



**Universidad Autónoma del Estado de
México**

**APLICACIÓN DE MODELOS DE LOCALIZACIÓN-ASIGNACIÓN PARA
LA IDENTIFICACIÓN DE ZONAS ADECUADAS PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE UNA CENTRAL DE ENERGÍA SOLAR EN EL
VALLE DE TOLUCA**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

MARIO ISRAEL CUADROS LARA

ASESOR:

SERGIO FRANCO MAASS

REVISARES:

Dra. En G. GIOVANNA SANTANA CASTAÑEDA

M. en A.E.G. SERGIO ESTEBAN DE LEÓN LÓPEZ

Noviembre 2019

Resumen

En este análisis el tema principal es el desarrollo de una metodología para identificar zonas adecuadas para instalaciones de energía solar a partir de modernas tecnologías, que son amigables con el medio ambiente, esto enfocado a buscar alternativas viables debido al incremento poblacional y la intensa actividad industrial y comercial, y su incremento en la demanda de electricidad.

En el presente trabajo se desarrolla una metodología a través de diferentes evaluaciones, modelos y análisis para la obtención de una metodología más completa y concreta, que permita identificar zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca, a partir de tres diferentes etapas donde se utiliza la evaluación de criterios múltiples MCE, modelos matemáticos de localización-asignación y el análisis de cobertura de red, los tres métodos mencionados anteriormente se someten a una matriz de comparación final para obtener un resultado fiable.

Los métodos a utilizar se integran en un ambiente de Sistemas de Información Geográfico (SIG), el cual nos permite a través de diferentes procesos evaluar el nivel adecuado del territorio, los resultados de la investigación constituyen un aporte importante en el campo de la aplicación garantizando la conservación del medio natural, así como, equidad espacial en la distribución de externalidades positivas y negativas y eficiencia espacial en la relación de oferta-demanda de energía.

Abstrac

In this analysis, the main theme is the development of a methodology to identify suitable areas for solar energy installations from modern technologies, which are friends with the environment, focused and seek viable alternatives due to population increase and intense industrial activity and commercial, and its increase in demand for electricity.

In the present work a methodology is developed through different evaluations, models and analyzes to obtain a more complete and concrete methodology, which allows identifying suitable areas for the construction of a solar power plant in the Toluca valley, starting from From three different stages where the MCE multiple criteria evaluation, mathematical location-allocation models and the red coverage analysis are used, the three previously selected methods are sometimes a final comparison matrix to obtain a reliable result.

The methods to be used are integrated into a Geographic Information Systems (GIS) environment, which allows us, through different processes, to evaluate the appropriate level of the territory, the research results analyzed, an important contribution in the field of application, guaranteeing the conservation of the natural environment, as well as, spatial equity in the distribution of positive and negative externalities and spatial efficiency in the supply-demand relationship of energy.

Introducción:	1
Problemática	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Hipótesis	3
Justificación	4
Capítulo 1. Antecedentes:	5
1.1. Instituto de Energías Renovables (IER)	5
1.1.1. Proyectos del IER	5
1.2. CEMIE-Sol	6
1.2.1. Proyectos de CEMIE-Sol	7
1.3. Aspectos generales del área de estudio	8
Capítulo 2. Marco Teórico, Conceptual	15
2.1. Las centrales de energía solar	15
2.1.1. Características generales de las centrales de energía solar	15
2.1.2. Tipología	16
2.1.3. Ventajas e inconvenientes	16
2.2. Requerimientos para la instalación de una central de energía solar.	17
2.2.1. Requerimientos geográficos	17
2.2.2. Requerimientos atmosféricos	18
2.2.3. Requerimientos y limitaciones socio-económicas	20
2.2.4. Restricciones a la localización	21
2.3. Directrices normativas	22
2.4. Aplicación de SIG para la localización de centrales de energía solar	25
2.4.1 Los modelos de evaluación de criterios múltiples (MCE) en el ambiente SIG	26

2.5. Los modelos de localización-asignación (LA).....	32
2.5.1. La localización de instalaciones deseables	35
2.5.2. La equidad y eficiencia espacial en la localización de instalaciones deseables.....	35
2.5.3. El concepto de distancia en el ambiente LA	36
2.5.4. La cobertura espacial en el análisis de redes.....	36
Capítulo 3. Metodología	39
3.1. Etapa 1. Identificación de zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar.	39
3.1.1. Determinación de variables de localización.....	39
3.1.2. Obtención de criterios	43
3.1.3. Análisis cartográfico	48
3.1.2. Normalización de los factores y cruce de coberturas	49
3.1.3. Definición de vector de pesos	50
3.1.4. Aplicación de la regla de decisión, análisis al punto ideal.....	51
3.1.5. Elección de alternativas viables	51
3.2. Etapa 2. Evaluación de los sitios candidatos con base en la justicia/equidad espacial (aplicación de modelos de localización-asignación para evaluar las externalidades positivas y negativas)	53
3.2.1. Obtención de mapa de población	53
3.2.2. Aplicación de modelos de localización-asignación (Minimax y Minisum)	53
3.2.3. Análisis de sitios candidatos con respecto a la proximidad de la población.....	56
3.3. Etapa3. Evaluación de los sitios candidatos con base en la eficiencia espacial (aplicación de modelos de redes para evaluar la cobertura espacial del servicio).....	56
3.3.1. Obtención de la red vial.....	56
3.3.2. Análisis de cobertura por sitio candidato (zona de influencia en red).....	57
3.4. Elección de sitios candidatos.....	57

Capítulo 4. Resultados.....	59
4.1 Etapa 1. Resultado de la Aplicación del método de evaluación de criterios múltiples (MCE)	59
4.1.2. Zonas Adecuadas para la Construcción de una Central de Energía Solar	60
4.2. Etapa 2. Resultados de la ampliación de los modelos matemáticos de localización-asignación Minimax y Minisum con base en la justicia/equidad espacial.....	64
4.2.1. Elección de los sitios candidatos para la aplicación de los modelos Minimax y Minisum	64
4.2.2. Aplicación del modelo matemático Minimax	65
4.2.3. Aplicación del modelo matemático Minisum	70
4.2.5 Elección del sitio candidato para la construcción de la central de energía	76
4.3. Etapa 3. Mapas, tablas y gráficas como resultado de la aplicación de modelos de redes mediante el Network Analyst con base en la eficiencia espacial.....	79
4.4. Análisis comparativo (matriz de comparación a través de la Evaluación de criterios múltiples MCE, modelos de localización-asignación Minimax/Minisum y Análisis de redes)	84
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	98
5.1. Conclusiones.....	98
5.2. Recomendaciones	100
Referencias:	101

Índice de Tablas

Tabla 1: Ventajas e inconvenientes	17
Tabla 2. Especificaciones relacionadas con la planeación y el control del sistema eléctrico	23
Tabla 3: Especificaciones relacionadas con el aprovechamiento sustentable de la energía.	24
Tabla 4: Matriz de evaluación	28
Tabla 5: Matriz de prioridades.....	28
Tabla 6: Matriz de valoración	29
Tabla 7: Escala de valores para comparación por pares	30
Tabla 8: Factores de localización.....	40
Tabla 9: Especificaciones para los factores en base a la Norma Mexicana, NMX-AA-164-SCFI-2013.....	40
Tabla 10: Factores de localización.....	40
Tabla 11: Restricciones de localización.....	41
Tabla 12: Especificaciones para las restricciones en base a la Norma Mexicana, NMX-AA-164-SCFI-2013.....	42
Tabla 13: Restricciones.....	42
Tabla 14: Alternativas viables	52
Tabla 15: Rangos de zonas adecuadas	63
Tabla 16: Aplicación de modelo matemático Minimax	67
Tabla 17: Minimax ponderado	69
Tabla 18: Aplicación de modelo Minisum	72
Tabla 19: Minisum ponderado	74
Tabla 20: Cobertura de Población	77

Tabla 21: Matriz de comparación de los modelos Minimax y Minisum para la elección del sitio candidato para la construcción de la central de energía solar	78
Tabla 22: Área de cobertura.....	81
Tabla 23: Cobertura de población.....	83
Tabla 24: Preorden de decisión	84
Tabla 25: Regla de decisión.....	84
Tabla 26: Matriz de comparación por pares.....	85
Tabla 27: Normalización de la Evaluación de criterios múltiples MCE y la Cobertura de red.....	86
Tabla 28: Matriz de comparación de la Evaluación de criterios múltiples (MCE), los modelos Minimax y Minisum y el Análisis de redes para la elección de los sitios candidatos para la construcción de la central de energía solar	87
Tabla 29: N° 1. Segundo sitio candidato adecuado.....	89
Tabla 30: N° 2. Cuarto sitio candidato adecuado	92
Tabla 31: N° 3. Decimo sitio adecuado	95

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Normalización de criterios	49
Ilustración 2: Definición de pesos.....	50
Ilustración 3: Razón de Consistencia	50
Ilustración 4: Evaluación de criterios múltiples (MCE)	51

Índice de Mapas.

Mapa 1: Localización del Valle de Toluca.....	8
Mapa 2: Población del valle de Toluca	9
Mapa 3: Altitud del valle de Toluca	10
Mapa 4: Pendiente del Valle de Toluca.....	11
Mapa 5: Radiación directa solar del vale de Toluca.....	12
Mapa 6: Áreas naturales protegidas del valle de Toluca	13
Mapa 7: Red vial del valle de Toluca	14
Mapa 8: Aplicación del método (MCE) zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca.....	60
Mapa 9: Zonas adecuadas con el área requerida para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca.....	61
Mapa 10: Zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca.....	62
Mapa 11: Sitios Candidatos Adecuados del Valle de Toluca.....	65
Mapa 12: Aplicación del modelo Minimax (mínima distancia al cuarto sitio candidato) del valle de Toluca.....	66
Mapa 13: Aplicación del modelo Minimax ponderado (cobertura de servicio a la mayor población y la mínima distancia en el décimo sitio candidato) del valle de Toluca	68
Mapa 14: Aplicación del modelo Minisum (suma de distancias, para la obtención de la mínima distancia) del séptimo sitio candidato del valle de Toluca	71
Mapa 15: Aplicación del modelo Minisum ponderado (cobertura de servicio de la suma de mayor población y la mínima distancia de la suma de distancias).....	73

Mapa 16: Sitio candidato adecuado para la construcción de la central de energía solar	76
Mapa 17: Aplicación del modelo de red Network Analyst (área de cobertura del servicio de energía mediante la red vial) del valle de Toluca.....	80
Mapa 18: Área de cobertura del sitio adecuado del servicio de energía mediante la red vial del valle de Toluca.....	82
Mapa 19: Localización-asignación de la zona adecuada N° 1, para construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca.....	90
Mapa 20: Localización-asignación de la zona adecuada N° 2, para la construcción de la central de energía solar en valle de Toluca.....	93
Mapa 21: Localización-asignación de la zona adecuada N° 3, para la construcción de la central de energía solar en valle de Toluca.....	96
Mapa 22: Localización-asignación de las zonas adecuadas, para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca.....	97

Introducción:

Las centrales de energía solar constituyen una importante alternativa para la generación limpia de energía. México, por su localización geográfica, tiene un gran potencial para incrementar la producción de energía eléctrica a partir de modernas tecnologías, amigables con el medio ambiente. Esto resulta particularmente importante en regiones como el Valle de Toluca en donde el incremento poblacional y la intensa actividad industrial y comercial, se ven reflejados en el incremento de la demanda de electricidad. La construcción de una central de energía solar permitiría satisfacer parte de dicha demanda, garantizando la conservación del medio ambiente.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten integrar una serie de metodologías y procedimientos para evaluar el nivel de adecuación del territorio. Su aplicación al caso de la localización de centrales de energía solar debe garantizar: a) la conservación del entorno natural; b) la equidad espacial en la distribución de las externalidades positivas y negativas y c) la eficiencia espacial en la relación oferta-demanda de energía. Por ello, la investigación que se propone se estructura en tres grandes fases:

- a) Evaluación del territorio para identificar zonas adecuadas, incluyendo restricciones ambientales y que garanticen la mayor aptitud en cuanto a las condiciones meteorológicas y ambientales. Para ello se plantea la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio que, mediante la sobreposición cartográfica, permitan obtener un conjunto de alternativas de localización.
- b) Evaluación de las alternativas de localización a partir de criterios de equidad espacial. Para ellos se aplicarán modelos de localización-asignación (Minimax y Minisum), lo que posibilitará la jerarquización de alternativas en función de la proximidad con los centros de población.
- c) Evaluación de alternativas de localización en función de la eficiencia espacial. Para ello se aplicará el análisis de cobertura en redes entre los sitios alternativos (Oferta potencial) y los sitios de consumo (Demanda).

Finalmente, la aplicación de modelos de localización-asignación permitirá la selección de los sitios candidatos para la construcción de una planta de energía solar. Los modelos de localización-asignación, se emplean de acuerdo con las características de cada proyecto, ya sean instalaciones

de servicios públicos o privados. Si bien los fines pueden variar significativamente, la ubicación espacial debe ajustarse a principios de justicia o equidad espacial. En cualquier caso, los usuarios deben tener condiciones equitativas al servicio ofertado.

Se parte del hecho de que una central de energía solar es una instalación “deseable”, esto es, que genera mayores beneficios a la población que los posibles perjuicios o afectaciones. En este caso se utilizarán dos modelos de localización-asignación, en primer lugar, el modelo (Minimax) Mínima Distancia Máxima, que tiene como objetivo encontrar la mínima distancia máxima entre oferta y demanda, lo que garantiza que el punto de demanda más alejado a la oferta, se encuentre a la menor distancia posible, logrando con ello la distribución más adecuada respecto a las zonas o localidades de mayor demanda del servicio, en segundo lugar se encuentra el modelo (Minisum), que tiene como objetivo encontrar la mínima suma de distancias entre los puntos de oferta y demanda, logrando con ello la máxima eficiencia en términos de la distribución global de la demanda. Al utilizar estos modelos de localización-asignación, se obtuvo como resultado la localización para un centro de energía solar, dentro del Valle de Toluca, donde se cubren las características de los modelos antes mencionados, con una eficiencia adecuada de este servicio para la población.

El presente documento consta de 5 grandes apartados o capítulos. En el primero se aborda la problemática que conduce a la necesidad de transitar hacia formas alternativas de generación de energía eléctrica, amigables con el ambiente. Ello da pie a plantear, como problema central, la necesidad de desarrollar metodologías para la localización de centrales de energía solar. En el segundo capítulo se revisan los contenidos teóricos necesarios que permiten el cumplimiento de ese objetivo. Se hace un recuento de los aspectos que caracterizan las centrales de energía solar, como base para definir los requerimientos espaciales para su localización. Este apartado se retoman también los conceptos necesarios para la aplicación de la MCE y los modelos LA en el ambiente SIG, como herramientas fundamentales para la evaluación del territorio. El capítulo tres hace una descripción del planteamiento metodológico seguido en la investigación, partiendo de la identificación de sitios candidatos en ambiente SIG y su consecuente evaluación con base en criterios de equidad (modelos LA) y eficiencia (cobertura de red). Finalmente, en el capítulo cuarto se revisan los resultados parciales obtenidos a lo largo de la investigación, hasta llegar a un conjunto de tres alternativas adecuadas para la construcción de la instalación.

Problemática

El valle de Toluca presenta un gran potencial para la generación de energía solar. Se desconocen, sin embargo, cuáles son los sitios más adecuados para la construcción de instalaciones para la generación de energía solar.

Objetivo general

Desarrollar y aplicar una metodología para analizar el territorio e identificar las localidades y su nivel de adecuación para la localización de una central de energía solar en el Valle de Toluca.

Objetivos específicos

- 1) Identificar las zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar, en función de factores y restricciones de localización mediante la aplicación del método evaluación de criterios múltiples (MCE).
- 2) Evaluar los sitios candidatos con base en la justicia/equidad espacial, mediante la aplicación de modelos de localización-asignación, (Minimax y Minisum).
- 3) Evaluar la cobertura espacial del servicio de los sitios candidatos con base en la eficiencia espacial, aplicando los modelos de redes.
- 4) Determinar los sitios candidatos más adecuados en función de la equidad y la eficiencia espacial.

Hipótesis

El valle de Toluca ha sufrido, en las últimas décadas, un importante crecimiento urbano e industrial. Esto ha traído como consecuencia el incremento en la demanda de energía eléctrica, la cual no se produce en la región. La construcción de instalaciones para la generación de energía eléctrica con tecnología solar limpia podría representar una alternativa importante para satisfacer dicha demanda. Se desconoce, sin embargo, si existen en el Valle de Toluca sitios adecuados para construir este tipo de instalaciones. Mediante la aplicación de un Sistema de Información Geográfica es posible desarrollar un modelo de análisis que permita evaluar el nivel de adecuación del territorio para la localización-asignación de este tipo de instalaciones.

Justificación

La investigación se justifica desde muy diversas perspectivas. Desde el punto de vista de la Geografía como ciencia, constituye un aporte en materia del estudio de problemas de localización-asignación. Hasta donde se tiene noticia, no existen muchos ejemplos de aplicación de este tipo de metodologías al problema de la evaluación del nivel de adecuación del territorio para la generación de energía solar. Desde la perspectiva social, un análisis exitoso del territorio podría servir como punto de partida para posibles inversiones en la generación de energías limpias. Finalmente, desde un enfoque personal, la investigación constituye la prueba fehaciente de mi habilitación como geógrafo, es decir, como un profesionalista capaz de integrar el conocimiento del territorio y, con base en el análisis profundo de los procesos que en el ocurren, aportar soluciones a problemas relevantes para la sociedad.

Capítulo 1. Antecedentes:

De acuerdo con la temática del trabajo, existen en México, proyectos de energía solar fotovoltaica generados por instituciones como el Instituto de Energías Renovables (IER) y el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE-SOL) A continuación se muestran algunos trabajos de las instituciones antes mencionadas.

1.1. Instituto de Energías Renovables (IER)

El Instituto de Energías Renovables de la UNAM es una institución clave para que el país transite hacia un modelo energético que impulse el desarrollo sustentable basado en fuentes renovables de energía. El IER es el resultado de las actividades de investigación, docencia y difusión realizadas institucionalmente desde 1979 y de la transformación del Centro de Investigación en Energía en Instituto, llevada a cabo en enero del 2013, como consecuencia de la fortaleza de la planta académica y la consolidación de las líneas de investigación que se cultivan.

En su breve historia como Instituto de Energías Renovable en 2013 se obtuvo la aprobación del Consejo Universitario de la transformación del Centro de Investigación en Energía (CIE) en el Instituto de Energías Renovables, el 25 de enero, creación de la Unidad de Comunicación de la Ciencia con adscripción a la Secretaría Académica, el 19 de febrero, aprobación del proyecto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE Solar) liderado por el IER y la participación del Instituto en varios proyectos del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE Geo), una mayor colaboración con la industria, ya que se firmaron 23 convenios y existen 22 proyectos de investigación financiados con ingresos extraordinarios. A continuación, se presenta un ejemplo de los proyectos del IER. **(Del Río, 2013).**

1.1.1. Proyectos del IER

Monitoreo del sistema de calentamiento solar de la alberca de UNAM.

La instalación del monitoreo del sistema de calentamiento solar de alberca de C.U. está integrada por un sistema de calentamiento solar con 482 colectores solares fabricados en polipropileno de alta densidad, distribuidos en dos secciones; “Ludoteca” con 216 colectores y “Pasillo” con 266 colectores, sumando en conjunto un área de captación de 1856 m². El sistema está diseñado para dar una fracción solar a los requerimientos de la alberca de aproximadamente un 20%,

considerando calentar el agua de la alberca a una temperatura de 27°C, siendo el volumen de agua en la alberca de 6000 m³ (6, 000,000 litros).

El calentamiento del agua de la alberca se realiza de manera indirecta utilizando intercambiadores de calor de placas, circulando el agua caliente proveniente de los colectores por el circuito primario cerrado y circulando el agua de la alberca en el circuito secundario del intercambiador.

Para el registro de las variables termodinámicas del sistema de calentamiento solar y poder medir su aportación de energía, se instalaron sensores electrónicos para medir la temperatura a la entrada y salida de los colectores solares, así como el flujo másico de agua de los circuitos primarios de las dos secciones, además del flujo másico y la temperatura del agua de succión y retorno, que es tomada de la alberca y que circula por los circuitos secundarios.

También se instaló una estación meteorológica para medir las variables (irradiación, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad y dirección de viento, y precipitación pluvial). (**Fest y Brown, 2017**).

1.2. CEMIE-Sol

El centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE-SOL) es un proyecto nacional, integral e incluyente que comprende la estructuración de un consorcio que genere sinergias en favor del aprovechamiento de energía solar en el país, la planeación científico-tecnológica de mediano y largo plazo para el conocimiento, dominio y su uso favorable de esta energía, y la integración y ejecución de una cartera de proyectos estratégicos que propicie la ejecución de resultados de valor para el sector energético del país.

El consorcio conjunta y consolida instituciones y empresas de todo el país referentes en materia de energía solar. El grupo es liderado por el Instituto de Energías Renovables, de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), y está conformada por 57 participantes entre los que se encuentran 47 instituciones de investigación y educación superior y 10 empresas.

Tiene como objetivos impulsar la generación de productos servicios comerciales sobre una base de innovación sólida, la creación de capacidades de emprendimiento en la industria solar de México desde una edad temprana, la generación de conocimiento sostenido y ascendente, la generación de talento de clase mundial, la promoción del uso estratégico de la tecnología solar

para su apropiamiento y su aprovechamiento social, entre otros. (Secretaria de Energía (SENER). 2012).

1.2.1. Proyectos de CEMIE-Sol

Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados

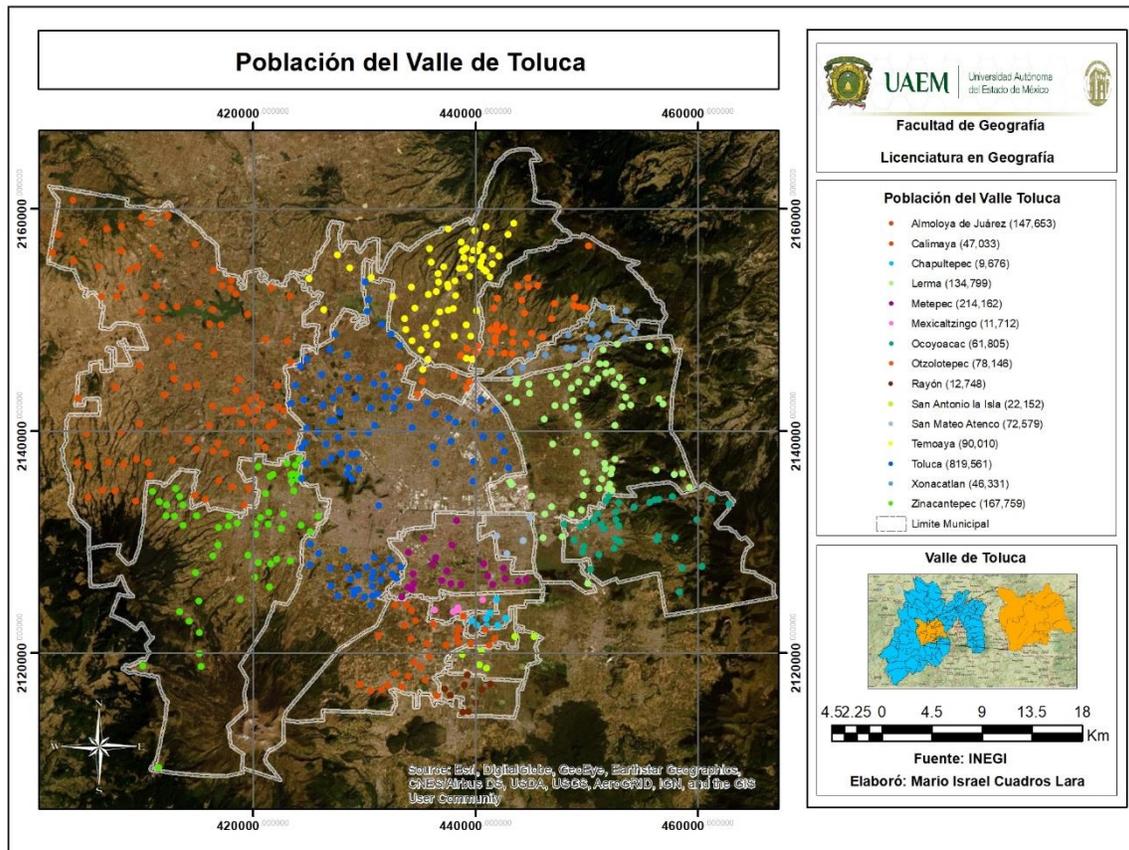
Desarrollar una tecnología limpia, de bajo costo, que permita eficientar la conversión de energía solar a energía eléctrica. Se crearán y probarán nuevos equipos científicos que conjuntarán tres áreas: seguidores solares, óptica (espejos) y nuevos materiales o celdas solares.

