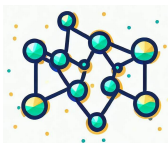


MANUAL TÉCNICO

MODELOS DE INTERACCIÓN ESPACIAL

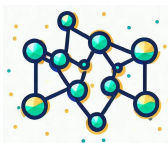
Ver 1.0

Adonai Emmanuel Nicanor Bautista

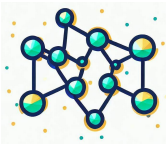


ÍNDICE

1.	Introducción	3
2.	Plugin – Modelos de Interacción Espacial (MIE)	4
3.	Requisitos funcionales del sistema	5
	Requisitos funcionales de entrada	5
	Requisitos funcionales de proceso	5
	Requisitos funcionales de salida	6
4.	Requisitos no funcionales del sistema	7
	Usabilidad	7
5.	Comprendiendo a los Modelos de Interacción Espacial	7
6.	Ejemplo de resultados de la ejecución	14
7.	Modelo de dominio.....	15
8.	Modelo de negocio.....	15
9.	Casos de uso.....	17
10.	Diagrama de clases	22
	Tarjetas CRC	22
	Diagrama de clases completo	25
	Glosario de Clases.....	26
11.	Diagrama de paquetes.....	27
12.	Diagrama de actividades.....	27
13.	Diagrama de secuencia	28
14.	Diagrama de despliegue	28
15.	Decisión del lenguaje	29
16.	Funcionamiento interno del <i>plugin</i>	30
	Lectura de datos	30
	Procesamiento	32



Creación de salidas.....	33
17. Ejemplo teórico de los Modelos de Interacción Espacial	34
Restricción en el origen.....	35
Restricción en el destino	37
Bibliografía	39



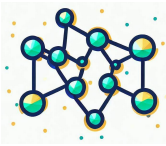
1. Introducción

Bajo las circunstancias socioeconómicas que se presentan en México, la limitación de recursos económicos ha forzado a las dependencias públicas y privadas a buscar estrategias que permitan optimizar el uso de recursos, 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, la falta de documentación de técnica y de usuario 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.

Este desarrollo geotecnológico beneficia a investigadores, estudiantes, planificadores urbanos, especialistas, tomadores de decisiones, sector privado, gobierno, etc., para evaluar escenarios socioeconómicos relacionados con accesibilidad e interacción espacial, cuya información generada permita tomar



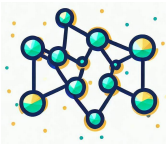
mejores decisiones estratégicas para la ubicación y/o mejora de los servicios evaluados, para mitigar el desperdicio de recursos económicos visualizado a través de planteamientos hipotéticos cada vez más cercanos a la realidad donde los conflictos sociales son cada vez más notables.

2. Plugin – Modelos de Interacción Espacial (MIE)

El *plugin* MIE tiene como objetivo principal el crear un software con bajo acoplamiento, el cual permita separar el código que se encarga de ejecutar los procesos de captura y despliegue de capas georreferenciadas en la interfaz del Sistema de Información Geográfica QGIS, así como aquellos módulos encargados de generar estadísticas con los datos, lo anterior permite migrar la funcionalidad del software con una gran facilidad, desarrollando únicamente la parte grafica en el lenguaje de programación que el Sistema de Información Geográfica proporcione (un ejemplo es PyQT, es proporcionado por QGIS para el desarrollo de éstas y hace uso del lenguaje de programación Python). El flujo de la entrada y salida de datos se muestra en la Figura 2.1 donde se aprecia de forma general el procesamiento que conlleva la ejecución del plugin.



Figura 2.1: Flujo de entrada y salida de datos.



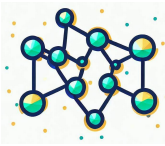
3. Requisitos funcionales del sistema

Requisitos funcionales de entrada

- a) 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).
- b) Lectura de parámetros solicitados a través de la interfaz gráfica necesarios para la ejecución del modelo.

Requisitos funcionales de proceso

- a) Validación que admita únicamente utilizar archivos vectoriales del tipo polígono y puntos.
- b) 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.
- c) 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 atraktividad de los destinos y finalmente el factor de fricción de distancia.
- d) 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.
- e) Generar capas con atributos de identificación para aquellos datos relevantes arrojados por el modelo, tanto para orígenes como destinos,

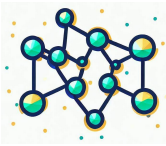


es decir, para aquellos valores sobresalientes en la matriz de interacción espacial.

- f) 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.
- g) 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).

Requisitos funcionales de salida

- a) Crear una estructura de carpetas para almacenar la información obtenida por la herramienta, con el propósito de organizar los distintos archivos que se generarán.
- b) 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.
- c) Almacenar gráficas en formato PNG (Portable Network Graphics), ya que es uno de los formatos de imagen con menor pérdida de datos.
- d) 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.



4. Requisitos no funcionales del sistema

Usabilidad

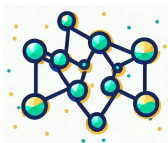
- a) El desarrollo de la automatización deberá contar con información detallada sobre el manejo y uso del complemento (plugin), es decir, se deberá contar con información técnica y de uso (manual técnico y manual de usuario).
- b) El complemento deberá incluir las validaciones correspondientes para evitar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

5. Comprendiendo a los Modelos de Interacción Espacial

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

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.

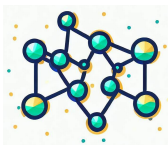
Explicativos: Estimación/calibración de parámetros; buscan una correspondencia de la información empírica respecto a la formulación teórica del modelo.

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.

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

Ecuación 5.1

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:



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

Ecuación 5.2

Siendo:

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

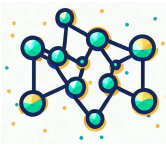
Ecuación 5.3

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 5.4

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

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

Ecuación 5.5

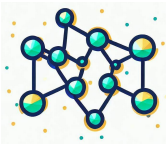
Siendo:

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

Ecuación 5.6

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 esta 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 estan 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.

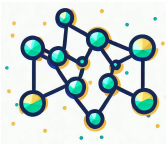
- 1. Doblemente restrictivo:** Los totales para las filas (orígenes) y columnas (destinos) O_i y D_j son conocidos. Estos modelos son usados principalmente para describir las interacciones entre orígenes y destinos, es decir, las relaciones existentes entre cada par de zonas evaluadas, ya que, al conocer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

Matemáticamente se representa de la siguiente forma:

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

Ecuación 5.7

Siendo:



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

Ecuación 5.8

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

Ecuación 5.9

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

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

Ecuación 5.10

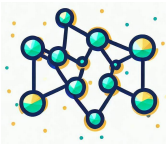
Y

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

Ecuación 5.11

Donde:

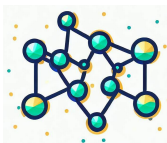
- T_{ij} : Interacción entre orígenes y destinos, es decir, la interacción entre consumidores de la zona de origen i y las unidades de servicio j .
- O_i : Flujo total emitido por cada lugar de origen. Número de consumidores potenciales en la zona de origen i .
- D_j : Flujo total recibido por cada lugar 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 esta 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).

