaña de entradas, Figura 3.17-B: Pestaña de restricciones, Figura 3.17-C: Pestaña de formatos de salida, Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.17-A, representa la ventana y pestaña de inicio a la hora de ejecutar la herramienta, en esta sección el usuario provee a la herramienta los insumos vectoriales, únicamente en esta sección se brinda la información geográfica, posteriormente, en la Figura 3.17-B, se deberán proporcionar las variables necesarias para la selección del tipo de restricción a utilizar (Restricción en el origen, Restricción en el destino, Doblemente restrictivos), así como los filtros correspondientes a cada una de las restricciones a utilizar. Finalmente, la Figura 3.17-C, muestra la selección de los formatos de salida, en esta pestaña el usuario elige en que formatos de datos geospaciales desea guardar la información generada por la herramienta.

A partir de las propuestas presentadas, se decidió tomar como referencia al prototipo 2, ya que éste alberga a todos los elementos en una sola ventana y cuya navegación se realiza a través de pestañas, sin la necesidad de mostrar ventanas emergentes al usuario.



### 3.3.1.3 Datos de salida

Cuando la ejecución del modelo termine, es necesario generar salidas que muestren los resultados de dicha ejecución, estas salidas permiten al investigador/especialista disponer de información para generar conclusiones claras y precisas acerca de los datos que han sido evaluados, recordando que la representación visual contribuye de manera significativa a la hora de tomar decisiones. Estos archivos de salida serán clasificados en cuatro tipos:

- Archivos vectoriales y capas temáticas

Los archivos vectoriales y capas temáticas creadas a partir del modelo generan un apartado visual y representativo de los datos obtenidos, es decir, se incluyen colores, formas, secciones, delimitaciones, etc. Estos datos son transformados en la base de un mapa temático (Figura 3.18). Es importante recalcar que como parte del resultado de la ejecución se pueden crear capas de líneas, puntos y/o polígonos, esto se encuentra sujeto a los datos de entrada que el usuario proporcione.

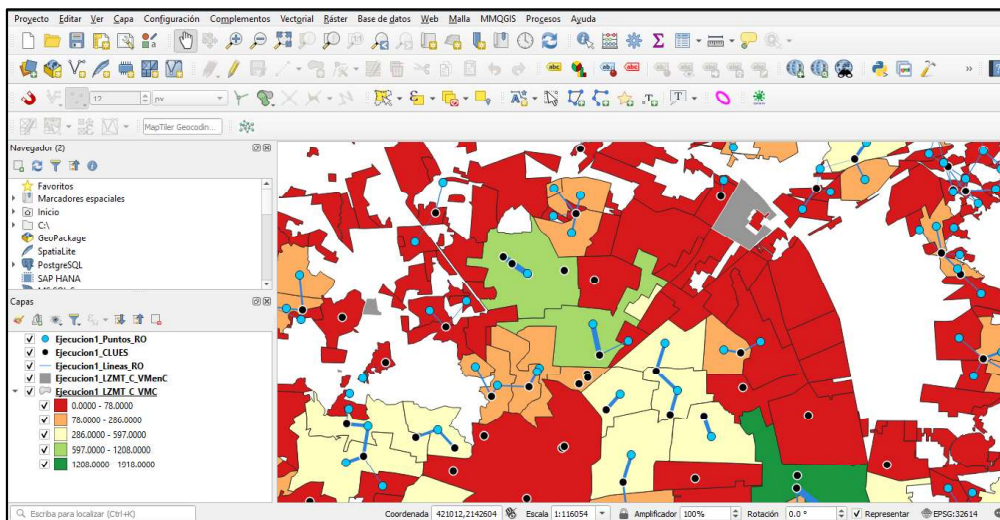


Figura 3.18: Archivos vectoriales y capas temáticas, Fuente: Elaboración propia.

- Hojas de cálculo

Las estadísticas generadas por el modelo son almacenadas en un formato para ser trabajado a través de una hoja de cálculo, estas estadísticas incluyen un conjunto de registros conformados por la clave o ID que identifica cada región evaluada, el índice calculado y otros datos relevantes para su análisis. Las hojas de

cálculo (Figura 3.19) están disponibles en distintos formatos como: xls (Excel), ods (Open Office) y CSV (genérico).

	A	B	C	D	E	F	G
1	CVE_ORI	CVE_DEST	ACC_IND	ACC_TOT	ACC_PROM	ACC_STD	TOT_DEST
2	151060127	MCSSA010893	167	167	167	0	1
3	151060234	MCSSA009336	45	45	45	0	1
4	151060233	MCSSA009394	373.3928577	528	264	109.3928577	2
5	151060233	MCSSA017700	154.6071423	528	264	109.3928577	2
6	151060220	MCSSA010893	93	93	93	0	1
7	151060112	MCSSA007854	201	201	201	0	1
8	151150021	MCSSA003770	17	17	17	0	1
9	151150013	MCSSA008525	0.859453686	2	1	0.140546314	2
10	151150013	MCSSA018062	1.140546314	2	1	0.140546314	2

Figura 3.19: Ejemplo de hoja de cálculo, Fuente: Elaboración propia.

- Reportes HTML

Además de las hojas de cálculo, los reportes son almacenados de forma automática en formato HTML, la información que contiene este reporte es acerca de los insumos con los que fue alimentada la herramienta (Figura 3.20).

### Reporte de ejecución (General)

**Archivo de Origen:** /home/hades/Documentos/Datos\_EDOMEX/Localidades\_ZMT\_pob\_repro/LZMT\_C.shp  
**ID de origen:** CVEGEO  
**Campo de origen:** POB65\_MAS  
**Archivo de Destino:** /home/hades/Documentos/Datos\_EDOMEX/CLUES\_repro/CLUES.shp  
**ID de destino:** CLUES  
**Campo de destino:** C1301  
**Fricción de distancia:** 1.2  
**Tipo de restricción:** Restricción en el destino  
**Unidades de medida:** Metros  
**Tipo de filtro:** Rango  
**Valor(es):** Entre 50.0 y 150.0  
**Ruta de almacenamiento:** /home/hades/Documentos/tmp/

FLUJ_PROM	Flujo promedio	FLUJ_MEDIANA	Flujo (mediana)
FLUJ_STD	Flujo (Desviación Estándar)	FLUJ_MODA	Flujo(s) (Moda)
T_CEROS	Total de ceros		
Flujos	Flujos obtenidos	Total	Total de flujos identificados
93.3972	86.0	25.0562	80
			34

Figura 3.20: Ejemplo de reporte HTML, Fuente: Elaboración propia.

- Gráficas

La representación gráfica o visualización de los datos es importante para cualquier análisis de datos, estas representaciones facilitan el manejo la información por más compleja que parezca, pues todo se sintetiza en colores, tamaños y formas, lo que agiliza el proceso de interpretación y entendimiento de

estos resultados. Gracias a Python y a la librería Plotly se pueden generar diversos tipos de gráficos de acuerdo con las necesidades del usuario (Figura 3.21).

En la Figura 3.21 se muestra un ejemplo de la distribución de los flujos evaluados, donde se puede observar si existe alguna simetría entre los datos de acuerdo con la caja generada, así mismo como la presencia de los valores atípicos en sus respectivos extremos. En dicho caso la mediana cae sobre el límite inferior de la caja, lo que sugiere una posible asimetría en los valores más bajos, es decir, aquellos que se encuentran entre 75.75 y 86.

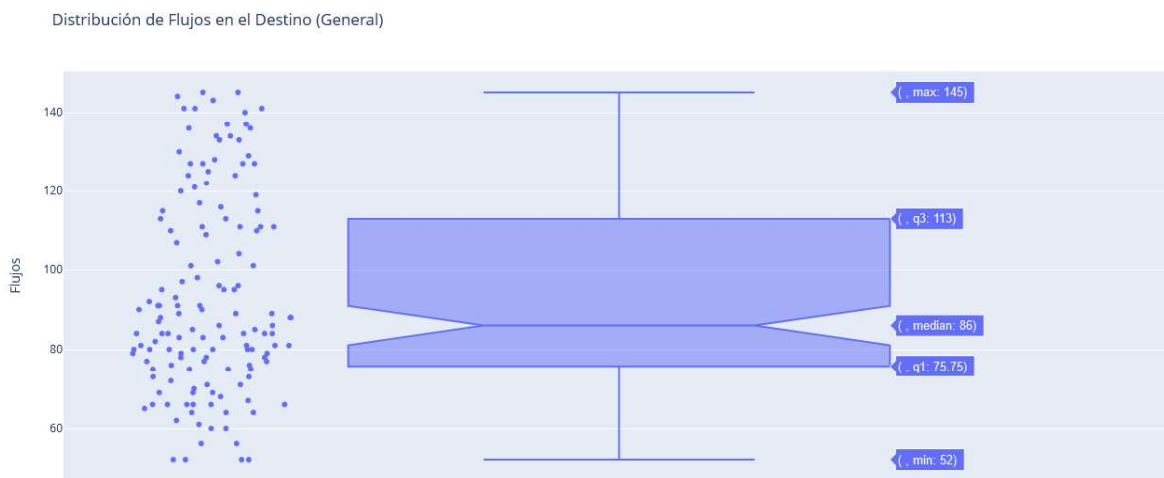


Figura 3.21: Representación gráfica de los datos evaluados mediante su distribución y su diagrama de caja (Boxplot), Fuente: Elaboración propia.

#### 3.3.1.4 Instaladores

Los instaladores desempeñan un papel esencial en el proceso de construcción del modelo, ya que posibilitan la distribución y configuración de la herramienta en los dispositivos de los usuarios. La creación de estos instaladores varía según el sistema operativo de destino, así como la extensión de dicho instalador. La Tabla 3.15 describe el tipo de sistema operativo y su extensión.

Tabla 3.15: Instaladores.

Sistema Operativo	Tipo de extensión
Windows	“.exe”
MacOS	“.sh”
Linux	“.sh”

Fuente: Elaboración propia.

- Instalador Windows

Para generar un instalador en el sistema operativo Windows es necesario apoyarse de una herramienta externa que se encargue de empaquetar todos los módulos y archivos necesarios, posteriormente estos serán instalados en la ruta de destino donde QGIS reconocerá dicha herramienta.

*InstallSimple* es un software sencillo para generar y distribuir instaladores de programas propios. Tiene dos versiones de licenciamiento, gratuita y de pago, y en esta investigación se ocupó la primera. Con ayuda de una interfaz diseñada para que su operación sea intuitiva (Figura 3.22) se van llenando los campos necesarios para generar este instalador, se pueden configurar parámetros de rutas, propietarios, permisos de administrador, entre otros datos (Install Simple, 2011).

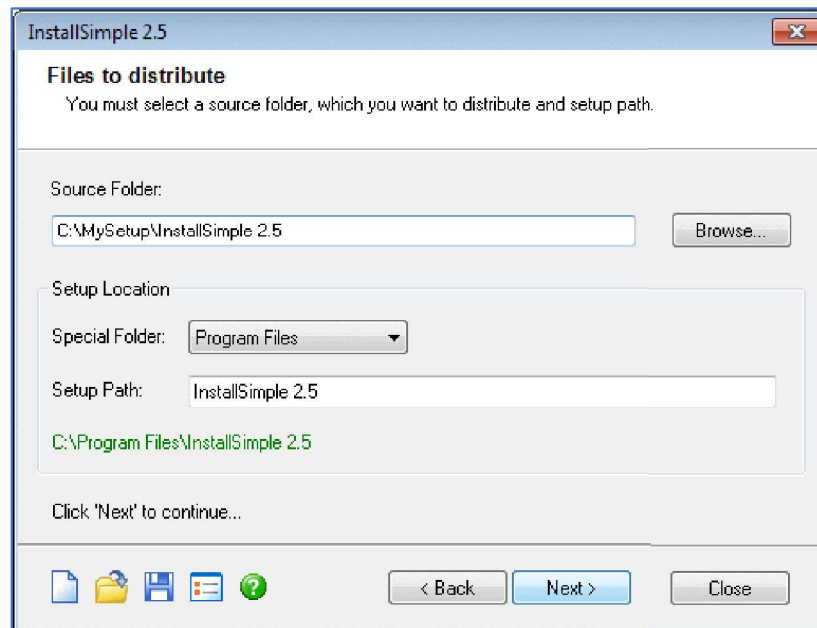


Figura 3.22: InstallSimple, Fuente: Reproducido de InstallSimple (2011).

- Instalador Linux y MacOS

Al igual que QGIS en Windows, es necesario crear un instalador para realizar el empaquetamiento de todos los módulos y archivos necesarios. Sin embargo, en los sistemas *UNIX*, la mayoría de las instalaciones se realizan a través de scripts automatizados. Para realizar dicho instalador es necesario crear un script en *Bash* (Interfaz de usuario de línea de comandos popular en los sistemas *UNIX*), el cual debe contener las instrucciones necesarias para la localización y extracción de la herramienta en la carpeta destinada a almacenar los *plugins* en estos sistemas operativos.

Un script básico en *Bash* que contiene este tipo de instrucciones es el que se muestra en la Figura 3.23:

```
#!/bin/sh
echo ""
echo "Instalador de la herramienta MIE v.1.0"
echo ""
echo "Iniciando instalación de la herramienta..."
echo ""
export PATH_HERRAMIENTA=$HOME'/.local/share/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins/'
export TOOL='SpatialInteractionModels/'
echo ""
echo "Comprobando información de instalación..."
#Comprueba que existe la ruta de los plugins, en caso contrario crea la carpeta
if [ ! -d $PATH_HERRAMIENTA ];
then
    echo "Creando archivos faltantes..."
    mkdir $PATH_HERRAMIENTA
    chmod 777 $PATH_HERRAMIENTA
fi
echo ""
echo "Ruta de Instalacion: "$PATH_HERRAMIENTA
echo ""
# Creamos un directorio temporal donde lo extraeremos
export WRKDIR=`mktemp -d /tmp/MIE.XXXXXX`
SKIP=`awk '/^MIE.tar.gz/ { print NR + 1; exit 0; }' $0`

# Extracción del archivo en la carpeta temporal
tail -n +$SKIP $0 | tar xvz -C $WRKDIR

# Nos vamos al temporal y ejecutamos el script de instalacion
PREV=`pwd`
cd $WRKDIR
# Una vez extraído movemos la información a la carpeta
mv -f $TOOL $PATH_HERRAMIENTA
exit 0
MIE.tar.gz
```

Figura 3.23: Script de instalación en Bash, Fuente: Elaboración propia.

### 3.3.2 Pruebas

Este flujo de trabajo se encarga evaluar la calidad del producto, específicamente del software en desarrollo. Facilita la revisión de las entradas, procesos y salidas, examinando minuciosamente cada componente y módulo. Su propósito principal es identificar y corregir posibles defectos en el sistema, mejorar las validaciones y asegurar la implementación perfecta de cada parte que conforma el software (Jacobson et al., 2000).

La clasificación de las pruebas de software estará evaluada en tres prioridades: baja, media y alta. La primera hace referencia a una importancia mínima pero no tan significativa dentro de la ejecución, por ejemplo: la función encargada de dar formato visual a los reportes. La segunda hace referencia a una importancia intermedia, por ejemplo: la función encargada de liberar la memoria al crear capas temporales. Finalmente, la tercera hace referencia aquellas funciones que tiene un alto impacto dentro de la ejecución, por ejemplo: las funciones encargadas de calcular los índices, las que generan reportes, las que guardan las capas vectoriales, etc.

Para este apartado en específico se describirán las pruebas generales con prioridad alta, sin embargo, en la sección de anexos se puede consultar con mayor detalle el resto de las pruebas realizadas y documentadas.

Las pruebas de software se ajustan a la planificación establecida, fundamentándose en la creación de escenarios que simulan la entrada de datos para obtener diferentes salidas. Como se explicó previamente, las pruebas generales de este software se llevarán a cabo en tres etapas distintas:

- Entradas (Lectura de capas vectoriales y parámetros adicionales)
- Cálculo de índice (MIE)
- Salidas (Organización de archivos, reportes y capas temáticas)

La Figura 3.24 muestra la clasificación de las tres distintas etapas de prueba para verificar la calidad y desempeño del *plugin* desarrollado.

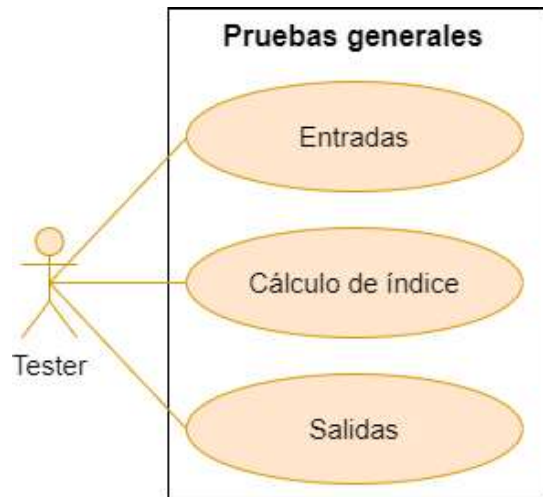


Figura 3.24: Caso de uso de Pruebas, Fuente: Elaboración propia.

- **Prueba: Entradas**

Tabla 3.16: Prueba general 1 – VE\_01.

Título: Lectura y carga de capas	ID: VE_01
<b>Prioridad de prueba:</b> Alta	
<b>Nombre del módulo:</b> Spatial_interaction_models.py	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• load_origin()</li> <li>• load_dest()</li> <li>• validate_inputs()</li> </ul>	
<b>Descripción:</b> Los módulos se encargan de la lectura y carga de las capas vectoriales que se encuentran en el espacio de trabajo de QGIS. Cuando las capas son cargadas, se extraen los atributos que contienen y son elegibles para el usuario a través de los combobox. Pasan por un proceso de validación donde se filtra la selección única de atributos del tipo numérico. Además, se verifica que las capas vectoriales presenten la misma proyección cartográfica, así como el uso exclusivo de capas de tipo punto y polígono.	
<b>Condiciones previas:</b> La interfaz gráfica debe encontrarse en ejecución, así como la disponibilidad de capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS.	
<b>Pasos:</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cargar las capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS o realizar la carga de forma manual a través del explorar de archivos disponible en la interfaz gráfica.</li> <li>2. Seleccionar alguna de las capas vectoriales disponibles en el combobox de la interfaz gráfica.</li> <li>3. Seleccionar los atributos correspondientes a la evaluación de los MIE.</li> </ol>	

4. Presionar el botón “siguiente” (validación de capas y atributos seleccionados).

**Resultado:** Satisfactorio.

*Fuente: Elaboración propia.*

- **Prueba: Cálculo de índice**

*Tabla 3.17: Prueba general 2 – CI\_01.*

Título: Calculo de índice MIE	ID: CI_01
<b>Prioridad de prueba: Alta</b>	
<b>Nombre del módulo:</b> SIM/Estadísticas.py <ul style="list-style-type: none"> <li>• Extract_data()</li> <li>• distanceMatrix()</li> <li>• origin_restriction()</li> <li>• dest_restriction()</li> <li>• d_restriction()</li> </ul>	
<b>Descripción:</b> Los módulos se encargan de ejecutar cualquier MIE, el primer paso es la extracción de los atributos (oferta y demanda) que serán evaluados por los modelos. La segunda parte consta del cálculo de la matriz de distancias entre orígenes y destinos, este cálculo se realiza en metros, sin embargo, el usuario puede elegir cualquier otra unidad de distancia. Con la extracción de los atributos y la matriz de distancia previamente calculada, inicia el cálculo de los MIE (de acuerdo con la selección por el usuario).	
<b>Condiciones previas:</b> La interfaz gráfica debe encontrarse en ejecución, así como la disponibilidad de capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS.	
<b>Pasos:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cargar las capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS o realizar la carga de forma manual a través del explorar de archivos disponible en la interfaz gráfica.</li> <li>2. Seleccionar alguna de las capas vectoriales disponibles en el <i>combobox</i> de la interfaz gráfica.</li> <li>3. Seleccionar los atributos correspondientes a la evaluación de los MIE.</li> <li>4. Seleccionar el modelo e introducir los parámetros asociados a éste.</li> <li>5. Presionar el botón “siguiente” (validación parámetros).</li> </ol>	
<b>Resultado:</b> Satisfactorio.	