Al final del proyecto se obtendrán dos prototipos de concentradores solares: el primero, hará uso de celdas basadas en nitruros de galio-indio, las cuales se muestran más eficientes, estables, y con poca o nula afectación hacia el medio ambiente en comparación con las basadas en CdTe, GaAs o plomo; el segundo, utilizará celdas conocidas como PETE (por sus siglas en inglés Photon Enhanced Thermionic Emission) que tienen la peculiaridad de aprovechar tanto la luz solar (provocando el efecto fotoeléctrico) como el calor generado por esta (efecto fotónico). Las celdas tipo PETE tienen la ventaja de poder aprovechar el efecto térmico, sin ser dañadas (como ocurre con las primeras). Con el segundo prototipo se podrán concentrar hasta 1000 soles en una celda de área aproximada a 4 cm², provocando un aumento en la temperatura hasta llegar a los 600-700 °C, eficientando, con ello, la salida de electrones del material utilizado. (García, 2015).

Población

De acuerdo al censo de población y vivienda (2010), realizado por el Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), la población del área de estudio corresponde a (1, 936,126 habitantes) de los cuales (993,910 son mujeres) y (942,109 son hombres), a continuación, se muestra el número de población por municipio (Iter 2010). (Mapa 2)

Mapa 2: Población del valle de Toluca

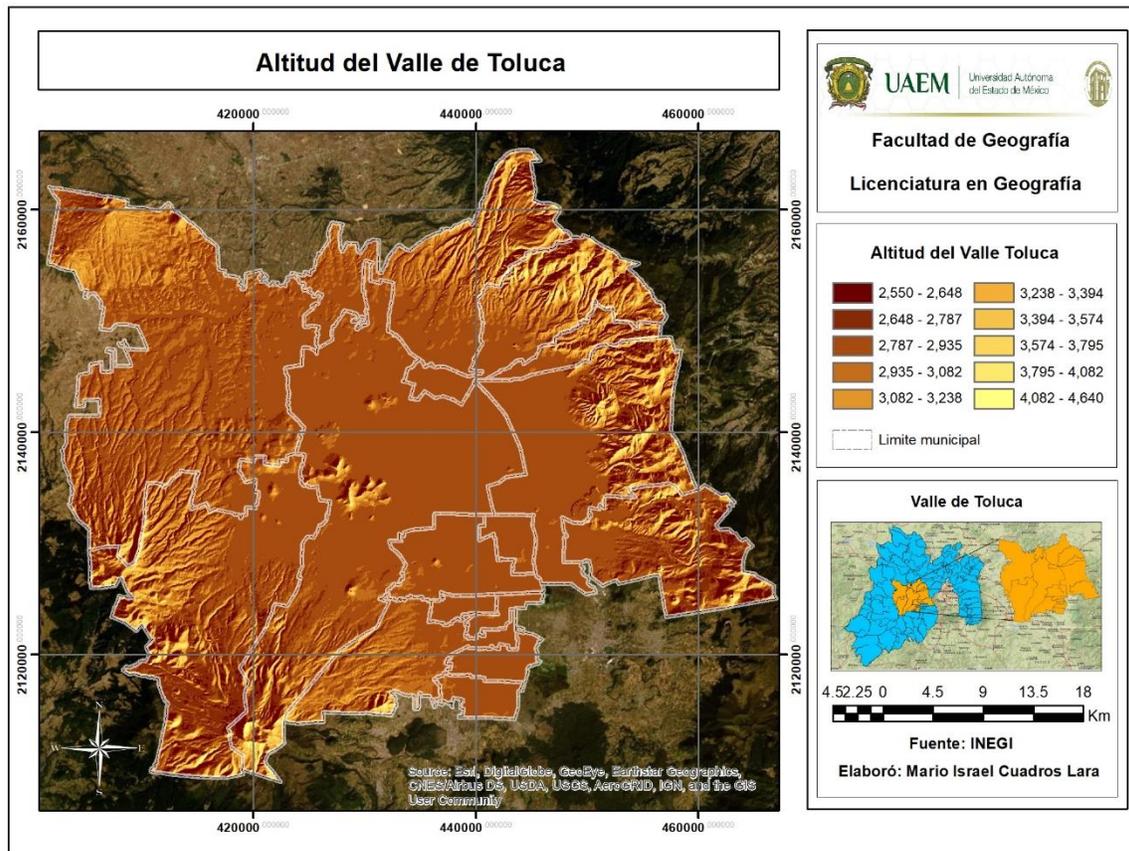


Fuente: (INEGI 2010)

Altitud

El valle de Toluca se caracteriza por tener contrastes importantes, en la zona centro se encuentra la menor altitud de toda el área de estudio, principalmente esta área comprende a la zona urbana del municipio de Toluca, con una altitud de (2550 msnm), y al suroeste hasta los (4640 msnm) que corresponde al volcán Xinantécatl, también conocido como nevado de Toluca, el cual representa la mayor altitud del área de estudio, por lo que existe una gradiente altitudinal de (2090 m), lo que de igual forma genera un gradiente de temperatura considerable y condiciones idóneas para la existencia de diferentes tipos de vegetación. A continuación, se muestra la altitud del área de estudio. (PRDUVT 2005). (Mapa 3)

Mapa 3: Altitud del valle de Toluca

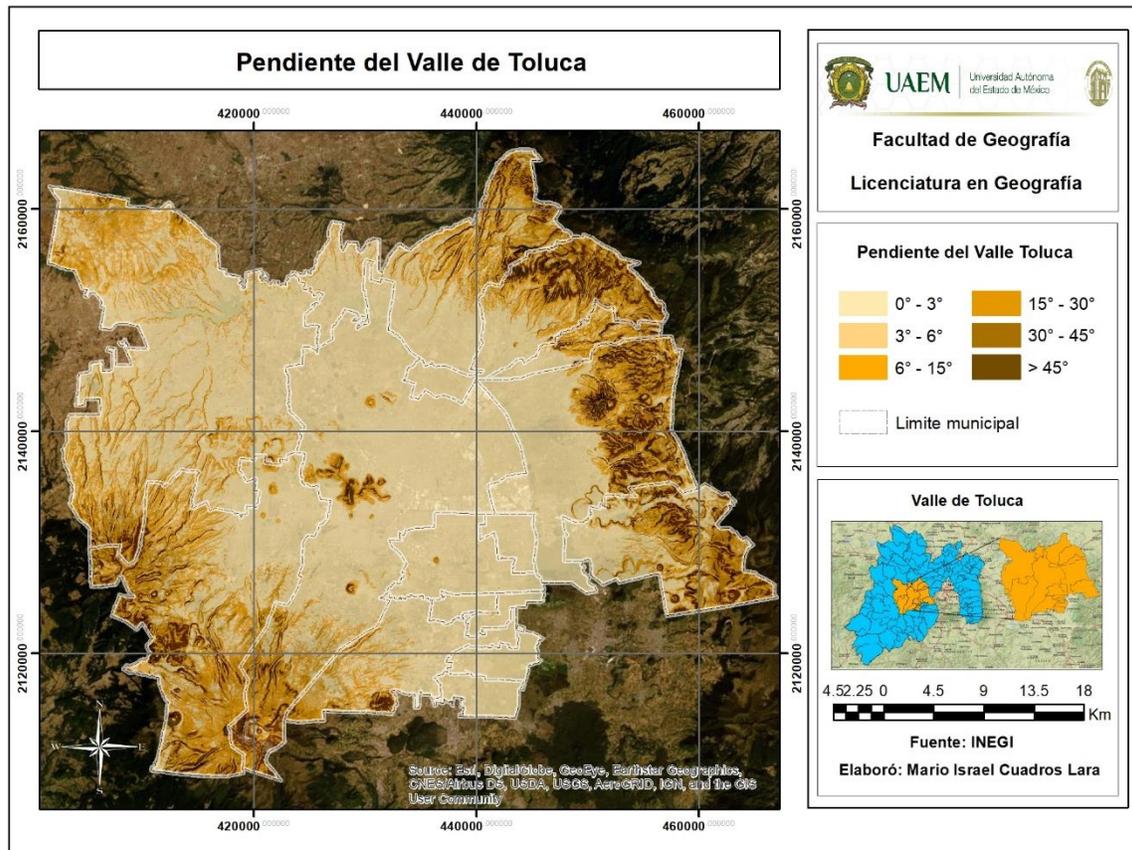


Fuente: (INEGI)

Pendiente

La pendiente del valle de Toluca está constituida por diversos factores, entre los que se pueden mencionar la litología y estructura geológica la geometría de vértices y la intensidad y tipo de procesos modeladores del relieve, ya que el área de estudio forma parte de la superficie del Eje Neovolcánico así como de a Sierra Madre del Sur, por lo que se identifican pendientes que van de ($0^\circ - 3^\circ$) hasta ($> 45^\circ$), de acuerdo a las elevaciones que se encuentran dentro de área, en la zona centro se localizan las áreas planas, mientras que en la periferia se encuentran las pendientes más pronunciadas de caída libre, según la clasificación de (Lugo, 1988). (Mapa 4)

Mapa 4: Pendiente del Valle de Toluca

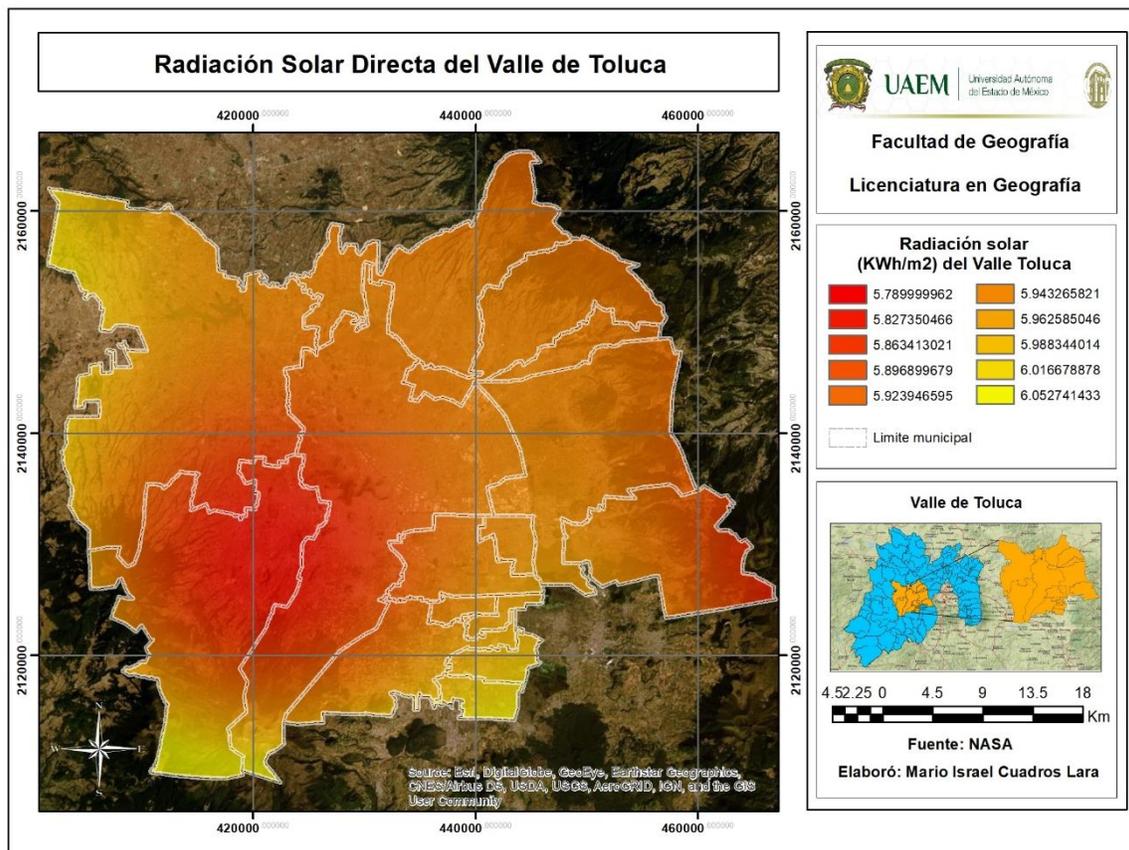


Fuente (INEGI)

Radiación Solar

En México durante el invierno la radiación solar presenta los valores más bajos en el norte del país que corresponden a (2-2.5 KWh/m² día), mientras que hacia el sur de la República estos valores aumentan ligeramente conforme disminuye la latitud, alcanzando temporalmente cifras elevadas de hasta (4.5-5 KWh/m² día), por el contrario, en verano la radiación solar es máxima en el noreste y en la península de Baja California es hasta de (7-8 KWh/m² día). En el resto del país es de (5-6 KWh/m² día), valores bajos que se deben a la entrada de aire marítimo tropical en la porción sur de México, para el valle de Toluca se presenta una radiación anual con una mínima de (5.7 KWh/m² y máxima 6.0 KWh/m²), siendo esta área potencial en radiación solar. (Tejada 2015) (Mapa 5)

Mapa 5: Radiación directa solar del vale de Toluca

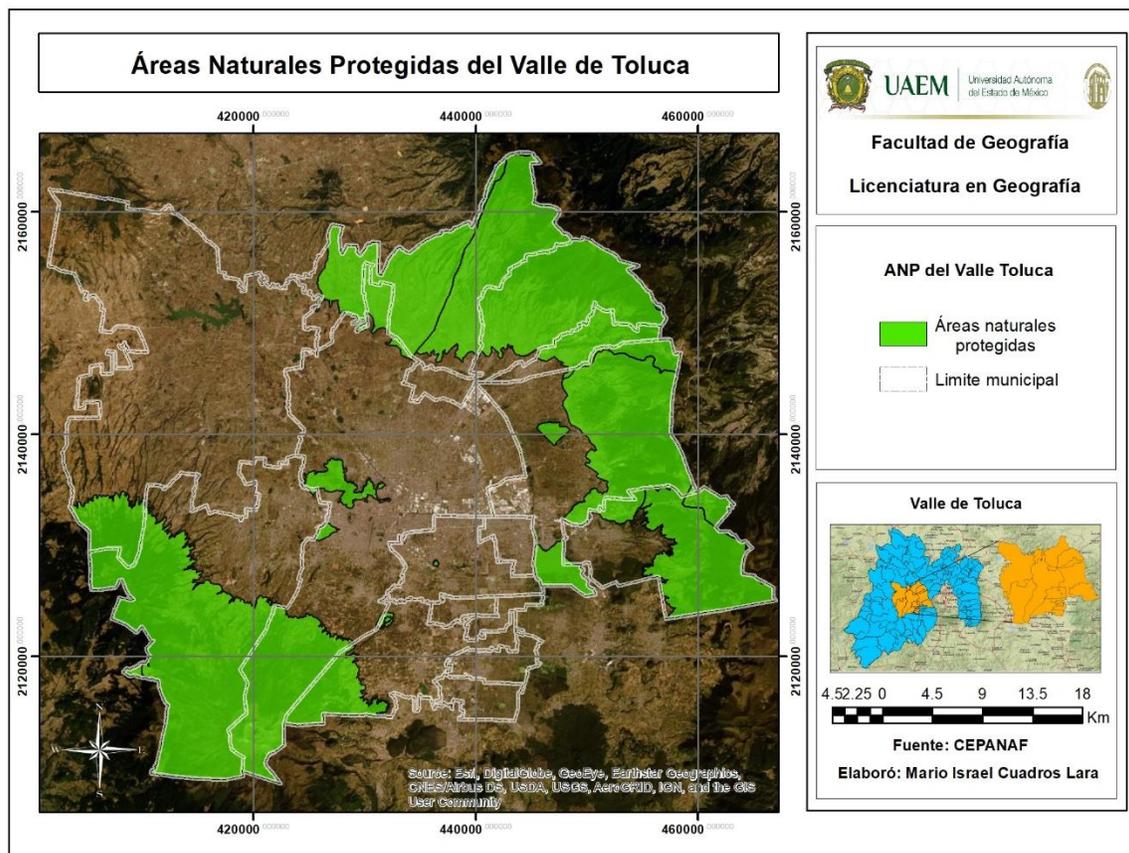


Fuente: (NASA)

Áreas naturales protegidas

El Estado de México cuenta con 88 Áreas Naturales Protegidas, por lo que es la entidad con el mayor número de ellas en el país. Suman un total de (983,984.04 ha), que representan aproximadamente el (43.75 %) del territorio estatal. A la fecha se tienen 28 programas de conservación y manejo publicados, los que representan una superficie de (398,115.50 ha), equivalente al (40.45 %) de la superficie protegida., mientras que el valle de Toluca el cual pertenece al mismo estado, suman un total de (42,614.915 ha) dentro de las cuales se encuentran parques nacionales, estatales, municipales, área de protección de flora y fauna y área de recursos naturales (CEPANAF 2014). (Mapa 6)

Mapa 6: Áreas naturales protegidas del valle de Toluca

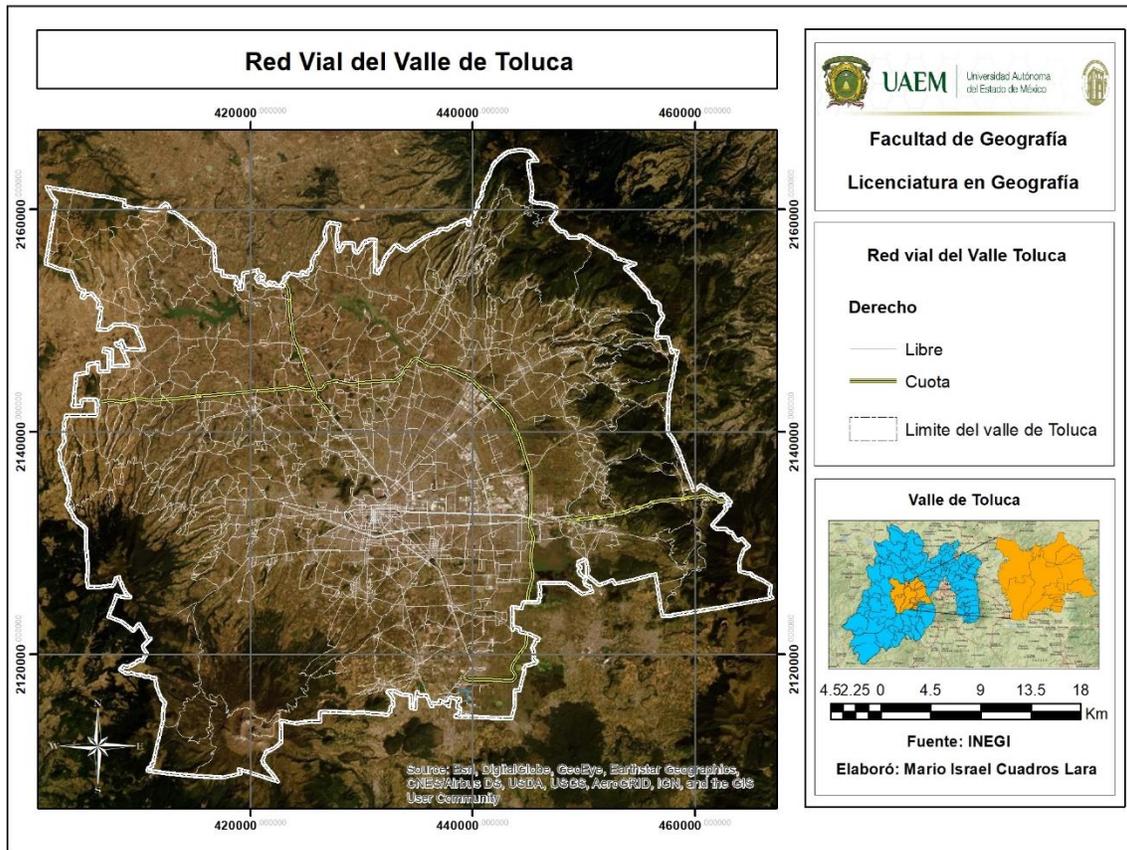


Fuente: (CEPANAF)

Red vial

La red vial son caminos que atiende el Estado de México a través de la Junta de Caminos del Estado de México y el Sistema de Autopistas, Aeropuertos, Servicios Conexos y Auxiliares del mismo, la junta de caminos atiende (4,326.67 km) divididos en (4,032.97 km) pavimentados y (293.70 km) revestidos y el SAASCAEM, atiende (393.10 km) de autopistas, el valle de Toluca cuenta con (3,442.21 km) de red vial. (JCEM 2018) (Mapa 7)

Mapa 7: Red vial del valle de Toluca



Fuente: (INEGI)

Capítulo 2. Marco Teórico, Conceptual.

2.1. Las centrales de energía solar

La energía solar es el proceso de transformación de la luz solar directamente en electricidad mediante células solares. Dentro de cada célula hay capas de un material semiconductor especialmente tratado formando dos capas (positiva en una parte y negativa en la otra) para formar un campo eléctrico. Cuando la luz solar incide sobre la célula se liberan electrones a través de las capas formando una corriente eléctrica. **(Martín, 2014)**

Una central de energía solar (CE) consta de varios componentes que incluyen las células solares, conexiones eléctricas, soportes y sistemas para regular la salida eléctrica (inversor). Debido a la baja tensión de una célula solar individual, necesitan ser combinadas y conectadas entre sí en una matriz de varias células formando los módulos fotovoltaicos. **(Martín, 2014)**

2.1.1. Características generales de las centrales de energía solar

Las centrales solares son el dispositivo en el que se produce la conversión de luz en electricidad gracias a las propiedades de los semiconductores por una parte y a las estructuras (unión pn, heterounión, interfaz sólido-electrolito) que permiten extraer los electrones excitados de la célula, antes de que vuelvan a su estado de equilibrio térmico, hacia un circuito exterior para que realicen un trabajo. **(NAP, 2007)**

Las centrales de energía solar transforman la energía radiante del sol en energía eléctrica. Este proceso de transformación se produce en un elemento semiconductor que se denomina célula fotovoltaica. Cuando la luz del sol incide sobre una célula fotovoltaica, los fotones de la luz solar transmiten su energía a los electrones del semiconductor generándose así una corriente eléctrica capaz de circular por un circuito externo. **(Recarte 2013)**

Para hacer posible el manejo práctico de las células fotovoltaicas, estas se presentan asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un bloque llamado panel o módulo fotovoltaico, que constituye el elemento básico para la producción de electricidad. Normalmente, un módulo fotovoltaico está formado por unas 36 células, teniendo diferentes medidas que oscilan desde el 0,5 m² hasta 1 m², el grosor también oscila entre 3,5 cm y 5 cm. **(Recarte 2013)**

El módulo fotovoltaico está formado por unos conjuntos de células solares conectadas entre sí en serie y paralelo hasta conseguir el voltaje adecuado para su utilización, este voltaje suele ser de 12 V, aunque a plena radiación solar y 25 °C de temperatura suele ser de 15 V a 17 V. El conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que lo soportan. **(Recarte 2013)**

2.1.2. Tipología

Existen dos formas de utilizar la energía eléctrica generada a partir del efecto fotovoltaico. Primeramente, encontramos instalaciones aisladas de la red eléctrica, que son sistemas en las que la energía generada se almacena en baterías para poder disponer de su uso cuando sea preciso. **(Recarte 2013)**

En segundo lugar, encontramos las instalaciones conectadas a la red eléctrica convencional, en las que toda la energía generada se envía a la red eléctrica convencional para su distribución donde sea demandada. **(Recarte 2013)**

2.1.3. Ventajas e inconvenientes

La energía solar presenta ventajas e inconvenientes tanto técnicas como no técnicas. A menudo, las ventajas y desventajas son diametralmente opuestas a las de las centrales convencionales de combustibles fósiles. Por ejemplo, las plantas de combustibles fósiles provocan emisiones peligrosas para el medio ambiente, usan una fuente limitada, su coste tiende a crecer y no son modulares, es decir, no se pueden hacer plantas pequeñas. La energía solar no tiene ninguno de esos problemas, por el contrario, tiene la desventaja de su difícil almacenamiento. Por último, coinciden en ser ambas tecnologías muy fiables. **(NAP, 2007)**

Identificamos las ventajas e inconvenientes de la energía solar (Tabla 1). Algunos de estos últimos no son técnicos, sino que están relacionadas con la economía o las infraestructuras, pero pueden compensarse parcialmente gracias a la gran aceptación pública y por los indudables beneficios al medio ambiente. **(NAP, 2007)**

Tabla 1: Ventajas e inconvenientes

Ventajas	Inconvenientes
Limpia, renovable, silenciosa	Gran inversión inicial
Retribuida económicamente la producción para venta de red	Difícil almacenamiento
Corto pago de la energía	Proceso de fabricación de módulos complejo y caro
Sin partes móviles y modular	No competitiva con otras energías en la actualidad
Elevada fiabilidad	Producción variable según climatología y época del año

Fuente: (NAP, 2007)

2.2. Requerimientos para la instalación de una central de energía solar.

2.2.1. Requerimientos geográficos

Cobertura de suelo

Consideraciones respecto a la disponibilidad y usos del suelo. Se considera el uso actual del suelo como una de las influencias más fuertes para la localización de actividades con el fin de determinar con precisión las medidas protectoras y/o correctoras a aplicar para conseguir una buena integración una vez concluida la fase de construcción. Los factores considerados son: Superficie de ocupación necesaria: La construcción de una central de energía solar necesita que exista una superficie de terreno lo suficientemente amplia para albergar dicha instalación, requiriendo una superficie mínima de 5 ha. **(Perpiña, 2012)**