6. Ejemplo de resultados de la ejecución

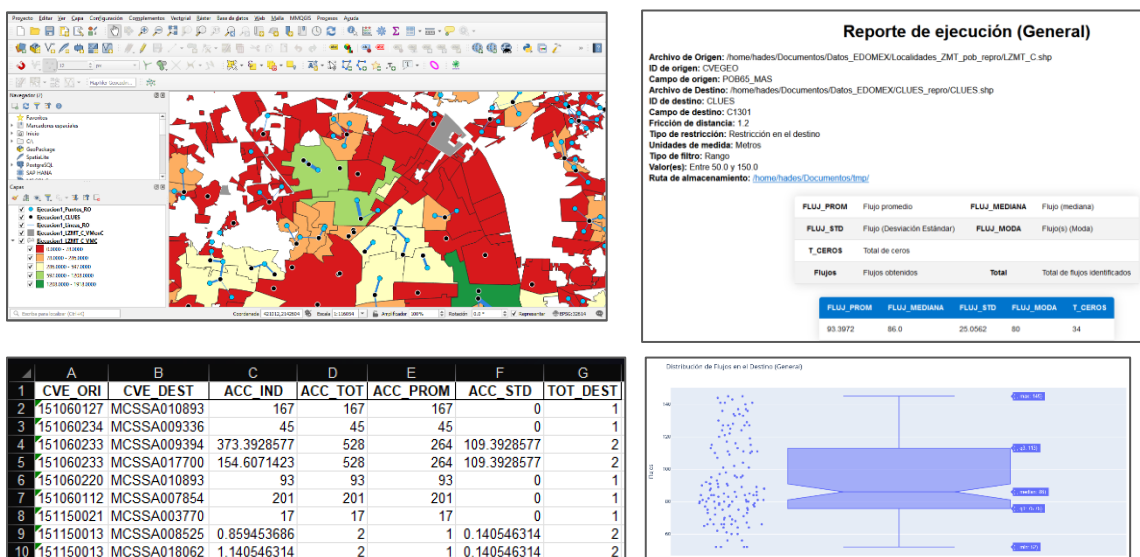
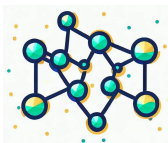


Figura 6.1: Resultados

Los archivos de salida estan compuestos por distintos como: Capas vectoriales y sus capas temáticas respectivas, hojas de cálculo (estadísticas sin componente espacial), reporte HTML (contiene los parámetros con lo que fue alimentado el *plugin*) y gráficas de caja (para identificar la concentración y distribución de los datos). Tanto las capas temáticas como las hojas de cálculo pueden ser exportadas en distintos formatos con el objetivo de ser lo más flexible posible con los datos.



7. Modelo de dominio

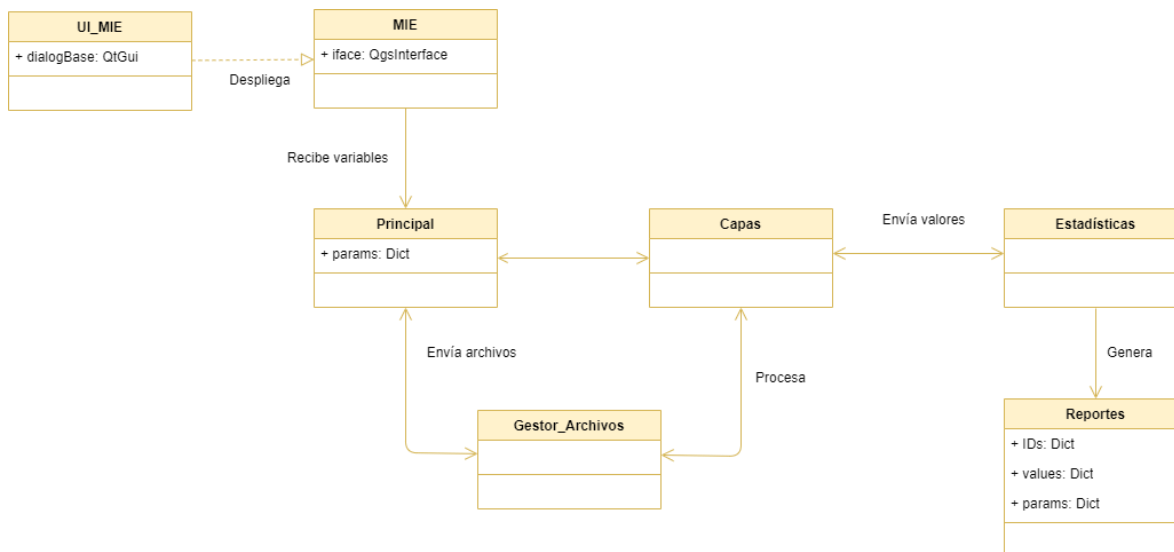


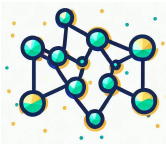
Figura 7.1: Clases y parámetros - Modelo de Dominio, Fuente: Elaboración propia.

8. Modelo de negocio

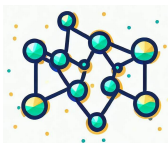
El *plugin* MIE es una extensión creada por terceros y desarrollada en un lenguaje de programación libre (Python) que trabaja de forma colaborada con el ambiente SIG de QGIS. Dicha herramienta se encarga de calcular y estimar el nivel de accesibilidad espacial y flujos que puede interactúan entre orígenes y destinos a través de los tres tipos de modelos que ofrece.

El *plugin* ofrece la posibilidad de trabajar con archivos vectoriales (tanto del tipo punto como polígonos) y genera diferentes capas para la visualización de los resultados, producto de los cálculos desarrollados durante el proceso de ejecución.

- **Segmento de clientes:** El *plugin* tiene un grado de especialización medio-alto, se limita, en primera instancia, a profesionales en el área de la Geografía, sin embargo, en caso de presentarse alguna oportunidad, se podría ofrecer este tipo de sistema a clientes que les interese el análisis sobre la ubicación y detección de escases de servicios a partir de restricciones tales como la distancia que se evalúan para determinar la accesibilidad hacia este.