*Fuente: Elaboración propia.*



- **Prueba: Salidas**

Tabla 3.18: Prueba general 3 – GS\_01.

Título: Generación de salidas		ID: GS_01
<b>Prioridad de prueba:</b> Alta		
<b>Nombre del módulo:</b>		
SIM/Capas.py	SIM/Reportes.py	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• thematic_lines()</li> <li>• thematic_points()</li> <li>• thematic_polygons()</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• report_HTML()</li> <li>• __aux_report()</li> <li>• save_calcs()</li> </ul>	
SIM/GestorArchivos.py	<ul style="list-style-type: none"> <li>• boxplot()</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• save_layers()</li> </ul>		
<b>Descripción:</b> Estos módulos se encargan de generar las salidas al culminar la ejecución del <i>plugin</i> . Estas salidas van desde la generación de archivos vectoriales con su correspondiente capa temática hasta la creación de reportes HTML, hojas de cálculo y diagramas de caja.		
<b>Condiciones previas:</b> La interfaz gráfica debe encontrarse en ejecución, así como la disponibilidad de capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS.		
<b>Pasos:</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cargar las capas vectoriales en el espacio de trabajo de QGIS o realizar la carga de forma manual a través del explorar de archivos disponible en la interfaz gráfica.</li> <li>2. Seleccionar alguna de las capas vectoriales disponibles en el combobox de la interfaz gráfica.</li> <li>3. Seleccionar los atributos correspondientes a la evaluación de los MIE.</li> <li>4. Seleccionar el modelo e introducir los parámetros asociados a éste.</li> <li>5. Seleccionar los formatos vectoriales de salida (al menos uno).</li> <li>6. Seleccionar la creación de hojas de cálculo (opcional).</li> <li>7. Establecer un prefijo a la ejecución (opcional).</li> <li>8. Seleccionar la ruta donde se almacenará la información generada por la ejecución.</li> <li>9. Presionar el botón “aceptar” (validación de parámetros).</li> </ol>		
<b>Resultado:</b> Satisfactorio.		

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Transición

Última fase de Proceso Unificado (Figura 3.25) donde el sistema se verifica y valida, se realiza la corrección de errores (si es que aún existen). Además, se realiza la documentación (tanto técnica como para el usuario final) del software para realizar ajustes y mejoras en un futuro.

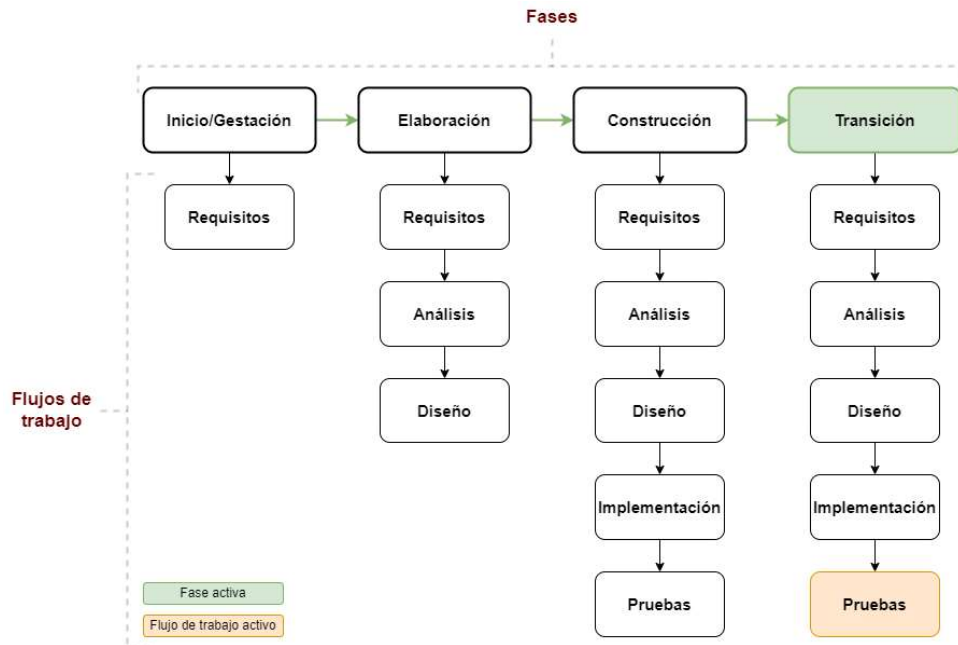


Figura 3.25: Fase 4 – Pruebas, Fuente: Elaboración propia.

La documentación técnica como manual de usuario se encuentran contenidos en la sección de “Anexos” donde se incluyen todos los diagramas realizados para la construcción del *plugin*. Es importante mencionar que el *plugin* ha sido colocado en un repositorio de *GitHub* (Figura 3.26) donde el usuario puede descargar esta automatización de los MIE.

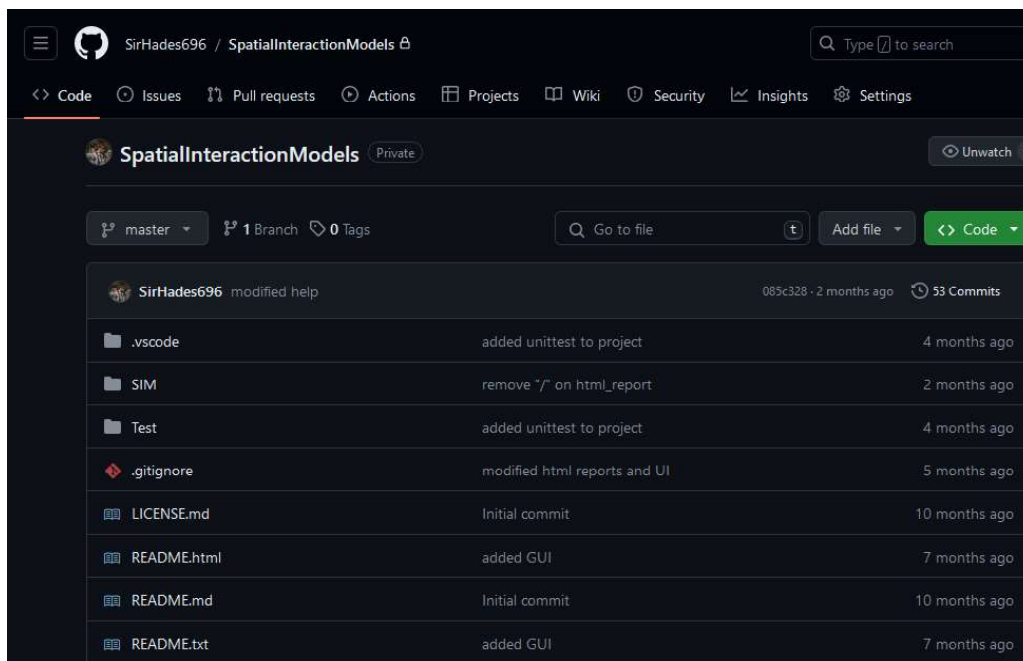


Figura 3.26: Despliegue del proyecto en GitHub, Fuente: Elaboración propia.

### 3.5 Caso de estudio

Los datos obtenidos que permitieron la preparación de los insumos y generación de mapas temáticos para este caso de estudio fueron a través de fuentes oficiales y con información actual disponible de los años 2020, 2021 y 2023.

Tabla 3.19: Preparación de insumos.

Nombre	Fuente	Producto generado
Zona Metropolitana de Toluca	Marco Geoestadístico, (INEGI, 2023)	Figura temática de la Zona de estudio
Pirámide poblacional	Integración Territorial (ITER), (INEGI, 2021)	Gráfico piramidal de población
Población que habla alguna lengua indígena	Integración Territorial (ITER), (INEGI, 2021)	Figura temática de población que habla alguna lengua indígena
Marginación por localidad	Gobierno de México – CONAPO, (Gobierno de México, 2021)	Figura temática de marginación
Localidades	Integración Territorial (ITER), (INEGI, 2021)	Figura temática de clasificación de localidades
Población	Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL), (INEGI, 2021)	Figura temática de la distribución de la población
Densidad de población	Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL), (INEGI, 2021)	Figura temática de la densidad de población
Red vial	Red Nacional de Caminos (2020), (INEGI, 2015)	Figura temática de la clasificación de la red vial
Oferta y demanda potencial	Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL) y Catálogo de Clave Única de Establecimientos de Salud (CLUES), (INEGI, 2021) y (Gobierno de México, 2017)	Figura temática que incluye la demanda y oferta potencial

Fuente: Elaboración propia.

Para la preparación de los datos de oferta y demanda potencial, se requirió de realizar limpieza y ajuste en los datos, principalmente al apartado de demanda,

ya que al establecer la geocodificación de éstos a nivel de desagregación de manzana, se identificó que existían múltiples registros en blanco y para evitar la depuración de dichas manzanas, se optó por calcular los valores faltantes a través de las técnicas de *Machine Learning* con Python.

Para realizar dicho proceso se utilizó la librería de *Sci-kit learn* (2011) con la clase *sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor*. Dicha librería permite utilizar el algoritmo de “vecinos más cercanos” aplicando tareas de regresión, donde el objetivo principal es predecir un valor a través de distintas observaciones cercanas dentro de un conjunto de datos de entrenamiento.

La aplicación de esta librería fue por medio de los siguientes pasos:

1. Se estructuró un conjunto de datos con dos variables, una independiente y una dependiente. De esta última es de la que se desean estimar los valores faltantes a partir de la primera.
2. El conjunto de datos original se divide en dos subconjuntos de datos. Uno para entrenamiento y otro para prueba, los cuales tienen el 80% y 20% de los datos originales, respectivamente.
3. Se aplica el entrenamiento del modelo con el subconjunto de datos de entrenamiento.
4. Se calcula el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para estimar el grado en que el modelo genera valores similares a aquellos ya conocidos de la variable dependiente. Mientras el valor sea más cercano a 1, significa que los datos generados por el modelo son más parecidos a los ya existentes de la variable dependiente.
5. El paso 3 y 4 se repitieron hasta alcanzar el mejor  $R^2$  posible, ajustando el número de vecinos a considerar por el modelo.
6. Posteriormente, se aplica el modelo entrenado con el subconjunto de datos de prueba y se vuelve a calcular  $R^2$ .
7. Se compararon los valores de  $R^2$  de entrenamiento y de prueba para verificar su similitud. El hecho de que estos valores sean similares (más no iguales) indica que el modelo estimó correctamente los datos

de prueba y que tuvo el mismo rendimiento ante nuevos datos (los de prueba).

8. Se realiza la predicción de los datos de la variable dependiente (que de origen eran faltantes) a partir de la variable independiente correspondiente.
9. Se integran los nuevos datos de la variable dependiente en un nuevo archivo para poder ser geocodificado y procesado.

Con el cálculo completo de los lugares vacíos en las variables objetivo (variables dependientes), se realizó el cálculo del Valor Índice Medio (VIM), la cual es una técnica útil para clasificar unidades territoriales en base a un índice derivado de distintas variables. Facilita la identificación de diferencias y particularidades entre unidades espaciales (García de León Loza, 1988).

Para la estimación del VIM se realizó a través de los siguientes pasos:

1. Identificación previa de las variables dependientes (variables a explicar) (tanto variables de beneficio y variables de costo).
2. Selección de la variable independiente (variable que contiene los totales).
3. Generar una estandarización de los datos a través del cálculo de porcentaje de las variables a explicar respecto a la variable independiente.
4. Con la estandarización de las variables, aplicar la siguiente normalización respecto a si son variables de costo (Ecuación 3.12) o beneficio (Ecuación 3.13).

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

*Ecuación 3.12*

Para variables de *Beneficio*

$$z = -\left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}\right)$$

*Ecuación 3.13*

## Para variables de *Costo*

Donde:

$x_i$  = elemento  $i$  de la variable dependiente.

$\bar{x}$  = media del conjunto de elementos de variable dependiente.

$\sigma$  = desviación estandar del conjunto de elementos de la variable dependiente.

5. Una vez que los datos han sido normalizados, se aplica una reclasificación con 6 categorías.
6. Se realiza un promedio de dichos valores reclasificados y se aplica el nuevo etiquetado.
7. Para explicar dicho fenómeno se realiza una categorización de 6 etiquetas, por ejemplo: 1 – Muy Bajo, 2 – Bajo, 3 – Medio Bajo, 4 – Medio Alto, 5 – Alto, 6 – Muy Alto.
8. Los datos son geocodificados para su posterior visualización en SIG.
9. Con el valor de la categorización se crea el ponderador que permite crear la demanda potencial a través de una multiplicación sencilla respecto a la categoría por la población total (variable independiente en este caso).

Las variables utilizadas para el cálculo del VIM fueron extraídas del SCITEL en la sección de resultados por AGEB y Manzana urbana del año 2020 (Tabla 3.20).

Tabla 3.20: Variables para la construcción del VIM.

Variable	Descripción	Tipo
POBTOT	Total de personas que residen habitualmente en el país, la entidad federativa, el municipio o la demarcación territorial y la localidad	N/A
POB65_MAS	Personas de 65 a 130 años de edad.	Beneficio
PCON_LIMI	Personas que realizan con poca dificultad al menos una de las siguientes actividades: ver, aun usando lentes; oír, aun usando aparato auditivo; caminar, subir o bajar; recordar o concentrarse; bañarse, vestirse o comer; hablar o comunicarse.	Beneficio

PSINDER	Total de personas que no están afiliadas a servicios médicos en ninguna institución pública o privada	Beneficio
PDER_SS	Total de personas que están afiliadas a servicios médico en alguna institución de salud pública o privada como: el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE e ISSSTE estatal), Petróleos Mexicanos (PEMEX), la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR), el Instituto de Salud para el Bienestar (INSABI) o en otra.	Costo

*Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).*

La selección de estas variables tiene el propósito de identificar a la población adulta mayor que tiene alguna limitación física y que no cuenta con algún seguro médico en la ZMT.

Para realizar el cálculo de la oferta potencial se utilizaron los insumos brindados por el Catálogo de Clave Única de Establecimientos de Salud (CLUES) y se aplicó la Ecuación 3.14:

$$OP = T_c * 28 * N_{Turnos} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Donde:

$T_c$  = Total de consultorios (Correspondiente a la variable E13 que maneja el CLUES).

28 = Número aproximado consultas que un médico brinda en un turno.

$N_{Turnos}$  = Número de turnos.

El número aproximado de consultas que un médico brinda en un turno se extrajo del Sistema Normativo de Equipamiento de los Centros de Salud Urbanos y Unidades Básicas de Servicio (SEDESOL, 2000 y 2016), donde la capacidad de diseño para cada una de estas unidades es de 28 consultas por turno.

El número de consultorios es un insumo que no está directamente brindado en los datos proporcionados por los CLUES (2017) procesados y especializados por Santana (2020), este atributo se calculó a partir de la clave que existe en su campo

“TIPOLOGÍA” de cada unidad de salud y la Tabla 3.21 muestra la relación entre la TIPOLOGÍA y el número de turnos.

Tabla 3.21: Tipologías y número de turnos.

Tipología	Número de turnos
<b>A, B, C, D y W</b>	1
<b>E</b>	2
<b>F</b>	3
<b>G, H, I, J, K, L, Q, R, S y CAP</b>	4

Fuente: Elaboración propia.

Para comprender que significa cada clave de la tipología de las unidades de salud, en la Tabla 3.22 se encuentra las descripciones asociadas a las diferentes claves. La construcción de la tabla es un resumen del diccionario de datos que viene incluido con los datos proporcionados por los CLUES.

Tabla 3.22: Tipología de unidades de consulta externa.

Clave	Tipo	Número de núcleos básicos de servicios
A	Rural	1
B		2
C		3
D	Urbano	1
E		2
F		3
G		4
H		5
I		6
J		7
K		8
L		9
Q		10
R		11
S		12
CAP	Centros Avanzados de Atención Primaria a la Salud (CAAPS)	

Fuente: Elaboración propia.

Un núcleo básico de servicios está conformado por un médico familiar o general y dos enfermeras, los cuales prestarán servicio a la población del área geográfica correspondiente, en un consultorio equipado y éste estará apoyado por un promotor de la salud (Secretaría de Salud, 1995).



## ***Resumen***

En este capítulo 3 se abordaron las distintas etapas de Proceso Unificado, donde resaltan las fases y flujos de trabajo acorde a dicho marco metodológico de trabajo. La primera fase llamada “Inicio/Gestación del proyecto” se encargó de la recopilación de requisitos, siendo una de las fases de mayor impacto en el desarrollo pues de aquí surge lo que se desea implementar. La segunda fase se refiere a “Elaboración” donde se sigue realizando una corrección en los requisitos, se plantea el diseño estructural del software con el uso del UML. La tercera fase está dedicada a la “Construcción” y pruebas del software en términos de codificación, y finalmente, la fase de “Transición” es el proceso general en que el software es puesto a disposición del usuario y se realizan los ajustes finales (si fuese necesario). Y se estructuraron los insumos para el caso de estudio.

## Capítulo 4: Resultados

### 4.1 Aplicación (plugin)

El principal resultado de esta investigación es el *plugin* que automatiza a los Modelos de Interacción Espacial, el cual se desarrolló gracias al uso de las herramientas de programación que provee el Sistema de Información Geográfica QGIS. Estas herramientas permiten la comunicación y cambio de información entre el usuario, las capas georreferenciadas y el SIG. Es importante mencionar que el *plugin* debe estar previamente instalada.

En la Figura 4.1 se muestra la ubicación del *plugin* dentro de la zona del panel de herramientas.

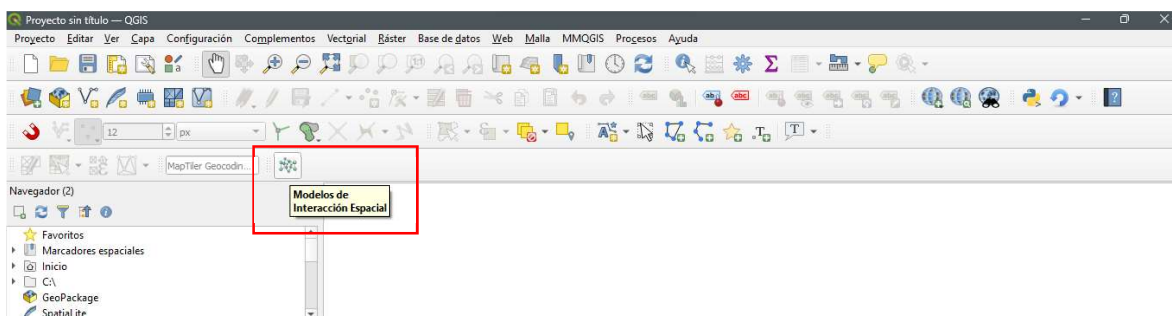


Figura 4.1: Ubicación del *plugin* en el panel de herramientas, Fuente: Elaboración propia.