Regulación de los usos del suelo: Las zonas urbanas, industriales y similares no son edificables nuevamente, al igual que los cuerpos de agua. Se clasifica, por un lado, en suelo urbano, urbanizable y no urbanizable, y por otro respecto a la calificación se contempla los usos globales: residencial, industrial, terciario, protegido, dominio público, común. En concreto, a partir de la legislación vigente, para la localización de una instalación energética es necesario que el suelo sea no urbanizable común. **(Perpiña, 2012)**

Altitud

Este criterio es mencionado como una gran determinante para la generación de energía solar, ya que a mayor altitud reduce la radiación solar directa, por ello se determinó específicamente que una altitud adecuada debe ser menor a 2.800 metros. **(García 2001)**

Pendiente

Las construcciones de estas instalaciones requieren, para minimizar los costes, establecerse en terrenos llanos, con lo que la adecuación del territorio es inversamente proporcional al valor de la pendiente del lugar. Se pretende establecer el acceso por depresiones naturales y poco abruptas, además de evitar zonas erosionables. **(Perpiña, 2012)**

Este es un factor importante al localizar las zonas adecuadas para la central de energía solar y se considera, ya que este tipo de tecnologías necesitan zonas planas o semiplanas. Es por ello que se propone considerar solo las áreas con pendiente menor a 3%. Esto con el fin de evitar las sombras que se puedan generar. **(Hernández, 2017)**

2.2.2. Requerimientos atmosféricos

Radiación

El sol produce constantemente energía electromagnética, que nos llega directamente a la Tierra. La radiación solar global consta de tres componentes: radiación directa, difusa y reflejada. La radiación solar directa es la fracción de la radiación que tiene una trayectoria bien definida en forma de ondas electromagnéticas. Irradiación es la energía incidente en una superficie por unidad de superficie y a lo largo de un cierto periodo de tiempo. **(Perpiña, 2012)**

Conocer los recursos en tecnologías de concentración supone tener datos de la radiación directa. La medida de la radiación directa es costosa y compleja, por lo que son pocas las estaciones meteorológicas que disponen de datos. La evaluación del potencial solar es una labor que requiere de un periodo muy amplio de toma de datos, del orden de años. A esto se suma la necesidad de realizar una toma de datos suficientemente detallada, para que los valores obtenidos sean representativos y reflejen las particularidades de cada microclima. Normalmente se emplean modelos que estiman la radiación directa a partir de otras variables meteorológicas o de datos de satélites. **(Perpiña, 2012)**

Las condiciones de funcionamiento de una central solar fotovoltaica dependen de variables externas tales como la radiación solar. Para poder efectuar el diseño de una instalación solar fotovoltaica se necesita saber la radiación del lugar. Para ello se ha de disponer de los datos de radiación solar actualizados y de fuentes de reconocido prestigio. **(Recarte 2013)**

Para un aprovechamiento rentable de la energía solar, algunos autores plantean que la radiación debe tener un cierto valor y ser de un tipo específico, por ejemplo, los lugares adecuados para la instalación de una central de energía solar deben ofrecer al menos 2 KWh/m² de irradiación solar directa anual, aun pudiendo funcionar con umbrales inferiores, pero enclaves óptimos debieran ofrecer más de 2.5 KWh/m². **(Hernández, 2017)**

México está ubicado en el cinturón solar de la tierra. El país tiene una alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas. Con una irradiación media anual de aproximadamente 6.6 KWh/m² por día, México es uno de los países a nivel mundial que presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía, es por ello que el estado de México, puede presentar zonas potenciales ya que en esta parte del territorio mexicano se presenta una irradiación media anual de aproximadamente 5.4 kWh/m². **(Hernández, 2017)**

Irradiación (Insolación)

La irradiación también conocida como insolación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo. La irradiancia es la utilizada para describir el valor de la potencia luminosa (energía/unidad de tiempo) incidente en un determinado instante por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Por su diferente comportamiento, la irradiación la podemos separar en tres componentes: la directa, la difusa y la reflejada. **(Martín, 2014)**

- Directa: Es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera. Es la mayor y las más importante en las aplicaciones fotovoltaicas.

- Difusa: Es la que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aún de día, como sucede por ejemplo en la luna.
- Reflejada: Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas. **(Martín, 2014)**

2.2.3. Requerimientos y limitaciones socio-económicas

Proximidad a la población

La demanda queda establecida mediante la distribución espacial, es decir, aquellos consumidores potenciales de la oferta (energía solar). La demanda es localizada por los núcleos de población, en función del número de habitantes, representado por un elemento poligonal, para llevar a cabo medida de distancias (proximidad). **(Perpiña, 2012)**

Proximidad a las zonas inundables

Cabe destacar que existen áreas en el territorio con características especiales, ya sean de origen natural o artificiales sobre los cuales se ha de adoptar una política conservativa y proteccionista. En el estudio estos son los limitantes y se han considerado las zonas inundables, para garantizar la seguridad de la central de energía solar frente a inundaciones requieren una franja de protección entorno al elemento de 300 m. **(Perpiña, 2012)**

Proximidad a la infraestructura eléctrica

La red de transporte de energía eléctrica es la parte del sistema de suministro eléctrico constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas. **(Hernández, 2017)**

Una línea de transporte de energía eléctrica o línea de alta tensión es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión de la energía eléctrica a grandes distancias. Está constituida tanto por el elemento conductor, usualmente cables de acero, cobre o aluminio, como por sus elementos de soporte, las torres de alta tensión. **(Hernández, 2017)**

2.2.4. Restricciones a la localización

Áreas Naturales Protegidas

La adecuación del territorio es directamente proporcional a la distancia que les separa de estos elementos. Esto es debido a que estos espacios son susceptibles de ser contaminados por algún residuo, además de que legalmente están excluidos para cualquier otro uso. Lugares de interés y patrimonio histórico, así como vías pecuarias y actividades colectivas tradicionales. **(Perpiña, 2012)**

Áreas inundables

Es un elemento del medio natural muy vulnerables sobre todo a nivel superficial, en este caso concreto, evitando la contaminación de las aguas o infraestructura relacionada por algún tipo de residuo proveniente de la instalación. La adecuación del territorio es directamente proporcional a la distancia que les separa de cualquier curso de agua o infraestructura relacionada. **(Perpiña, 2012)**

Cuerpos de Agua

Es un elemento del medio natural muy vulnerables sobre todo a nivel superficial, en este caso concreto, La adecuación del territorio es directamente proporcional a la distancia que les separa de cualquier curso de agua o infraestructura relacionada. La proximidad a los cauces fluviales, así como lagos, lagunas, embalses, etc., requieren una franja de seguridad en torno al elemento. **(Perpiña, 2012)**

Núcleos urbanos

La configuración del entorno urbano varía dependiendo de la distribución de las viviendas, su estructura y también su antigüedad. Como es habitual en la mayoría de los núcleos urbanos, la zona centro suele ser un área de gran concentración de edificios y con una distribución de manzanas no demasiado homogénea que adquiere una estructura más ordenada y con menor densidad de viviendas en las zonas que han sido urbanizadas posteriormente. **(Hernández, 2017)**

En cuanto a la distribución de la población de núcleos urbanos, estos son un factor restrictivo para hallar las zonas adecuadas, puesto que estos no se pueden modificar ni cambiar. **(Hernández, 2017)**

Población dispersa

La población dispersa se establece fuera de las áreas definidas como núcleos urbanos, en función de la densidad de población a nivel municipal, y de la distancia que separa la instalación de la zona urbana. Para esta se consideración población dispersa a las zonas rurales. **(Perpiña, 2012)**

Proximidad a la infraestructura

La asignación de la demanda a una instalación es uno de los puntos críticos en la teoría de la localización. Frecuentemente, la demanda es asignada a la instalación más próxima teniendo ésta la capacidad de absorber dicha demanda. En problemas de capacidad limitada, es posible repartir la demanda en caso necesario entre varias instalaciones, pero en el caso que no pudiera realizarse sería necesario introducir condiciones en el modelo para asegurar que toda la demanda sea asignada a una única instalación. En otros casos, el modelo interpreta que una fracción de la demanda es abastecida por la instalación más cercana, y el remanente será abastecido por otra más alejada. **(Perpiña, 2012)**

Proximidad a equipamiento e instalaciones

Un concepto relacionado con el de distancia es el de proximidad a equipamientos e instalaciones: la distancia desde cada objeto geográfico existente en un mapa a un lugar/objeto de referencia o destino. Esto puede ser representado mediante lo que se denomina mapa de proximidad de toda una región respecto a uno o varios lugares de referencia. **(Perpiña, 2012)**

2.3. Directrices normativas

Ley de la industria eléctrica (LIE)

La LIE tiene por objeto regular la planeación y el control del Sistema Eléctrico Nacional, el Servicio Público de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica y las demás actividades de la industria eléctrica. Las disposiciones de esta Ley son de interés social y orden público.

Esta Ley tiene por finalidad promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes. (LIE, 2014).

Tabla 2. Especificaciones relacionadas con la planeación y el control del sistema eléctrico

<i>Artículo</i>	<i>Fracción</i>	<i>Concepto</i>
13		<ul style="list-style-type: none"> • Promover la instalación de los recursos suficientes para satisfacer la demanda en el Sistema Eléctrico Nacional y cumplir con los objetivos de Energías Limpias.
14	<i>I y II</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Procurarán la operación del Sistema Eléctrico Nacional en condiciones de eficiencia, Calidad, Confiabilidad, Continuidad, seguridad y sustentabilidad. • Incluirán los elementos de la Red Eléctrica Inteligente que reduzcan el costo total de provisión del Suministro Eléctrico o eleven la eficiencia, Confiabilidad, Calidad o seguridad del Sistema Eléctrico Nacional de forma económicamente viable.

Fuente: (LIE, 2014)

Ley de transición energética (LTE)

La LTE tiene por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos. (LTE, 2015)

Tabla 3: Especificaciones relacionadas con el aprovechamiento sustentable de la energía

Artículo	Fracción	Concepto
2	II	<ul style="list-style-type: none"> Facilitar el cumplimiento de las metas de Energías Limpias y Eficiencia Energética establecidos en esta Ley de una manera económicamente viable.
	III	<ul style="list-style-type: none"> Incorporar las externalidades en la evaluación de los costos asociados a la operación y expansión de la Industria Eléctrica, incluidos aquellos sobre la salud y el medio ambiente.
	V	<ul style="list-style-type: none"> Establecer mecanismos de promoción de energías limpias y reducción de emisiones contaminantes.
	VI	<ul style="list-style-type: none"> Reducir, bajo condiciones de viabilidad económica, la generación de emisiones contaminantes en la generación de energía eléctrica.
	VIII	<ul style="list-style-type: none"> Promover el aprovechamiento sustentable de la energía en el consumo final y los procesos de transformación de la energía.

Fuente: (LTE, 2015)

Norma Mexicana Edificación Sustentable, NMX-AA-164-SCFI-2013

Esta norma mexicana especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable para contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguran su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural.

Campo de aplicación

La presente norma mexicana es de aplicación voluntaria para todas las edificaciones que se ubiquen dentro del territorio nacional, públicas o privadas, destinadas en su totalidad o en uso mixto a diferentes actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial.

Aplica a las edificaciones y sus obras exteriores, ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. Se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyendo proyectos de remodelación, renovación o reacondicionamiento del edificio. (NMX, 2013).

2.4. Aplicación de SIG para la localización de centrales de energía solar

Actualmente, la realización de análisis de localización de instalaciones/actividades mediante Sistemas de Información Geográfica es una práctica bastante extendida. Esto ha sido debido a los enormes avances que han experimentado los SIG, la disponibilidad de los datos para su aplicación real y la implementación de los modelos matemáticos necesarios en este ámbito. Los SIG son una herramienta adecuada para análisis de localización por muchos de los elementos que integra y son necesarios para tal fin, tales como las coordenadas de cualquier elemento, atributos alfanuméricos, representaciones gráficas, análisis espaciales, etc. Sin embargo, todavía en la actualidad los SIG poseen deficiencias para cubrir las exigencias de las modernas técnicas de localización. La constatación de estas insuficiencias ha llevado a plantear la ampliación y mejora de las técnicas de los SIG para adecuarlas a la operabilidad de estas teorías, e incluso se ha desarrollado el denominado Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE). **(Perpiña, 2012)**

Además, se ha hecho un esfuerzo por integrar las teorías y cálculos matemáticos para salvar los diferentes obstáculos que presentaban los SIG creando otro software específico para análisis de localización, como el denominado localiza. **(Bosque y Moreno, 2004).**

Se tiene un ejemplo concreto en el estudio presentado en las I Jornadas de SIG libre donde se describe la utilidad y funcionalidad de dicha herramienta para resolver y analizar problemas de localización óptima de instalaciones. **(Bosque et al., 2007).**

Sin embargo, los avances que se están realizando son significativos y merecen de nuestro interés por dos razones fundamentalmente. La primera, porque parece que avanzan por el camino adecuado para la toma de decisiones, y en segundo lugar porque la utilización de estos recursos parece legítima siempre que se tomen los resultados como aproximaciones parciales a la solución. Por todo ello, cabe afirmar, que los modelos de optimización espacial pueden ser de indudable utilidad para diversos fines. **(Perpiña, 2012)**

Los modelos de localización-asignación, en su nomenclatura general constituyen un conjunto de modelos matemáticos que se han ido incluyendo en los SIG incorporados como un análisis de redes, como hemos apuntado anteriormente. Su objetivo puede ser sintetizado como encontrar la mejor localización, es decir, la óptima de cualquier fenómeno, que generalmente suelen ser servicios, instalaciones o actividades. Un gran número de ejemplos prácticos y aplicaciones tales como la localización de un hospital, escuelas rurales, localización de contenedores de residuos

sólidos urbanos, localización óptima de una planta de tratamiento de residuos peligrosos. **(Bosque y Moreno 2004).**

2.4.1 Los modelos de evaluación de criterios múltiples (MCE) en el ambiente SIG

Las técnicas de evaluación de criterios múltiples (MCE) han sido aplicadas en un gran número de disciplinas, una de ellas es la MCE-SIG, utilizando diferentes criterios y factores según el objeto del estudio, tales como la planificación y ordenación territorial, localización de instalaciones, mapas de usos del suelo, reducción de riesgos naturales e impactos ambientales, físicas, etc. Principalmente, se utilizan para ayudar y facilitar la toma de decisiones de determinados problemas que atañen a un territorio, encontrando para ello la mejor solución. Con esta finalidad surgen los denominados Sistemas de apoyo para la toma de decisiones (Decision Support System, DSS) tratándose de un nexo de unión entre la información que se gestiona a partir de técnicas de modelado y la elección de una decisión por parte de gestores ante una determinada situación. **(Perpiña, 2012)**

Las técnicas de evaluación de criterios múltiples resultan una herramienta muy útil en una gran diversidad de problemas enmarcados en la ordenación del territorio, siendo una aproximación muy válida para evaluar y analizar zonas antes de llevar a cabo una decisión política o un proceso de planificación. En el momento que un proceso de MCE empieza un gran número de elementos deben ser tenidos en cuenta, tales como el objetivo a alcanzar, los factores implicados (criterio o limitantes), los pesos, las diferentes matrices y la elección de las reglas de decisión. **(Perpiña, 2012)**

Evaluación multiobjetivo vs evaluación multicriterio

Multiobjetivo

Actualmente, es conocido el hecho de que en la mayoría de los problemas de localización de instalaciones o de asignación de rutas participan otros objetivos que influyen en la decisión final, lo que se conoce como análisis multiobjetivo. El objetivo de este análisis es: minimización de costes/distancia, asignación y cobertura de la demanda, maximización de beneficios y preocupación ambiental. **(Current et al., 1990).**

Multicriterio

La finalidad de la Evaluación multicriterio es la de investigar un número de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto. Además, puede utilizarse para inventariar, clasificar, analizar y organizar convenientemente las alternativas en un proceso de planificación urbana y regional. Orientado en este ámbito el principio básico de una evaluación multicriterio se centraría en componer una matriz de evaluación cuyos elementos fueran, por una parte (columnas), un conjunto de alternativas, y por otra (filas), un conjunto de criterios, para solucionar un problema previamente definido. **(Voogd 1983).**

Dentro del análisis multicriterio se pueden distinguir dos grandes ramas, la denominada decisión multicriterio discreta, donde la búsqueda de la mejor opción entre un número finito de alternativas posibles es el principal objetivo y, en segundo lugar, basada en la programación lineal con criterios múltiples apoyándose en los algoritmos relacionados con la misma, como por ejemplo el método simplex. **(Barba y Pomerol, 1997)**, El problema de la decisión multicriterio puede darse en cualquier ámbito, público o privado y en cualquier situación actúa un decisor el cual tiene la responsabilidad de escoger entre varias posibilidades, denominadas alternativas. Al conjunto de éstas se le denomina conjunto de elección, donde para seleccionar la alternativa más adecuada dentro de este conjunto, el decisor dispone de una serie de criterios, que pueden ser en determinados casos contradictorios entre sí, dependiendo del ángulo desde el cual se quiera abordar el problema (económico, social, ambiental, etc.). **(Perpiña, 2012)**

La matriz de decisión

La (MCE) se basa principalmente en una serie de alternativas, que a su vez éstas, han sido determinadas por unos criterios. Así pues, la estructura que se desprende de dicha relación es aquella organizada en forma de matriz. La matriz denominada matriz de Evaluación, donde cada fila expresa las cualidades de cada alternativa (i) con respecto a los (n) criterios que se han considerado. Cada columna (j) representa las evaluaciones de todas las alternativas con respecto al criterio (j). (Tabla 4). Los valores internos de la matriz se denominan puntuaciones de los criterios, los cuales indican la adecuación de cada alternativa en función de cada criterio. Esto convierte a esta fase, asignación de valores a cada alternativa, una de las más importantes, y donde diferentes métodos de (MCE) despliegan todo su potencial. **(Perpiña, 2012)**

Tabla 4: Matriz de evaluación

		Criterios			
		C₁	C₂	C_i	C_n
Alternativas	A ₁	Valoración de Criterios			
	A ₂				
	A ₃				
	A _m				

Fuente. (Perpiña 2012)

Uno de los elementos que se han de tener en cuenta una vez se ha constituido la matriz de evaluación, es el peso o ponderación de los criterios. (Tabla 5) Estos nos determinan cuales son los criterios más relevantes de los establecidos para la actividad evaluada. A cada criterio se le asigna un peso (W_j) a partir de un valor específico, de acuerdo con el nivel de importancia relativa. Para establecer los pesos a los criterios existen distintas técnicas. Así, podemos componer la matriz de prioridades teniendo en cuenta diferentes puntos de vista y otorgar el peso adecuado. **(Perpiña, 2012)**

Tabla 5: Matriz de prioridades

		Criterios			
		C₁	C₂	...	C_n
Puntos de vista	V ₁	Peso (W_j)			
	V ₂				
	...				
	V _m				

Fuente: (Perpiña, 2012)

Por último, una vez establecidas la matriz de evaluación y de prioridades, es posible establecer la matriz de valoración. Esta indicará un valor r_i para cada alternativa, es decir, la capacidad de cada una de ellas para acoger la actividad. **(Perpiña, 2012)**

Tabla 6: Matriz de valoración

		Alternativas			
		A ₁	A ₂	...	A _i
Puntos de vista	V ₁	Valores r _i			
	V ₂				
	...				
	V _m				

Fuente: (Perpiña, 2012)

La regla de decisión

La aplicación de las reglas de decisión es el procedimiento por el cual se obtiene una evaluación concreta. Se trata específicamente de la selección entre alternativas, es decir, son las reglas de decisión las que dictan la clasificación de cada alternativa. La elección de una alternativa respecto a las demás conlleva consecuencias, lo que se denomina resultado de la decisión, y el conjunto de estas consecuencias forman el espacio de los resultados de la decisión. La regla de decisión puede ser compleja cuando se desea integrar un conjunto de criterios distintos, lo que conocemos como evaluación multicriterio. **(Malczewski 1999)**

En un entorno SIG, la adición de las capas resultantes (donde anteriormente, a cada alternativa espacial se le ha asignado un valor de capacidad de acuerdo con la actividad evaluada) de los criterios adoptados, conforman las reglas de decisión. **(Malczewski 1999)**

Cuando el decisor ha establecido los criterios respecto a la evaluación, está en disposición de establecer preferencias sobre ellos. Esto significa en la práctica que no todos los criterios tienen la misma importancia y, por lo tanto, se expresan en términos de “pesos”. **(Malczewski 1999)**

El vector de ponderación

No todos los criterios tienen la misma importancia respecto a otros, pudiendo ser debido por ejemplo a circunstancias personales y por lo tanto subjetivas u objetivas. De modo que, para jerarquizar dichos criterios se utilizan los pesos o ponderaciones, y pueden ser definidos como el valor asignado a un criterio de evaluación que indica su importancia relativa respecto a otros

criterios bajo consideración. Cuanto más elevado es el valor asignado al peso, más importante es el criterio en el sistema global (**Malczewski 1999**).

Una notación aceptada y difundida para el concepto de peso es (w_j) que es el peso asignado al criterio (j) independientemente del carácter del mismo. También haremos mención al vector de pesos $w = [w_1, \dots, w_n]$ que define el conjunto de todos ellos. En este tipo de análisis los pesos, usualmente, son normalizados y por lo tanto cumplen que

$$\sum w_j = 1.$$

La principal diferencia entre los métodos que se describen a continuación es la precisión de cada uno de ellos, la facilidad de uso, el entendimiento por parte del decisor, el fundamento teórico y la disponibilidad o facilidad de incorporación en los SIG. (**Perpiña, 2012**).

Método de la comparación por pares (pairwise comparison methods). Se fundamentan en establecer una matriz cuadrada donde sus filas y sus columnas están definidas por el número de factores a ponderar. De este modo, se comparan pares de factores, estableciendo la importancia que tiene cada uno frente a los demás. Posteriormente se determina el eigenvector, donde quedan establecidos los pesos, y también el eigenvalor que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores (**Saaty 1980**).