- **Propuesta de valor:** El *plugin* MIE ofrece una interfaz sencilla y documentada, que permite a los usuarios generar análisis espacial de una forma muy ágil e interactiva, este modelo otorga como resultado múltiples formatos y recursos, así como la agrupación de resultados con el objetivo de sintetizar la información y generar escenarios de ejecución.
- **Canales:** Los puntos de contacto entre el cliente y el producto son:
 - **Repositorio oficial:** A través del repositorio del proyecto [*SpatialInteractionModels*](#) se podrá acceder al *plugin* para ser descargado.
 - **Reporte de errores:** Para realizar el reporte con algún problema detectado el *plugin*, se realiza la petición a través del siguiente enlace: [*Issues*](#).
- **Recursos clave:**
 - **Licencias:** El *plugin* cuenta con la licencia GNU GPL v3.0 garantiza a los usuarios la libertad de ejecutar, estudiar, compartir y modificar el software.
 - **Plataforma:** El *plugin* cuenta con una interfaz totalmente documentada, intuitiva y de fácil uso.
- **Actividades clave:**
 - **Mantenimiento:** Con el manejo constante del sistema, y las necesidades cambiantes de los usuarios, se requiere dar mantenimiento al software para cubrir los nuevos planteamientos del mercado y usuarios de la herramienta.
 - **Actualización:** Para mantener competente el sistema, es necesario generar un monitoreo en búsqueda de mejoras de manera constante.



9. Casos de uso

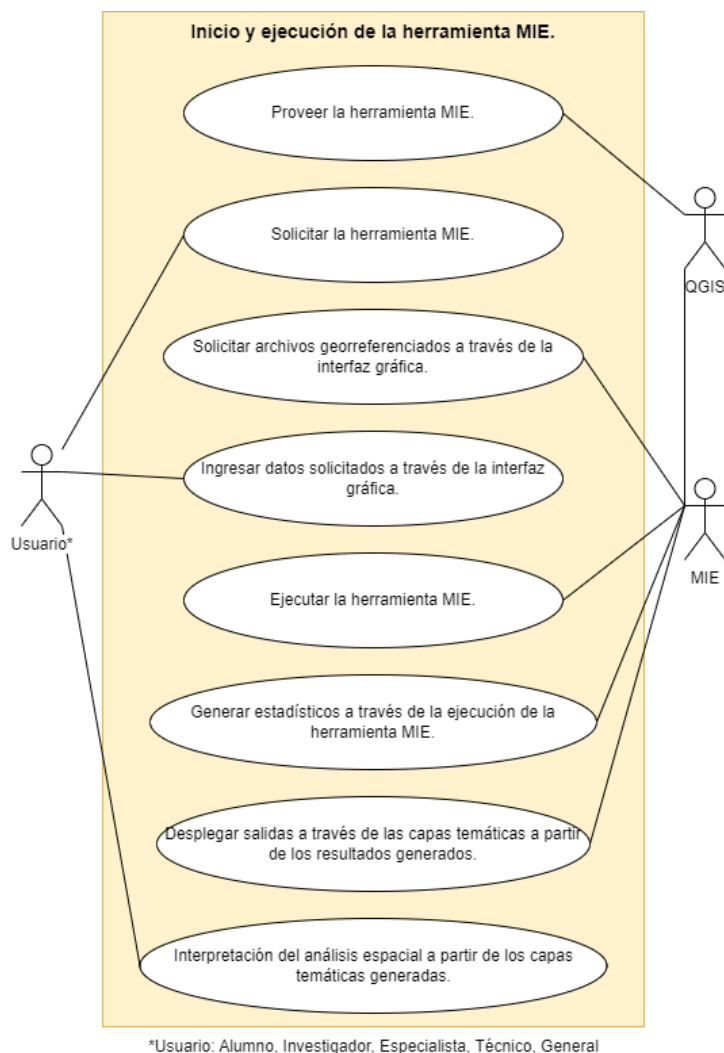


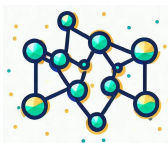
Figura 9.1: Caso de uso general, Fuente: Elaboración propia.

- **Descripción general de diagrama**

Tabla 9.1: 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 9.2: 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 plugin 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"> 1. La herramienta debe estar perfectamente instalada para que sea mostrada. 2. Si el icono no aparece, probablemente no este habilitado y sea necesario habilitarlo. 3. Verificar la existencia de la herramienta en el menú vectorial. 4. Hacer clic sobre alguna de las dos opciones anteriores e inicializar la herramienta MIE.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si el icono no se visualiza o el nombre del plugin no existe en el menú vectorial, pudo existir un error de instalación por lo que será necesario reinstalar.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.3: 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"> 1. Localizar el icono que identifica a la herramienta y hacer clic sobre este. 2. La herramienta será mostrada al usuario.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si el icono no se visualiza pudo existir un error de instalación por lo que será necesario reinstalar.

Fuente: Elaboración propia.

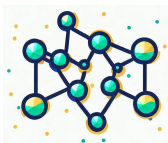


Tabla 9.4: Solicitar archivos georreferenciados a través de la interfaz gráfica.

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"> 1. Todos los campos solicitados deben ser mostrados y distribuidos correctamente en la interfaz. 2. Cada campo debe estar perfectamente identificado como opcional o requerido.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 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.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.5: 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"> 1. El usuario debe introducir los archivos georreferenciados en los campos solicitados, debe ser un archivo de puntos y otro de polígonos. 2. Debe llenar todos los campos solicitados en la interfaz gráfica.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 1. En caso de introducir algún dato erróneo, la interfaz notificará al usuario a través de un mensaje de error.

Fuente: Elaboración propia.

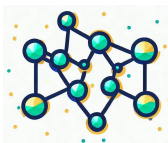


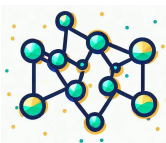
Tabla 9.6: Ejecutar la herramienta MIE.

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"> 1. La herramienta comenzará con la ejecución de la herramienta MIE. 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. 3. Realizará una copia en memoria de los archivos introducidos para evitar manipular los datos originales de entrada. 4. Se seleccionará el tipo de restricción a usar. 5. Se brindarán los parámetros necesarios. 6. Procesará la información. 7. Generará las capas temáticas y los estadísticos resultantes.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si la herramienta encuentra algún error en los parámetros introducidos, esta abortará el proceso notificando el error.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.7: 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.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1. Al terminar la ejecución de la herramienta MIE y con la generación de la información estadística esta debe ser almacenada en disco. 2. Los archivos almacenados en memoria deben ser ahora archivos físicos para el usuario. 3. Los archivos deben estar disponibles en la ruta elegida por el usuario o en una base de datos, ya sea nueva o existente.



Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Si se registró un error durante la ejecución de la herramienta, se debe repetir este proceso.
------------------	--

Fuente: Elaboración propia.

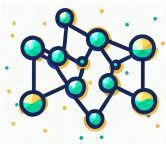
Tabla 9.8: Mostrar al usuario las capas temáticas generados a partir de los resultados.