Otra forma de acceder a la herramienta es a través del menú de complementos, en la Figura 4.2 se muestra la ubicación del *plugin*.

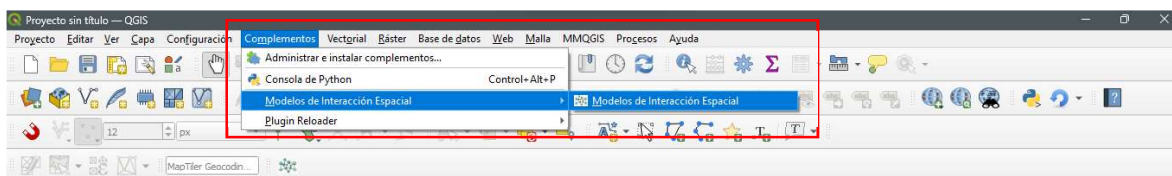


Figura 4.2: Ubicación del *plugin* en el área de complementos, Fuente: Elaboración propia.

Cuando el *plugin* es inicializado, éste es mostrado como una herramienta más y su contenido se divide en 3 secciones (Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5), la primera de ellas hace referencia a la entrada de los archivos vectoriales, la segunda a la selección y uso del modelo de interacción espacial, y la tercera hace referencia a la generación de salidas. Nota: Las secciones se van completando de sección en sección, el usuario no puede ir de una sección a otra sin haber completado todos los datos solicitados en la posición actual.

Es importante mencionar que cada una de las secciones cuenta con un botón de ayuda que, dentro de la documentación de usuario, este es redirigido a dicha sección en específico y aquí el usuario puede revisar los insumos que se necesitan para ejecutar el modelo.

Las entradas (Figura 4.3) tienen el objetivo de recabar la información geográfica con la que los modelos serán ejecutados. Esta sección permite cargar de forma automática las capas que se encuentran en el espacio de trabajo de QGIS, así como también permite la búsqueda de dichos datos a través del explorador de archivos que ofrece el sistema operativo. Cuando las capas son seleccionadas, los *combobox* que hacen referencia al campo ID y campo de población/oferta, son actualizados de forma automática a través de esta previa selección de capas vectoriales. El Botón de ayuda está presente en la parte superior derecha en color azul.

Figura 4.3: Entradas - Interfaz gráfica, Fuente: Elaboración propia.

La segunda sección hacer referencia al uso de las restricciones (Figura 4.4), aquí el usuario elige el tipo de modelo a ejecutar (“restricción en el origen”, “restricción en el destino”, “doblemente restrictivo”), así como las unidades en que será calculada la matriz de distancias, el parámetro de fricción de la distancia y el tipo de filtro acorde a la selección del modelo, donde este filtro tiene tres posibles elecciones como: “mayor que”, “menor que” o “rango”. Nuevamente, el botón de ayuda está presente en la parte superior derecha en color azul.

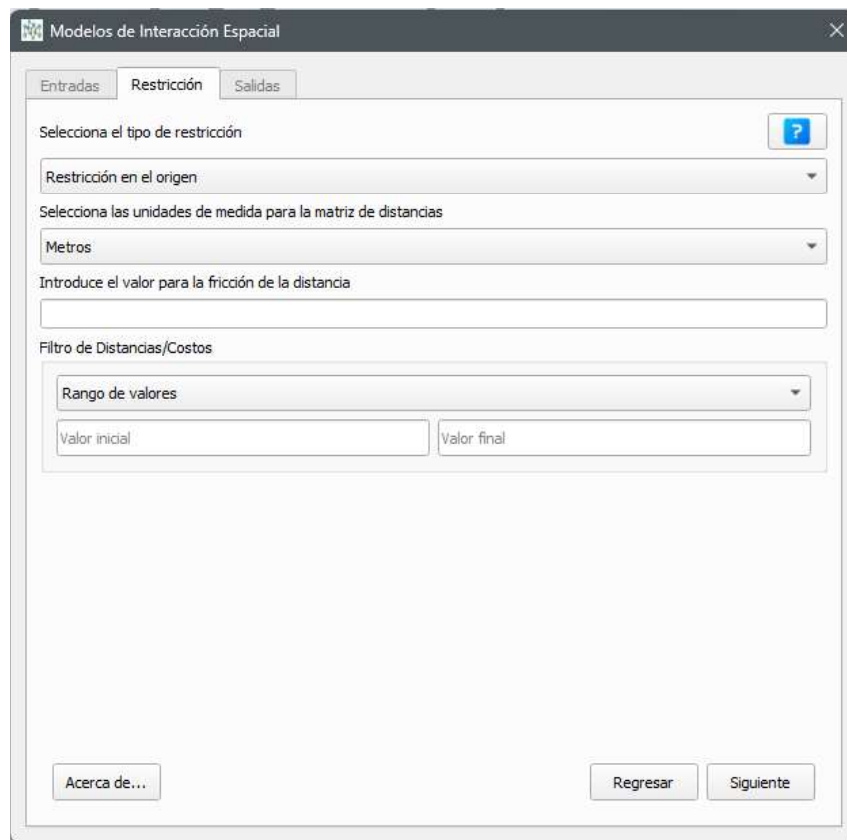


Figura 4.4: Restricciones - Interfaz gráfica, Fuente: Elaboración propia.

La tercera y última sección es donde el usuario elige el formato en que desea guardar/visualizar los resultados de la ejecución (Figura 4.5). La primera “caja de verificación” hace referencia a la creación de archivos temporales, y los consecutivos permiten crear archivos espaciales en formato *SQLITE*, *GeoJSON*, *Geopackage* y en *Shapefile*. También, brinda la posibilidad de guardar únicamente los datos estadísticos sin el componente espacial, es decir, crea hojas de cálculo en distintos formatos como el “xls”, “ods” y “csv”. Como en los casos anteriores, el botón de ayuda está presente en la parte superior derecha en color azul.

Es importante mencionar que, si el usuario desea generar diferentes escenarios de prueba, tiene la opción de asignar prefijos de ejecución para agrupar las capas vectoriales resultantes.

Para guardar la información creada por el modelo, es necesario agregar una ruta de almacenamiento, sin embargo, puede optar por usar la ruta de algún proyecto creado con anterioridad o asignar una ruta manualmente.

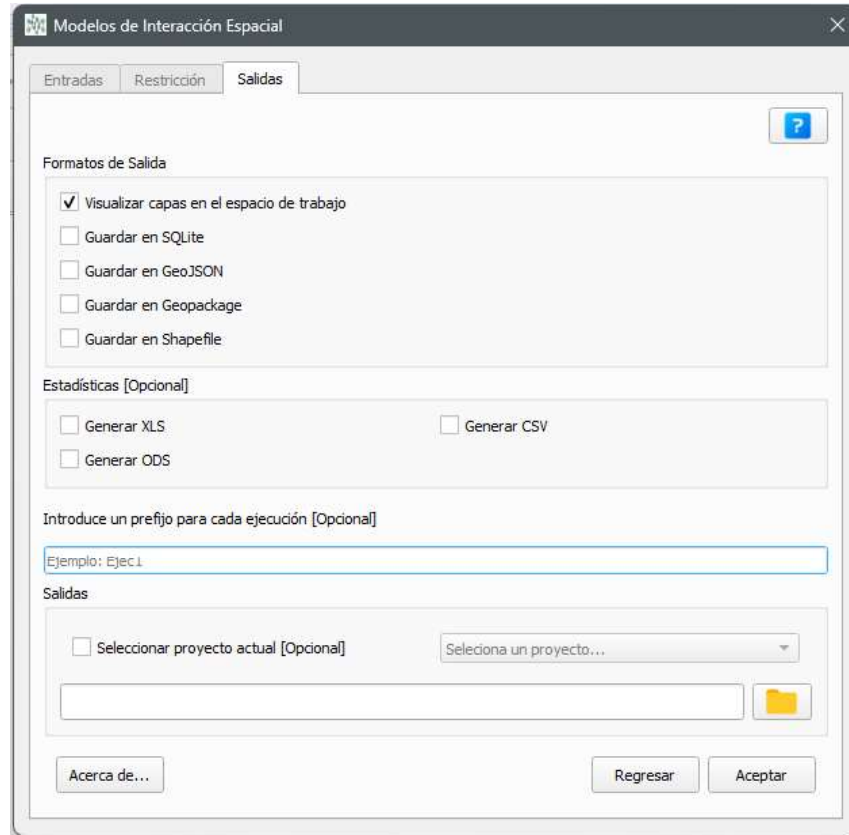


Figura 4.5: Salidas - Interfaz gráfica, Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 Caso de estudio

### 4.2.1 Contextualización

La relevancia de las zonas metropolitanas se fundamenta en su capacidad para ser los epicentros de un dinamismo económico crucial para el país. Esto se deriva de su conexión económico-funcional, impulsada por los flujos de intercambio de insumos, productos y personas. Este dinamismo se destaca aún más en contraste con los cambios en las vocaciones económicas, así como las disparidades sociales y territoriales presentes (Moreno, 2014).

Sin embargo, Moreno (2014) también expresa que, a pesar de representar una significativa oportunidad de desarrollo, las zonas metropolitanas también enfrentan considerables desafíos. En México, la ausencia de una planificación de crecimiento adecuada y ordenada puede agudizar problemas sociales como la desigualdad, la segregación social y territorial, la inseguridad, la escasez de agua, la prestación deficiente y de baja calidad de servicios, la contaminación, la congestión vehicular, la degradación del ambiente y la ingobernabilidad.

Para delimitar una zona metropolitana, al menos en México, SEDATU, CONAPO e INEGI (2018) enuncian que se deben cumplir ciertos criterios, mismos que se muestran de forma resumida en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Criterios para la delimitación de zonas metropolitanas.

Criterios demográficos	Criterios estadísticos y geográficos	Criterios de planeación y política urbana
Conurbación municipal cuya población es de 100 mil habitantes o más.	Su localidad geoestadística principal, de tipo urbana con el mayor número de habitantes está ubicada a no más de 15 km de la ciudad central	Estar incluidos en la declaratoria de zona conurbada o zona metropolitana correspondiente.
Tienen una ciudad de 100 mil habitantes o más con un alto grado de integración física y funcional.	Al menos el 15% de su población de 15 a 70 años residente trabaja en los municipios centrales de la ZM, o el 10% de la población que trabaja reside en los municipios centrales de ésta.	Estar considerados en el respectivo programa de ordenación de zona conurbada o zona metropolitana.
Contiene ciudades de 500 mil habitantes o más o capitales estatales.	Porcentaje de población ocupada de 15 a 70 años en actividades secundarias y terciarias mayor o igual a 75%.	Estar considerados en la Estrategia Nacional de Ordenamiento Territorial y en el Programa Nacional de

Cuentan con ciudades de 200 mil habitantes o más de las franjas fronterizas norte y sur, o las ciudades en las costas.	Por lo menos 20 habitantes por hectárea.	Desarrollo Urbano y Ordenación del Territorio.
--	--	--

*Fuente: Elaboración propia con base en SEDATU, CONAPO e INEGI (2018).*

Garrocho y Campos (2005) describen que la Zona Metropolitana de Toluca (ZMT) no es ajena a este tipo de problemas sociales, políticos y ambientales; los fallos generados por la calidad urbana afectan de manera significativa a la población y a los servicios que se brindan en ésta, la mala planificación urbana provoca que estas características de la ciudad no siempre coincidan con los requisitos del usuario, las posibilidades de movilidad y localización de servicios básicos (salud, educación, transporte, etc.). El actual diseño de las ciudades impone un gran desafío que, al menos en México y América Latina, las vuelve intransitables, peligrosas y muchas de las veces invivibles.

La ZMT (Figura 4.6) está compuesta por 16 municipios, que de acuerdo con CONAPO (2018) son: Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio La Isla, San Mateo Atenco, Temoaya, Tenango del Valle, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec.

La extensión territorial de la ZMT es de aproximadamente 2,412.72  $km^2$ , donde destacan los municipios de Almoloya de Juárez, Toluca y Zinacantepec, con poco más del 50% del total de la zona. Los municipios más pequeños son Chapultepec y Mexicaltzingo. En la periferia se encuentran los municipios de Calimaya, San Antonio La Isla, Almoloya de Juárez, Zinacantepec, Temoaya, Xonacatlán y Otzolotepec (Arce y Sánchez, 2021). Sin embargo, de acuerdo con INEGI (2021) los municipios con mayor población son: Toluca, Metepec y Zinacantepec. Adicionalmente, es importante mencionar que en el municipio de Toluca se localiza la capital del Estado de México.

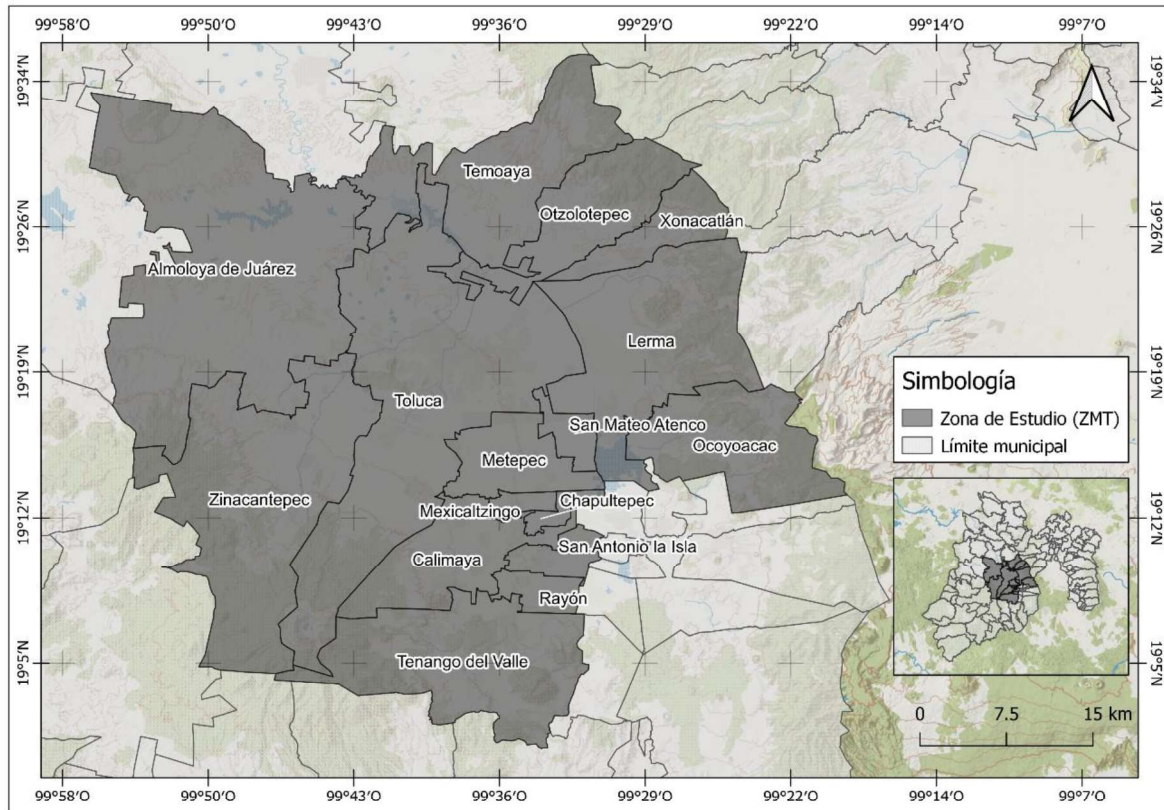


Figura 4.6: Zona Metropolitana de Toluca, Fuente: Elaboración propia.

La ZMT cuenta con un aproximado de 17,626 manzanas urbanas y rurales (Figura 4.7), donde el 6.37% representa a las manzanas rurales y el 93.62% corresponde a las manzanas urbanas. La localización de las manzanas rurales se encuentra principalmente alrededor del centro de la ZMT. La elaboración de la cartografía fue con base en el Marco Geoestadístico del INEGI (2023).



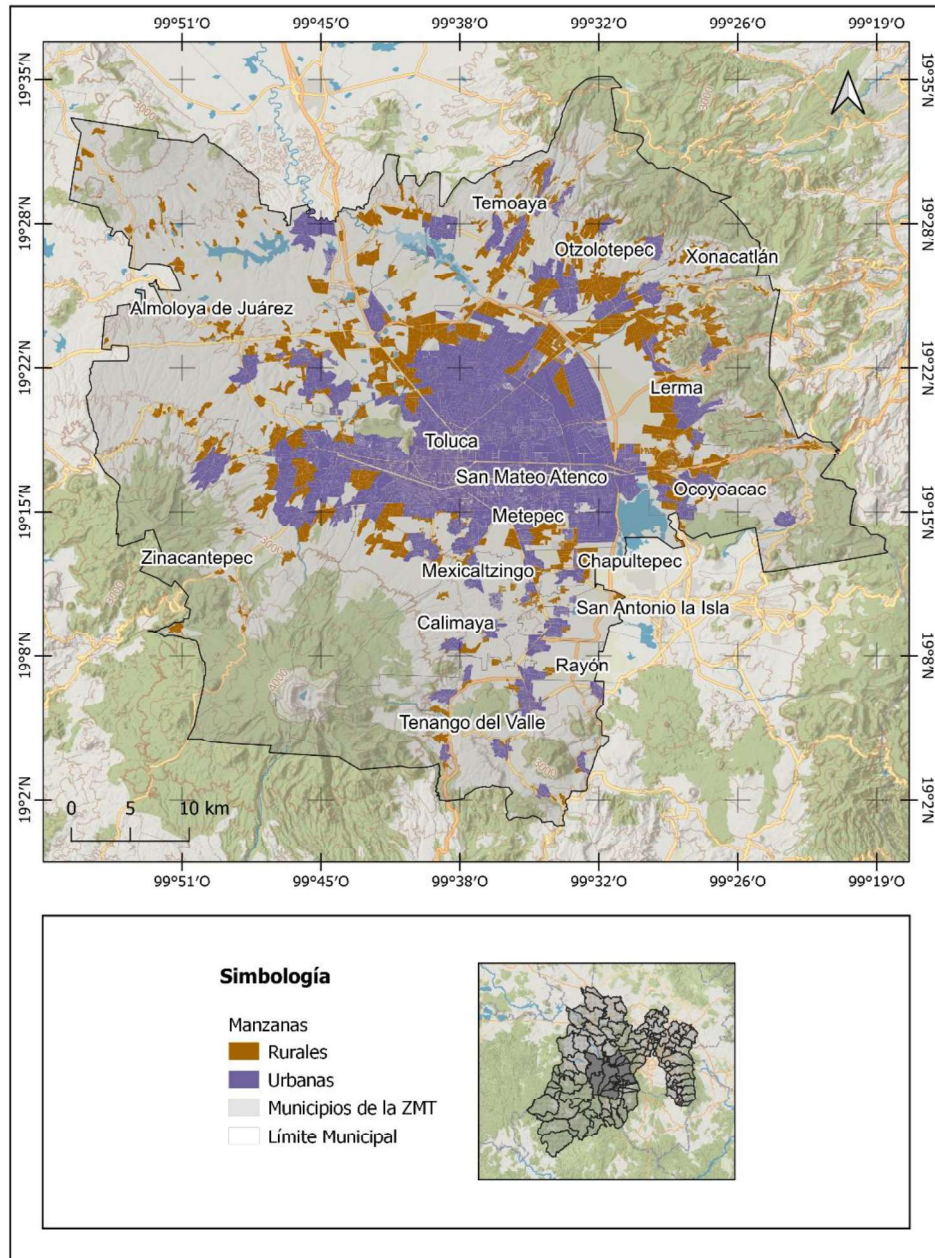


Figura 4.7: Manzanas urbanas y rurales, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2023).