Desarrollo de la matriz de comparación por pares. Para constituir una matriz es necesario utilizar una escala de valores del 1 al 9 (y los inversos), comparando dos factores mediante un juicio de valor, completando todas las celdas, donde la matriz es recíproca, es decir, ambos lados de la diagonal tienen valores inversos. (Tabla 7)

Tabla 7: Escala de valores para comparación por pares

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremo	Muy Extremo	Fuerte	Moderado	Igual	Moderado	Fuerte	Muy Extremo	Extremo

Fuente: (Perpiña, 2012)

Cálculo de los pesos de los criterios. Se calculan los pesos a partir de una serie de juicios de valores entre pares de factores. Esta fase agrupa las siguientes operaciones: 1) suma de los valores de cada columna de la matriz, 2) Normalización de los pesos de la matriz, y 3) cálculo de la media de los elementos de la matriz normalizada para cada fila para estimar los pesos relativos que están siendo comparados. El valor más alto representa el criterio más importante. **(Perpiña, 2012)**

Estimación de la razón de consistencia. El ratio de consistencia determina la coherencia aritmética de las matrices de comparación por pares establecidas. Este valor se establece a partir del índice de consistencia (CI) y un índice aleatorio (RI). Para afirmar que los juicios de valor. **(Perpiña, 2012)**

La implementación de la (MCE) en ambiente SIG

Materializando la teoría vista anterior, ésta debe obtenerse a partir de capas temáticas (mayoritariamente entidades poligonales), las cuales sirven para, a partir de un objetivo planteado, establecen los criterios a través de los cuales se evalúa la aptitud de cada uno de los factores que intervienen en el uso o actividad. **(Perpiña 2012)**

El software IDRISI ha desarrollado diversos módulos donde se exploran procedimientos específicos de localización multicriterio para objetivos que entran en conflicto. Uno de estos módulos denominado *Multi-criteria Evaluation* es el principal a la hora de formar las matrices de evaluación, aunque con una limitación muy importante respecto al número de factores que pueden ser combinados no pudiéndose superar el número de 16. Este módulo se basa en el método de comparación por pares (Jerarquías analíticas de Saaty) por tratarse del más eficiente en un ámbito multicriterio. Otro de los módulos destacados es el WEIGHT, en el cual se introduce la matriz de comparación por pares obteniendo así los valores de los pesos de cada factor. Este es uno de los SIG ráster más empleados en planificación empresarial, territorial y ambiental. **(Gómez y Barredo, 2005).**

No obstante, existen algunos problemas importantes para un correcto uso de la MCE dentro de un SIG. En especial el amplio número de alternativas habitualmente existentes en un problema de planificación territorial (en muchas ocasiones las alternativas coinciden con los puntos del territorio) dificulta el empleo de muchas Técnicas de Evaluación Multicriterio. La razón estriba en que algunas de las reglas de decisión usadas en ellas a veces no son capaces de comparar entre sí,

en un período de tiempo razonable, todas las alternativas. Por ello, lo habitual es utilizar reglas de decisión compensatorias, en ellas el mecanismo de combinación de los criterios permite que las valoraciones bajas en uno o varios factores se compensen con el valor alto en uno (o más de uno) de los restantes factores. De este modo la solución elegida puede resultar poco adecuada en alguno de los factores. Frente a ellas se encuentran las reglas de decisión no compensatorias: en este caso la combinación de los factores es de tal tipo que no permite compensar valores bajos en unos factores con los más elevados de otros factores. **(Perpiña 2012)**

2.5. Los modelos de localización-asignación (LA)

Los modelos de localización-asignación, en términos generales, son diseñados con la finalidad de representar el proceso de ubicar instalaciones en un lugar determinado, existe un gran número de ejemplos donde es posible aplicar dichos modelos, como vertederos, gasolineras, plantas de producción eléctrica, tratamiento de aguas, residuos urbanos, hospitales, colegios, entre otros, es decir, el problema de la localización concierne a un gran número de disciplinas y puede ser aplicado a diferentes escenarios en la práctica. **(Revelle y Eiselt, 2005).**

Los Modelos de localización-asignación son un conjunto de procedimientos matemáticos que intentan buscar soluciones al problema de donde situar, centros de servicios (en sentido amplio) de manera que se optimicen ciertos valores considerados importantes a la hora de que los usuarios utilicen dichos servicios. **(Bosque y Moreno, 1990).**

Esto implica, por lo tanto, definir primero las magnitudes que son relevantes para el empleo de las instalaciones por la población y después formular una expresión matemática de dichas magnitudes, de tal manera que el modelo obtenga un óptimo de su valor, mínimo o máximo, dependiendo del tipo de servicio a localizar. **(Bosque y Franco, 1995)**

La mayoría de los modelos han sido diseñados para determinar la localización óptima de una o varias instalaciones deseables (usualmente idénticas), de tal manera que se obtenga su mejor distribución espacial a partir de minimizar los costos o tiempos totales de transporte. **(Bosque y Moreno, 1990).**

Los modelos de localización óptima más extendidos, diferenciando entre aquellos que se utilizan para ubicar instalaciones deseables, tales como equipamientos educativos, sanitarios, comerciales, de ocio, deportivos, culturales, etc., y los que tratan instalaciones catalogadas como molestas o perjudiciales, como vertederos, fábricas contaminantes, incineradores químicos, plantas de almacenamiento de residuos radiactivos. **(Bosque y Moreno, 2004)**

Modelo p-centro (Minimax)

El problema p-centro o también conocido como Minimax, trata de localizar p instalaciones con el objetivo de minimizar la máxima distancia entre la demanda (nodo o arista) y la instalación más cercana a la demanda. Además, en estos problemas distinguimos entre los que las instalaciones pueden ser ubicadas en cualquier lugar de la red (nodos o aristas) conocido como p-centro absolutos, y aquellos problemas donde sólo pueden ser localizadas en los nodos denominados p-centro vértices. Este problema puede ser entendido como un problema de cobertura donde se tienen que localizar p instalaciones cubriendo toda la demanda y minimizando la distancia de cobertura. Este modelo se utiliza para localizar servicios de emergencia tales como, parques de bomberos, ambulancias o comisarías de policía. **(Perpiña, 2012)**

Este problema p-centro tiene como objetivo minimizar la máxima distancia entre los puntos de demanda y las instalaciones. Este modelo está directamente relacionado con la equidad de la accesibilidad espacial, es decir, encontrar que la accesibilidad entre los distintos lugares sea lo menos desigual posible, y conseguir, por tanto, que los que se encuentran más alejados de las instalaciones no se vean perjudicados por ello. **(Bosque y Moreno, 2004).**

Este principio podemos enunciarlo como: dado un número limitado de equipamientos a instalar, obtener el conjunto de los cuales minimizan la distancia o desplazamiento máximo, asignando la demanda al centro más próximo. Una vez enunciado, la formalización de este modelo de localización se constituye por una función objetivo que busca identificar y reducir al mínimo la máxima distancia ponderada con la demanda del lugar más perjudicada, considerando los m puntos de demanda existentes. Por tanto, la formulación sería:

$$\text{Minimizar } Z = \text{Max } d_i t_{ij} X_{IJ}$$

Modelo p-mediano (Minisum)

El problema p-mediano (o también conocido como Minisum o problema de Weber) consiste en localizar p instalaciones en p localizaciones minimizando un criterio de coste. Este puede ser definido en términos de tiempo, dinero, número de viajes, distancia total, y otros. Además, este problema puede llevar asociado un peso en los puntos de demanda (demanda ponderada), significando que no todos los puntos de demanda contribuyen igual en la función objetivo. El problema p-centro, trata de localizar p instalaciones con el objetivo de minimizar la máxima distancia entre cualquier instalación y el punto de demanda asignado. **(Perpiña, 2012)**

Este modelo se utiliza para localizar servicios de emergencia tales como, parques de bomberos, ambulancias o comisarías de policía. Otros modelos son formulados en función de la demanda cubierta. Es el caso de los problemas de localización con cobertura, donde el punto de demanda i puede ser cubierto por la instalación en el punto j si la distancia (o tiempo, u otros) entre ambos es menor que R (valor predeterminado), la cual se conoce como cobertura. **(Perpiña, 2012)**

El objetivo es maximizar la demanda a cubrir a partir de un cierto número de instalaciones de entre un conjunto de lugares candidatos, o en el caso del problema de cobertura de conjunto, se intenta minimizar el número de instalaciones necesarias para cubrir toda la demanda sin una distancia específica. Y, por último, tenemos el problema de localización con costes fijos, en el cual se incorpora un coste específico de localizar la instalación (puesta en marcha) diferente en cada una de ellas, pero el objetivo sigue siendo un Minisum, se considera un dato conocido el número de instalaciones a ser localizadas, contrariamente a lo que ocurre en este modelo, en el cual se determinará de modo que se minimicen los costes. **(Perpiña, 2012)**

Este principio tiene en cuenta en su formulación tanto el número de equipamientos/instalaciones a localizar como el desplazamiento total, siendo este último concepto el más importante, es decir, se busca minimizar los costes totales de desplazamiento, de tal modo que se podría enunciar de la siguiente manera: dado un número de equipamientos a instalar, determinar de entre los emplazamientos candidatos, aquellos que minimicen el desplazamiento total de los consumidores, asignándoles el más cercano. La formalización del principio del Minisum, mediante programación matemática, para minimizar el valor Z en la función objetivo será:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_i t_{ij}^{\beta} x_{ij}$$

2.5.1. La localización de instalaciones deseables

Este tipo de modelos persiguen resolver un doble problema, es decir, por un lado, determinar la localización óptima de equipamientos/instalaciones, y al mismo tiempo asignar la demanda (posibles consumidores o usuarios), por los que comúnmente se les denomina problemas de localización-asignación. No obstante, dependiendo del objetivo que se persigue, se definen unos u otros, aunque un gran número de estudios corroboran el problema de optimización centrado en la reducción al mínimo de los costes de desplazamiento. **(Perpiña, 2012)**

2.5.2. La equidad y eficiencia espacial en la localización de instalaciones deseables

Los modelos de localización-asignación hasta ahora definidos consideran dos magnitudes: la eficiencia espacial de la localización de los centros de servicio y la justicia espacial de su distribución en el territorio **(Bosque, 1992)**.

La eficiencia espacial se refiere al volumen global de desplazamientos que el conjunto de la demanda debe efectuar para utilizar las instalaciones y trata de medir el coste, en tiempos de recorrido o distancias, que la población se verá obligada a recorrer para poder utilizar los servicios **(Bosque, 1992)**.

Esta distancia evidentemente tiene un coste monetario, más o menos fácil de medir, y que se busca reducir lo más posible. La eficiencia puede medirse también en función de los beneficios netos y, en términos de economías de escala, será mayor en la medida en que se logre el tamaño y emplazamiento que maximice el consumo del servicio. **(McAllister, 1996)**.

Para formular los modelos de localización de este tipo de instalaciones previamente se deben tener en cuenta dos principios básicos, de eficiencia y equidad, que permitan determinar la ubicación más adecuada para dichas instalaciones. En primer lugar, la eficiencia espacial, relacionada íntimamente con los costes, así como de las molestias que ocasionan a la población afectada. Por ello, estas instalaciones se intentan localizar en aquellas ubicaciones que determinen un coste mínimo en la construcción y del mantenimiento, tratamiento y uso cotidiano, por ejemplo, minimizando los desplazamientos mediante camiones y maquinarias pesadas, que provocan contaminación y ruidos. **(Bosque, 2002)**.

La justicia espacial se refiere a la accesibilidad diferencial de un servicio a los distintos grupos de la población, es decir, al grado de igualdad en la distribución de los servicios que presta cada instalación entre la población. La justicia espacial depende en este caso de la mayor o menor facilidad de acceso y depende de la variabilidad de las distancias que separan a cada individuo de la instalación más próxima, del tamaño de la oferta existente en dicha instalación y de la disponibilidad temporal de los servicios. La justicia espacial tiene especial relevancia en el caso de servicios ofertados por la Administración Pública, es decir, que son financiados por toda la población que, por lo tanto, tiene iguales derechos a usarlos en las mismas condiciones de acceso. **(Bosque, 1992).**

2.5.3. El concepto de distancia en el ambiente LA

En cualquier estudio de localización-asignación aparecen determinados componentes básicos que hay que considerar para llevar a cabo un procedimiento de análisis. Uno de ellos es la distancia o tiempo entre instalaciones y consumidores. Los problemas de localización también pueden ser caracterizados según la distancia métrica utilizada, que generalmente suele ser aquella que proporcione el camino más corto entre cualquier par de nodos usando los arcos que componen la red. **(Perpiña, 2012)**

La representación espacial tanto de los consumidores/clientes como de los lugares candidatos para las instalaciones/actividades es una de las diferencias fundamentales entre modelos de localización. En el primer caso, modelos de localización planos, la demanda (representada como una distribución de probabilidad espacial mediante coordenadas X, Y) y las instalaciones pueden localizarse en cualquier lugar de un plano. Esta descripción de modelo plano es una representación de la realidad muy simplificada (dos dimensiones), alejada de la complejidad real, pero puede entenderse como una primera aproximación a la solución. Las distancias utilizadas en este espacio plano, suelen ser, la rectangular, distancia métrica o euclidiana, aunque otras también pueden ser empleadas. **(Perpiña, 2012)**

2.5.4. La cobertura espacial en el análisis de redes

Como definición de red se considera un sistema interconectado de elementos lineales (aristas), que forman una estructura espacial por la que pueden pasar flujos de algún tipo: personas, mercancías,

energía, información. En una red se distinguen los elementos lineales (o aristas) que interrelacionan en las intersecciones (nudos de la red), las cuales son elementos puntuales. Cada elemento lineal tiene un origen y un destino de los flujos que pasan por él. Además, uno de los atributos más importantes asociado a cada una de las aristas que forman una red es la longitud o coste de recorrerla, pero existen otros atributos temáticos como la demanda de un bien o producto a lo largo de una longitud. Los nudos de la red tienen incorporados igualmente variables temáticas. **(Bosque, 1992).**

En la realidad geográfica se pueden encontrar numerosos objetos espaciales de tipo lineal, tanto de origen natural como los ríos pertenecientes a una cuenca hidrográfica, como los humanos, por ejemplo, una red de carreteras o ferrocarriles de un país. Existen algunos tipos de redes que requieren mayor atención debido a su importancia, son las denominadas redes de comunicaciones (que normalmente forman circuitos), como por ejemplo las carreteras, ferrocarriles, distribución de agua, de energía, entre otras. **(Bosque 1992).**

Para representar este tipo de fenómenos de la realidad se pueden esquematizar como una red: por ejemplo, las carreteras serán representadas como las aristas de la red que unen diversas ciudades y pueblos, siendo éstos los nudos de la red. De esta forma una red puede hacerse equivalente a un grafo matemático, es decir, a un conjunto de puntos (las, intersecciones de las líneas) y un conjunto de líneas manteniendo una serie de relaciones entre pares de puntos. Esto sería de una manera muy sintetizada la esencia de la teoría de grafos, la cual permite conocer la estructura completa de una red o su desarrollo, a partir de unos datos parciales iniciales. Además, también pueden llegar a conocerse determinados problemas de índole geográfica que se generan a partir de los asentamientos y las redes de transporte, en función de las propiedades topológicas y el grado de conectividad de la red. **(Seguí 1992).**

El análisis de redes permite plantear y resolver un gran número de problemas prácticos, como por ejemplo la determinación de rutas óptimas para vehículos que deben moverse por una red de carreteras, la localización de servicios o instalaciones de modo óptimo respecto a costes de recorrido para su empleo por los usuarios, la delimitación de distritos o áreas de influencia, la asignación de caminos de determinación de un producto a los almacenes existentes, etc. **(Perpiña, 2012)**

Capítulo 3. Metodología

La metodología del trabajo se divide en tres etapas, la primera es para la identificación de zonas adecuadas bajo factores de localización (geográficos, meteorológicos y socioeconómicos) y restricciones de localización (ambientales, sociales e infraestructura), la segunda etapa se refieren a la evaluación de sitios candidatos con base en los modelos de localización-asignación Minimax y Minisum con relación a la justicia/equidad espacial y la tercera etapa se refiere a la aplicación de modelos de redes con relación a la eficiencia espacial.

3.1. Etapa 1. Identificación de zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar.

Las zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar se identificaron a través de factores de localización y restricciones, utilizando variables para la obtención de zonas adecuadas, posteriormente se realizó un análisis de sobre posición cartográfica mediante la aplicación del método de la suma lineal ponderada (MCE).

3.1.1. Determinación de variables de localización

Las variables utilizadas para la selección de una instalación central de energía solar, se encuentran relacionados con aspectos geográficos, socioeconómicos, ambientales y de infraestructura, debido al impacto que esta instalación tiene, La elección del conjunto de variables tiene determinadas cualidades, cada atributo es medible, de la misma manera cada criterio cubrió aspectos del problema, fueron utilizadas significativamente en el análisis, es así como se determinaron las variables.

Los factores son aspectos determinantes para la valoración de una alternativa como solución de un problema, se relacionaron de tal manera que tengan una correlación con la capacidad positiva del resultado. A continuación, se describen los factores esenciales para la localización de la central de energía solar. (Tabla 8)

Tabla 8: Factores de localización

Características Geográficas	Condiciones meteorológicas	Factores socioeconómicos
Cobertura de suelo	Radiación	Proximidad a la población
Altitud	Irradiación (Insolación)	Proximidad a las zonas inundables
Pendiente		Proximidad a la infraestructura eléctrica

Fuente: (Elaboración propia)

Para el caso de estudio se basó en la Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, de acuerdo con las especificaciones para la selección de zonas adecuadas. (Tabla 9)

Tabla 9: Especificaciones para los factores en base a la Norma Mexicana, NMX-AA-164-SCFI-2013.

Factor	Especificaciones
Cobertura de Suelo	Las centrales de energía solar solo pueden ser instaladas en una cobertura de suelo no urbanizable común.
Pendiente	Pendientes superiores a 25 % no es permitida la ubicación de este tipo de instalaciones, pendientes erosionables y suelos inestables.

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 10: Factores de localización

Factores	Descripción
Altitud	Para la instalación adecuada de la central de energía solar se recomienda una altitud menor a los 2.800 m.s.n.m
Radiación	Los lugares adecuados para la instalación de una central de energía solar deben ofrecer al menos 2 KWh/m ² de irradiación solar directa anual.

Irradiación (Insolación)	La irradiación es recomendable para este tipo de instalación es la directa ya se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera.
Proximidad a la Población	La demanda será localizada por los núcleos de población, más próximos a la central de energía solar.
Proximidad a las Zonas Inundables	Para garantizar la seguridad de la central de energía solar frente a inundaciones requieren una franja de protección entorno al elemento de 300 m.
Proximidad a la Infraestructura Eléctrica	La proximidad de la infraestructura eléctrica es un factor importante ya que de esta depende el suministro eléctrico de la central de energía solar.

Fuente: (Elaboración propia)

Las restricciones son elementos que se deben considerar para ubicar una instalación en la posición más adecuada, estos elementos los denominaremos factores de la localización, el análisis exhaustivo de la logística debe, además, tener en cuenta diversos factores, tanto naturales como artificiales, para evaluar la posibilidad de ubicar la central de energía solar. Estos factores los podemos identificar como zonas de influencia determinadas a partir de una distancia mínima especificada donde no estará permitido localizar la instalación. (Tabla 11)

Tabla 11: Restricciones de localización

<i>Ambientales</i>	<i>Sociales</i>	<i>Infraestructura</i>
Áreas Naturales Protegidas	Núcleos Urbanos	Proximidad a la infraestructura
Áreas inundables	Población dispersa	Proximidad a equipamiento e instalaciones
Cuerpos de agua		

Fuente. (Elaboración propia)

Tomando en cuenta los criterios de especificación para la selección de zonas adecuadas correspondiente a la Norma Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, se consideró lo siguiente. (Tabla 12)

Tabla 12: Especificaciones para las restricciones en base a la Norma Mexicana, NMX-AA-164-SCFI-2013.

Restricción	Especificaciones
Áreas Naturales Protegidas	No debe ubicarse en sitios dentro de Áreas Naturales Protegidas en cualquiera que sea su categoría, y en el caso de situarse en zonas de amortiguamiento deben respetarse los criterios, lineamientos y restricciones contemplados en los Planes de Manejo, el decreto que establece el Área Natural Protegida, y demás instrumentos legales vigentes que regulen las obras y actividades permitidas y que establezcan usos prohibidos.
Áreas Inundables	No debe ubicarse en zonas inundables, a menos que dispongan de las medidas necesarias para que los torrentes puedan correr sin propiciar riesgos y se hagan los ajustes necesarios al proyecto para evitar daños humanos y materiales, siempre y cuando se cuente con las autorizaciones de competencia local y federal respectivas.
Cuerpos de Agua	No debe ubicarse en cuerpos de agua como, lagos, lagunas, embalses, a menos que cuente con una franja de seguridad en torno al elemento.

Fuente: (NMX-AA-164-SCFI, 2013)

Tabla 13: Restricciones

Restricciones	Descripción
Núcleos Urbanos	No debe ubicarse en núcleos urbanos, la proximidad a los núcleos urbanos requiere una franja de seguridad en torno al elemento.
Población Dispersa	Determinación de la población dispersa teniendo en cuenta la densidad de población y la distancia a los núcleos respecto de la instalación central de energía solar.

Proximidad a la Infraestructura	No debe ubicarse en infraestructura como, depósito de combustibles y de agua, torres de alta tensión, gasolineras, acueducto, tuberías, presa, extracción minera, almacenamiento de residuos y transformadores eléctricos.
Proximidad a Equipamientos e Instalaciones	No debe de ubicarse en equipamientos e instalaciones, la proximidad a los equipamientos e instalaciones requieren una franja de seguridad en torno al elemento.

Fuente: (Elaboración propia)

3.1.2. Obtención de criterios

La información para la elaboración de criterios se obtuvo en diferentes formatos principalmente bases de datos para la posterior elaboración de capas vectoriales y raster, por otro lado se obtuvieron los shapefile donde se incluía la zona de estudio, sin embargo se extrajo solo la información requerida, de igual manera se obtuvo la información más reciente con respecto al año actual, a través de diversas plataformas digitales con información abierta y gratuita, principalmente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el Geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de Biodiversidad (CONABIO), así como, de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Prediction of Worldwide Energy Resources, entre otros.

Factores

Obtención del factor cobertura de suelo: se descargó el conjunto de datos vectoriales de cobertura de suelo, Escala 1:250 000 de INEGI (2016), posteriormente se delimito la zona de estudio, a la cual se le aplicó una reclasificación, en la que presento, Agricultura, Área desprovista de vegetación, Bosque, Cuerpo de agua, Pastizal inducido, Pradera de alta montaña, Tular, Zona urbana y Vegetación, posteriormente se realizó una conversión de un formato vector a raster, donde con ayudada de una matriz de comparación se le otorgo el peso adecuado a cada una de las variables, donde por consistencia es aceptable, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor de altitud: se realizó la descarga de un modelo digital de elevación (MDE), tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos sensores y remotos satelitales y aerotransportados, del Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), para el manejo apropiado del modelo digital de elevación (MDE), se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se delimito la zona de estudio, los valores representados de cada pixel correspondían a la altitud de la zona que van desde los 2550 hasta los 4640 msnm, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor pendiente: se realizó la descarga de un modelo digital de elevación (MDE), tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos sensores y remotos satelitales y aerotransportados, del Instituto de Estadística y Geografía (INEGI), para el manejo apropiado del modelo digital de elevación (MDE), se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se realizó la delimitación de la zona de estudio, una vez obtenido este proceso con la ayuda de la herramienta (Slope) se generó la capa de pendiente, en la que se determinaron pendientes que van desde (0° a 3° y 45°) donde los valores de cada pixel correspondían a la pendiente de la zona de estudio, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor radiación: se realizó la descarga de base de datos de la zona de estudio de la radiación normal directa del año 2017, del visor de acceso a datos, que proporciona herramientas de subconjuntos, gráficos y visualización de datos, de la página oficial de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Prediction of Worldwide Energy Resources, posteriormente se trabajó la base de datos en Microsoft Excel donde se hizo la transformación de coordenadas geográficas a Universal Transversal de Mercator (UTM), WGS 1984 UTM Zona 14 Norte, para un manejo apropiado de los datos, se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se creó un formato vector de tipo puntual, que representa las estaciones que contienen los datos de radiación, al cual se le realizó una interpolación con la herramienta (IDW), donde cada pixel representa un valor de radiación anual que va desde (5.7 hasta 6.0 KWh/m^2), posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor irradiación: se realizó la descarga de base de datos de la zona de estudio de la irradiación del año 2017, del visor de acceso a datos, que proporciona herramientas de subconjuntos, gráficos y visualización de datos, de la página oficial de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Prediction of Worldwide Energy Resources, posteriormente se trabajó la base de datos en Microsoft Excel donde se hizo la transformación de coordenadas geográficas a Universal Transversal de Mercator (UTM), WGS 1984 UTM Zona 14 Norte, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se creó un formato vector de tipo puntual, que representa las estaciones que contienen los datos de irradiación, al cual se le realizó una interpolación con la herramienta (IDW), donde cada pixel representa un valor de irradiación anual que va de (0.8 a 0.6 W/m²), posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor de proximidad a la población: se realizó la descarga de la base de datos, del Sistema de Integración Territorial (ITER, 2010), de la plataforma digital, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), posteriormente se trabajó la base de datos en Microsoft Excel donde se hizo la transformación de coordenadas geográficas a Universal Transversal de Mercator (UTM), WGS 1984 UTM Zona 14 Norte, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se creó un formato vector de tipo puntual, que representa la población de la zona de estudio, con el que se realizó una capa de proximidad a través de la herramienta (Euclidian Distance), donde el valor de cada pixel determino la distancia de la población, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor de proximidad a las zonas inundables: se realizó la descarga de un modelo digital de elevación (MDE), tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos sensores y remotos satelitales y aerotransportados, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para el manejo apropiado del modelo digital de elevación (MDE), se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se delimito la zona de estudio, una vez realizado la delimitación se hizo una reclasificación, para obtener las zonas con menor altitud de la zona de estudio y propensas a inundaciones, por consecuente como esta capa es una restricción, los valores de cada pixel son binarios que corresponden a (0 = No Adecuado y 1= Adecuado), una vez identificadas las zonas inundables, fueron utilizadas para crear una capa de proximidad a través de la herramienta (Euclidian

Distance), donde el valor de cada pixel determino la distancia a las zonas inundables, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Obtención del factor de proximidad a la infraestructura eléctrica: se localizó la infraestructura eléctrica, que se encuentran dentro de la zona de estudio a través de Google Maps, extrayendo las coordenadas de la infraestructura, posteriormente se trabajó la base de datos en Microsoft Excel donde se hizo la transformación de coordenadas geográficas a Universal Transversal de Mercator (UTM), WGS 1984 UTM Zona 14 Norte, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se creó un formato vector de tipo puntual, que representa la infraestructura eléctrica, la cual se utilizó para crear una capa de proximidad a través de la herramienta (Euclidian Distance), donde el valor de cada pixel determino la distancia a la infraestructura eléctrica, posteriormente se realizó una normalización con la herramienta (Fuzzy) con una oscilación entre (0 = No Adecuado a 1 = Adecuado).

Restricciones

Obtención de la restricción áreas naturales protegidas: se realizó la descarga de los datos vectoriales del Estado de México del año (2014), de la Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM), para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se realizó un recorte conforme a el área de estudio, el cual con apoyo de la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción de áreas inundables: se realizó la descarga de un modelo digital de elevación (MDE), tipo superficie con 5 m de resolución derivado de datos sensores y remotos satelitales y aerotransportados, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para el manejo apropiado del modelo digital de elevación (MDE), se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se extrajo la zona de estudio a través de un recorte, posteriormente se hizo una reclasificación, con las zonas con menor altitud de la zona de estudio y propensas a inundaciones, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción de cuerpos de agua: se descargó el conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III, de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), con la siguiente clave E14A27, E14A28, E14A29, E14A37, E14A38, E14A39, E14A47, E14A48 y E14A49, las cuales son las cartas que cubren la zona de estudio, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se trabajó con los cuerpos de agua donde con la ayuda de la herramienta (Merge) se realizó una unión, posteriormente con apoyo de la herramienta (Clip) se hizo un recorte de la zona de estudio, por ultimo con apoyo de la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción de núcleos urbanos: se realizó la descarga de los datos vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional (2018), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), a nivel de Área Geográfica Ocupada (AGEB) urbana, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde con apoyo de la herramienta (Clip) se realizó un recorte de la zona de estudio para obtener los núcleos urbanos, y posteriormente con la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción población dispersa: se realizó la descarga de los datos vectoriales del Marco Geoestadístico Nacional (2018), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se extrajo la población rural, que pertenece a la población dispersa, y posteriormente con la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción de proximidad a la infraestructura: se descargó el conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III, de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), con la siguiente clave E14A27, E14A28, E14A29, E14A37, E14A38, E14A39, E14A47, E14A48 y E14A49, las cuales son las cartas que cubren la zona de estudio, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se trabajó con, estructura elevada, faro, instalación de bombeo, instalación de comunicación, planta generadora, subestación eléctrica y tanque de agua, que pertenecen a la infraestructura y con apoyo de la herramienta (Merge) se realizó una unión, posteriormente se

realizó una delimitación de la zona de estudio y con la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

Obtención de la restricción de proximidad a equipamientos e instalaciones: se descargó el conjunto de datos vectoriales de información topográfica escala 1:50 000 serie III, de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018), con la siguiente clave E14A27, E14A28, E14A29, E14A37, E14A38, E14A39, E14A47, E14A48 y E14A49, las cuales son las cartas que cubren la zona de estudio, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5, donde se trabajó con, Cementerio, edificación, instalaciones deportivas y depósito de desechos, que pertenecen a equipamientos e instalaciones y con apoyo de la herramienta (Marge) se realizó una unión, posteriormente se realizó una delimitación de la zona de estudio y con la herramienta (Conversion tools) se realizó una conversión de un formato vector a raster, con valores de pixel que corresponden a (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado).