Caso de uso	Desplegar salidas a través de las capas temáticas generados a partir de los resultados.
Actores	QGIS y MIE.
Propósito	Mostrar las capas temáticas generadas por la herramienta MIE en el espacio de trabajo de QGIS.
Resumen	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.
Precondiciones	Archivos almacenados correctamente en físico dentro del disco o en una base de datos.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> 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. 2. Las capas temáticas serán agrupadas de forma automática por la herramienta para mantener una correspondencia adecuada.
Subflujos	<ol style="list-style-type: none"> 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.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9.9: Interpretación del análisis espacial a partir de las capas temáticas generados.

Caso de uso	Interpretación del análisis espacial a partir de las capas temáticas generadas.
Actores	Usuario*
Propósito	Permitir al usuario obtener un análisis espacial objetivo a partir de las capas temáticas generados.
Resumen	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.
Precondiciones	Capas temáticas generadas y almacenadas correctamente en disco o en una base de datos.
Flujo principal	<ol style="list-style-type: none"> 1. El usuario debe ser capaz de interpretar los valores representados de manera visual (por medio de colores). 2. Las capas temáticas permiten obtener un análisis claro y conciso de los valores generados. 3. El usuario puede modificar la capa temática a su preferencia para mejorar el análisis espacial.



Subflujos

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.

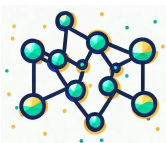
Fuente: Elaboración propia.

10. Diagrama de clases

Tarjetas CRC

Interfaz Gráfica	
<ul style="list-style-type: none">• Desplegar los componentes gráficos que permiten la captura de las variables necesarias para los MIE.• Debe contener dos combobox para los archivos vectoriales. Uno para el archivo de polígonos y el otro para el archivo de puntos.• Debe contener dos combobox, uno para seleccionar el atributo que identifica a la oferta y otro para seleccionar el atributo que identifica a la demanda.• Debe contener un combobox que permite seleccionar el tipo de restricción a utilizar.• Debe contener una opción que permita seleccionar la ruta donde serán almacenados los resultados.	<ul style="list-style-type: none">• Sistema de Información Geográfica (QGIS)

Controlador	
<ul style="list-style-type: none">• Debe poder interactuar con el explorador de archivos para buscar las capas vectoriales y alimentar la interfaz gráfica.• Debe recibir los archivos vectoriales y extraer los atributos de cada archivo para actualizar los combobox.• Debe identificar los errores y retornar un mensaje al usuario.	<ul style="list-style-type: none">• Interfaz gráfica• Principal



- Debe recibir la restricción a utilizar, así como los parámetros adicionales.

Principal

- Debe recibir los parámetros adecuados, estas variables ya deben de haber sido filtradas y validadas correctamente.
- Se encargará de establecer el orden de ejecución y dirección de
- Las variables recibidas deberán ser distribuidas a las diferentes clases para ser procesadas.

- **Capas**
- **Gestor de Archivos**

Capas

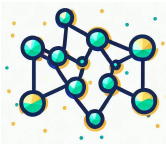
- Opera con las capas seleccionadas, en el caso de la capa de polígonos se obtienen sus centroides para calcular la matriz de distancias.
- Genera las capas temáticas para cada una de las restricciones con la que se ejecute la herramienta.
- Genera capas de puntos, líneas y polígonos, cada una está sujeta a la restricción a utilizar.
- Las capas que sean generadas deben ser personalizadas a través de la aplicación de un temático.

- **Selección de capas**
- **Gestor de archivos**
- **Estadísticas**

Gestor de Archivos

- Las capas vectoriales que sean leídas, se les realizará una copia en memoria con el objetivo de evitar manipular los archivos originales de entrada. Esta opción permite agregar nuevos atributos sin alterar las capas de origen.
- Permitirá tener la administración de las capas en memoria, es

- **Selección de capas**
- **Capas**



decir, cuando una capa deja de ser útil, esta es desechada y no genera información adicional no necesaria.

Estadísticas

- Con la obtención de los atributos de las capas vectoriales permitirá operar la automatización de los MIE.
- De acuerdo con la restricción que sea elegida será la forma en cómo se calculará el modelo.
- Contiene las tres restricciones de los MIE.
- Analiza los datos y obtiene únicamente los de interés. Estos datos que han sido filtrados son retornados a las capas para poder crear las capas temáticas.
- Los datos de interés también son enviados a la clase gráficas para la creación de estas.

- **Capas**
- **Gráficas**

Gráficas

- Recibe los datos de interés que han sido filtrados previamente para generar gráficos estadísticos que permitan resumir la información procesada.

- **Sistema de Información Geográfica**

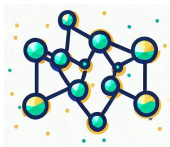


Diagrama de clases completo

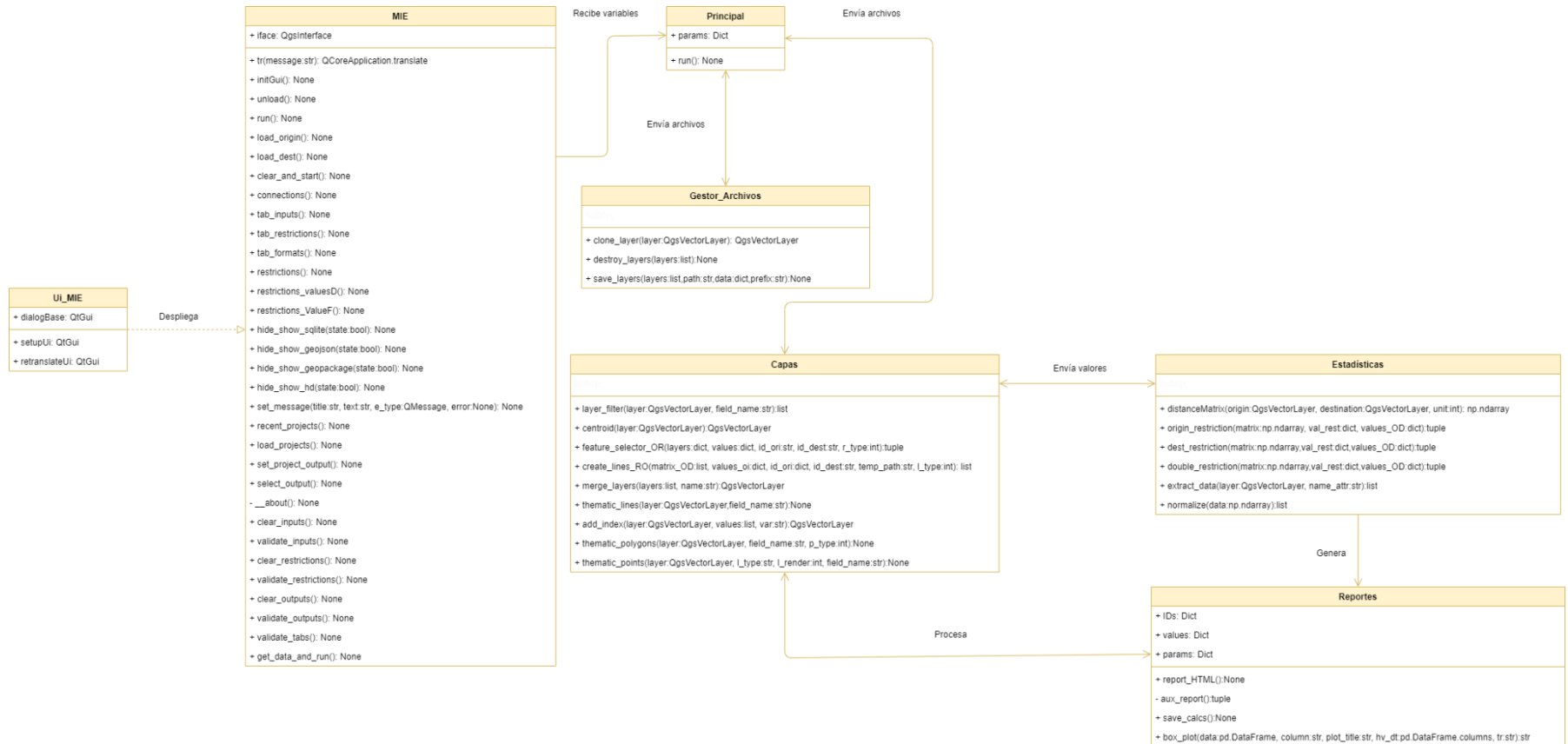
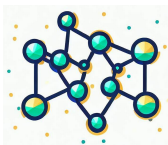