La accesibilidad vial y las redes de carreteras son elementos cruciales para el desarrollo integral de la ZMT, ya que generan un impacto positivo en sectores como la economía, la seguridad, la conectividad y la calidad de vida de las personas. Gracias a Red Nacional de Caminos (2015) con su actualización del año 2020, se pudo clasificar en tres principales niveles: primaria, secundaria y terciaria (Figura 4.8). A excepción de la zona suroeste, la red vial prácticamente cubre la totalidad de la ZMT.

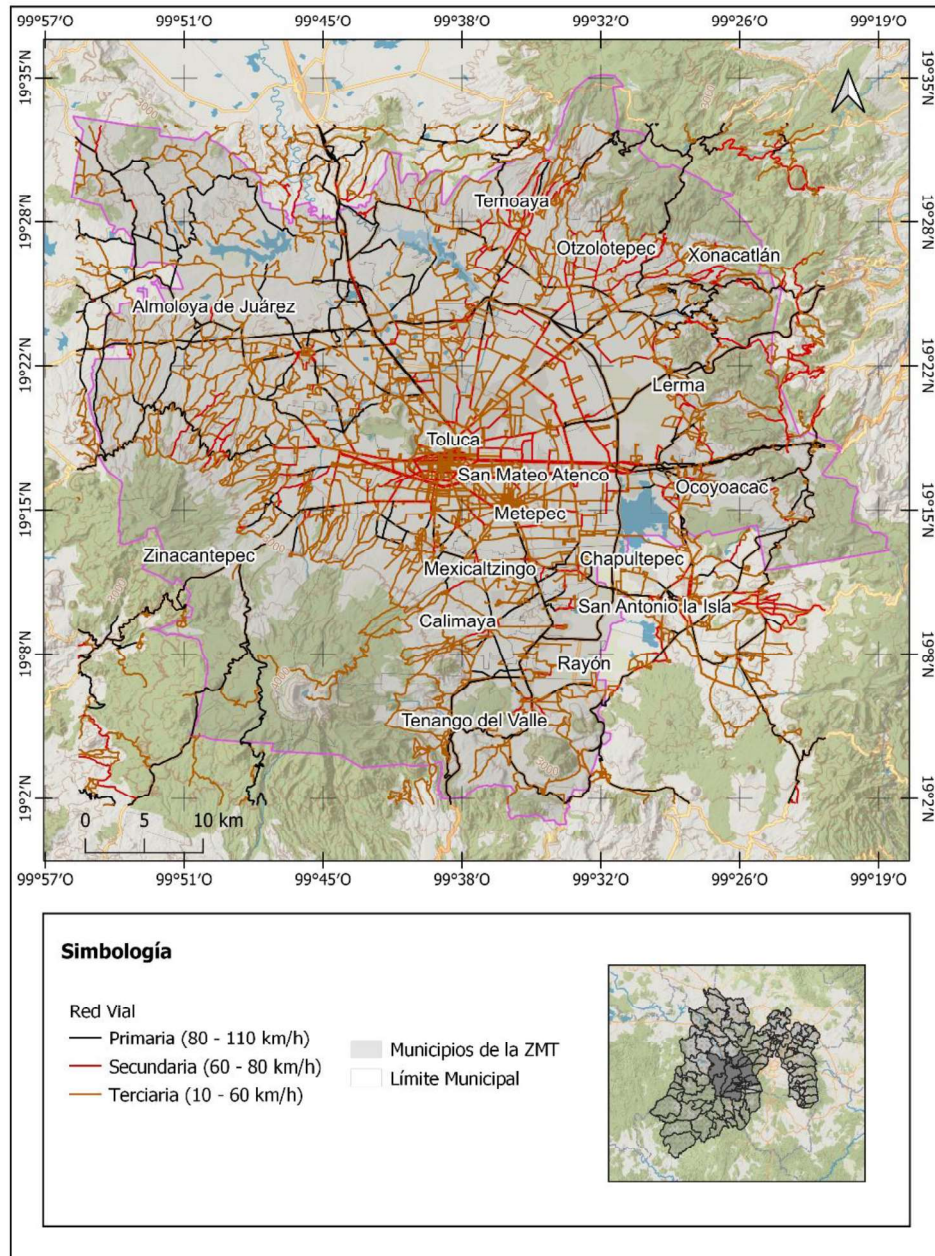


Figura 4.8: Red Vial, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2015).

En la ZMT, de acuerdo con la Integración Territorial (ITER) del INEGI (2021), la distribución de la población femenina es superior a la masculina, la cual representa un 51.45% y 48.50% respectivamente. Los rangos de edad donde predominan los hombres son entre los “0 y 4 años”, “5 a 9 años”, “10 y 14 años” y “15 a 19 años”. La Figura 4.9 muestra la distribución casi equitativa de la población masculina y femenina en la ZMT. El estudio está enfocado en la población de 65 años y más, la cual representa un 7.46% de la población total en la ZMT. Otro punto

importante es que la población actual de la pirámide se encuentra con una forma progresiva, sin embargo, la tendencia marca que, en un tiempo no muy lejano, esta forma cambie a regresiva por la baja tasa de natalidad.

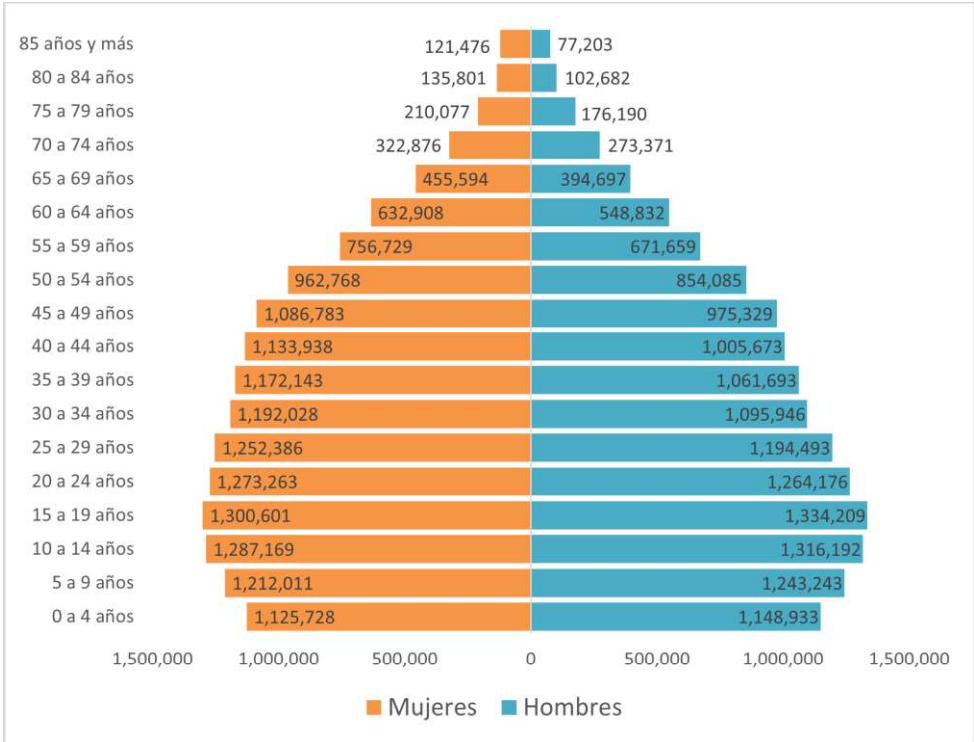


Figura 4.9: Pirámide población, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).

De acuerdo con los datos proporcionados por el Gobierno de México (Data México) (2023), en la ZMT se hablan por lo menos nueve lenguas indígenas y son las siguientes: Tseltal, Chinanteco, Mixe, Mixteco, Totonaco, Zapoteco, Náhuatl, Mazahua y Otomí, donde, las últimas tres tienen una mayor predominancia en la zona y destacando principalmente la lengua indígena Otomí. En la Figura 4.10 se puede apreciar la distribución de la población de 5 años y más que habla alguna lengua indígena, dicha distribución se encuentra en el nivel de desagregación de manzana urbana y rural. Y, de forma general, se aprecia que la población hablante de alguna lengua indígena se encuentra alrededor del centro de la ciudad de Toluca, así como la zona norte y sur de la ZMT.

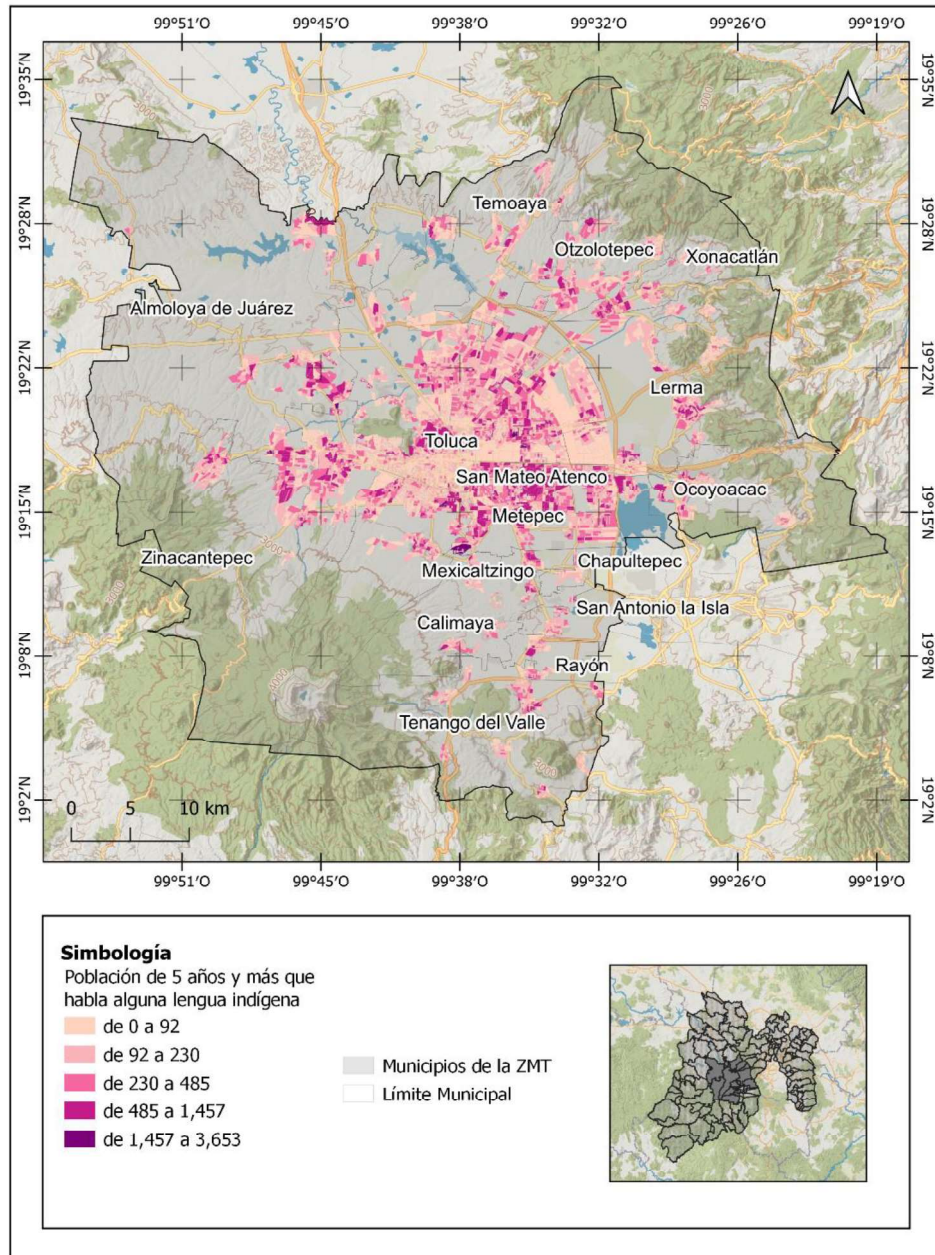


Figura 4.10: Población de 5 años y más que habla alguna lengua indígena, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).

Con base a los datos proporcionados por el Gobierno de México (2021), la ZMT se encuentra en el nivel “Muy bajo” y “Bajo” de marginación por localidad. De manera puntual, los municipios de Almoloya de Juárez y Tenango del Valle son los que representan un nivel “Medio” y “Alto” en sus localidades. En la Figura 4.11 se aprecia esta situación.

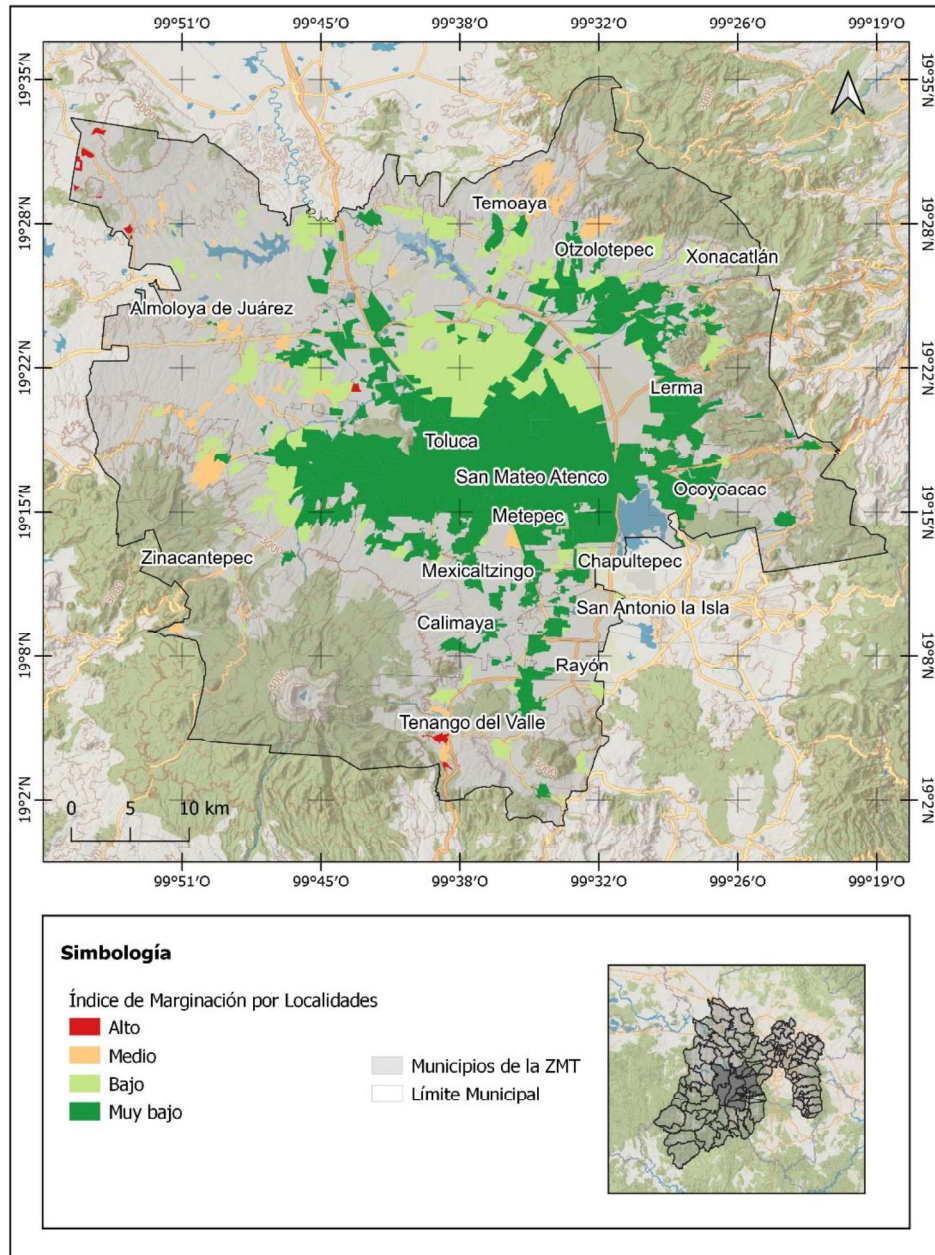


Figura 4.11: Índice de Marginación 2020, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).

La distribución de la población a nivel de manzana es de un máximo de 2,589 habitantes y al igual que la población hablante de alguna lengua indígena, ésta se encuentra distribuida alrededor del centro de la ciudad. Este insumo fue obtenido del Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad (SCITEL) (2021). En la Figura 4.12 se observa la distribución de la población.

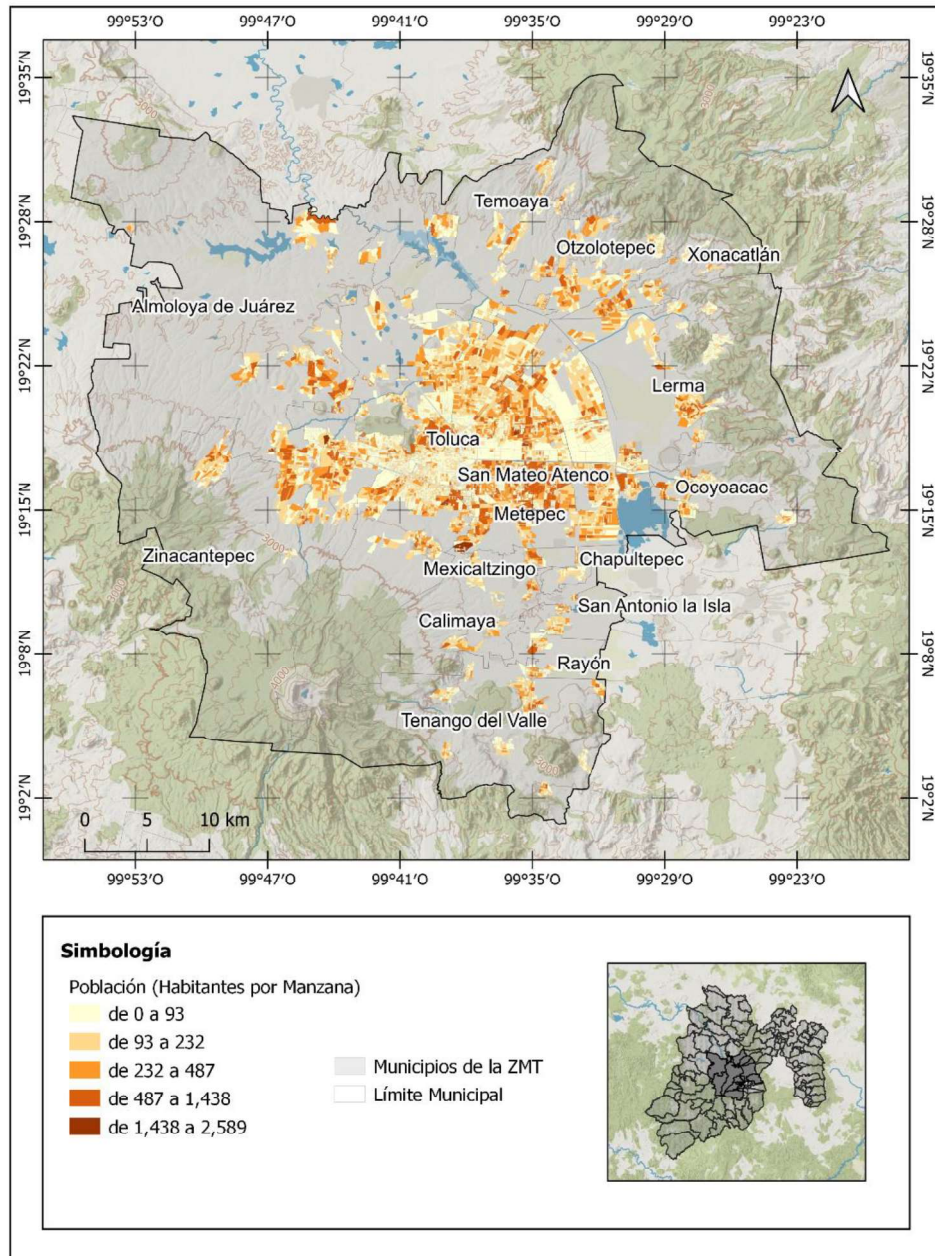


Figura 4.12: Población (Habitantes por Manzana), Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).