3.1.3. Análisis cartográfico

El análisis cartográfico, se realizó después de la determinación de criterios, por lo que se generó una estructura de base de datos de la cual se requirió de la generación de un conjunto de mapas o coberturas en el ambiente SIG tipo raster para un manejo apropiado de la información se utilizó Arc Map 10.5 y TerrSet Geoespatial Monitoring and Modeling System.

La elección del modelo de datos es un aspecto fundamental que determina en buena medida las alternativas de implementación de una metodología determinada en el ambiente SIG, por lo tanto se determinó utilizar como primer paso el en antes mencionado software Arc Map 10.5 y posteriormente el software TerrSet por el ofrecimiento que da a la hora de integrar al SIG, para lo que se requirió posteriormente de utilizar Arc Map, transformar las capas al formato Tagged Image File Format (TIFF), que maneja TerrSet.

Otro punto importante fue la elección del tamaño de pixel esto como parte de estandarización de los datos, por lo que fue necesario definir la resolución cartográfica a la que se realizaría el estudio. El tamaño de pixel depende de muchos factores y muy en especial, del tamaño de los archivos que manejara el sistema, el tamaño de pixel que se utilizó para este caso de estudio fue de 30 m para lo que se aplicó la siguiente fórmula para determinar los parámetros de las columnas y filas:

$$\text{Columna} = \frac{X \text{ máxima} - X \text{ mínima}}{\text{Resolución (30)}}$$

Resolución (30)

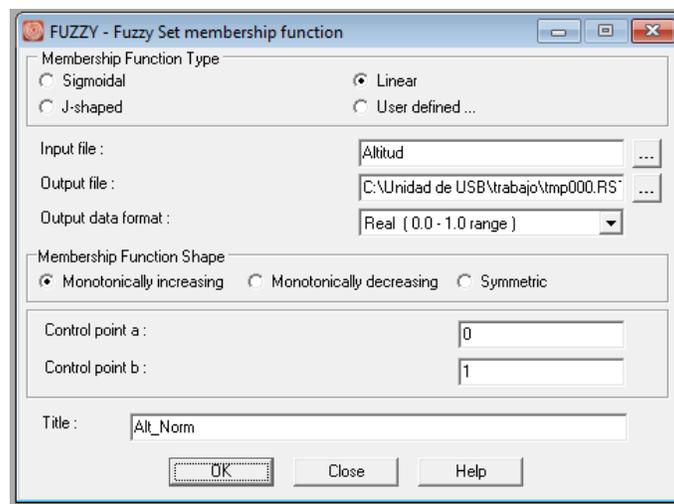
$$\text{Filas} = \frac{Y \text{ máxima} - Y \text{ mínima}}{\text{Resolución (30)}}$$

Resolución (30)

3.1.2. Normalización de los factores y cruce de coberturas

En este punto se realizó la estandarización de las capas de los factores, dicho de mejor forma se normalizo mediante el comando (Fuzzy) teniendo como datos de salida un formato byte es decir, con una oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para este caso se utilizó una función de tipo lineal e incremento monótono, es decir a medida que aumenta la variable aumenta el valor de adecuación para localizar las zonas adecuadas. Al ingresar los parámetros para su normalización se obtuvieron capas como resultado de la función lineal de incremento monótono que es le aplico a los factores. (Ilustración 1)

Ilustración 1: Normalización de criterios

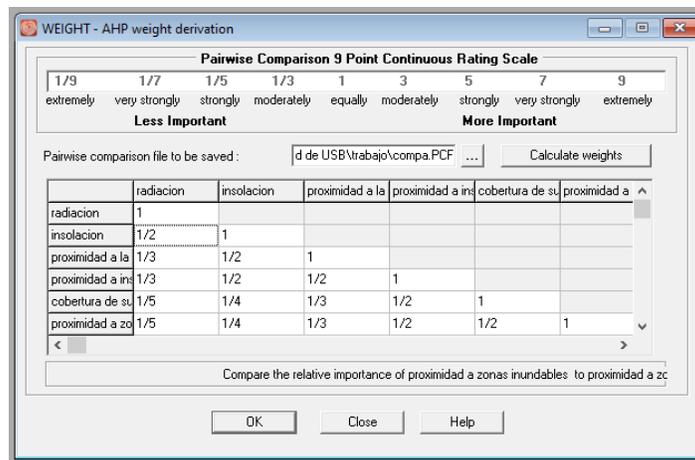


Fuente: (TerrSet)

3.1.3. Definición de vector de pesos

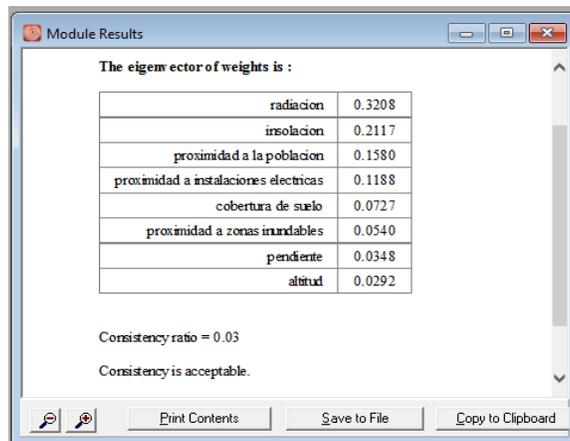
Los criterios previamente definidos, se sometieron a una comparación, no sin antes haberlos transformado en unidades semejantes, donde se utilizó el método de comparación por pares (*pairwise comparison methods*), donde se estableció una matriz en la cual las filas y columnas se definieron con un número de factores para ponderar, de esta forma se compararon los pares de factores, de manera que se estableció la importancia que tiene cada uno en función de los demás, una vez realizado esto se determinó el eigenvector, donde quedaron previamente establecidos los pesos. (Ilustración 2 y 3)

Ilustración 2: Definición de pesos



Fuente: (TerrSet)

Ilustración 3: Razón de Consistencia

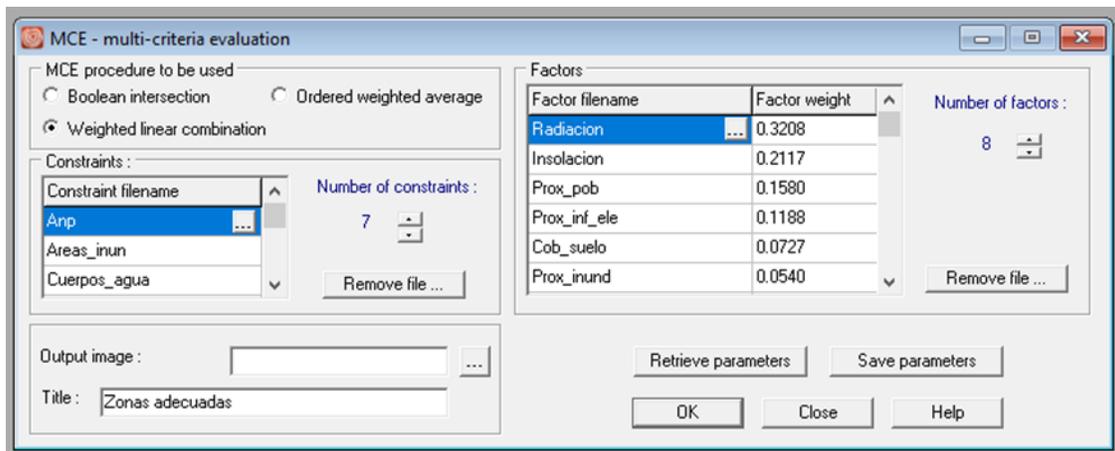


Fuente: (TerrSet)

3.1.4. Aplicación de la regla de decisión, análisis al punto ideal

Una vez establecidos los pesos de cada factor, se realizó el proceso de evaluación de criterios múltiples (MCE), en el Sistema de Información Geográfico (SIG), TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System, donde se utilizó la herramienta de apoyo a la decisión para la evaluación de criterios múltiples (MCE), en este caso será un mapa de zonas adecuadas, por lo tanto se utilizaron las capas binarias, que son la restricciones representadas con valores de (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), posteriormente se multiplicaron con los factores el cual muestra la adecuación de áreas para una central de energía solar, permitiendo del cruce de factores y restricciones respectivamente. (Ilustración 4)

Ilustración 4: Evaluación de criterios múltiples (MCE)



Fuente: (TerrSet)

3.1.5. Elección de alternativas viables

Posteriormente mediante el comando (Group) se realizó un proceso, que determinó agrupaciones contiguas de celdas con valores idénticos en una imagen. Las celdas que pertenecen a la misma agrupación contigua reciben un identificador único, numerado consecutivamente en el orden encontrado.

Una vez obtenida la agrupación de cada polígono con ayuda del comando (Área) se determinaron las áreas menores a diez hectáreas para su posterior eliminación, ya que no cumplían los lineamientos para la localización adecuada de una central de energía solar.

Por consiguiente se realizó una reclasificación mediante el comando (Reclass) para pasar los grupos con áreas mayores a diez hectáreas a un valor de uno, para posteriormente mediante el comando (Overlay) que produce una nueva imagen a partir de los datos de dos imágenes de entrada, que corresponde a la multiplicación de la primera capa de resultados de zonas adecuadas por la última capa de valores de uno, para así nueva mente obtener como mapa final de zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el Valle de Toluca.

Se obtuvo el mapa de las zonas adecuadas, donde posteriormente se realizó una reclasificación mediante el comando (Reclass), con cinco niveles con los valores de adecuación, para la instalación de la central de energía solar:

La elección de alternativas viables de acuerdo al método de evaluación de criterios múltiples (MCE) obtuvo como resultado el nivel de adecuación en función de los criterios establecidos, donde se a partir de los cinco niveles antes mencionados, que van de nivel, muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, A partir de ahí, se seleccionaron las alternativas con mayor adecuación para para cubrir el servicio a la población, es decir, los niveles con valores más altos, descartando los niveles muy bajo y bajo. (Tabla 14)

Tabla 14: Alternativas viables

<i>Nivel de adecuación</i>	
Medio	3
Alto	4
Muy Alto	5

Fuente: (Elaboración propia)

3.2. Etapa 2. Evaluación de los sitios candidatos con base en la justicia/equidad espacial (aplicación de modelos de localización-asignación para evaluar las externalidades positivas y negativas)

Una vez obtenidas las zonas adecuadas como resultado de la primera etapa, fue necesario realizar una evaluación con base a la justicia/equidad espacial, donde fueron aplicados los modelos de localización-asignación (Minimax y Minisum), donde se obtuvieron los sitios candidatos adecuados de acuerdo con cada uno de los modelos.

3.2.1. Obtención de mapa de población

Se descargó el Sistema de Integración Territorial (ITER 2010), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), posteriormente se depuró la base de datos, obteniendo solo la información requerida, para un manejo apropiado de los datos se utilizó el SIG, Arc Map 10.5 donde se realizó la transformación de coordenadas de (X y Y), para visualizar la información del número de población por localidad, en representación puntual, donde se transformó en formato vectorial, para obtener el mapa de población.

3.2.2. Aplicación de modelos de localización-asignación (Minimax y Minisum)

Una vez que se obtuvieron las zonas adecuadas a través del análisis del método de evaluación de criterios múltiples (MCE), la información obtenida se trabajó en el SIG, Arc Map 10.5, donde con ayuda de la herramienta (*Feature to point*) se generaron centros de cada zona adecuada, donde posteriormente a cada uno de los sitios candidatos a través de la herramienta (*Euclidean Distance*) se generó un (*Buffer*) con un área de cobertura de cinco km, para calcular la población total atendida en este rango de distancia.

Posteriormente aplicado este proceso para cada uno de los sitios candidatos a través de mapa de población se realizó una extracción de distancia, con ayuda de la herramienta (*Extract to point*), donde se obtuvo la distancia euclidiana de cada uno de los sitios hacia la población cubriendo un área de cinco km ya mencionada anteriormente.

Minimax: para la aplicación del primer modelo se toma en cuenta que implementa la equidad espacial, donde a través de los sitios candidatos se calculó la mínima distancia asignando el centro de oferta más cercano a la población, esto se realizó mediante el comando (*Buffer*) aplicado

anteriormente con un área de cobertura ya mencionado de cinco km, este proceso se realizó mediante hojas de cálculo con ayuda de la herramienta (Excel) donde se extrajo el archivo (DBF) de cada uno de los sitios candidatos, donde se localizaba la mínima distancia en km de cada uno de los sitios candidatos, de esta manera se obtuvo el modelo Minimax, el cual posteriormente se le aplicó una normalización obteniendo como datos de salida la oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para poder realizar una comparación numérica semejante, ya que el modelo Minimax hace referencia a la mínima distancia, es decir la localidad más cercana al sitio candidato, para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*mínimo-máximo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{mínimo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (*Minimax*) menos (b).

Minimax Ponderado: para la obtención del método Minimax ponderado se realizó mediante la aplicación del método derivado de la ecuación universal de la gravedad de Newton que corresponde a $F=g (m_1m_2/r^2)$, para este caso la ecuación se modificó porque “G” correspondiente a (Gravedad) y no existe en este análisis, por lo que (m_1) sería hipotéticamente la masa de los sitios candidatos de la central de energía solar asignándole el valor constante de 1, mientras que (m_2) es la masa de las localidades expresada por su población y finalmente (r^2) es la distancia al cuadrado que separa a la localidad de la central de energía, con base en lo anterior la ecuación simplificada corresponde a $F= (m_2/r^2)$, posteriormente para poder realizar una comparación numérica semejante fue necesario realizar una normalización obteniendo como datos de salida la oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*máximo-mínimo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{máximo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (*Minimax ponderado*) menos (b).

Minisum: para la aplicación del segundo modelo se toma en cuenta que implementa la eficiencia espacial, dado el número de sitios candidatos de centrales de energía, se calculó de entre estos sitios candidatos posibles la distribución para minimizar la distancia total de la población, asignado

el sitio candidato más próximo a la población. Esto se realizó mediante el comando (Buffer) aplicado anteriormente con un área de cobertura ya mencionado de cinco km, este proceso se realizó mediante hojas de cálculo con ayuda de la herramienta (Excel) donde se extrajo el archivo (DBF) de cada uno de los sitios candidatos, de esta manera se aplicó el modelo Minisum a través de la suma de distancias mínimas de los sitios candidatos, el cual posteriormente se le aplicó una normalización obteniendo como datos de salida la oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para poder realizar una comparación numérica semejante, ya que el modelo Minisum hace referencia a la mínima distancia de sumas de distancias, es decir las localidades más cercanas a el sitio candidato a la central de energía, para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*mínimo-máximo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{mínimo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (*Minisum*) menos (b).

Minisum ponderado: para la obtención del método Minisum ponderado se realizó mediante la aplicación del método derivado de la ecuación universal de la gravedad de Newton que corresponde a $F=g (m_1m_2/r^2)$, para este caso la ecuación se modificó de la misma forma que el modelo Minimax ponderado por lo que la ecuación simplificada corresponde a $F= (m_2/r^2)$, tomando en cuenta que (m_1) sería hipotéticamente la masa de la suma de los sitios candidatos de la central de energía eléctrica asignándole el valor constante de 1, mientras que (m_2) es la masa de la suma de las localidades expresada por su población y finalmente (r^2) es la distancia al cuadrado que separa a las localidades de la central, posteriormente para poder realizar una comparación numérica semejante fue necesario realizar una normalización obteniendo como datos de salida la oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*máximo-mínimo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{máximo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (*Minisum ponderado*) menos (b).

3.2.3. Análisis de sitios candidatos con respecto a la proximidad de la población

Una vez aplicados los dos modelos de localización-asignación Minimax y Minisum, los resultados se llevaron a un nuevo archivo en hojas de cálculo donde se trabajó con apoyo de la herramienta (Excel), donde se extrajeron los resultados de los modelos Minimax, Minimax ponderado, Minisum y Minisum ponderado, cada uno de estos modelos previamente normalizados para poder realizar el último análisis de esta segunda etapa, que consistió de dos pasos el primero se aplicó la fórmula $(Minimax + Minimax\ ponderado + Minisum + Minisum\ ponderado) / 4$ que corresponde a la suma de los modelos aplicados antes mencionados y la división entre cuatro, como segundo paso se realizó una normalización obteniendo como datos de salida una oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), donde el sitio candidato con valor de (1.0000 = Adecuado), es el mejor sitio con mayor eficiencia y equidad espacial, es decir, con la mínima distancia a la localidad y la mayor cobertura del servicio a la población.

3.3. Etapa3. Evaluación de los sitios candidatos con base en la eficiencia espacial (aplicación de modelos de redes para evaluar la cobertura espacial del servicio)

Para efecto de evaluar la eficiencia espacial de los sitios candidatos, es decir, la accesibilidad entre oferta y demanda de energía eléctrica, se llevó a cabo un análisis de cobertura en red. Para ello fue necesario definir la red de distribución, construir la topología de redes y realizar el análisis mediante el módulo Network Analyst de Arc GIS 10.5.

3.3.1. Obtención de la red vial

Se descargó la red vial nacional (2018) de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en formato vector, para un manejo adecuado de la información se utilizó el Sistema de Información Arc Gis 10.5, donde se delimitó la zona de estudio y posteriormente una vez obtenida la red vial se aplicó mediante el comando (Topology) para eliminar todos los errores que contenía esta red vial creada mediante líneas.

El primer paso fue crear una (Geodatabase) este comando sirve para la edición y administración de datos geográficos, dentro de esta geodatabase se creó una (Feature Dataset) el cual es una colección de clases de entidades relacionadas que comparten un sistema de coordenadas en común, denominadas datos de extensión en este caso una topología, en la cual se importó la red vial.

Posteriormente mediante el comando (New Topology) se agregaron las reglas topológicas para la corrección de errores, estas reglas fueron: mayor que la tolerancia del grupo, no debe superponerse, no debe cruzarse, no debe tener pseudo nodos, no debe tener solapamiento, no debe tener intersección propia, debe ser una parte y no debe cruzarse ni tocar el interior.

3.3.2. Análisis de cobertura por sitio candidato (zona de influencia en red)

Una vez aplicado estas reglas de corrección posteriormente se realizó el análisis de cobertura, como primer paso se creó un (Network Dataset) el cual permitió modelar redes, que se crearon a partir de entidades de origen, que incluyen líneas y puntos, conocidos como nodos.

Posteriormente se utilizó la herramienta Network Analyst mediante el comando (New service area) el cual se le agregaron los sitios candidatos, con una distancia de cinco kilómetros, que permitió encontrar áreas de servicio situadas en las proximidades de la ubicación de la red. Esta área de servicio de red es una región que abarca todas las calles accesibles (es decir, calles que están dentro de una impedancia especificada). Las áreas de servicio creadas por Network Analyst también ayudan a evaluar la accesibilidad. Las áreas de servicio concéntricas muestran la forma en que la accesibilidad varía con la impedancia. Una vez creadas las áreas de servicio, se pudieron utilizar para identificar el número de personas y la superficie de terreno.

3.4. Elección de sitios candidatos

En la elección de sitios candidatos, se retomaron las tres etapas anteriores, la Evaluación de criterios múltiples MCE, los modelos matemáticos de Localización-asignación y el Análisis de cobertura de red, los cuales se sometieron en una matriz de comparación, para ello se aplicó un preorden de decisión para cada criterio obtenido, posteriormente se realizó una regla de decisión generada de el preorden ya mencionado, para elaborar una matriz de comparación por pares para obtener el peso de cada criterio y obtener una razón de consistencia aceptable que al sumar los pesos de cada criterio el resultado fuese igual a uno.

Una vez con el peso asignado para cada criterio y con una razón de consistencia aceptable se elaboró una matriz de comparación con los criterios de cada etapa aplicada, para ello se realizó la normalización de la Evaluación de criterios múltiples MCE y del Análisis de red.

Normalización de la evaluación de criterios múltiples: como primer paso, se extrajeron los resultados del nivel de adecuación de cada uno de los sitios candidatos, posterior a ello para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*máximo-mínimo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{máximo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (MCE) menos (b).

Normalización del análisis de cobertura de red: el resultado obtenido de este análisis fue un número determinado de población por cada sitio candidato, para realizar la normalización se aplicó la ecuación de la recta, donde $y = (mx+b)$, donde se restaron los valores de distancia (*máximo-mínimo*) posteriormente el resultado se dividió entre uno para obtener (m), después se realizó una multiplicación de ($m*\textit{máximo}$), por ultimo al resultado se le resto uno para obtener (b), entonces para generar la normalización se aplicó $y = (m*x-b)$, que corresponde a multiplicar (m) por (*Análisis de cobertura de red*) menos (b).

Una vez que se obtuvieron los seis criterios normalizados de las etapas aplicadas anteriormente los resultados se llevaron a un nuevo archivo en hojas de cálculo donde se trabajó con apoyo de la herramienta (Excel), mediante una matriz de comparación final, en la cual se realizó la ecuación ($MCE+Minimax+Minimax\ ponderado+Minisum+Minisum\ ponderado+Análisis\ de\ redes /6$) que corresponde a la suma de la evaluación de criterios múltiples mas los modelos y métodos aplicados antes mencionados y la división entre seis, por último se realizó una normalización obteniendo como datos la oscilación entre (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), donde el sitio candidato con valor de (1.0000 = Adecuado), es decir, con la mínima distancia a la localidad y la mayor cobertura del servicio a la población.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de la tesis que lleva por título: “Aplicación de modelos de localización-asignación para la identificación de zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el Valle de Toluca”, a continuación, se detalla el proceso de análisis y los resultados que consisten en mapas donde se representa cada modelo aplicado con la información correspondiente, así como tablas con los valores que representa cada mapa y gráficas con los porcentajes normalizados de las tres etapas realizadas anteriormente.

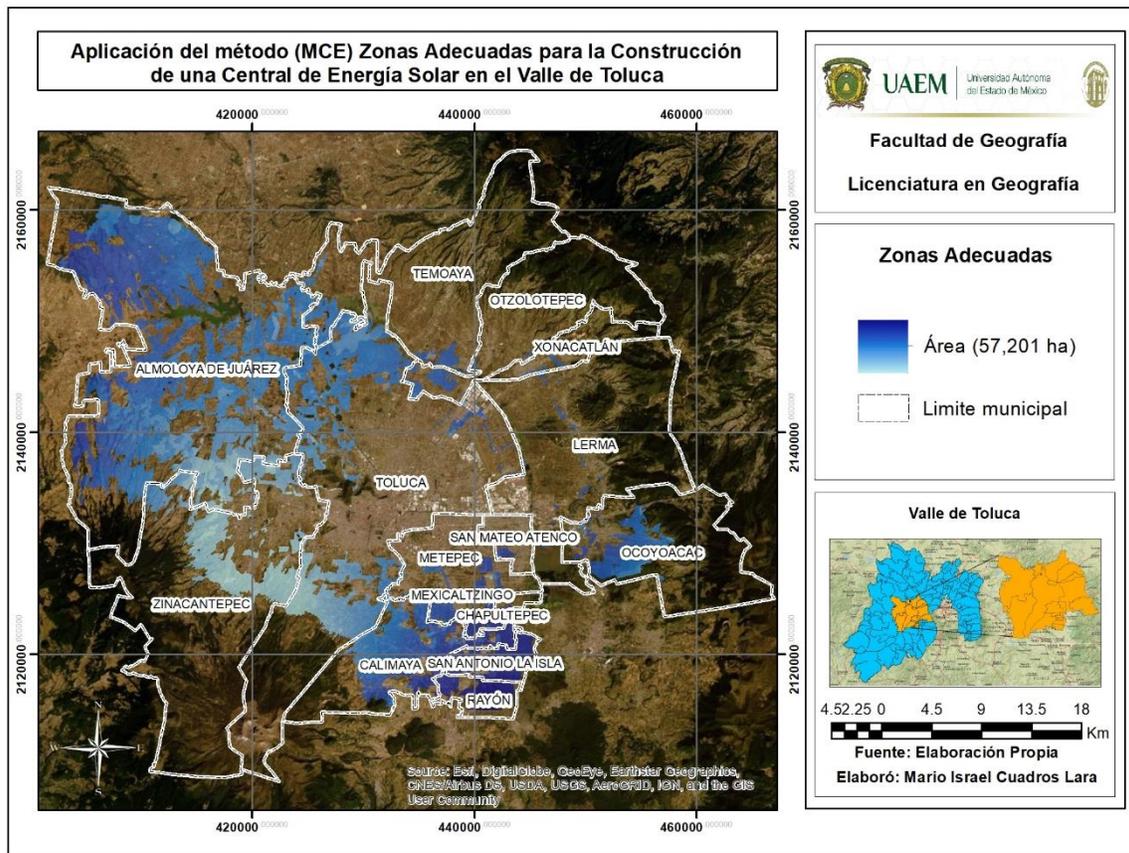
4.1 Etapa 1. Resultado de la Aplicación del método de evaluación de criterios múltiples (MCE)

Los resultados obtenidos de esta etapa cumplen con el primer objetivo específico que es la “Identificar las zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar, en función de factores y restricciones de localización mediante la aplicación del método evaluación de criterios múltiples (MCE)” de acuerdo a la aplicación de este método se obtuvieron tres mapas de las zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar, el primero que corresponde a las zonas adecuadas sin tomar en cuenta el área requerida para la construcción ni los niveles de adecuación, el segundo mapa que corresponde a las zonas adecuadas tomando en cuenta el área requerida para la construcción pero no los niveles de adecuación, y el tercer mapa que corresponde a las zonas adecuadas tomando en cuenta el área requerida para su construcción y los niveles de adecuación siendo este el mapa de zonas adecuadas.