Figura 10.1: Atributos y funciones, Fuente: Elaboración propia.

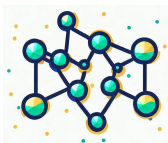


Glosario de Clases

Tabla 10.1: 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.
Estadísticas	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.
Reportes	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.



11. Diagrama de paquetes

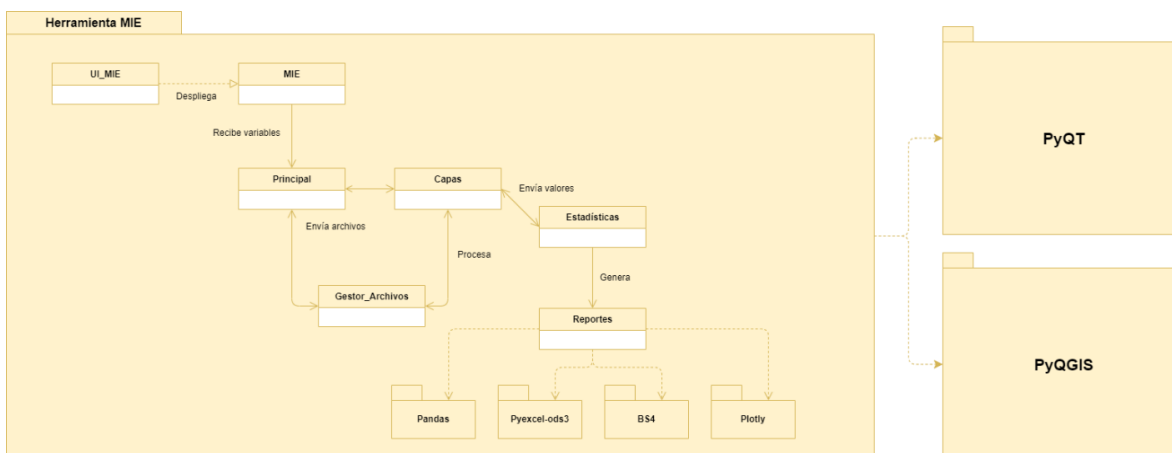


Figura 11.1: Paquetes y librerías del plugin, Fuente: Elaboración propia.

12. Diagrama de actividades

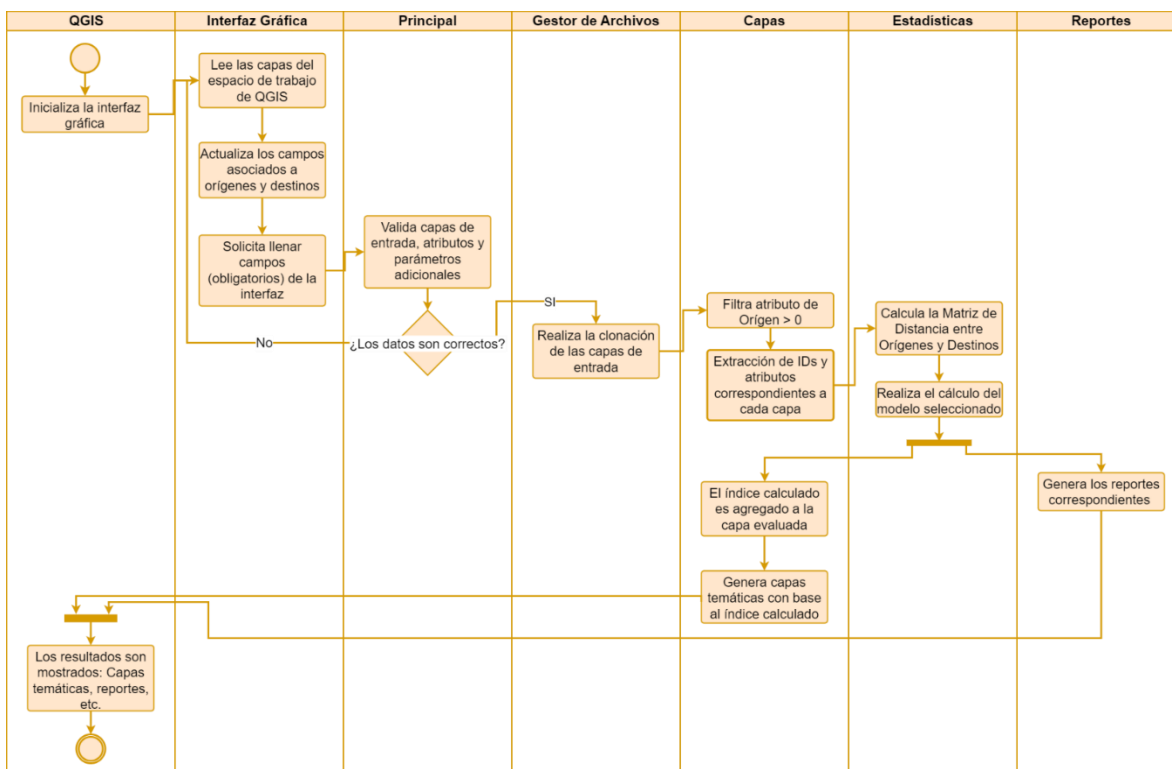
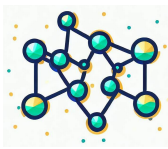


Figura 12.1: Ejecución de la herramienta, Fuente: Elaboración propia.