La densidad de población de la ZMT abarca un aproximado de 0.41 habitantes por metro cuadrado. Donde, dicha densidad tiene una mayor concentración en los conjuntos habitacionales, tal y como lo muestra la Figura 4.13. Destaca el hecho de que la población está distribuida de una forma más o menos uniforme sobre las manzanas que integran la ZMT.

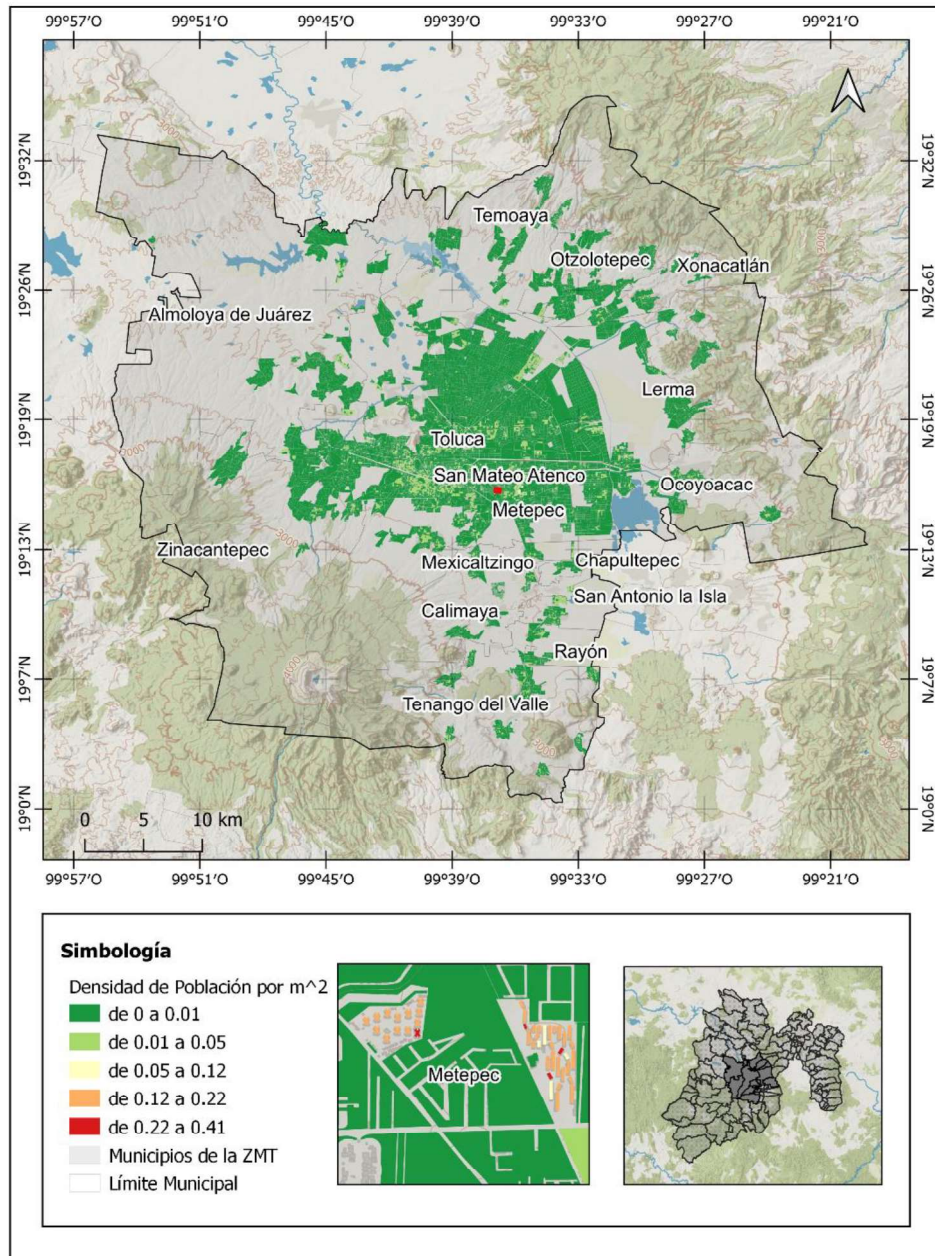


Figura 4.13: Densidad de población, Fuente: Elaboración propia con base en (INEGI, 2021).

La Figura 4.14 muestra la distribución espacial de la oferta y demanda potencial que existe en la ZMT. La oferta potencial pareciera que se encuentra distribuida (en su mayoría) acorde a la demanda que existe en su ubicación, exceptuando la zona norte del municipio de Toluca, donde se puede apreciar que las pocas unidades de salud existentes no compensan la demanda de la región (manzanas con tonalidades rojos y naranjas). La distribución de la demanda concentra sus niveles en “Medio Alto”, “Alto” y “Muy Alto” y se puede resaltar qué,

aquellas manzanas donde se encuentran los niveles “Muy Bajo” pertenece a edificios gubernamentales y servicios, zonas industriales y el aeropuerto de la ciudad de Toluca.

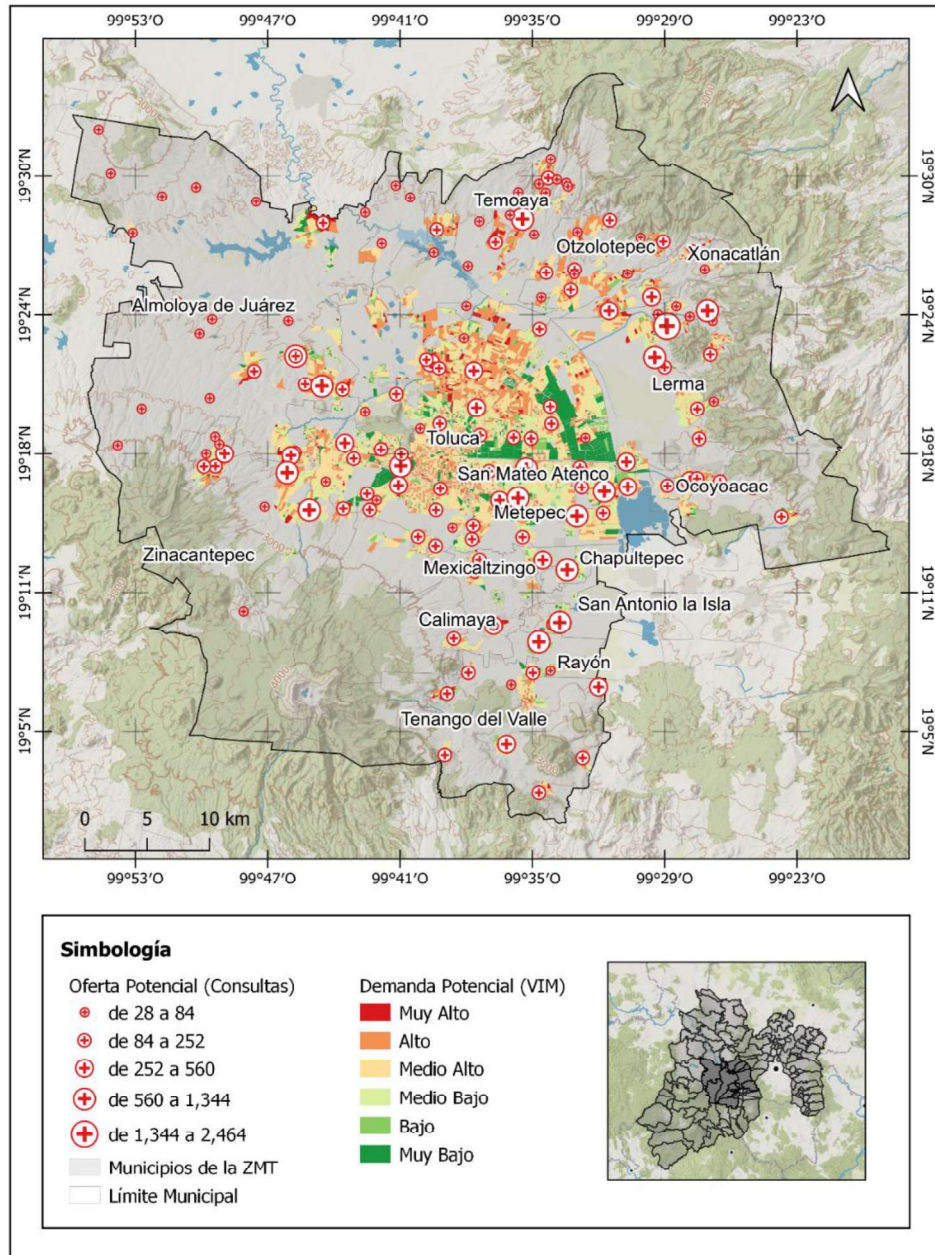


Figura 4.14: Oferta y Demanda potencial, Fuente: Elaboración propia.



### ***4.2.2 Escenarios***

Antes de plantear los escenarios de estudio, es importante mencionar que una parte fundamental de la demanda potencial, en este caso de estudio, es el indagar en la accesibilidad que representan los CLUES hacia la población adulta mayor, que posee alguna dificultad física y que no cuenta con aseguramiento social. Los adultos mayores requieren de por lo menos un medicamento y el consumo de este puede variar en distintas etapas de tiempo que van desde meses, años e incluso por el resto de sus vidas (Garrocho et al., 2020). Uno de los mayores problemas que enfrenta la población adulta mayor son las afectaciones y repercusiones hacia la salud, debido a enfermedades crónicas, discapacidades motrices o mentales, lo que requiere de atención médica y por ende el consumo de medicamentos y cuidados personales (Han Chande, 2012).

Los medicamentos son esenciales para la salud y para la sobrevivencia de las personas, por eso el promover el acceso a estos servicios significa respeto al derecho de la vida y la garantía de poder disfrutar de los beneficios de los avances tecnológicos, así como el reconocimiento del valor de la salud humana (Torres, 2010).

Estos factores influyen de manera significativa a la hora de acercarse a un centro de salud o alguna clínica familiar, ya que la distancia juega un papel de suma importancia (aunado a las complicaciones y afectaciones de las zonas metropolitanas, por lo menos en México). La distancia que propone la SEDESOL (2000) es una distancia de 5 a 15 kilómetros para cada unidad urbana y 1 kilómetro para cada unidad rural. Al realizar este análisis se propuso una distancia máxima de 3 kilómetros (que se obtuvo de promediar la distancia mínima de las unidades urbanas y la distancia máxima de las unidades rurales). Es importante mencionar que esta distancia se considera razonable para que la mayoría de las personas puedan acceder a los servicios de salud de manera relativamente fácil, según su forma de transporte básico. De acuerdo con Rojas y Velázquez (2017) la distancia adecuada debe de ir desde los 2 hasta los 5 kilómetros.

La población objetivo se determinó en primera instancia a través de la selección de tres variables que permitieron calcular el Valor Índice Medio (VIM), estas variables ayudaron identificar a la población adulta mayor que tiene alguna discapacidad física y que no cuenta con algún seguro médico. Una vez calculado, normalizado y reclasificado los valores resultantes del VIM, se decidió potencializar la demanda que existía en cada una de las manzanas de la zona de estudio. Es decir, al buscar evaluar la población objetivo se utilizó el valor resultante de la reclasificación del VIM para multiplicar por la población actual de cada manzana y de esta forma obtener la demanda potencial. Esta nueva variable incluye a la población total multiplicado por la prioridad de atención de los adultos mayores.

Es importante mencionar que cada una de las figuras temáticas mostradas con anterioridad y a continuación, se pueden interactuar con ellas a través de un geovisor que está alojado en un servicio gratuito. La liga de acceso es la siguiente: [Geovisor - Modelos de interacción espacial](#).

Una vez obtenida las variables de demanda y oferta potencial, se ejecutaron los modelos: restricción en el origen y restricción en el destino.

### RESTRICCIÓN EN EL ORIGEN:

Los Modelos de Interacción Espacial con restricción en el origen tienen como característica principal conocer la magnitud de saturación que cada una de las unidades de servicio pueden ofrecer (potenciales y/o carentes) respecto a los flujos totales que son emitidos desde cada origen. La Tabla 4.2 muestra el comportamiento que tiene este modelo en la matriz de interacción espacial.

Tabla 4.2: Comportamiento del modelo restricción en el origen, Fuente: Elaboración propia.

	Servicio 1	Servicio 2	Servicio 3	Flujos totales
Demanda 1	Interacción 1,1	Interacción 1,2	Interacción 1,3	Total demanda 1
Demanda 2	Interacción 2,1	Interacción 2,2	Interacción 2,3	Total demanda 2
Demanda 3	Interacción 3,1	Interacción 3,2	Interacción 3,3	Total demanda 3
	Saturación 1 (¿?)	Saturación 2 (¿?)	Saturación 3 (¿?)	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la relación que existe respecto a la formulación matemática y las variables utilizadas para los escenarios que corresponden a este modelo.

Formula general:

$$O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}$$

Que, matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = A_i O_i W_j d_{ij}^{-b}$$

Factor de balance:

$$A_i = \frac{1}{\sum_i W_j d_{ij}^{-b}}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos.
- $O_i$ : Demanda potencial previamente calculada.
- $W_j$ : Oferta potencial previamente calculada.
- $A_i$ : Factor de balance.
- $d_{ij}$ : Distancia que existe entre la demanda y la oferta potencial.
- $b$ : Fricción de distancia con valores de: 0, 0.5 y 1.
- Además, de la aplicación de un filtro de una distancia menor a 3,000 metros.

Es importante recordar que la fricción de la distancia funge como una probabilidad o grado de facilidad para llegar a una oportunidad en función de la distancia (Rodrigue et al., 2013). Este valor oscila entre 0 y 1, donde 1 significa que la oportunidad de acceso es muy alta (100%) lo que se traduce como “muy fácil de llegar”, el valor 0.5 (probabilidad del 50%) representa que la distancia máxima a la oportunidad tiene una influencia significativa. Y, finalmente el valor 0 indica que el

acceso es muy limitado “casi imposible de llegar” (Fotheringham y O’Kelly, 1989). Además, este concepto se aplica en ambos modelos.

- Escenario RO1 - Fricción de distancia = 0: En la Figura 4.15 se puede observar que los servicios con nula accesibilidad se encuentran en el lado izquierdo de la zona de estudio, principalmente el municipio de Almoloya de Juárez y es el que concentra la mayoría de estos CLUES. Los servicios con mayor accesibilidad apenas alcanzan un 13.92% y estos se concentran principalmente en el centro de la zona de estudio. Mostrando que estas unidades de servicio están distribuidas conforme a la población que se encuentra en dichas zonas (con excepción de las zonas comerciales e industriales).
- Escenario RO2 - Fricción de distancia = 0.5: La Figura 4.16 muestra que, al realizar un ajuste en la fricción de distancia, específicamente de 0.5, éste no afecta para nada el modelo y los valores resultantes son totalmente iguales a los del escenario RO1.
- Escenario RO3 - Fricción de distancia = 1: La Figura 4.17 muestra que, al realizar el ajuste en la fricción de distancia con valor de 1, existe una redistribución de la accesibilidad en los servicios centrales de la zona de estudio. Estos CLUES con mayor accesibilidad alcanzaron un total de 14.55% y teniendo un incremento del 0.63% respecto a los escenarios RO1 y RO2. En este escenario resalta nuevamente que los CLUES con accesibilidad nula se encuentran fuera del radio de cobertura ideal un análisis a nivel de desagregación por manzanas (los resultados pueden variar por el tipo de nivel de desagregación, por ejemplo, en el caso de usar desagregación por localidades).

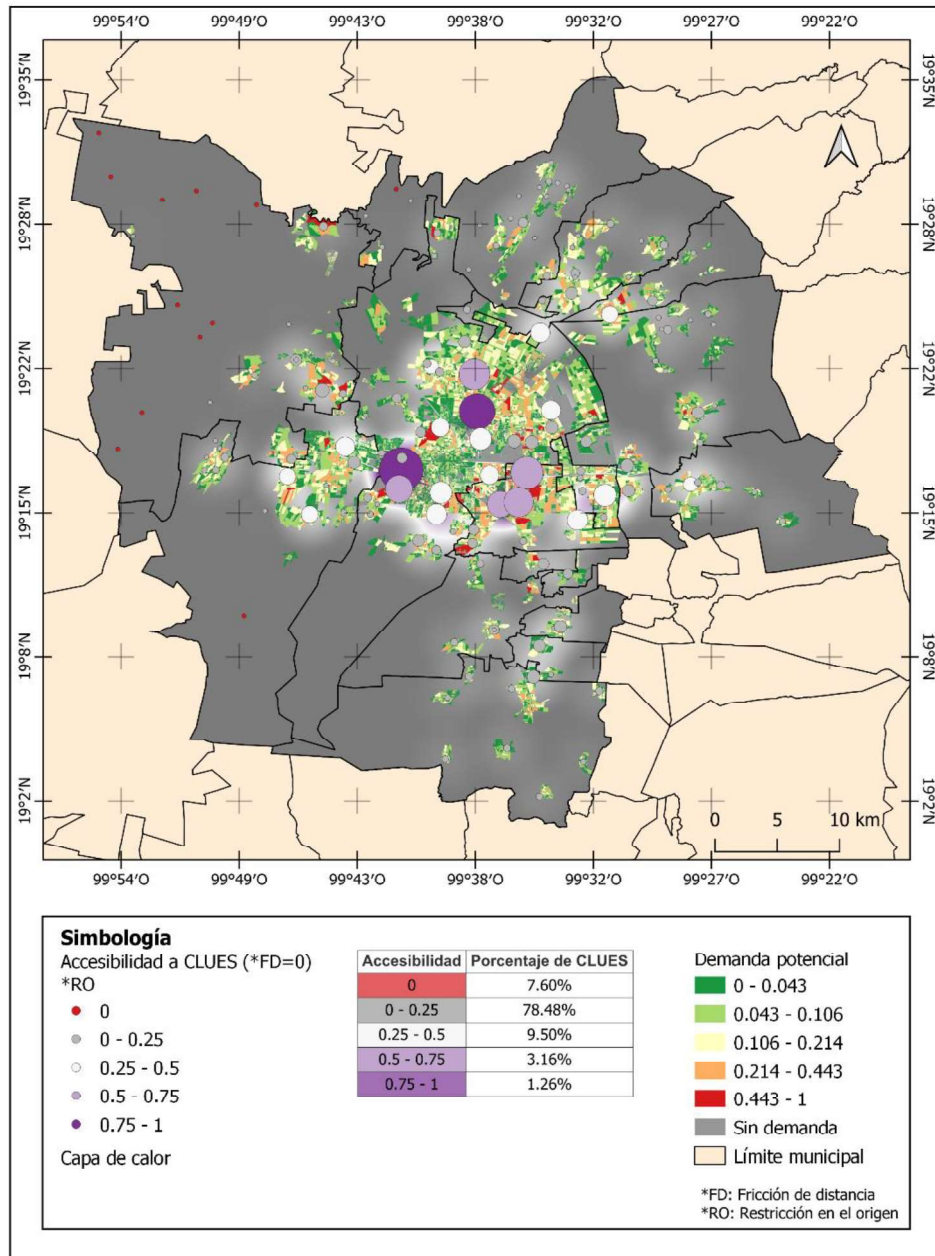


Figura 4.15: Escenario RO1 - Fricción de distancia = 0, Fuente: Elaboración propia.