4.1.2. Zonas Adecuadas para la Construcción de una Central de Energía Solar

A continuación, se muestra el resultado del método (MCE) con las zonas adecuadas para la construcción de la central de energía solar, como resultado de los factores y restricciones de localización con un área total de (57,201 ha), sin tomar en cuenta los niveles de adecuación ni el área requerida para la construcción de la central de energía solar. (Mapa 8)

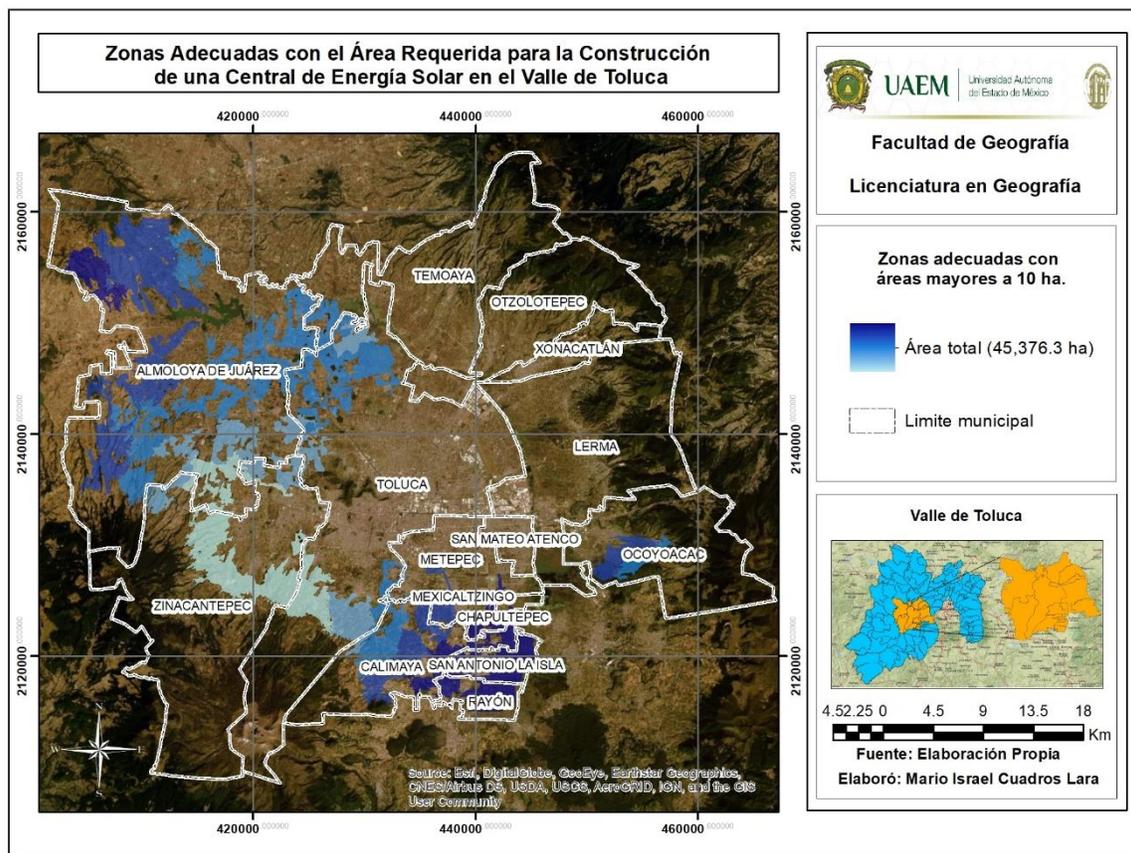
Mapa 8: Aplicación del método (MCE) zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca.



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestra a continuación el resultado del método de evaluación de criterios múltiples (MCE) con las zonas adecuadas para la construcción de la central de energía solar, como obtención de los factores y restricciones de localización, con un área total de (45,376.3 ha) donde se muestran las áreas requeridas para la construcción mayores a cinco hectáreas, por lo que los polígonos de cinco hectáreas o menos fueron eliminados para un mejor manejo y construcción de la central de energía solar. (Mapa 9)

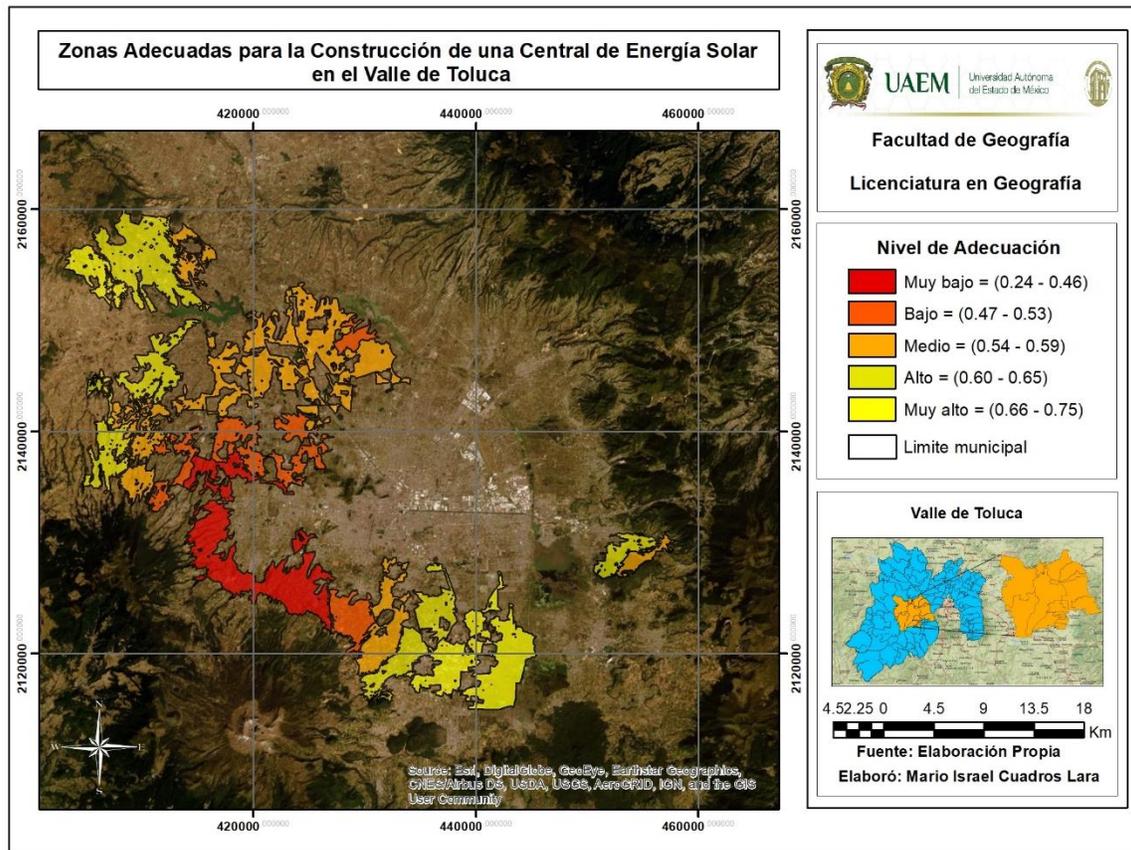
Mapa 9: Zonas adecuadas con el área requerida para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación se muestra como resultado final del método de evaluación de criterios múltiples (MCE) las zonas adecuadas, de acuerdo a los factores y restricciones de localización, con el área requerida mayor a cinco hectáreas para la construcción de la central de energía solar, así como los cinco niveles y sus valores de adecuación que corresponden a un nivel muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, es así como se cumple el primer objetivo que es la identificación de zonas adecuadas en el valle de Toluca. (Mapa 10)

Mapa 10: Zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los valores obtenidos, el nivel de adecuación numérico a través de la paleta de colores previamente definida, como resultado de método de evaluación de criterios múltiples (MCE) para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca. (Tabla 15)

Tabla 15: Rangos de zonas adecuadas

Muy bajo	0.24 - 0.46
Bajo	0.47 - 0.53
Medio	0.54 - 0.59
Alto	0.60 - 0.65
Muy alto	0.66 - 0.75

Fuente: (Elaboración propia)

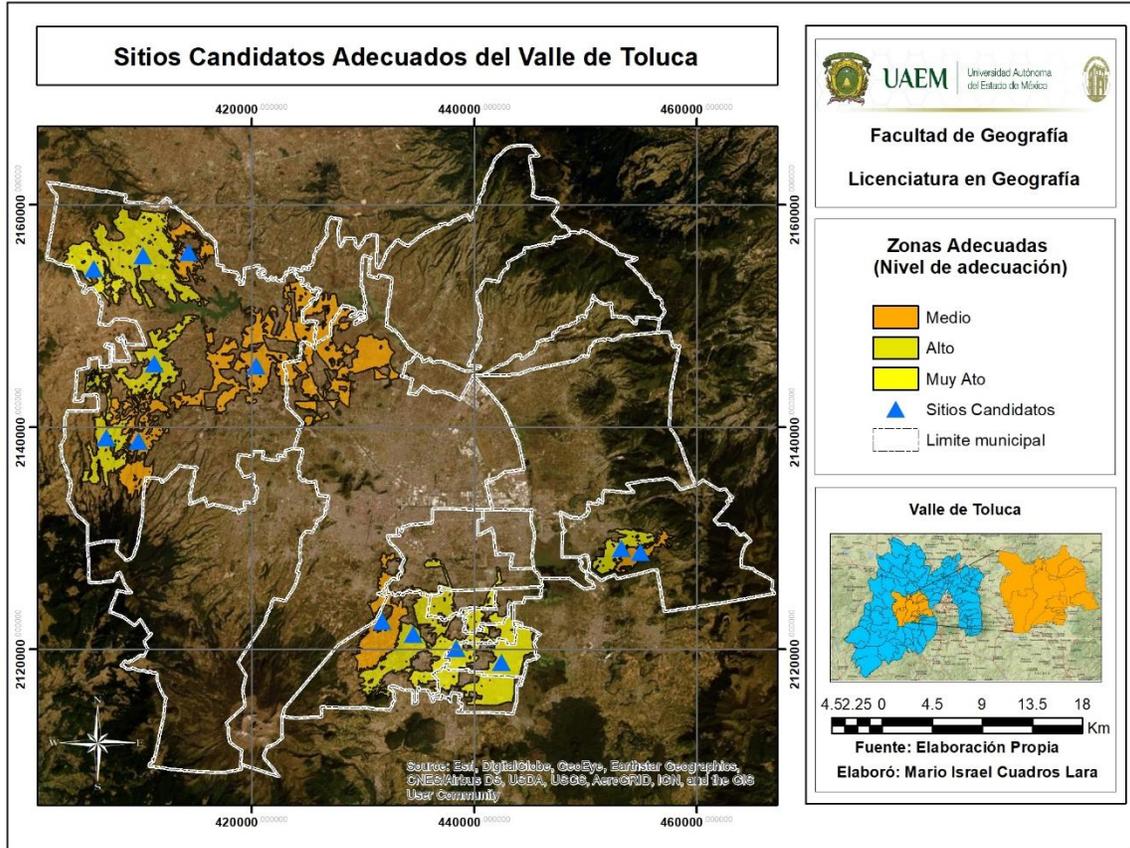
4.2. Etapa 2. Resultados de la ampliación de los modelos matemáticos de localización-asignación Minimax y Minisum con base en la justicia/equidad espacial

Los resultados obtenidos de esta etapa cumplen con el segundo objetivo específico que corresponde a “Evaluar los sitios candidatos con base en la justicia/equidad espacial, mediante la aplicación de modelos de localización-asignación, (Minimax y Minisum)”, a continuación, se muestran los resultados de la aplicación de estos modelos a partir de mapas, tablas y gráficas con los valores correspondientes de cada uno de los procesos aplicados en esta etapa.

4.2.1. Elección de los sitios candidatos para la aplicación de los modelos Minimax y Minisum

A partir del mapa de zonas adecuadas reclasificado en cinco niveles adecuación, muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, que se obtuvo como resultado del análisis de los factores y restricciones, en base al razonamiento lógico se descartaron los rangos de adecuación muy bajo y bajo, posteriormente con las zonas de adecuación restantes, se determinaron trece sitios candidatos, uno por cada polígono dentro de los niveles ya mencionados para la construcción de la central de energía solar. (Mapa 11).

Mapa 11: Sitios Candidatos Adecuados del Valle de Toluca

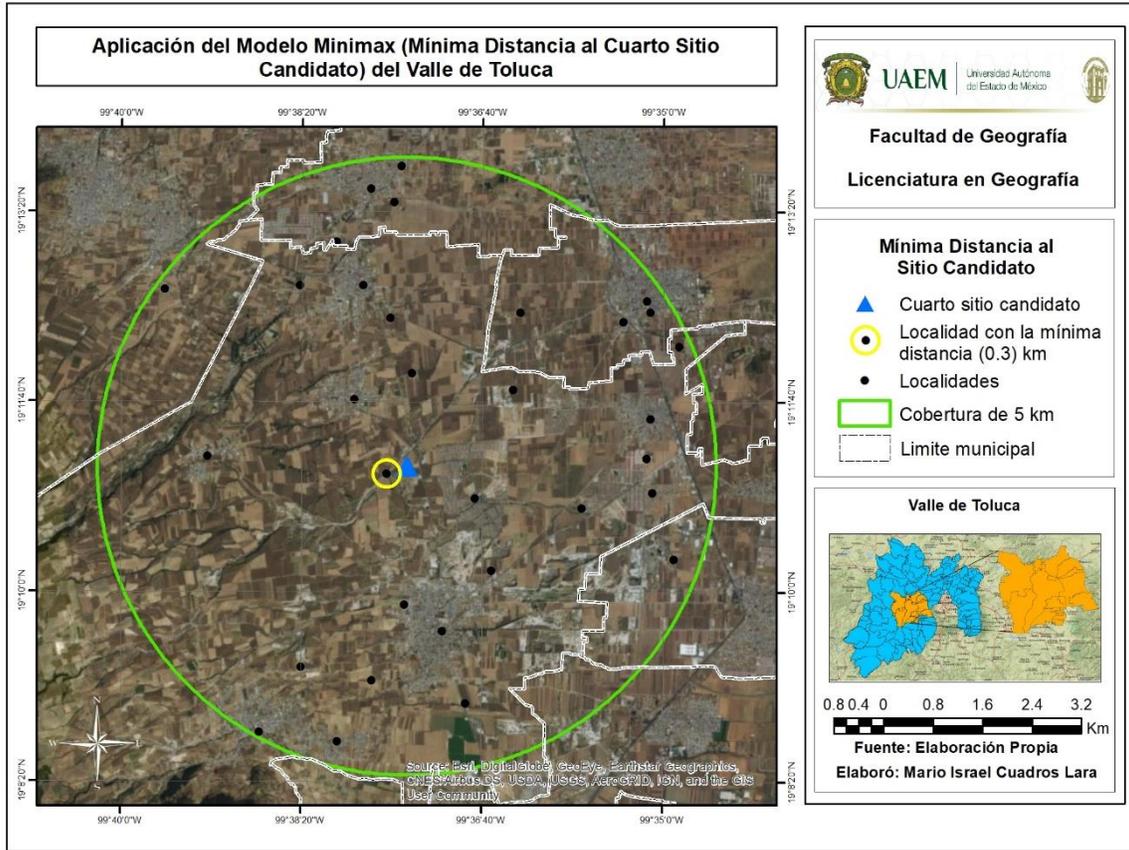


Fuente (Elaboración Propia)

4.2.2. Aplicación del modelo matemático Minimax

Minimax: una vez con la selección de los trece sitios candidatos, para poder aplicar el modelo matemático Minimax, se realizando un proceso de distancia lineal con apoyo de la herramienta (Euclidean Distance) cubriendo un área determinada de cinco km, en base a un razonamiento lógico, para localizar las localidades de cada uno de los sitios candidatos con la mínima distancia, siendo el cuarto sitio candidato el sitio adecuado con una mínima distancia a la localidad más cercana de (0.3 km), para la construcción de la central de energía solar según la aplicación del modelo Minimax. (Mapa 12).

Mapa 12: Aplicación del modelo Minimax (mínima distancia al cuarto sitio candidato) del valle de Toluca



Fuente: (Elaboración Propia)

Posteriormente se extrajo la mínima distancia de los trece sitios candidatos, para un mejor manejo de la información, que se realizó en hojas de cálculo con apoyo de la herramienta (Excel), donde se obtuvo el modelo matemático Minimax, al que se le aplicó una normalización con una oscilación de (0 = No Adecuado y 1 = Adecuado), para después realizar una comparación. A continuación, se muestra este resultado, donde se puede observar que el cuarto sitio candidato corresponde al sitio con la localidad más cercana de acuerdo a la distancia mínima que es de (0.3 km), y con una normalización equivalente a (1.0000 = Adecuado). (Tabla 16)

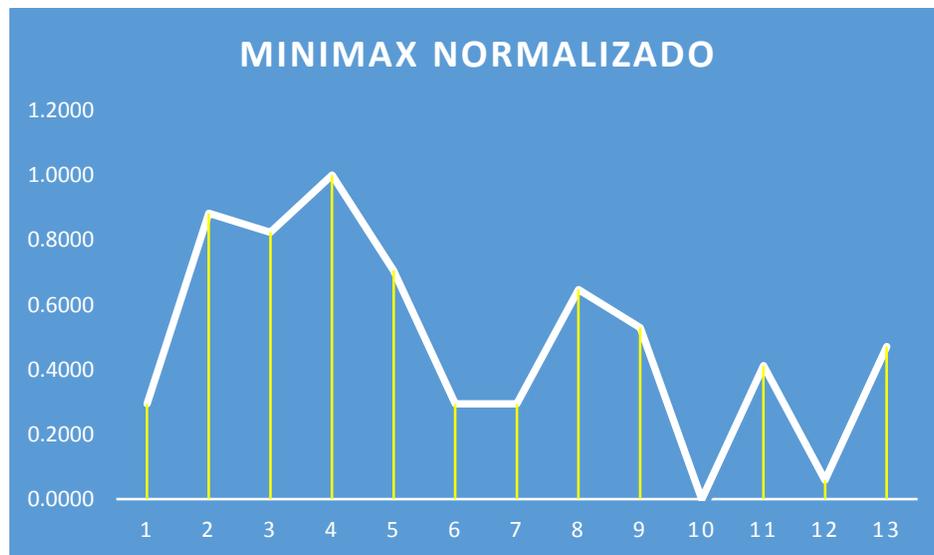
Tabla 16: Aplicación de modelo matemático Minimax

<i>Sitios candidatos</i>	<i>Distancia Mínima (km)</i>	<i>Normalización</i>
1	1.5	0.2941
2	0.5	0.8824
3	0.6	0.8235
4	0.3	1.0000
5	0.8	0.7059
6	1.5	0.2941
7	1.5	0.2941
8	0.9	0.6471
9	1.1	0.5294
10	2	0.0000
11	1.3	0.4118
12	1.9	0.0588
13	1.2	0.4706

Fuente: (Elaboración Propia)

A continuación, se muestran los porcentajes del modelo Minimax normalizado, donde se observan los valores de mínima distancia a la localidad más cercana, de esta misma forma se muestra el sitio candidato número cuatro que corresponde al sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar. (Gráfica 1)

Gráfica 1: Modelo Minimax Normalizado

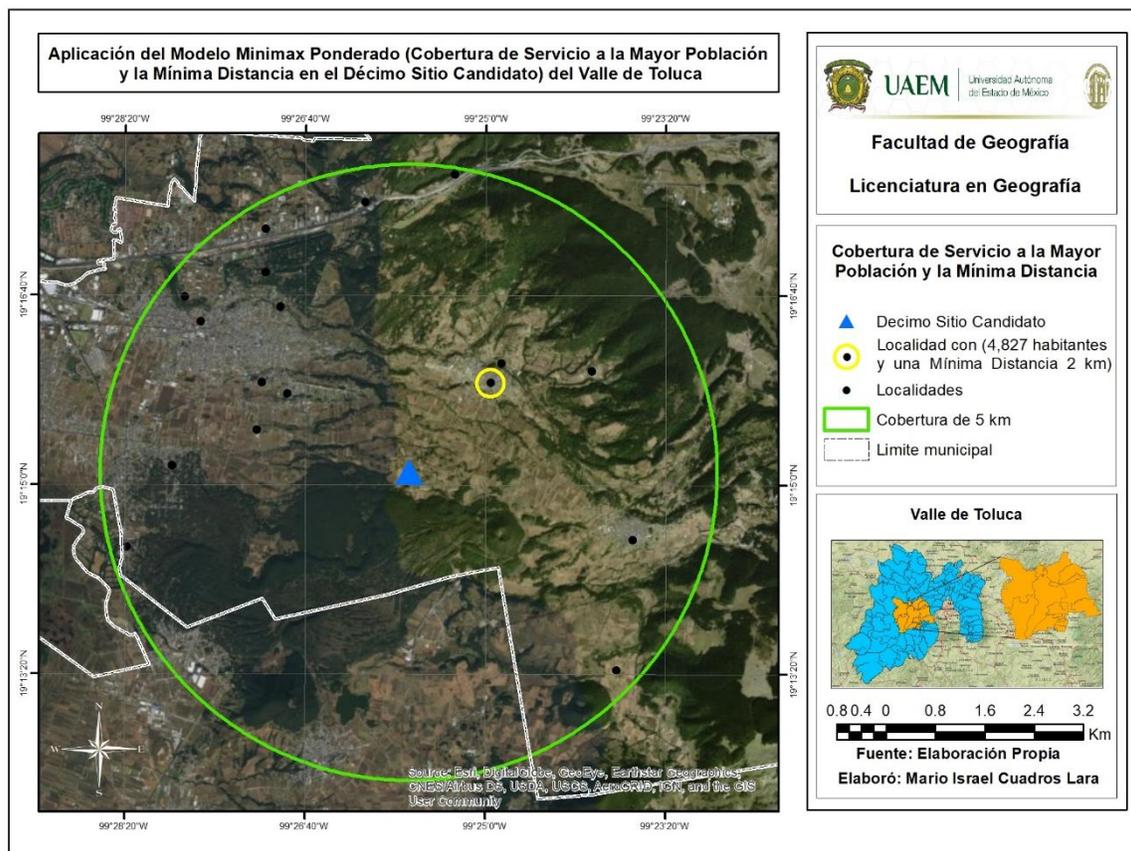


Fuente: (Elaboración Propia)

Minimax ponderado: se aplicó del modelo matemático Minimax ponderado a los trece sitios candidatos anteriormente seleccionados, para este se utilizó el método de la ecuación universal de la gravedad de Newton, la cual se simplifico y aplico como $F = (m_2/r^2)$, donde establece la localidad con la mayor población y la mínima distancia hacia el sitio candidato.

Se observa a continuación el décimo sitio candidato y la localidad con mayor población donde se aplica la eficiencia espacial cubriendo el servicio de energía solar a una población de (4,827 habitantes) considerando que es la mayor población dentro del área de cobertura de cinco km definida anteriormente y la mínima distancia de (2 km), siendo este sitio el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar, según la aplicación del modelo Minimax ponderado. (Mapa 13)

Mapa 13: Aplicación del modelo Minimax ponderado (cobertura de servicio a la mayor población y la mínima distancia en el décimo sitio candidato) del valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los resultados de la aplicación del modelo Minimax ponderado, donde se observan los valores obtenidos que corresponden al décimo sitio, con la mayor población de (4,827 habitantes) y una distancia mínima de (2 km), siendo este sitio candidato, el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar. (Tabla 17).