13. Diagrama de secuencia

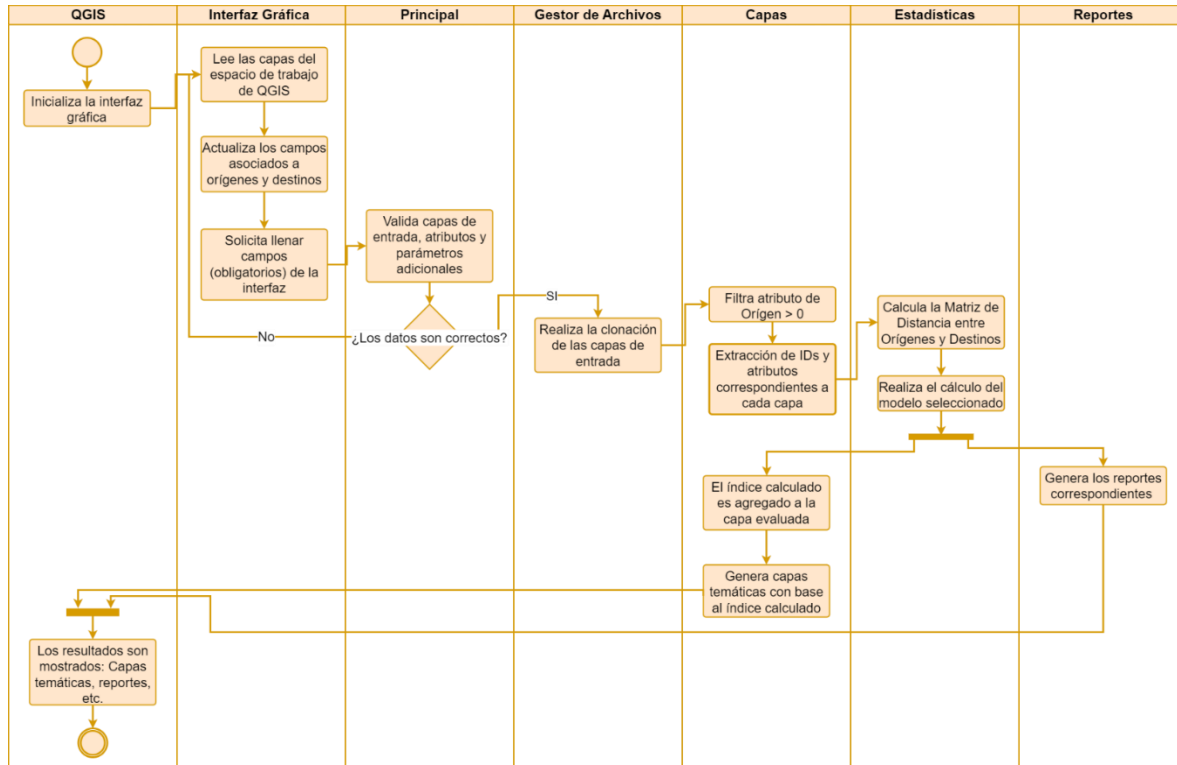


Figura 13.1: Ejecución de la herramienta, Fuente: Elaboración propia.

14. Diagrama de despliegue

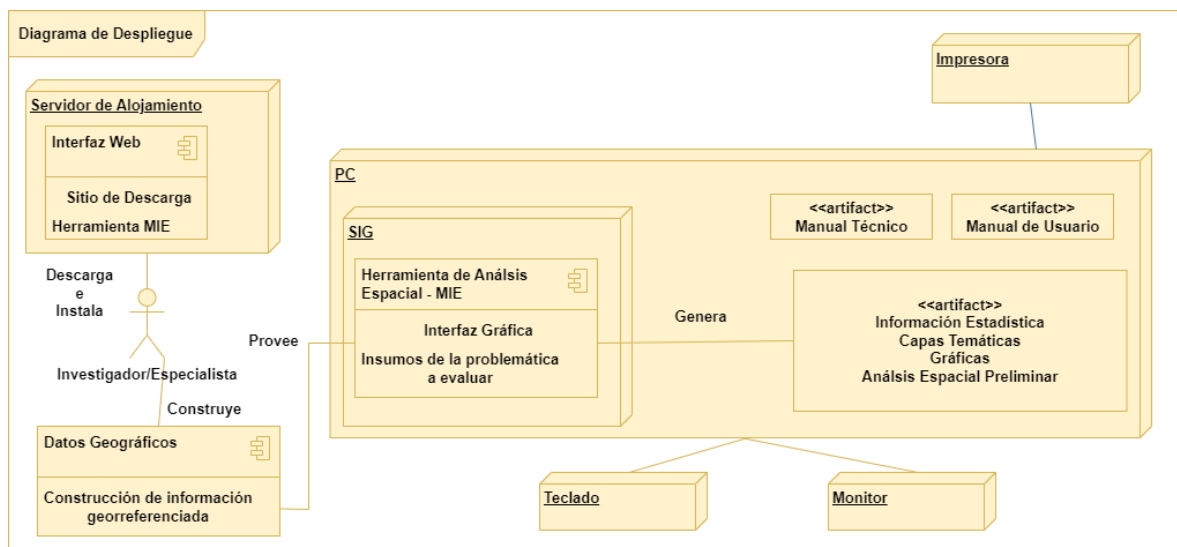
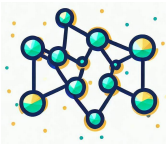


Figura 14.1: Descarga, instalación y uso del plugin, Fuente: Elaboración propia.



15. Decisión del lenguaje

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).

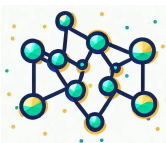
La API de QGIS es un conjunto de herramientas de programación que permiten a los desarrolladores crear complementos personalizados y aplicaciones que se integren con QGIS. La API está basada en Python y C++, y proporciona una amplia variedad de funciones y clases para manipular datos geoespaciales, interactuar 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 15.1 describe cada uno de los módulos:

Tabla 15.1: Módulos de QGIS.

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



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

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

16. Funcionamiento interno del *plugin*

El funcionamiento interno del *plugin* hace uso de diferentes rutinas, sin embargo, se destacan tres momentos importantes que van desde la lectura y preprocesamiento de los archivos vectoriales, hasta rutinas que permiten la generación de reportes y estadísticas. Tal y como lo resume la Figura 16.1.