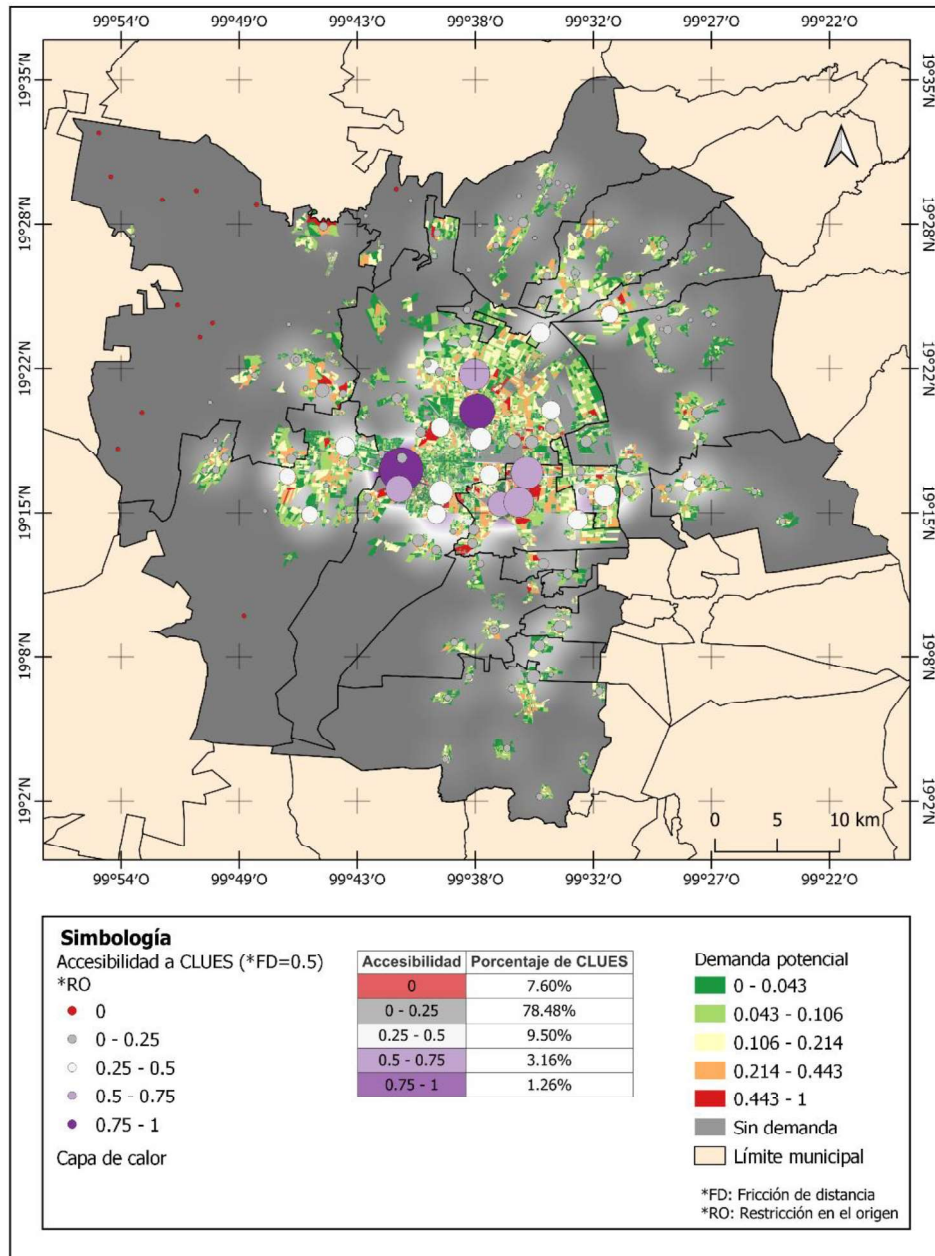


Figura 4.16: Escenario RO2 - Fricción de distancia = 0.5, Fuente: Elaboración propia.

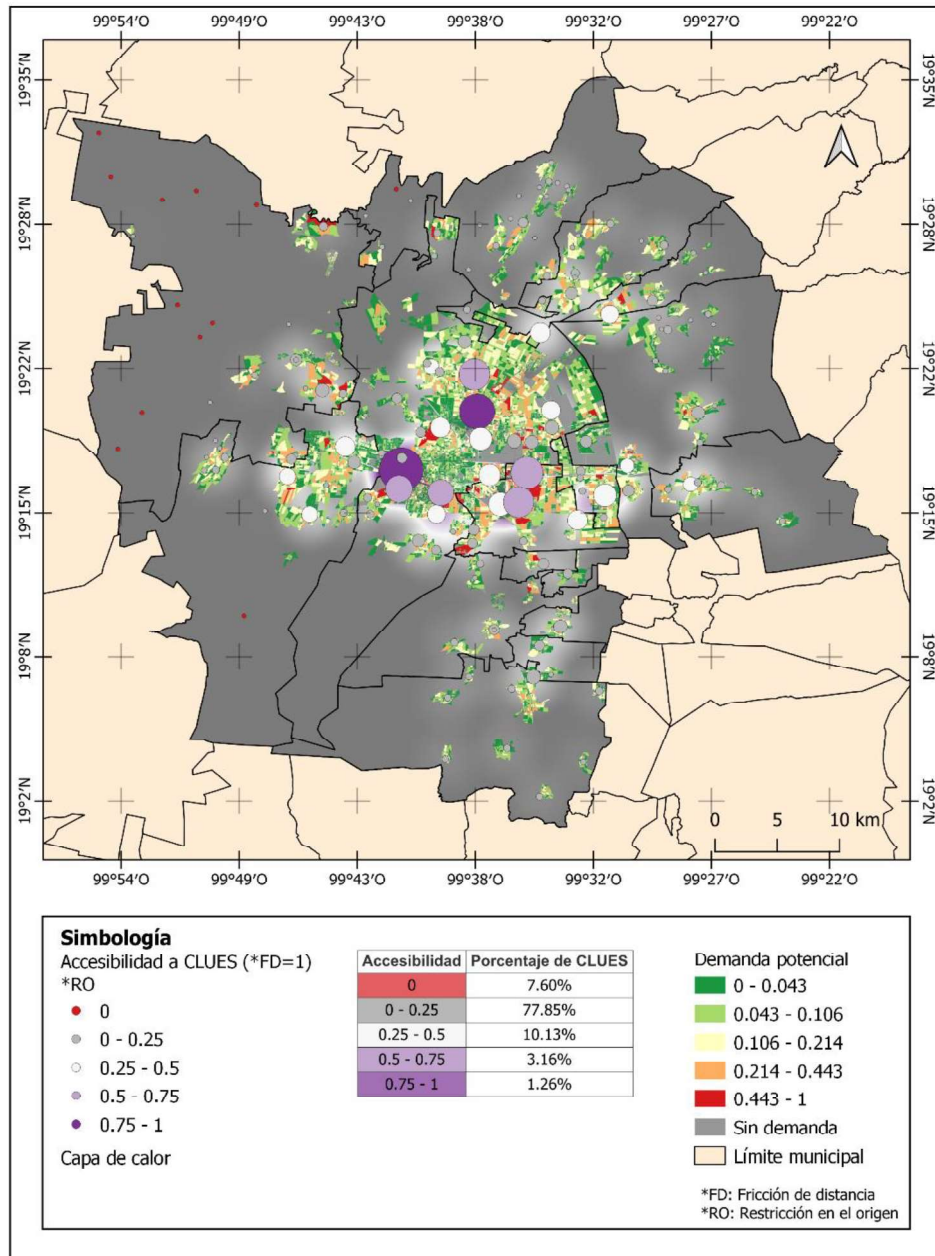


Figura 4.17: Escenario RO3 - Fricción de distancia = 1, Fuente: Elaboración propia.

## RESTRICCIÓN EN EL DESTINO:

Los Modelos de Interacción Espacial con restricción en el destino tienen como característica principal conocer los flujos emitidos de cada lugar de origen respecto a la disponibilidad total que ofrecen las diferentes unidades de servicio. La Tabla 4.3 muestra el comportamiento que tiene este modelo en la matriz de interacción espacial.

Tabla 4.3: Comportamiento del modelo restricción en el destino.

	Servicio 1	Servicio 2	Servicio 3	Flujos totales
Demanda 1	Interacción 1,1	Interacción 1,2	Interacción 1,3	Demanda 1 (¿?)
Demanda 2	Interacción 2,1	Interacción 2,2	Interacción 2,3	Demanda 2 (¿?)
Demanda 3	Interacción 3,1	Interacción 3,2	Interacción 3,3	Demanda 3 (¿?)
	Total disp. 1	Total disp. 2	Total disp. 3	

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra la relación que existe respecto a la formulación y las variables utilizadas para los escenarios que corresponden a este modelo.

Formula general:

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij}$$

Que, matemáticamente se representa de la siguiente forma:

$$T_{ij} = B_j D_j W_j d_{ij}^{-b}$$

Factor de balance:

$$B_j = \frac{1}{\sum_j W_j d_{ij}^{-b}}$$

Donde:

- $T_{ij}$ : Interacción entre orígenes y destinos.



- $D_j$ : Oferta potencial previamente calculada.
- $W_j$ : Demanda potencial previamente calculada.
- $B_j$ : Factor de balance.
- $d_{ij}$ : Distancia que existe entre la demanda y la oferta potencial.
- $b$ : Fricción de distancia con valores de: 0, 0.5 y 1.

Al no agregar un filtro a los flujos emitidos por cada lugar de origen, esto permitió identificar como se distribuía la población en relación con la capacidad total brindada por los servicios de salud. Se tiene un total de 158 CLUES con una capacidad total de 34328 consultas potenciales.

- Escenario RD1 - Fricción de distancia = 0: La Figura 4.18 muestra una distribución tentativamente equilibrada en toda la zona de estudio, es decir, se observa un mejor predominio de los valores en tonalidad verde oscuro acompañado de los tonos verde claro, amarillo y naranja.
- Escenario RD2 - Fricción de distancia = 0.5: En la Figura 4.19 se puede observar un ligero aumento respecto a los valores de los porcentajes correspondientes a los cinco rangos de clasificación. Esta nueva distribución de los flujos tiene mayor presencia en el lado derecho de la zona de estudio (predominancia en tonalidades verdes).
- Escenario RD3 - Fricción de distancia = 1: La Figura 4.20 presenta un cambio ligeramente distinto a los escenarios previos. Se aprecia una mayor distribución del rango medio (tono amarillo) en la parte central de la zona de estudio a pesar de concentrar un porcentaje menor de polígonos. También, este rango tiene un mayor impacto en el lado derecho de la zona de estudio, algo similar a lo que sucedió en el escenario RD2, sin embargo, la tonalidad que tiene mayor impacto es la amarilla.

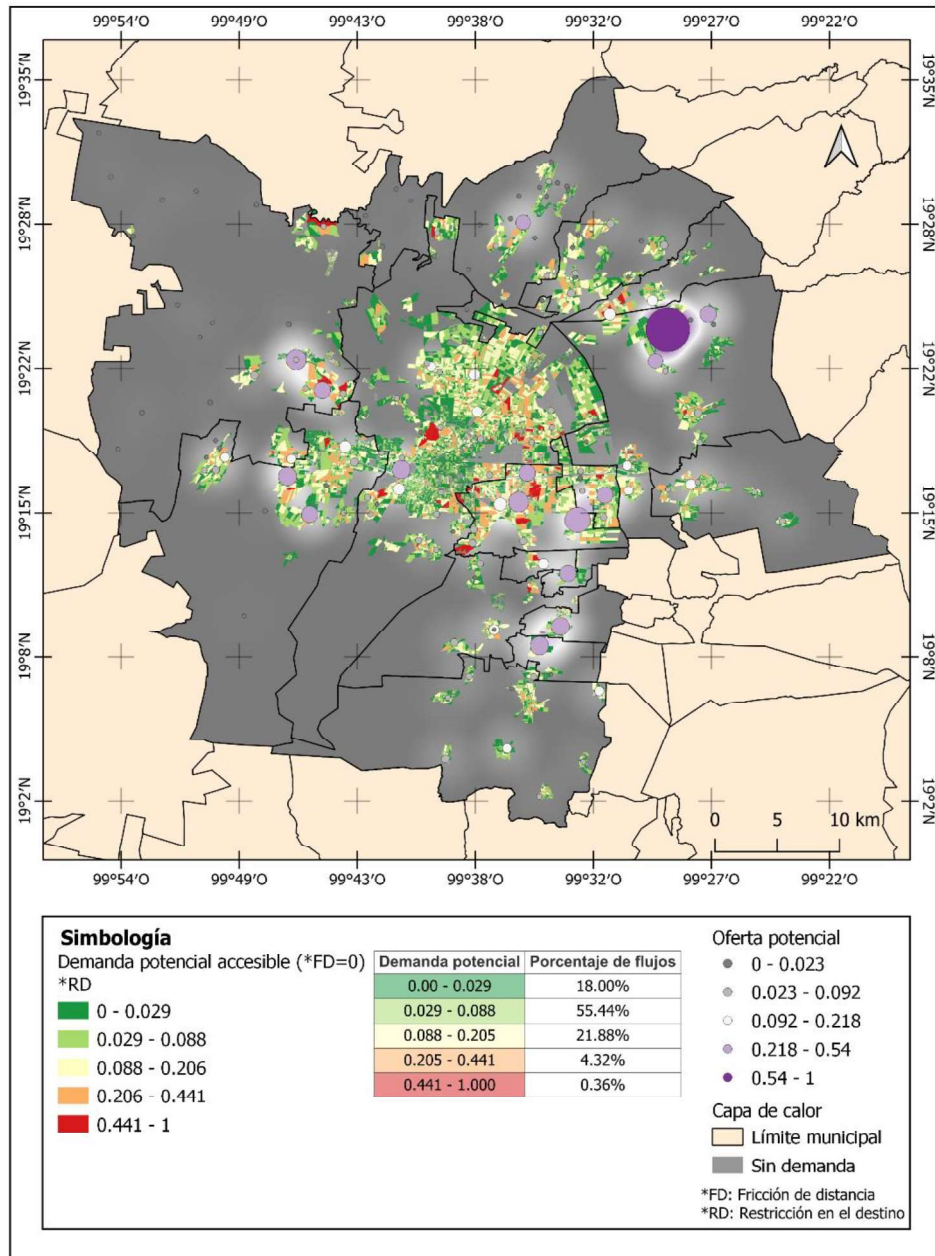


Figura 4.18: Escenario RD1 - Fricción de distancia = 0, Fuente: Elaboración propia.

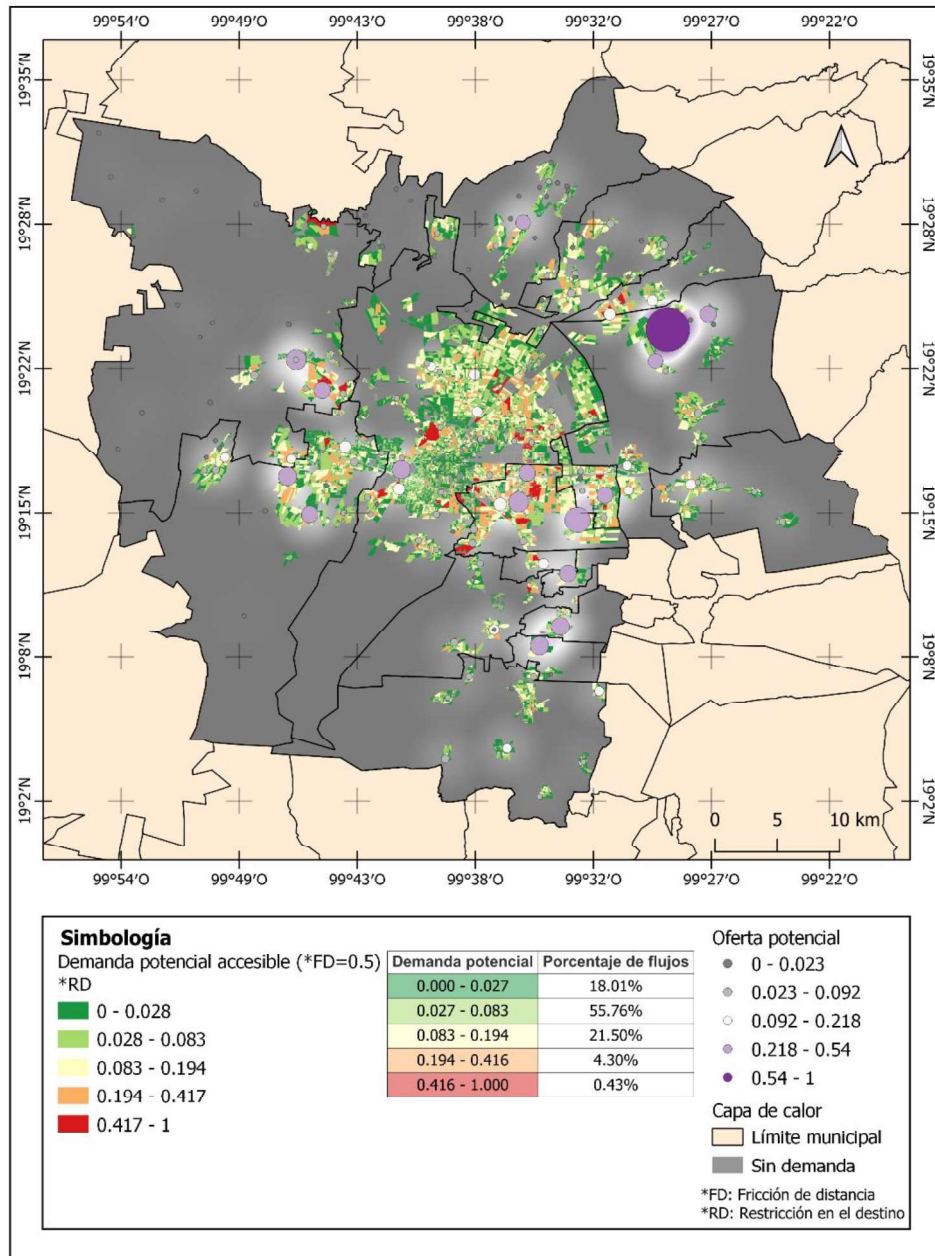


Figura 4.19: Escenario RD2 - Fricción de distancia = 0.5, Fuente: Elaboración propia.