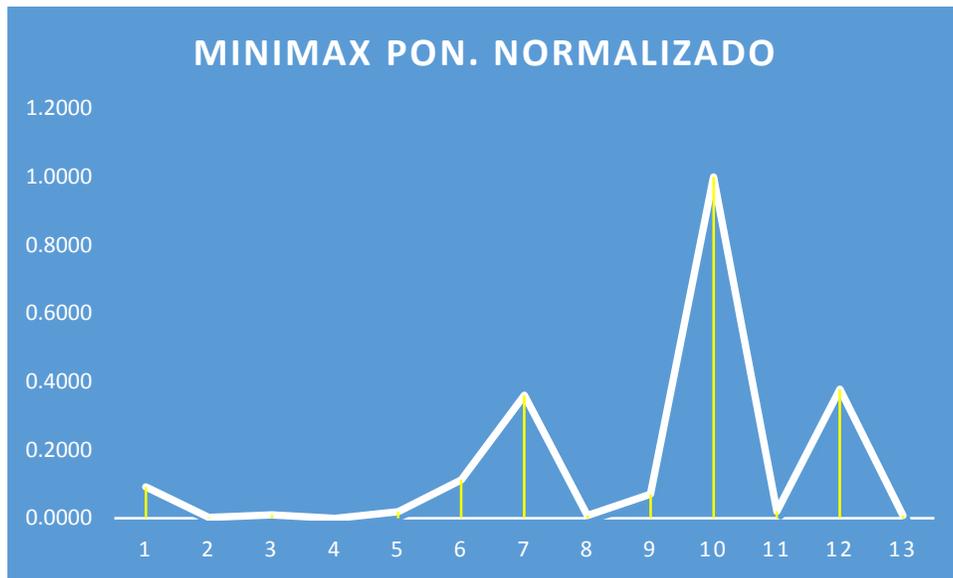
Tabla 17: Minimax ponderado

Sítios Candidatos	Población	Mínima distancia (km)	Minimax ponderado normalizado
1	787	1.5	0.0915
2	220	0.5	0.0027
3	540	0.6	0.0099
4	40	0.3	0.0000
5	595	0.8	0.0195
6	968	1.5	0.1126
7	3089	1.5	0.3598
8	200	0.9	0.0082
9	1121	1.1	0.0701
10	4827	2	1.0000
11	232	1.3	0.0201
12	2020	1.9	0.3776
13	109	1.2	0.0079

Fuente: (Elaboración propia)

Se muestran a continuación los porcentajes del modelo Minimax ponderado normalizado, donde se observan los valores que corresponden la mayor población de las localidades de esta misma forma se muestra que el décimo sitio candidato corresponde al sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar. (Gráfica 2)

Gráfica 2: Modelo Minimax ponderado normalizado



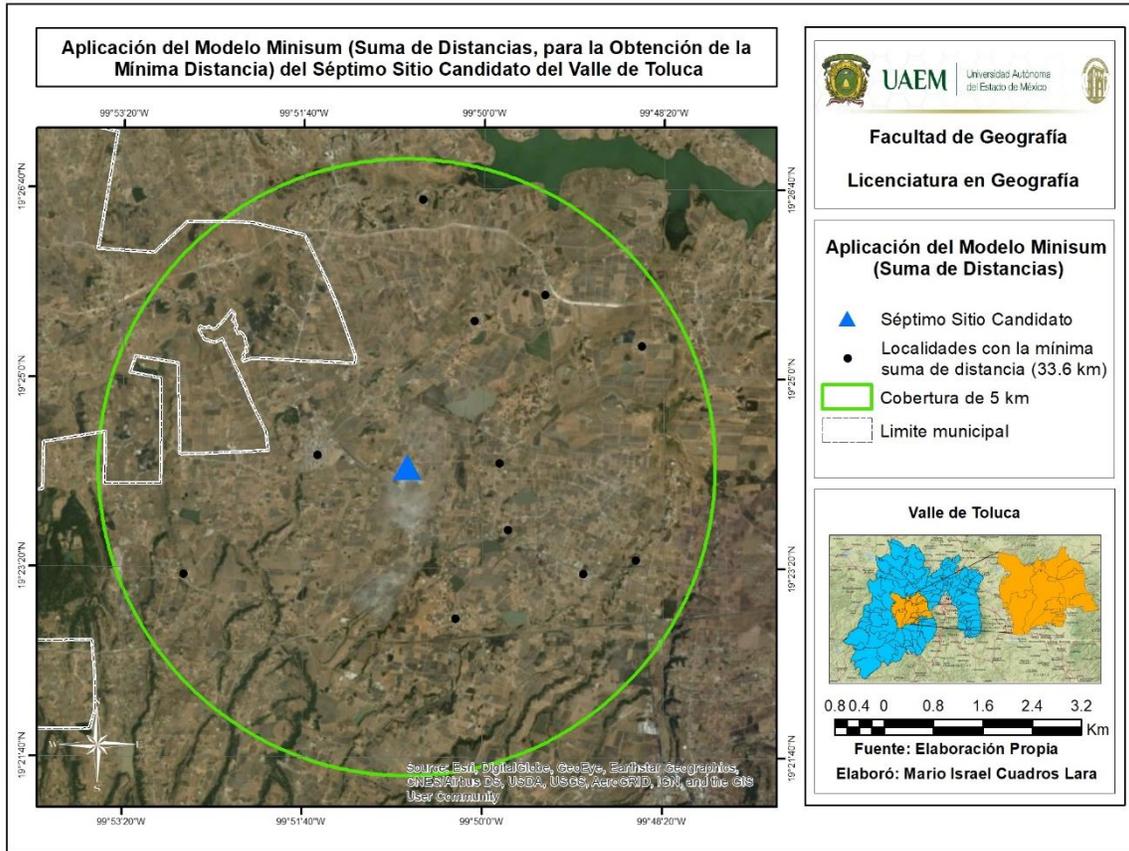
Fuente: (Elaboración propia)

4.2.3. Aplicación del modelo matemático Minisum

Minisum: para la aplicación del modelo matemático Minisum, se realizó la suma de distancias de los trece sitios candidatos, es decir se sumaron las distancias mínimas de cada sitio para la obtención de la mínima distancia de sumas de distancias mínimas, de esta forma se obtuvo como resultado que el séptimo sitio candidato es el sitio adecuado, con la suma de distancias mínimas que corresponde a (33.6 km).

A continuación, se muestra la aplicación del modelo matemático Minisum, donde se observan las localidades del séptimo sitio que dieron como resultado a través de la suma de distancias la mínima distancia de los trece sitios candidatos con un valor de (33.6 km) ya antes mencionado, siendo este sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar de acuerdo a la aplicación del modelo Minisum. (Mapa 14)

Mapa 14: Aplicación del modelo Minisum (suma de distancias, para la obtención de la mínima distancia) del séptimo sitio candidato del valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestran a continuación los resultados de la aplicación del modelo Minisum, donde se observan los valores obtenidos, de cada uno de los sitios candidatos como resultado de la suma de distancias, siendo el séptimo sitio candidato el sitio adecuado, con la distancia mínima de (33.6 km), para la construcción de la central de energía solar según la aplicación del modelo Minisum. (Tabla 18)

Tabla 18: Aplicación de modelo Minisum

<i>Sitios candidatos</i>	<i>Suma de distancia mínima (km)</i>	<i>Minisum normalizado</i>
1	83.9	0.4814
2	130.6	0.0000
3	41.6	0.9174
4	109.6	0.2162
5	80.3	0.5183
6	48.3	0.8487
7	33.6	1.0000
8	58.3	0.7448
9	107.4	0.2388
10	62.3	0.7036
11	44.7	0.8854
12	78.6	0.5361
13	49.0	0.8408

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los porcentajes del modelo Minisum normalizado, donde se observan los valores de mínima distancia de la suma de distancias, de esta misma forma se muestra el séptimo sitio candidato, que corresponde al sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar. (Gráfica 3)

Gráfica 3: Minisum normalizado

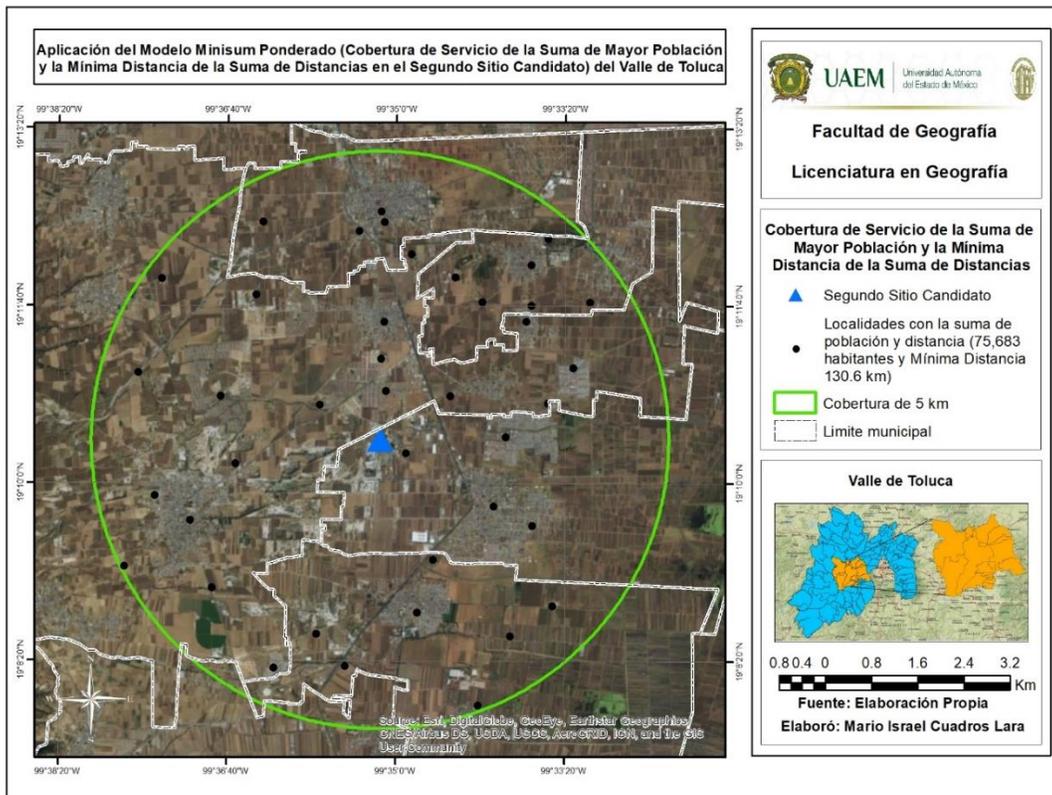


Fuente: (Elaboración propia)

Minisum ponderado: se aplicó del modelo matemático Minisum ponderado a los trece sitios candidatos anteriormente seleccionados, para este se utilizó el método de la ecuación universal de la gravedad de Newton, la cual se simplifico y aplico como $F = (m_2/r^2)$, de tal forma que para la aplicación de este modelo se requirió la suma de las mínimas distancias de los sitios candidatos y la suma de población de los mismos.

Se muestra a continuación el segundo sitio candidato y la suma de población de las localidades del mismo, con la mayor población donde se aplica la equidad espacial cubriendo el servicio de energía solar a una población de (75,683 habitantes) considerando que es la mayor población dentro del área de cobertura de cinco km definido anteriormente y la mínima distancia de la suma de distancias que corresponde a (130.6 km) hasta el segundo sitio candidato, siendo este sitio el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar, según la aplicación del modelo Minisum ponderado. (Mapa 15)

Mapa 15: Aplicación del modelo Minisum ponderado (cobertura de servicio de la suma de mayor población y la mínima distancia de la suma de distancias)



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los resultados de la aplicación del modelo Minisum ponderado, donde se observan los valores obtenidos que corresponden al segundo sitio, con la suma de la mayor población que corresponde a (75,683 habitantes) y la suma de distancias mínimas que corresponde a (130.6 km), siendo este sitio candidato, el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar según la aplicación del modelo Minisum ponderado. (Tabla 19)

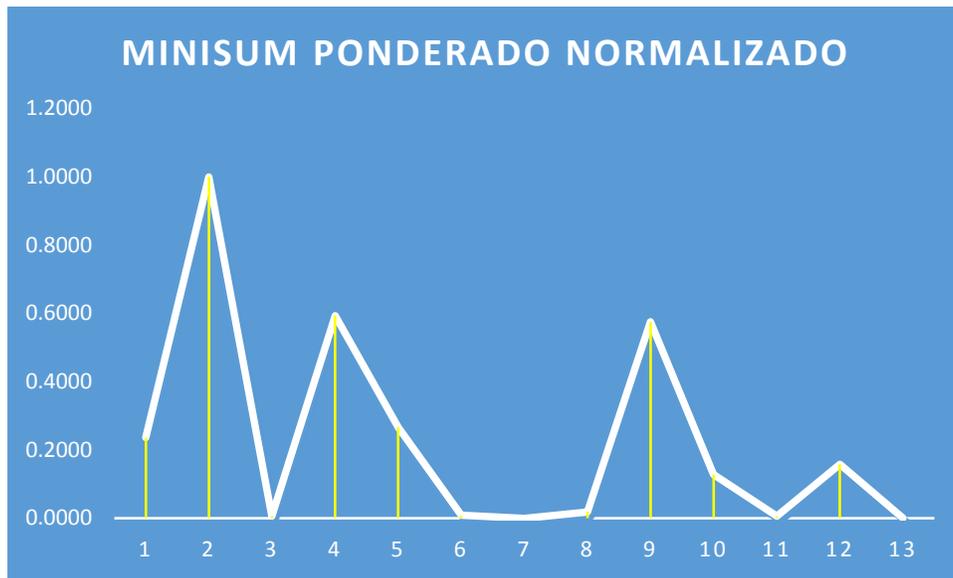
Tabla 19: Minisum ponderado

<i>Sitios candidatos</i>	<i>Suma de la población</i>	<i>Suma de mínimas distancias (km)</i>	<i>Minisum ponderado normalizado</i>
1	44,851	83.9	0.2360
2	75,683	130.6	1.0000
3	12,766	41.6	0.0060
4	64,211	109.6	0.5933
5	54,936	80.3	0.2664
6	10,887	48.3	0.0086
7	12,787	33.6	0.0000
8	11,091	58.3	0.0183
9	64,870	107.4	0.5753
10	45,742	62.3	0.1280
11	11,020	44.7	0.0060
12	34,953	78.6	0.1579
13	6,310	49	0.0006

Fuente: (Elaboración propia)

Se muestran a continuación los porcentajes del modelo Minisum ponderado normalizado, donde se observan los valores que corresponden a la suma de la mayor población de las localidades de esta misma forma se muestra que el segundo sitio candidato corresponde al sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar. (Gráfica 4)

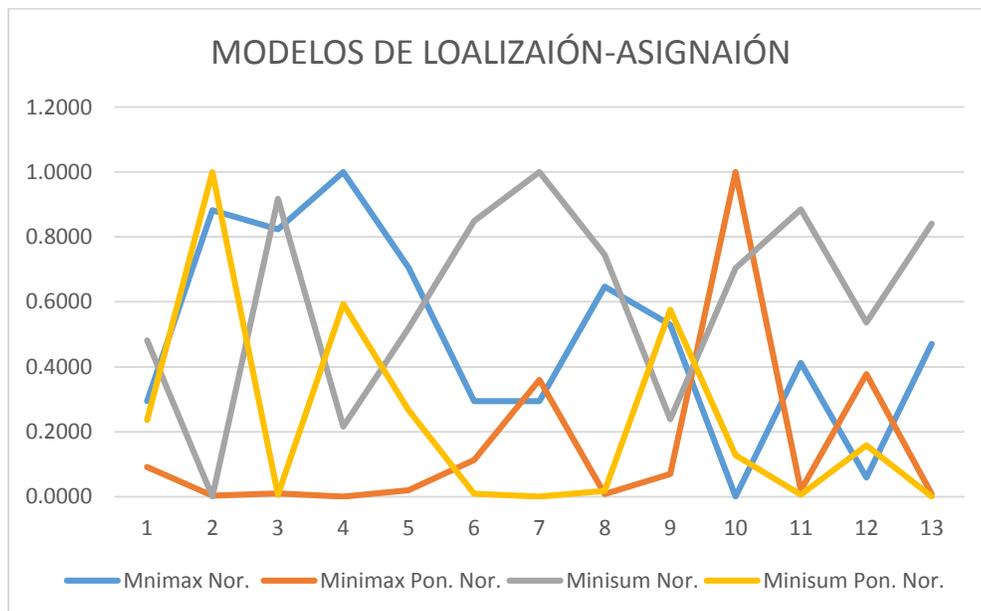
Gráfica 4: Minisum ponderado normalizado



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los porcentajes de los cuatro modelos de localización-asignación normalizados donde se observa el comportamiento de los valores así como los sitios adecuados donde cabe señalar que resaltan los cuatro valores correspondientes a (1.0000 = Adecuado) de los sitios candidatos. (Gráfica 5)

Gráfica 5: Modelos de Localización –asignación

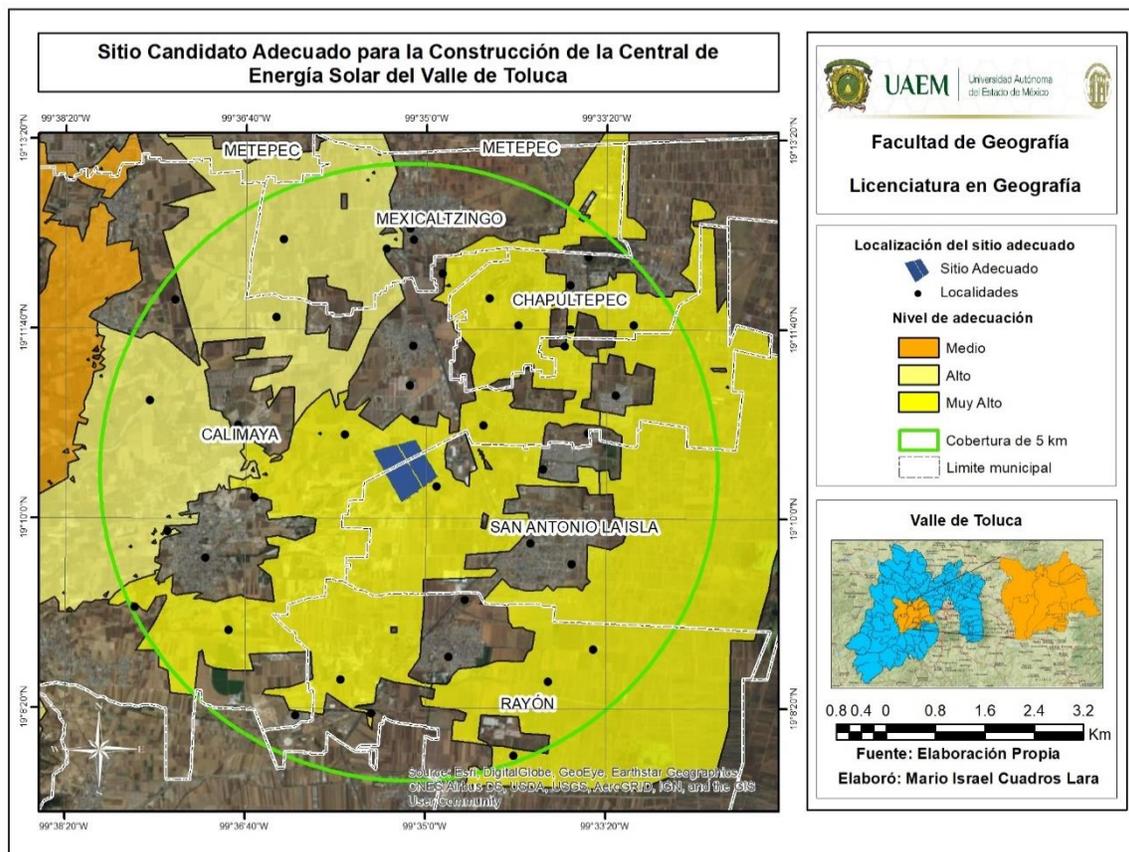


Fuente: (Elaboración propia)

4.2.5 Elección del sitio candidato para la construcción de la central de energía

A continuación se muestra el segundo sitio candidato, como resultado de la aplicación de los modelos matemáticos Minimax y Minisum, siendo este el sitio adecuado, ubicado en el municipio de San Antonio la Isla, de tal forma que el área de cobertura de cinco km cubre parte de los municipios vecinos, siendo estos, Rayón, Calimaya, Mexicaltzingo y Chapultepec, también se muestra el nivel de adecuación de esta ubicación que corresponde a un nivel alto de acuerdo al resultado de la primera etapa localización de zonas adecuadas. (Mapa 16)

Mapa 16: Sitio candidato adecuado para la construcción de la central de energía solar



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestran a continuación los municipios y el número de habitantes que cubre el segundo sitio adecuado de acuerdo al área de cobertura de cinco km, en cuanto a la aplicación de los modelos Minimax y Minisum. (Tabla 20)

Tabla 20: Cobertura de Población

Municipio	Cobertura de Población (Habitantes)
San Antonio la Isla	21,903
Rayón	10,889
Calimaya	24,589
Mexicaltzingo	10,622
Chapultepec	6,461
Total:	74,464

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación se muestra la matriz de comparación, y los resultados obtenidos a través de la misma, donde el segundo sitio candidato corresponde al sitio adecuado, con la aplicación del primer modelo Minimax obteniendo la mínima distancia de (0.5 km) y una normalización de equivalente a (0.8824 = No Adecuado), posteriormente en la aplicación del modelo Minimax ponderado cubre una población máxima de (220 habitantes) y una distancia mínima de (0.5 km) por lo que en la normalización equivale a (0.0027 = No Adecuado).

En el caso del modelo Minisum los resultados obtenidos fueron una suma de distancia mínima de (130.6 km) por lo que la normalización equivale a (0.0000 = No Adecuado), por último, en la aplicación del Minisum ponderado se obtuvo una cobertura de la suma de la población de (75,683 habitantes) y una suma de distancia mínima de (130.6 km) por lo que en la normalización equivale a (1.0000 = Adecuado).

Posteriormente para obtener los resultados de la matriz del sitio adecuado se realizó la suma y división entre estos cuatro aspectos obteniendo un valor de (0.4713), que normalizado en conjunto con los resultados de los demás sitios candidatos, con una oscilación que va de entre (0 a 1) obteniendo el segundo sitio el valor de (1.0000 = Adecuado) siendo este el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar, según la matriz de comparación de estos modelos. (Tabla 21)

Tabla 21: Matriz de comparación de los modelos Minimax y Minisum para la elección del sitio candidato para la construcción de la central de energía solar

<i>Sitios candidatos</i>	<i>Minimax Normalizado</i>	<i>Minimax Ponderado Normalizado</i>	<i>Minisum Normalizado</i>	<i>Minisum Ponderado Normalizado</i>	<i>Suma</i>	<i>División Entre 4</i>	<i>Normalización</i>
1	0.2941	0.0915	0.4814	0.2360	1.1031	0.2758	0.0000
2	0.8824	0.0027	0.0000	1.0000	1.8850	0.4713	1.0000
3	0.8235	0.0099	0.9174	0.0060	1.7569	0.4392	0.8361
4	1.0000	0.0000	0.2162	0.5933	1.8095	0.4524	0.9034
5	0.7059	0.0195	0.5183	0.2664	1.5101	0.3775	0.5205
6	0.2941	0.1126	0.8487	0.0086	1.2640	0.3160	0.2058
7	0.2941	0.3598	1.0000	0.0000	1.6540	0.4135	0.7045
8	0.6471	0.0082	0.7448	0.0183	1.4184	0.3546	0.4032
9	0.5294	0.0701	0.2388	0.5753	1.4136	0.3534	0.3971
10	0.0000	1.0000	0.7036	0.1280	1.8316	0.4579	0.9317
11	0.4118	0.0201	0.8854	0.0060	1.3233	0.3308	0.2816
12	0.0588	0.3776	0.5361	0.1579	1.1303	0.2826	0.0348
13	0.4706	0.0079	0.8408	0.0006	1.3199	0.3300	0.2773

Fuente: (Elaboración Propia)

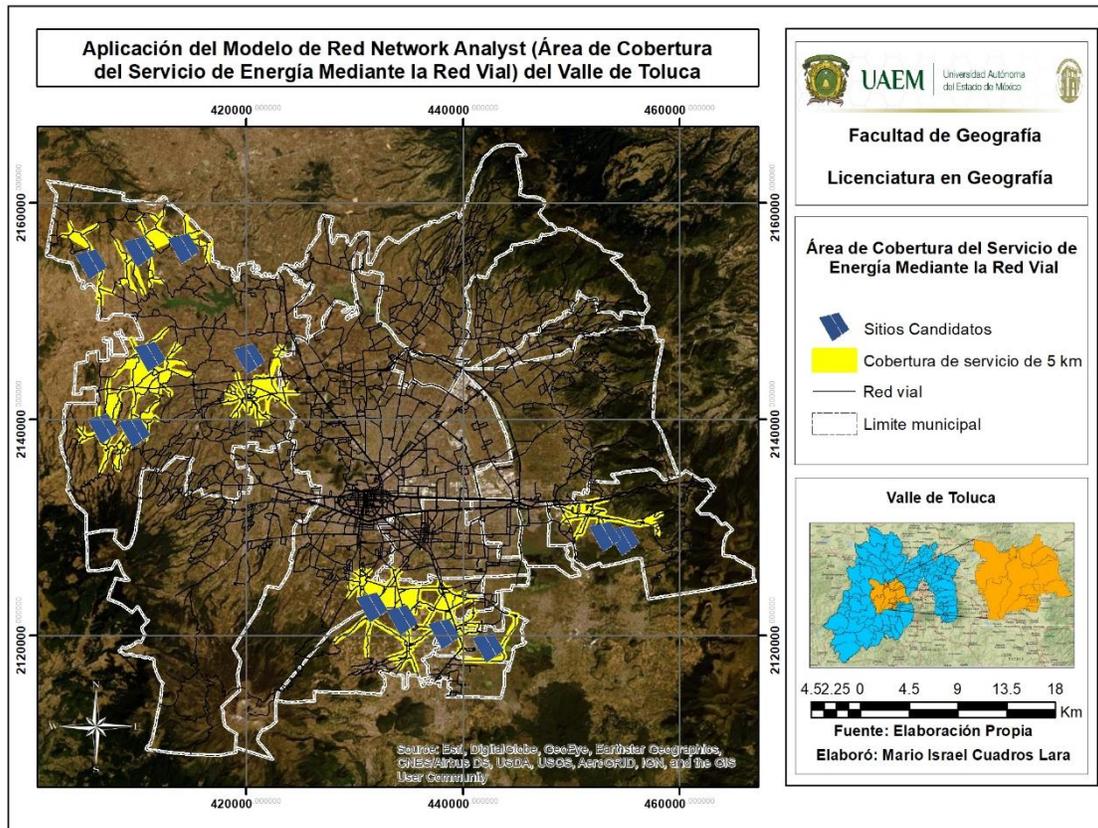
4.3. Etapa 3. Mapas, tablas y gráficas como resultado de la aplicación de modelos de redes mediante el Network Analyst con base en la eficiencia espacial.