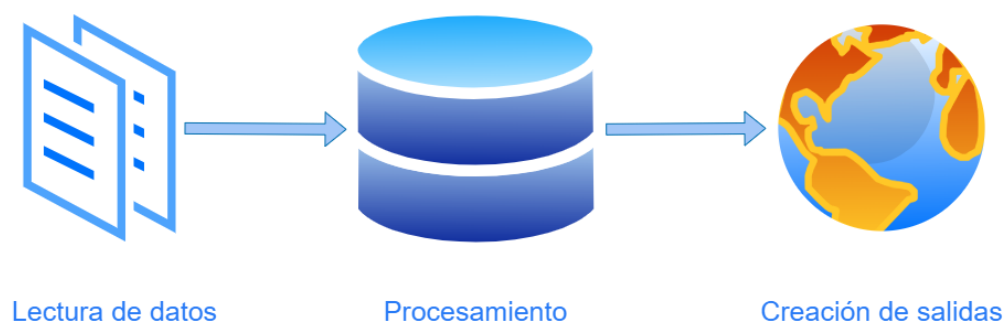


Figura 16.1: Funcionamiento interno, Fuente: Elaboración propia.

Lectura de datos

Recibe como parámetros todos aquellos datos necesarios y obligatorios para que pueda ser ejecutado de manera correcta. La función de cada uno de estos insumos esta descrito de manera concreta en la Tabla 16.1:

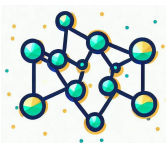
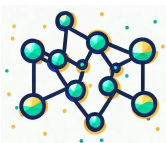


Tabla 16.1: Análisis de datos de entrada.

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"> • ID: Identificador único de cada polígono/punto que compone el archivo vectorial. • Nombre: 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. • Población: Valor numérico que muestran la cantidad de población a evaluar correspondiente a cada polígono/punto.
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"> • ID: Identificador único de cada punto que compone el archivo vectorial. • Servicio: 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. • Disponibilidad del Servicio: Valor numérico que muestran la cantidad total de unidades que brinda el servicio, puede ser número total de empleados, número de camas disponibles, etc.
Opción - Tipo de restricción	<p>Retomando que los MIE se clasifican en 3 tipos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Restricción en el origen • Restricción en el destino • Doblemente restrictivos
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>
Variable - Fricción de distancia	<p>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.</p>

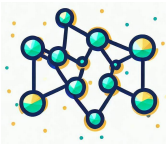


Variable - Comportamiento de las restricciones (filtros)	Dependiendo del tipo de restricción del modelo a utilizar, esta tiene un comportamiento que va desde “un valor mayor a”, “un valor menor a” y “un rango de valores”.
Opción - Reportes	La generación de reportes tanto estadísticos como gráficas puede crearse de forma automática o a través de la selección del usuario.
Opción - Formatos de salida (vectoriales)	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"> • SQLite • GeoJSON • Geopackage • Shapefile
Opción – Formatos de salida (estadísticas)	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"> • Formato “.xls” • Formato “.csv” • Formato “.ods”
Variable - Prefijo	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.
Opción - Proyectos actuales	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.
Variable - Ruta de almacenamiento	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.

Procesamiento

Los datos son preprocesados para ponerlos a disposición del modelo a ejecutar. Durante esta etapa las capas vectoriales son clonadas para evitar la pérdida de información en los datos originales. Se calculan los centroides (si es que se



introdujo una capa de polígonos), se calcula la matriz de distancia entre orígenes y destinos.

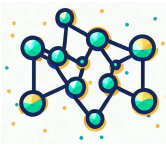
Cuando la etapa de preprocesamiento ha concluido inicia el cálculo del modelo seleccionado. La ejecución es similar para los modelos, es decir, se requiere de los valores de orígenes, destinos, fricción de distancia y la relación que existe entre orígenes-destinos (matriz de interacción espacial).

Al finalizar el cálculo estadístico de los modelos se identifican las relaciones que satisfacen al modelo (relación origen-destino). La selección de estas relaciones da paso a la creación de capas de líneas, identificación de puntos de interés y aplicación de temáticos a los resultados con el objetivo de resaltar la importancia espacial del modelo sobre los datos de entrada. También, es un paso previo para la generación de reportes y gráficas.

Creación de salidas

Al culminar los cálculos estadísticos y con la identificación de las relaciones espaciales, el *plugin* genera distintos de reportes que van desde reportes en formato HTML los cuales incluyen un resumen de los insumos con lo que fue ejecutado en ese momento el *plugin*. Crea gráficas de caja que son interactivas con el usuario en las cuales se puede observar la distribución de las unidades de servicio evaluadas. También, se crea hojas de cálculo para realizar análisis fuera del SIG, ya que este tipo de archivos contiene la información del modelo sin el uso del componente espacial. Finalmente, la creación de nuevos archivos vectoriales que contienen la parte estadística y el componente espacial para ser representados dentro del SIG, cada una de estas capas vectoriales está asociada a su archivo de estilo, es decir, está ligada a una capa temática para facilitar la interpretación de los datos.

Todos los archivos que son guardados están distribuidos y ordenados en distintas carpetas con el objetivo de mantener una organización de estos.



17. Ejemplo teórico de los Modelos de Interacción Espacial

La base de los Modelos de Interacción Espacial (para este caso) es la matriz de distancias que funge como la matriz de interacción espacial. Los pasos previos para el cálculo de los diferentes modelos es identificar los flujos que emite cada origen y la atractividad que ofrece cada servicio.