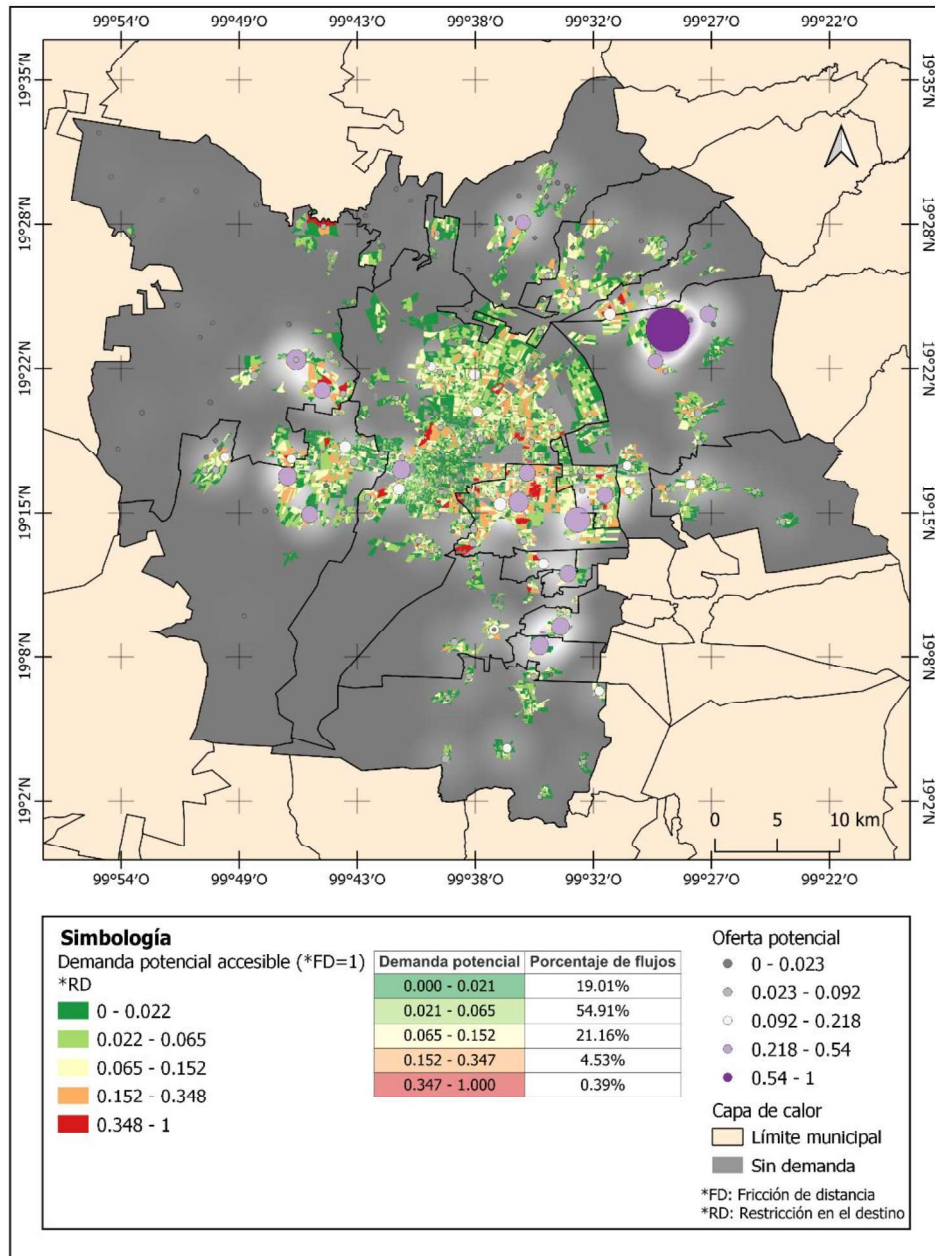


Figura 4.20: Escenario RD3 - Fricción de distancia = 1, Fuente: Elaboración propia.

## ***Resumen***

En este apartado se presentaron los resultados, los cuales se dividieron en dos apartados importantes.

El primero de ellos abarca los resultados de la construcción de la herramienta, dónde se pueden visualizar las diferentes secciones que contiene la interfaz gráfica, aquí el usuario va introduciendo los insumos necesarios para que sea ejecutada, estas secciones son: entradas (leer/seleccionar los archivos vectoriales), restricción (elección del modelo a ejecutar) y salidas (formatos y ruta para almacenar la información).

El segundo apartado hace referencia a la aplicación de la herramienta en un caso de estudio. Se contextualizo toda la zona de estudio y posteriormente se aplicaron los modelos con restricción en el origen y restricción en el destino. La aplicación de los modelos se basó en usar 3 escenarios de estudio para identificar el comportamiento de estos modelos.

## Capítulo 5: Discusión

En esta sección se abordarán distintos temas de suma importancia ya que se profundiza los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo de investigación. La discusión se dividirá en dos partes importantes: la primera que hace referencia a la construcción del plugin y la segunda abarca la aplicación del caso de estudio. Al tratar estos puntos, se busca identificar nuevas líneas de investigación que permitan mejorar su relevancia en el ámbito académico y aplicado.

### PLUGIN

Al utilizar la arquitectura MVC (Modelo-Vista-Controlador), el mantenimiento del *plugin* es fácil, ya que al realizar cambios no se ven afectadas otras partes del sistema, además la detección de errores y correcciones son rápidas gracias al desarrollo modular (Alfaro, 2019). Igualmente, entre otras de las bondades que ofrece esta arquitectura es la facilidad para modificar la interfaz gráfica sin afectar el resto de la lógica de la aplicación.

El *plugin* al estar bajo el licenciamiento *OpenSource* tiene las libertades de que los usuarios expertos pueden estudiar y mejorar el software, y distribuir copias, siempre y cuando se conserven los derechos del autor principal. Al utilizar este tipo de licenciamiento, se pueden mejorar la calidad del software y adaptarlo a las nuevas versiones de QGIS. Este proceso de mejora es el que sufre QGIS, ya que los usuarios son los encargados de brindar soporte a este SIG y distribuir dichas copias a toda la comunidad. Aunado a esto, se requiere un constante mantenimiento para que el *plugin* pueda aprovechar las máximas bondades de QGIS y mejorar la compatibilidad con las nuevas versiones del software (QGIS, 2014).

Además, otro ejemplo muy claro del crecimiento que ha tenido las herramientas en QGIS, es la herramienta *processing* que en las primeras versiones de QGIS inició como un *plugin*, sin embargo, gracias al potencial que ha tenido este se ha convertido en una herramienta incluida ya en las herramientas base. El autor principal es Víctor Olaya y la herramienta *processing* la ha denominado como “*Spatial data processing framework for QGIS*”. En un artículo describe toda la

documentación necesaria para las personas que desean colaborar en este proyecto (Graser y Olaya, 2015).

Gracias a la automatización de los modelos de interacción espacial permite agregar nuevas herramientas y funcionalidades que no están presentes en la versión base de QGIS y mucho menos están presentes en el catálogo de complementos. Haciendo una comparación con las herramientas que tiene un acercamiento a los modelos de interacción espacial en QGIS, el actual desarrollo realiza la creación de líneas de conectividad entre puntos como lo hace *FlowMapper* (Cem GULLUOGLU, 2016) y extiende la formulación matemática de los modelos respecto a la herramienta *Gravity Model of Spatial Interaction in QGIS* (Marshall, 2021), donde utiliza la matriz básica de interacción espacial. Hay que recordar que el *plugin* desarrollado en esta investigación realiza ambas tareas y añade la creación de capas temáticas con la finalidad de simplificar el proceso de toma de decisiones.

Hablando en cuestión de ejecución, y si consideran los requisitos mínimos computacionales (Tabla 3.1), el *plugin* realiza cálculos “rápidos” cuando se trata de un conjunto de datos pequeños, sin embargo, a medida que el volumen de datos va aumentando, la ejecución comienza a volverse lenta y requiere un mayor consumo de recursos computacionales. Al realizar esta demanda de recursos, el proceso se vuelve lento y los tiempos de respuesta se vuelven prolongados.

## **CASO DE ESTUDIO**

El uso de escenarios de estudio permite explorar el comportamiento y sensibilidad del modelo respecto a las variables que se utilizan en la evaluación, dando pauta a anticipar o preparar posibles estrategias para la toma de decisiones para el futuro, buscando las mejores alternativas de solución, oportunidades emergentes y las complicaciones que pueden surgir al ajustar los datos.

El nivel de sensibilidad de la ejecución parte principalmente de la variable de fricción de distancia (para ambos modelos), esta variable puede tener un impacto significativo en la ejecución cuando se realiza una comparación con los valores de 0 y 1. Además, cuando se realiza la ejecución del modelo con restricción en el

origen, al mezclar el filtro de distancia y la fricción, esta ejecución tendrá un impacto notable en los resultados.

Es importante mencionar que el nivel de desagregación en los datos usados para la ejecución juega un papel primordial. Entre más pequeño es el nivel de desagregación, el nivel de análisis es más detallado permitiendo identificar patrones espaciales, disparidades que se presentan en la zona de estudio y posible relación entre las variables utilizadas. Finalmente, estos niveles identifican las áreas de éxito, oportunidad y desafíos presentes.

Analizando los resultados obtenidos por los modelos de interacción espacial con restricción en el origen y restricción en el destino para determinar cuál es el mejor para proponer/aumentar la disponibilidad de servicio, es necesario conocer las ventajas y desventajas de estos. Ambos muestran los flujos espaciales para encontrar los patrones de distribución que existen entre orígenes y destinos, reflejan el impacto que tiene la infraestructura del servicio respecto a la población demandante (para este caso), simulan cómo se ve afectada la disponibilidad del servicio y cómo la población interactúa con el servicio. Sin embargo, entre las desventajas más notables son la sensibilidad que existe entre los parámetros utilizados en la formulación, la complejidad de interpretar resultados cuando la escala y el volumen de datos aumenta, así como el consumo de recursos computacionales que demanda el cálculo de estos.

Tomando como referencia las ventajas y desventajas de estos modelos, hablando específicamente del modelo con restricción en el origen, este modelo es el que se adapta de mejor forma para identificar como interactúa la población demandante respecto a la oferta potencial de los servicios de salud en la Zona Metropolitana de Toluca, para ello es necesario contextualizar el cambio que ha presentado la zona de estudio en estos últimos años.

Al realizar un análisis de las múltiples series de vegetación y uso de suelo (desde la I hasta las VII) que ofrece CONABIO (2008) en su geoportal, la tendencia de crecimiento urbano hasta la serie V se concentraba únicamente en el municipio de Toluca y en el área colindante con el municipio de Lerma. Para la serie VI (año



2016), el crecimiento urbano fue exponencial principalmente alrededor del municipio de Toluca, destacando los municipios de Zinacantepec, Almoloya de Juárez, Lerma, Ocotlán, Ocoyoacac, los municipios del sur y por supuesto Toluca (hacia el norte). Finalmente, para la última serie (VII, año 2018), el crecimiento urbano se ha dado hacia el oeste y este donde se involucran los municipios de Zinacantepec, Lerma y Ocoyoacac. Esto nos indica que el crecimiento urbano se está desplazando hacia alrededor del municipio de Toluca. Este crecimiento lo reafirma Jiménez López et al. (2021), donde expresa que el municipio de Toluca está rodeada de asentamientos que al día hoy están aislados de la mancha urbana, y su expansión los incorporaría al área urbana continua, lo que incrementará notablemente su extensión.

Para una propuesta de solución ante la crisis de accesibilidad que se tiene hacia los CLUES, el modelo con restricción en el origen y específicamente con fricción de distancia igual a 1, obtuvo la mayor saturación de cada una de las unidades de servicio respecto a la población potencial actual (2020) y siguiendo el crecimiento dinámico que esta sufriendo la Zona Metropolitana de Toluca, desde una perspectiva espacial, lo recomendable sería maximizar la oferta potencial (aumentar el número de médicos = mayor número de consultas) de aquellos CLUES que se encuentran alrededor del municipio de Toluca, principalmente en los municipios de Lerma, Almoloya de Juárez, Calimaya, Ocoyoacac y Zinacantepec.

Contrastando los resultados obtenidos respecto a otras investigaciones que tienen en común la accesibilidad hacia los servicios de salud, proponen el uso de modelos que complementen los resultados, tal es el caso de modelos de localización-asignación (en su variante COBEMAX) propuesta por Santana (2016) donde se busca maximizar la cobertura de los servicios de salud en los municipios de Lerma, Xonacatlán, Chapultepec, Almoloya de Juárez, Calimaya, Ocotlán, Ocoyoacac, Metepec, Zinacantepec y San Mateo Atenco. Por otro lado, Garrocho (1988) ya proponía colocar unidades médicas (consulta general) en los municipios de Xonacatlán, Lerma y Zinacantepec.

Santana et al. (2015) afirman que la localización de los servicios de salud en la ZMT presenta desigualdades tanto en las localidades urbanas como rurales y la mayoría de los servicios (con mayor capacidad) se encuentran en el centro del municipio de Toluca y esto es claro ya que el principal crecimiento partió del centro de este municipio y en la actualidad la población ha ido migrando hacia las orillas, dejando al centro del municipio como un lugar que concentra únicamente servicios (desde públicos, privados y gubernamentales).

### ***Resumen***

En este capítulo se presentaron distintos puntos de gran importancia para profundizar los resultados que se obtuvieron durante la construcción del *plugin* y las implicaciones bajo la arquitectura de desarrollo, la conexión con QGIS y su licenciamiento. Además, se puntualizó el caso de estudio, donde se trataron temas como: la sensibilidad del modelo, la aplicación del caso de estudio y su comparación con otras aplicaciones similares, la calidad de los datos en cuanto a nivel de desagregación y el comportamiento que ha tenido la ZMT en los últimos años para colocar/maximizar la oferta potencial de los CLUES.

## Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

Se cumplió con el objetivo principal de este trabajo de investigación, pues se realizó la implementación de los modelos de interacción espacial a través de un *plugin* con vinculación directa al sistema de información geográfica QGIS y a los sistemas operativos (el *plugin* funcionó correctamente en los sistemas operativos de Linux y Windows), dicho *plugin* permitió evaluar a través de dos modelos la relación que existe entre la demanda y la oferta potencial de la Zona Metropolitana de Toluca. El *plugin* se ha puesto a disposición a los usuarios por medio de un repositorio público en la plataforma de [GitHub](#).

Contrastando los objetivos particulares, se tiene lo siguiente:

Del primer objetivo particular, se realizó el levantamiento de requisitos para desarrollar la implementación de los modelos de interacción espacial. En estos requisitos se evaluaron los modelos desde la perspectiva de selección de variables, tipo de variables, tipos de datos vectoriales, formatos, etc. Dentro de esta sección también se evaluaron los requisitos del sistema operativo y del propio SIG.

El segundo objetivo particular se dio solución a través de Proceso Unificado, ya que gracias a UML se construyeron los diagramas que permiten la implementación de los modelos de interacción espacial. Dentro de los diagramas desarrollados existen aquellos que muestran el flujo de las entradas y generación de resultados, así como el flujo de información hasta la conclusión de la ejecución.

Gracias a la selección del lenguaje de programación y a la particular conexión que existe entre éste y el SIG, Python es uno de los lenguajes que tiene mayor impacto en esta área. Haciendo uso del lenguaje de programación Python y la arquitectura MVC, se construyó el *plugin* desde la interfaz de usuario hasta los módulos que permiten calcular las estadísticas de los modelos, la creación de capas temáticas y salidas de cada ejecución. Esto atendió el tercer objetivo particular.

Con la preparación de los insumos de demanda y oferta potencial, se prepararon los escenarios para evaluar la relación que existe en la Zona

Metropolitana de Toluca. Se aplicaron los modelos con restricción en el origen y restricción en el destino. El primero permitió observar la saturación que tiene los servicios de salud respecto al alcance que tiene la población dentro de una distancia determinada. El segundo identifica que tanta población desde un punto en particular “puede” acceder a las unidades de servicio disponibles. Sin embargo, para un análisis con mayor detalle en la selección de los municipios para extender la oferta potencial de los servicios de salud, se eligió al modelo con restricción en el origen y con fricción de distancia igual a 1. De esta forma el último objetivo particular (cuatro) fue cumplido.

Hablando específicamente del desarrollo de software, la demanda de recursos está directamente atado al consumo que ofrece QGIS por lo que el *plugin* no puede aprovechar al máximo el resto de los recursos que están disponibles en el equipo de cómputo. Además, para poder ejecutarse requiere estrictamente una instancia de inicialización de la aplicación de QGIS, por lo tanto, la aplicación se vuelve inservible fuera del SIG. Lo recomendable es migrar toda la aplicación (hablando específicamente de los procesos de análisis espacial) y adaptarla para que sea funcional como un *plugin* geoespacial independiente, esto se lograría gracias a la documentación técnica presente, ya que contiene toda la lógica a través del diagramado UML.

El actual desarrollo del *plugin* realiza el cálculo de la matriz de interacción a través de la matriz de distancias usando el módulo de QGIS, sin embargo, se espera que en las próximas mejoras incluya el uso de una matriz que sea calculada a través de la pendiente del terreno y/o red vial, con el objetivo de mejorar la calidad de los resultados, también, que acepte matrices personalizadas por el usuario, por ejemplo, una matriz de costos de viaje (transporte público).

El desarrollo del geoportal permitió poner a disposición de cualquier usuario las capas vectoriales que fueron presentadas a lo largo del trabajo escrito, con el fin de que puedan tener acceso a dicho contenido, interactuar con ellas y en el mejor de los casos replicar las ejecuciones. Además, al estar seccionado la presentación

de las capas en la página web, el usuario puede ir directo a las que sean de su interés.

Finalmente, para cualquier tipo de análisis es recomendable plantear escenarios hipotéticos. Es una herramienta con un alto grado de importancia pues permite la toma de decisiones a un nivel estratégico. Los escenarios permiten un “juego” de variables donde incluso los resultados menos probables pueden tener un gran impacto a futuro, además, se considera una amplia gama de posibilidades, sin dejar de lado los riesgos potenciales, oportunidades y desafíos presentes en cada uno de estos planteamientos. El analizar cada uno de los escenarios también ayuda a establecer planes y estrategias para la toma de decisiones basadas en la flexibilidad de adaptación ante los puntos potenciales y/o carentes del análisis presente.

## Referencias bibliográficas

- ACESO. (17 de Mayo de 2018). *ACESO*. Recuperado el 5 de Abril de 2022, de ACESO: <https://aceso.readthedocs.io/en/latest/>
- Ahmadzai, F. (2020). Analyses and modeling of urban land use and road network interactions using spatial-based disaggregate accessibility to land use. *Journal of Urban Management*, 298-315. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jum.2020.06.003>
- Albornoz, C. (2014). Diseño de Interfaz Gráfica de Usuario. *WICC 2014 XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 540-544.
- Alfaro, C. (22 de Marzo de 2019). *Desarrollo de aplicaciones profesionales en PHP y MVC*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2023, de Designlopers: <https://designlopers.com/post/Desarrollo-de-aplicaciones-profesionales-en-PHP-y-MVC/>
- ALTAGUAX. (15 de Diciembre de 2014). *Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE)*. Recuperado el 20 de Abril de 2023, de Junta de Andalucía: [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/agencia\\_andaluza\\_agua/participacion/campanas\\_publicidad\\_sensibilizacion/sensibilizacion/altaguax/sade.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/agencia_andaluza_agua/participacion/campanas_publicidad_sensibilizacion/sensibilizacion/altaguax/sade.pdf)
- Anamelechi, F. (2022). *QGIS DOWNLOAD & INSTALLATION*. University of Illinois Urbana-Champaign, Department of Agricultural and Biological Engineering. Illinois: Illinois Drainage Guide. Recuperado el 28 de Febrero de 2023, de <https://publish.illinois.edu/illinoisdrainageguide/files/2022/07/QGIS-DOWNLOAD-INSTALLATION-GUIDE.pdf>
- Arce, C. A., & Sánchez, R. M. (2021). Factores de segregación territorial y socioeconómica del municipio de Calimaya en la periurbanización de la Zona Metropolitana de Toluca. *UNAM*, 1-18.
- ArcGIS. (12 de Septiembre de 2012). *Tres representaciones fundamentales de capas de información geográfica*. Recuperado el 19 de Febrero de 2023, de ArcGIS Resources: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000n000000.htm>
- ArcGIS Pro. (21 de Diciembre de 2020). *ArcGIS Pro*. Recuperado el 17 de Agosto de 2022, de How Huff Model works: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/business-analyst/understanding-huff-model.htm>
- Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2004). *El Lenguaje Unificado de Modelado*.

- Bosque Sendra, J., Gómez Delgado, M., Moreno Jiménez, A., & Dal Pozo, F. (2000). Hacia un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial para la localización de equipamientos. *Estudios Geográficos*, 567-598.
- Brennetot, A. (14 de Enero de 2017). *Justicia Espacial*. Recuperado el 20 de Abril de 2023, de <https://hypergeo.eu/justicia-espacial/?lang=es>
- Burrough, P., McDonnell, R., & Lloyd, C. (2015). *Principles of Geographical Information Systems*. United Kingdom: Oxford University Press.
- Cem GULLUOGLU. (26 de Mayo de 2016). *FlowMapper*. Recuperado el 17 de Agosto de 2022, de QGIS Python Plugins Repository: <https://plugins.qgis.org/plugins/FlowMapper/>
- Chuvienco, E. (1990). *Fundamentos de la teledetección espacial*. Madrid: Rialp.
- CIMAV. (30 de Junio de 2017). *Seminario "Sistema de Apoyo a la toma de decisiones espaciales (SADE)"*. Obtenido de Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.: <https://cimav.edu.mx/2017/06/seminario-sade/>
- CONABIO. (09 de Diciembre de 2008). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. Recuperado el 07 de Mayo de 2024, de Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- CONAPO. (2018). *Delimitación de zonas metropolitanas en México, 2015*. México: SEGOB.
- Cruz Martínez, A. (8 de Agosto de 2022). De 394 instalaciones de salud abandonadas, 142 ya funcionan: Insabi. *Periódico La Jornada*, pág. 19. Recuperado el 9 de Septiembre de 2022, de <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/08/18/politica/de-394-instalaciones-de-salud-abandonadas-142-ya-funcionan-insabi/>
- CUOM. (2013). *Manual operativo para la utilización del sistema de información geográfica Quantum GIS 1.8*. Veracruz: Universidad Veracruzana, Coordinación Universitaria de Observatorios Metropolitanos.
- D. Higgins, C. (31 de Mayo de 2019). *Findings*. Recuperado el 17 de Agosto de 2022, de Accessibility Toolbox for R and ArcGIS: <https://findingspress.org/article/8416-accessibility-toolbox-for-r-and-arcgis>
- Dieterlen, P. (2015). *Justicia distributiva y salud*. México: Biblioteca de Ética y Bioética.
- Domingo, J. (17 de Julio de 2023). *Plataforma Educativa Informática*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2023, de Patrón modelo-vista-controlador: <https://plataforma.josedomingo.org/pledin/cursos/flask/curso/u03/>

- ESRI. (14 de Septiembre de 2021). *¿Qué son los SIG?* Recuperado el 17 de Febrero de 2023, de ESRI: <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview>
- Estévez, R. (30 de Noviembre de 2018). <https://www.geomapik.com/desarrollo-programacion-gis/5-lenguajes-programacion-gis-imprescindibles/>. Recuperado el 15 de Marzo de 2023, de Geomapik: <https://www.geomapik.com/desarrollo-programacion-gis/5-lenguajes-programacion-gis-imprescindibles/>
- FISOTEC. (24 de Diciembre de 2022). *Open Source: qué es y beneficios para los G/S*. Recuperado el 29 de Marzo de 2023, de Fisotec Solutions: <https://fisotecsolutions.com/blog/open-source-que-es-beneficios-gis/>
- Flater, D. (18 de Febrero de 2022). *Gravity, Spatial Interaction, Movement, and Centrality Modeling Tools*. Recuperado el 16 de Agosto de 2022, de Gravity Model: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=0cdd43afa32b417681589e38ebd54097>
- Fotheringham, S., & O'Kelly, M. (1989). *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers Dordrecht.
- García de León Loza, A. (1988). La metodología del valor índice medio. . *Investigaciones Geográficas*, 19. doi:<https://doi.org/10.14350/rig.58975>
- Garrocho, C. (1988). Análisis de la accesibilidad a los servicios de salud y de los sistemas de información geográfica: teoría y aplicación en el contexto del Estado de México. *Norman Daniels, Just Health Care* , 427-444.
- Garrocho, C. (2012). *Estructura funcional de la red de ciudades de México*. México: El Colegio Mexiquense A.C.; Consejo Nacional de Población; Fondo de Población de las Naciones Unidas.
- Garrocho, C., & Campos, J. (2005). La población adulta mayor en el área metropolitana de Toluca, 1990-2000. *Papeles de Población*, 71-106.
- Garrocho, C., Chávez, T., & Álvarez, J. A. (2002). *La dimensión espacial de la competencia comercial*. Toluca.
- Geomatas. (27 de Enero de 2022). *Los principales lenguajes de programación en los SIG*. Recuperado el 15 de Marzo de 2023, de GEOMATAS: <https://geomatas.com/los-principales-lenguajes-de-programacion-en-los-sig/>
- GNOME. (20 de Marzo de 2020). *Manual del diseñador de interfaces de usuario Glade*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2023, de Gnome Help: <https://help.gnome.org/users/glade3/3.8/glade3.html>



- GNU. (02 de Enero de 2022). *What is Copyleft?* Recuperado el 22 de Noviembre de 2022, de GNU Operating System: <https://www.gnu.org/licenses/copyleft.en.html>
- Gobierno de México. (14 de Agosto de 2017). *Dirección General de Información en Salud*. Recuperado el 5 de Febrero de 2024, de Catálogo de Clave Única de Establecimientos de Salud-CLUES: [http://gobi.salud.gob.mx/Bases\\_Clues.html](http://gobi.salud.gob.mx/Bases_Clues.html)
- Gobierno de México. (04 de Octubre de 2021). *Consejo Nacional de Población*. Recuperado el 15 de Febrero de 2024, de Índices de marginación 2020: <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>
- Gobierno de México. (15 de Noviembre de 2023). *Gobierno de México*. Recuperado el 27 de Febrero de 2024, de Data México - Toluca | Zona Metropolitana: <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/toluca-991502?disabilityOptions=physicalImperiment&healthAreas=urbanHealth&healthCareOptionSelector=socialSecurityOption1&healthIndicators=unitHealth&healthSubcategories=doctors&yearHealthIMMS=Year15#i>
- González Moreno, J. O., Backhoff Pohls, M. Á., Morales Bautista, E. M., & Vázquez Paulino, J. C. (2020). *Análisis tempo-espacial de la Red Nacional de Caminos para la determinación de la Accesibilidad Geográfica de las Localidades Rurales de México*. Querétaro: Secretaría de comunicaciones y transportes; Instituto Mexicano del Transporte.
- Graser, A., & Olaya, V. (2015). Processing: A Python Framework for the Seamless Integration of Geoprocessing Tools in QGIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2220 - 2245.
- Han Chande, R. (2012). Diagnóstico socio-demográfico del envejecimiento en México. *CONAPO*, 1-16.
- Hernández Campoy, J. M. (2012). Los modelos de gravedad y la medición de la difusión del cambio lingüístico. *Revista de Filología de la Universidad de La Laguna*, 83-109.
- Heywood, I., Cornelius, S., & Carver, S. (2011). *An Introduction to Geographical Information Systems*. England: Pearson.
- Hinojosa de la Garza, O., Herrera Aguilar, J. L., & Álvarez Herrera, C. (2019). Sistemas de Soporte para la Toma de Decisiones Espaciales (SADE) Caso de Aplicación: Percepción del Sismo de Magnitud 5.4 en la Capital de Chihuahua, Chih., México. *Ciencias de la tierra*, 3-5.
- INEGI. (05 de Mayo de 2015). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 12 de Febrero de 2024, de Red Nacional de Caminos RNC.

2020:

<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463807452>

INEGI. (26 de Enero de 2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 12 de Febrero de 2024, de Sistema de Consulta de Integración Territorial, Entorno Urbano y Localidad: <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=10>

INEGI. (26 de Enero de 2021). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 20 de Febrero de 2024, de Integración Territorial: <https://www.inegi.org.mx/app/scitel/Default?ev=9>

INEGI. (2021). *Principales resultados por AGEB y Manzana Urbana*. México: INEGI.

INEGI. (01 de Diciembre de 2023). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 12 de Febrero de 2024, de Marco Geoestadístico: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>

INGEOEXPERT. (12 de Diciembre de 2019). *¿Qué son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y cómo funcionan?* Recuperado el 17 de Febrero de 2023, de Ingeoexpert: <https://ingeoexpert.com/articulo/que-son-los-sistemas-de-informacion-geografica-sig-y-como-funcionan/>

Install Simple. (8 de Abril de 2011). *Create installation package easily and quickly*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2023, de Install Simple: <http://installsimple.com/>

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. *Geoenseñanza*, 107-116.

ISFRRP. (11 de Abril de 2006). *Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*. Recuperado el 28 de Marzo de 2023, de Instituto Superior de Formación y Recursos en Red para el Profesorado: [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td\\_sig.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad2/td_sig.htm)

Jacobson, I., Booch, G., & Rumbaugh, J. (2000). *El proceso unificado de desarrollo de software*. Madrid: Addison Wesley.

Janse, B. (16 de Agosto de 2019). *The Rational Unified Proces Methodology (RUP)*. Recuperado el 23 de Marzo de 2023, de ToolsHero: <https://www.toolshero.com/information-technology/rational-unified-process-rup/>

Jiménez López, E., Garrocho Rangel, C., & Chávez Soto, T. (2021). Autómatas Celulares en Cascada para modelar la expansión urbana con áreas restringidas. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 779-823. doi:<http://dx.doi.org/10.24201/edu.v36i3.1997>

- Kanjilal, J. (7 de Diciembre de 2022). *Introduction to Rational Unified Process (RUP)*. Recuperado el 24 de Marzo de 2023, de Developer.com: <https://www.developer.com/project-management/rational-unified-process-rup/>
- LongLey, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2015). *Geographic Information Science and Systems*. Germany: Wiley.
- López, Ó. (05 de Marzo de 2022). *¿Qué es un Prototipo?* Recuperado el 02 de Noviembre de 2023, de FormiUX: <https://formiux.com/que-es-un-prototipo/>
- Lozada, E. (10 de Enero de 2018). *Modelos de Datos en un SIG*. Recuperado el 18 de Febrero de 2023, de GEOPAISA: <https://geopaisa.blog/2018/01/10/modelos-de-datos-en-un-sig/>
- Marshall, S. (12 de Junio de 2021). *Sam Marshall - A collection of work for OpenSource GIS*. Recuperado el 17 de Agosto de 2022, de Gravity Model of Spatial Interaction in QGIS: <https://gsmarshall.github.io/gravity/gravity.html>
- Martínez Quintero, S. P. (2019). Justicia Distributiva. *Universidad Católica de Colombia*, 1-5.
- MDN contributors. (10 de Noviembre de 2022). *Glosario de MDN Web Docs*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2022, de MDN Web Docs: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Glossary/GPL>
- Morales, A. (7 de Marzo de 2019). *7 razones para aprender Python si trabajas con GIS*. Recuperado el 16 de Marzo de 2023, de MappinGIS: <https://mappinggis.com/2019/03/7-razones-para-aprender-python-si-trabajas-con-gis/>
- Morales, A. (24 de Abril de 2022). *Lenguajes de programación para GIS*. Recuperado el 15 de Marzo de 2023, de MappingGIS: <https://mappinggis.com/2012/11/lenguajes-de-programacion-gis/>
- Moreno, S. (2014). La opinión pública sobre los problemas metropolitanos en México. *Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 1-34.
- Netec. (22 de Octubre de 2018). *¿Qué es Python?* Recuperado el 16 de Marzo de 2023, de Netec: <https://www.netec.com/que-es-python>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Peña, L., & Rodríguez, A. (29 de Abril de 2020). *¿Qué es Ley de la Oferta y la Demanda?* Recuperado el 20 de Abril de 2023, de Billin: <https://www.billin.net/glosario/definicion-ley-de-oferta-y-demanda/>

- Pressman, R. (2010). *Ingeniería del software. Un enfoque práctico*. México: McGraw-Hill.
- QGIS. (17 de Agosto de 2014). *Un Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto*. Recuperado el 13 de Mayo de 2024, de QGIS: <https://qgis.org/es/site/>
- QGIS. (13 de Agosto de 2015). *Datos Raster*. Recuperado el 29 de Marzo de 2023, de QGIS Documentation: [https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/gentle\\_gis\\_introduction/raster\\_data.html](https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html)
- QGIS. (12 de Abril de 2018). *QGIS API Documentation*. Recuperado el 22 de Marzo de 2023, de QGIS: <https://api.qgis.org/api/>
- QGIS. (1 de Marzo de 2023). *PyQGIS Developer Cookbook*. Recuperado el 17 de Marzo de 2023, de QGIS API Documentation: [https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/pyqgis\\_developer\\_cookbook/index.html](https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/pyqgis_developer_cookbook/index.html)
- RAE. (2 de Septiembre de 2018). *Modelo*. Recuperado el 18 de Febrero de 2023, de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/modelo>
- Ramos, L. B. (23 de Junio de 2017). *Los sistemas «Open Source» (OS) en el ámbito de los GIS*. Recuperado el 29 de Marzo de 2023, de Grupo TYCGIS: <https://www.cursosgis.com/los-sistemas-open-source-os-en-el-ambito-de-los-gis/>
- Redacción AD. (15 de Febrero de 2019). Los hospitales abandonados del Edoméx. *AD Noticias*. Recuperado el 9 de Septiembre de 2022, de <https://adnoticias.mx/los-hospitales-abandonados-del-edomex-1025764/>
- Robeyns, I. (2005). The Capability Approach: a theoretical survey. *Journal of Human Development*, 94 - 114.
- Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems*. London: Routledge.
- Rojas, D., & Velázquez, B. (2017). Distancia al centro de atención en salud y mortalidad durante los primeros años de vida: revisión sistemática y metaanálisis. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 420-431. doi:10.17533/udea.rfnsp.v35n3a12
- Rootstack. (8 de Noviembre de 2022). *Características clave de un desarrollo de software efectivo*. Recuperado el 24 de Marzo de 2023, de RootStack: <https://rootstack.com/es/blog/caracteristicas-clave-de-un-desarrollo-de-software-efectivo>
- Santana Castañeda, G. (2016). *LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE NUEVOS SERVICIOS PUBLICOS DE SALUD EN LA ZONA METROPOLITANA DE TOLUCA*. México: UNAM (Tesis de Doctorado).

- Santana Castañeda, G. (01 de Noviembre de 2020). *Repositorio Institucional*. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de SHP: Servicios de salud del Estado de México, 2020 CLUES: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/138373>
- Santana Castañeda, G., Aguilar Martínez, A. G., & Santana Juárez, M. V. (2015). Falta de cobertura de los servicios de salud y factores de localización óptima. *MEMORIA XIV CONFERENCIA IBEROAMERICANA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*, 373-394.
- Santana Núñez, J. M. (2011). *PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DE TOMOGRAFÍA COMPUTERIZADA PARA LA VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DE ESTUDIOS RADIOLÓGICOS (Tesis)*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria , España.
- Santander Universidades. (21 de Diciembre de 2020). *Metodologías de desarrollo de software: ¿qué son?* Recuperado el 23 de Marzo de 2023, de Becas Santander: <https://www.becas-santander.com/es/blog/metodologias-desarrollo-software.html>
- Santos, J. (1994). Los modelos de interacción espacial y el análisis de los flujos migratorios interregionales. Aplicación al territorio español. *Espacio, Tiempo y Forma VII, Geografía*, 51-81.
- Santos, J. M. (1994). Los modelos de interacción espacial y el análisis de los flujos migratorios interregionales. Aplicación al territorio español. *Espacio, Tiempo y Forma, Serie VII, Geografía.*, 51-81.
- Sci-kit Learn. (14 de Noviembre de 2011). *Sci-Kit Learn*. Recuperado el 12 de Febrero de 2024, de [sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor.html): <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsRegressor.html>
- Secretaría de Salud. (1995). *Modelo de Atención a la Salud para Población Abierta*. México: Secretaría de Salud.
- Secretaría de Salud. (2007). *Planeación de Unidades Médicas, Modelo Integrador de Atención a la Salud*. México: Secretaría de Salud.
- Sedaño, E., & Chung-Alonso, P. (2022). La justicia espacial y su aplicabilidad en espacios públicos de México. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 24-35.
- SEDATU, CONAPO, & INEGI. (2018). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. México: SEGOB.
- SEDESOL. (2000). *Sistema Normativo de Equipamiento Urbano, Tomo II, Salud y Asistencia Social*. México: SEDESOL.
- SEDESOL. (2016). *Estructura del Sistema Normativo*. México: SEDESOL.

- SEP. (2 de Agosto de 2022). *Newton y la ley de gravitación universal*. Recuperado el 11 de Mayo de 2023, de Nueva Escuela Mexicana Digital: <https://nuevaescuelamexicana.sep.gob.mx/detalle-ficha/7445/>
- Sevilla Arias, A. (1 de Marzo de 2020). *Ley de oferta y demanda*. Recuperado el 20 de Abril de 2023, de Economipedia: <https://economipedia.com/definiciones/ley-de-oferta-y-demanda.html>
- Soja, E. (2014). *En busca de la Justicia Espacial*. Valencia: Tirant Humanidades.
- Torossi, G. (2004). *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software/UML*.
- Torres, A. (2010). Medicamentos y transnacionales farmacéuticas: impacto en el acceso a los medicamentos para los países subdesarrollados. *Revista Cubana de Farmacia*, 97-110.
- Toscana Aparicio, A. (2017). En busca de la justicia espacial. *Política y cultura*, 209-213.
- UML. (25 de Noviembre de 2018). *¿Qué es UML? ¿Qué diagramas componen UML?* Recuperado el 24 de Marzo de 2023, de Diagramas UML: <https://diagramasuml.com/>
- Universidad de Murcia. (5 de Septiembre de 2018). *SIGMUR*. Recuperado el 17 de Febrero de 2023, de SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia: [https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_3.pdf](https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_3.pdf)
- Valdivia López, M., Ávila Sánchez, H., & Galindo Pérez, C. (2010). Fricción de la distancia, autocorrelación espacial de la productividad e impacto de la longitud por carretera en la dinámica de convergencia de la región centro de México (1993–2003). *Investigaciones geográficas*, 72-87.
- Vobruba, T., Körner, A., & Breitenecker, F. (2016). Modelling, Analysis and Simulation of a Spatial Interaction Model. *IFAC-PapersOnLine*, 221-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.054>
- Wolff, J. (2007). Models of Distributive Justice. *Department of Philosophy*, 1 - 10.