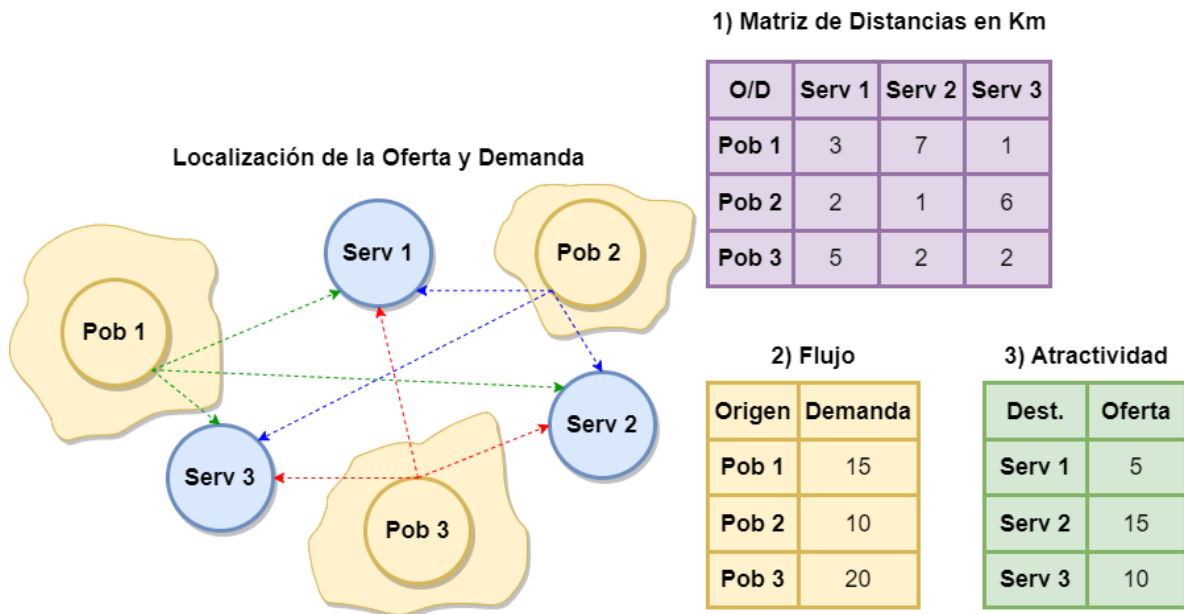
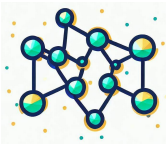


Figura 17.1: Ejemplo de MIE, Fuente: Elaboración propia.

Los insumos que se identifican hasta ahora son:

- Fricción de distancia (b) cuyo valor para los ejemplos será: 1.2
- Matriz de Distancia (d_{ij}) que corresponde al inciso uno de la figura anterior.
- Atractividad (W_j) que corresponde al inciso tres de la figura anterior.
- Flujos (O_i/D_j) que corresponden al inciso dos de la figura anterior.



Restricción en el origen

Ecuaciones:

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

Ecuación 17.1

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

Ecuación 17.2

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

Ecuación 17.3

1) El ejemplo se realizará sin aplicar ninguna restricción de distancia.

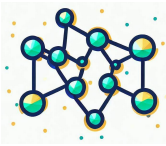
Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	3	7	1
Pob 2	2	1	6
Pob 3	5	2	2

2) Calcular de la Ecuación 17.3, la expresión d_{ij}^{-b} , lo que es igual a $\frac{1}{d_{ij}^b}$,

entonces:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	0.27	0.10	1.00
Pob 2	0.44	1.00	0.12
Pob 3	0.14	0.44	0.44

3) Multiplicar $W_j * \frac{1}{d_{ij}^b}$, retomando que W_j corresponde a la atractividad. Se identifica la columna a la que corresponde.



Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	1.34	1.45	10.00
Pob 2	2.18	15.00	1.16
Pob 3	0.72	6.53	4.35
Atractividad	1.34	1.45	10.00

4) Terminando de calcular la ecuación 17.3 correspondiente al factor de

balance $A_i = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{w_j}{d_{ij}^b} \right)}$ donde, primero se calcula la suma:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3	Suma
Pob 1	1.34	1.45	10.00	12.79
Pob 2	2.18	15.00	1.16	18.34
Pob 3	0.72	6.53	4.35	11.61

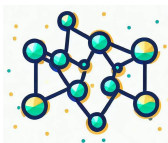
Aplicando la división:

A_i	Resultado
Pob 1	0.08
Pob 2	0.05
Pob 3	0.09

5) Calcular la interacción entre orígenes y destinos: $T_{ij} = A_i O_i W_j d_{ij}^{-b}$, lo que

es igual a $T_{ij} = A_i O_i W_j \frac{1}{d_{ij}^b}$:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	1.57	1.70	11.73
Pob 2	1.19	8.18	0.64
Pob 3	1.25	11.25	7.50



6) Finalmente, se calcula $O_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}$

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	1.57	1.70	11.73
Pob 2	1.19	8.18	0.64
Pob 3	1.25	11.25	7.50
O_i	4.00	21.13	19.86

Restricción en el destino

Ecuaciones:

$$D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij} \quad \text{Ecuación 17.4}$$

$$T_{ij} = B_j D_j W_j d_{ij}^{-b} \quad \text{Ecuación 17.5}$$

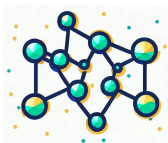
$$B_j = \frac{1}{\sum_j W_j d_{ij}^{-b}} \quad \text{Ecuación 17.6}$$

1) Calcular de la ecuación 17.6, la expresión d_{ij}^{-b} , lo que es igual a $\frac{1}{d_{ij}^b}$, entonces:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	3	7	1
Pob 2	2	1	6
Pob 3	5	2	2

Aplicando la división:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	0.27	0.10	1.00
Pob 2	0.44	1.00	0.12
Pob 3	0.14	0.44	0.44



- 2) Multiplicar $W_j * \frac{1}{d_{ij}^b}$, retomando que W_j corresponde a los flujos emitidos por cada unidad de origen. Se identifica la columna a la que corresponde.

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	0.27	0.10	1.00
Pob 2	0.44	1.00	0.12
Pob 3	0.14	0.44	0.44
Atractividad	5	15	10

Se aplica la multiplicación:

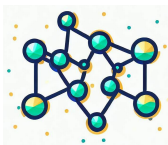
Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	4.01	1.45	15.00
Pob 2	4.35	10.00	1.16
Pob 3	2.90	8.71	8.71

- 3) Terminando de calcular la ecuación 17.3 correspondiente al factor de balance $B_j = \frac{1}{\sum_j \left(\frac{w_j}{d_{ij}^b} \right)}$ donde, primero se calcula la suma:

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3
Pob 1	4.01	1.45	15.00
Pob 2	4.35	10.00	1.16
Pob 3	2.90	8.71	8.71
Suma	11.27	20.16	24.87

Aplicando la división:

Resultado	0.09	0.05	0.04
B_j	Serv 1	Serv 2	Serv 3



4) Calcular la interacción entre orígenes y destinos:

$$T_{ij} = B_j D_j W_j d_{ij}^{-b}, \text{ lo que es igual a } T_{ij} = B_j D_j W_j \frac{1}{d_{ij}^b}:$$

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3	Flujos
Pob 1	1.78	1.08	6.03	1.78
Pob 2	1.93	7.44	0.47	1.93
Pob 3	1.29	6.48	3.50	1.29

5) Finalmente, se calcula $D_j = \sum_{i=1}^m T_{ij}$.

Origen/Destino	Serv 1	Serv 2	Serv 3	D_j
Pob 1	1.78	1.08	6.03	9
Pob 2	1.93	7.44	0.47	10
Pob 3	1.29	6.48	3.50	11

Bibliografía

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

Rodrigue, J.-P., Comtois, C., & Slack, B. (2013). *The Geography of Transport Systems*. London: Routledge.

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.