Los resultados obtenidos de esta etapa cumplen con el tercer objetivo específico que corresponde a “Evaluar la cobertura espacial del servicio de los sitios candidatos con base en la eficiencia espacial, aplicando los modelos de redes” este análisis se aplicó mediante la herramienta Network Analyst con el propósito de obtener el área de cobertura del servicio de energía solar, mediante la red vial,

Tomando en cuenta que la red eléctrica se establece paralelamente de las vías de comunicación, de esta manera se garantiza que mediante este análisis se muestra la cobertura real del servicio, por lo que se aplicó el mismo valor de área de cobertura definida anteriormente de cinco km desde cada sitio candidato y a través de nodos interconectados se realizó del desplazamiento hasta cubrir el área ya mencionada.

A continuación, se muestra la obtención de las áreas de cobertura mediante la aplicación del modelo de redes de los trece sitios candidatos que corresponden a un área de cobertura de cinco km para obtener el número de población que cubre cada sitio candidato. (Mapa 17)

Mapa 17: Aplicación del modelo de red Network Analyst (área de cobertura del servicio de energía mediante la red vial) del valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

Una vez que se aplicó el análisis de redes, se realizó la suma de la población que se encuentra dentro del área de cobertura de la red de cada sitio candidato, de acuerdo a los resultados obtenidos el segundo sitio candidato, es el sitio adecuado con la mayor área de cobertura de población, cubriendo el servicio a una población de (48,927 habitantes), por lo que el segundo sitio es el sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar según la aplicación del análisis de redes. (Tabla 22)

Tabla 22: Área de cobertura

Sitios candidatos	Cobertura de población
1	221
2	48,927
3	5,711
4	35,416
5	34,357
6	1,875
7	8,965
8	3,829
9	21,516
10	33,156
11	1,875
12	26,567
13	4,296

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestra el número de población de los sitios candidatos, donde se observa que el segundo sitio, corresponde al sitio adecuado con la mayor población de acuerdo a la aplicación del análisis de redes. (Gráfica 6).

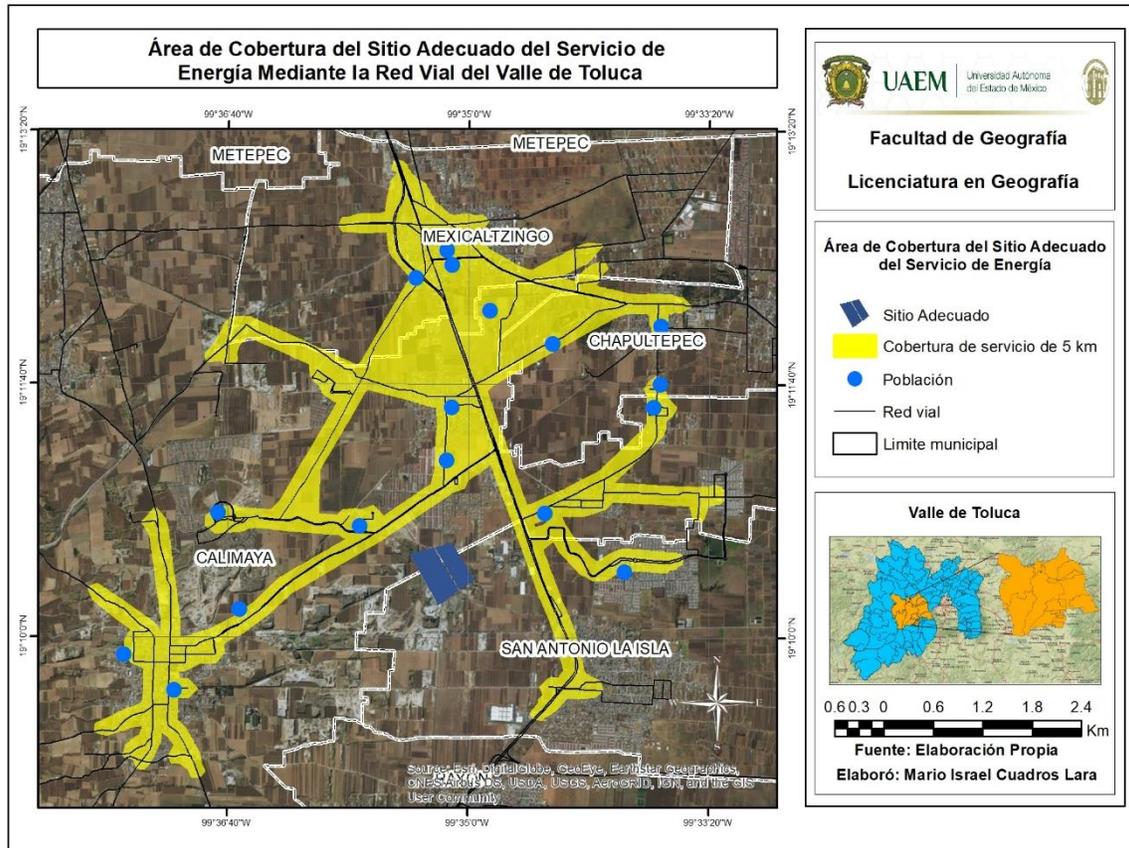
Gráfica 6: Cobertura de población



Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se observa la aplicación del análisis de redes que corresponde al segundo sitio candidato, el cual cumple con la área de cobertura de la población mayor, como se mencionó anteriormente, los municipios que se encuentran dentro de esta cobertura son Calimaya, San Antonio la Isla, Chapultepec y Mexicaltzingo. (Mapa 18).

Mapa 18: Área de cobertura del sitio adecuado del servicio de energía mediante la red vial del valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestran a continuación los municipios y el número de habitantes con el área de cobertura que cubre el sitio adecuado de acuerdo a la distancia de cinco km, en cuanto a la aplicación del análisis de redes. (Tabla 23)

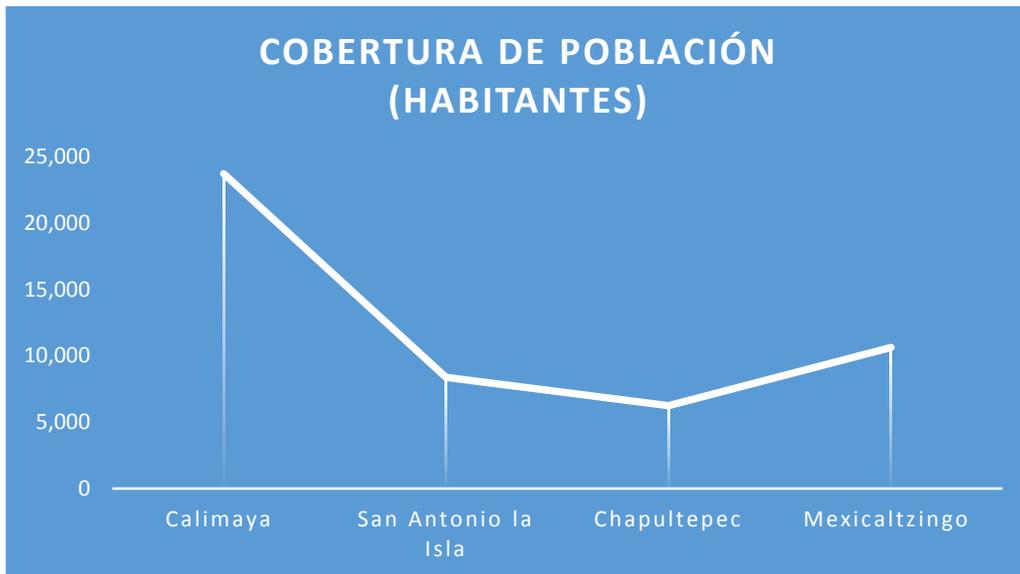
Tabla 23: Cobertura de población

<i>Municipios</i>	<i>Cobertura de población (Habitantes)</i>
Calimaya	23,706
San Antonio la Isla	8,371
Chapultepec	6,236
Mexicaltzingo	10,614
Total:	48,927

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los porcentajes de los sitios candidatos y área de cobertura de los mismos, donde se observa que el segundo sitio, corresponde al sitio adecuado con la mayor área de cobertura de acuerdo a la aplicación del análisis de redes. (Gráfica 7).

Gráfica 7: Área de cobertura de la población



Fuente: (Elaboración propia)

4.4. Análisis comparativo (matriz de comparación a través de la Evaluación de criterios múltiples MCE, modelos de localización-asignación Minimax/Minisum y Análisis de redes)

Para concluir con el cuarto objetivo específico que es “Determinar los sitios candidatos más adecuados en función de la equidad y la eficiencia espacial” se realizó el análisis comparativo no sin antes aplicar la regla de decisión, mediante una matriz de comparación por pares en la cual se asignó un peso para cada uno de los seis criterios obtenidos en el análisis de cada etapa descrita anteriormente.

A continuación, se muestra el preorden de decisión de los seis criterios aplicados anteriormente, así como la regla de decisión formulada a través del mismo, de la cual posteriormente se realizó la matriz de comparación por pares para finalmente obtener un peso de cada criterio y la suma de la razón de consistencia equivalente a 1.0. (Tablas 24, 25 y 26)

Tabla 24: Preorden de decisión

<i>Criterios</i>	<i>Wj</i>
MCE	0.4
Minimax	0.05
Minimax ponderado	0.2
Minisum	0.05
Minisum ponderado	0.2
Cobertura de red	0.1
<i>Suma Wj =</i>	1.0

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 25: Regla de decisión

	<i>wa</i>	<i>wb</i>	<i>wc</i>	<i>wd</i>	<i>we</i>	<i>wf</i>
Criterios	MCE	Minimax Pon.	Minisum Pon.	Minimax	Minisum	Cobertura De Red
	>	=	>	=	>	

Fuente: (Elaboración propia)

Tabla 26: Matriz de comparación por pares

	<i>MCE</i>	<i>Minimax ponderado</i>	<i>Minisum ponderado</i>	<i>Minimax</i>	<i>Minisum</i>	<i>Cobertura de red</i>	<i>Wj</i>
<i>MCE</i>	1						0.3299
<i>Minimax ponderado</i>	1/2	1					0.2693
<i>Minisum ponderado</i>	1/4	1/2	1				0.1806
<i>Minimax</i>	1/2	1/4	1/3	1			0.0975
<i>Minisum</i>	1/2	1/4	1/3	1/2	1		0.0833
<i>Cobertura de red</i>	1/5	1/6	1/6	1/2	1/3	1	0.0394
						Suma Wj =	1.0000

Fuente: (Elaboración propia)

Una vez realizada la matriz de comparación y con una consistencia aceptable, se aplicó una matriz final donde se evaluaron los criterios MCE, Minimax, Minimax ponderado, Minisum, Minisum ponderado y la Cobertura de red.

Para realizar esta matriz se normalizaron los valores obtenidos de la evaluación de criterios múltiples (MCE) de cada sitio candidato, así como, los valores obtenidos del análisis de cobertura de red, la normalización de estos valores fue de una oscilación que va de (1.0000 = Adecuado y 0.0000 = No Adecuado),

A continuación, se muestran los valores obtenidos de la evaluación de criterios múltiples (MCE) y la cobertura de red, así como la normalización que corresponde a cada evaluación aplicada anteriormente. (Tabla 27)

Tabla 27: Normalización de la Evaluación de criterios múltiples MCE y la Cobertura de red

<i>Sitio</i>	<i>Nivel de adecuación MCE</i>	<i>Nivel de adecuación MCE (Normalizado)</i>	<i>Cobertura de población (Habitantes)</i>	<i>Cobertura de población (Normalizado)</i>
1	0.715057	1.0000	221	0.0000
2	0.685838	0.8234	48927	1.0000
3	0.66852	0.7187	5711	0.1127
4	0.624684	0.4537	35416	0.7226
5	0.631859	0.4971	34357	0.7009
6	0.610096	0.3656	1875	0.0340
7	0.609176	0.3600	8965	0.1795
8	0.623653	0.4475	3829	0.0741
9	0.552055	0.0147	21516	0.4372
10	0.559685	0.0609	33156	0.6762
11	0.573467	0.1442	1875	0.0340
12	0.549617	0.0000	26567	0.5409
13	0.590927	0.2497	4296	0.0837

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se describe los sitios adecuados que se obtuvieron como resultado final cumpliendo el objetivo general que es “Desarrollar y aplicar una metodología para determinar el nivel de adecuación del territorio para la localización de una central de energía solar en el valle de Toluca”, con el fin de orientar la toma de decisiones asimismo, para la realización de estudios posteriores más detallados.

Una vez realizada la normalización de la Evaluación de criterios múltiples (MCE) y el Análisis de redes, se realizó la matriz de comparación agregando los modelos de localización-asignación, a continuación, se muestra dicha matriz, y los resultados obtenidos a través de la misma, donde se eligieron los tres sitios candidatos con mayor adecuación para la construcción de la central de energía solar. (Tabla 28)

Tabla 28: Matriz de comparación de la Evaluación de criterios múltiples (MCE), los modelos Minimax y Minisum y el Análisis de redes para la elección de los sitios candidatos para la construcción de la central de energía solar

<i>Sitios candidatos</i>	<i>MCE Normalizado</i>	<i>Minimax Normalizado</i>	<i>Minimax Ponderado Normalizado</i>	<i>Minisum Normalizado</i>	<i>Minisum Ponderado Normalizado</i>	<i>Cobertura de Red Normalizado</i>	<i>Suma</i>	<i>División</i>	<i>Normalización</i>
1	1.0000	0.2941	0.0915	0.4814	0.2360	0.0000	2.1031	0.3505	0.2726
2	0.8234	0.8824	0.0027	0.0000	1.0000	1.0000	3.7084	0.6181	1.0000
3	0.7187	0.8235	0.0099	0.9174	0.0060	0.1127	2.5883	0.4314	0.4925
4	0.4537	1.0000	0.0000	0.2162	0.5933	0.7226	2.9858	0.4976	0.6726
5	0.4971	0.7059	0.0195	0.5183	0.2664	0.7009	2.7080	0.4513	0.5467
6	0.3656	0.2941	0.1126	0.8487	0.0086	0.0340	1.6636	0.2773	0.0735
7	0.3600	0.2941	0.3598	1.0000	0.0000	0.1795	2.1935	0.3656	0.3136
8	0.4475	0.6471	0.0082	0.7448	0.0183	0.0741	1.9400	0.3233	0.1987
9	0.0147	0.5294	0.0701	0.2388	0.5753	0.4372	1.8655	0.3109	0.1650
10	0.0609	0.0000	1.0000	0.7036	0.1280	0.6762	2.5687	0.4281	0.4836
11	0.1442	0.4118	0.0201	0.8854	0.0060	0.0340	1.5014	0.2502	0.0000
12	0.0000	0.0588	0.3776	0.5361	0.1579	0.5409	1.6712	0.2785	0.0770
13	0.2497	0.4706	0.0079	0.8408	0.0006	0.0837	1.6533	0.2755	0.0688

Fuente: (Elaboración propia)

N° 1: El segundo sitio candidato es el sitio adecuado número uno, con los siguientes resultados de la Evaluación de criterios múltiples (MCE) con un nivel de adecuación Muy alto que corresponde a (0.68) y una normalización de (0.8234 = No Adecuado),

En la aplicación del primer modelo de Localización-asignación Minimax obteniendo la mínima distancia de (0.5 km) y una normalización de equivalente a (0.8824 = No Adecuado), posteriormente en la aplicación del Minimax ponderado cubre una población máxima de (220 habitantes) y una distancia mínima de (0.5 km) por lo que en la normalización equivale a (0.0027 = No Adecuado).

En el caso del modelo Minisum los resultados obtenidos fueron una suma de distancia mínima de (130.6 km) por lo que la normalización equivale a (0.0000 = No Adecuado), por último, en la aplicación del Minisum ponderado se obtuvo una cobertura de la suma de la población de (75,683 habitantes) y una suma de distancia mínima de (130.6 km) por lo que en la normalización equivale a (1.0000 = Adecuado).

Para la aplicación del análisis de redes, los resultados obtenidos fueron un área de cobertura de (5.0 km) cubriendo una población de (48,927 habitantes) por lo que en la normalización equivale a (1.0000 = Adecuado) para la construcción de la central de energía solar.

Posteriormente para obtener los resultados de la matriz de los sitios adecuados se realizó la suma y división entre estos seis criterios obteniendo un valor de (0.6181), que normalizado en conjunto con los resultados de los demás sitios candidatos, con una oscilación que va de entre (0 y 1) obteniendo el valor de (1.0000 = Adecuado) siendo este el primer sitio de adecuación para la construcción de la central de energía solar, según la matriz de comparación de estos modelos.

Se muestran los valores obtenidos mencionados anteriormente con respecto al segundo sitio adecuado, siendo este el sitio más adecuado de acuerdo a la Evaluación de criterios múltiples (MCE), a la justicia/equidad espacial con la aplicación de los modelos de localización-asignación y el método de análisis de redes (Tabla 29).

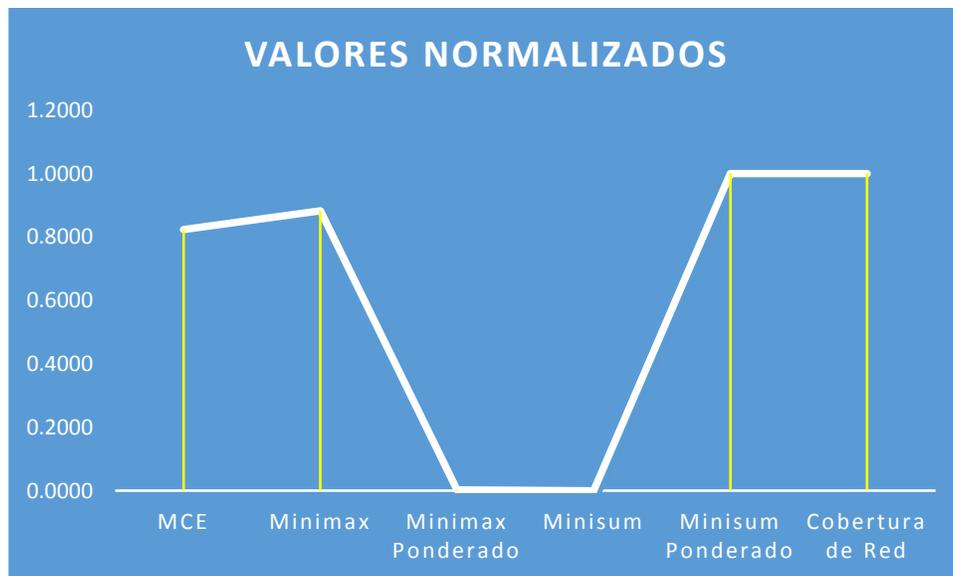
Tabla 29: N° 1. Segundo sitio candidato adecuado

Segundo sitio adecuado				
	<i>Nivel de Adecuación</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Población (Habitantes)</i>	<i>Normalización</i>
MCE	0.68	N/A	N/A	0.8234
Minimax	N/A	0.5	N/A	0.8824
Minimax ponderado	N/A	0.5	220	0.0027
Minisum	N/A	130.6	N/A	0.0000
Minisum ponderado	N/A	130.6	75,683	1.0000
Análisis de redes	N/A	5.0	48,927	1.0000
			Suma	3.7084
			División	0.6181
			Normalización	1.0000

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación se muestran los porcentajes obtenidos de la matriz de comparación de acuerdo a la normalización de cada criterio aplicado, siendo este sitio el primer sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca (Gráfica 8).

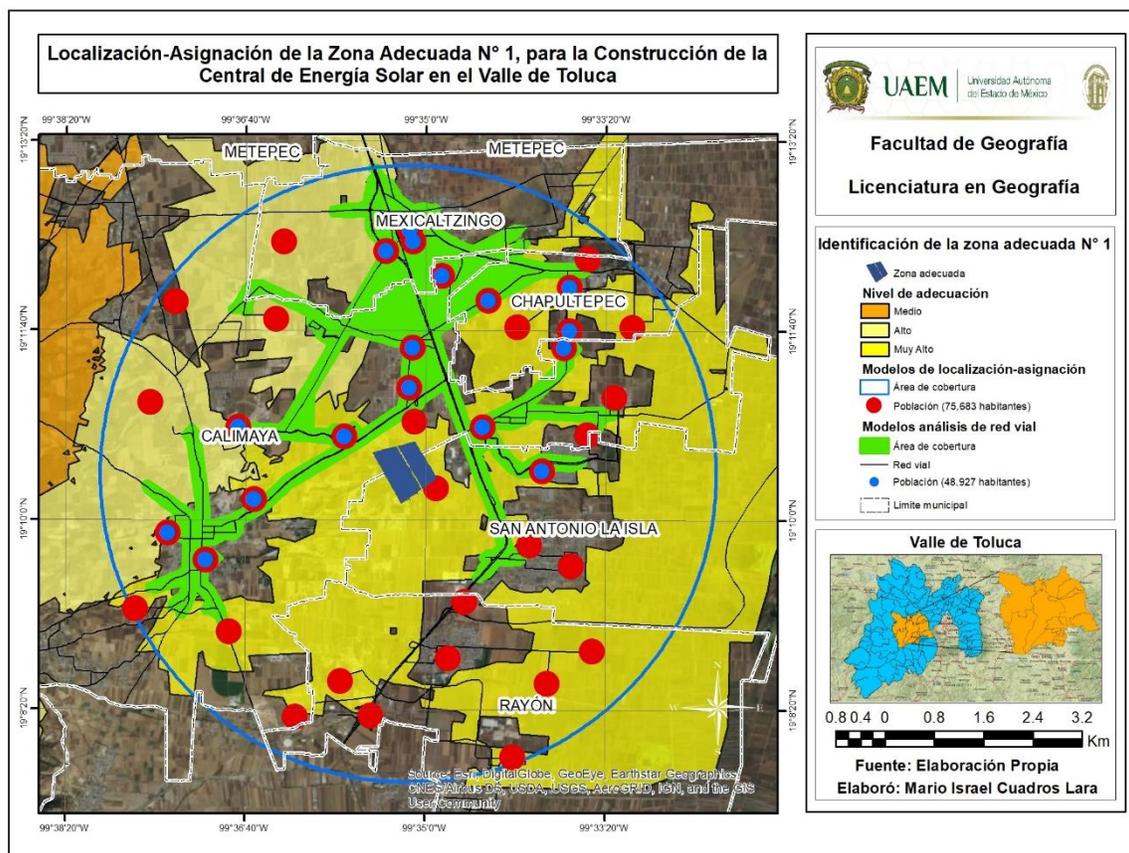
Gráfica 8: Valores normalizados



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestra la localización-asignación del primer sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar del valle de Toluca como resultado del análisis de las tres etapas anteriores, donde se observa la localización del sitio adecuado ubicado en el municipio de San Antonio la Isla, de esta misma forma se muestra el nivel de adecuación que corresponde a un nivel muy alto, así como el área de cobertura y su población según la aplicación de los modelos de localización-asignación Minimax y Minisum y el área de cobertura y población según a aplicación del método análisis de redes (Mapa 19).

Mapa 19: Localización-asignación de la zona adecuada N° 1, para construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

N° 2: El cuarto sitio candidato es el sitio adecuado número dos, con los siguientes resultados de la Evaluación de criterios múltiples (MCE) con un nivel de adecuación Alto que corresponde a (0.62) y una normalización de (0.4537 = No Adecuado),

En la aplicación del primer modelo de Localización-asignación Minimax obteniendo la mínima distancia de (0.3 km) y una normalización de equivalente a (1.0000 = Adecuado), posteriormente en la aplicación del Minimax ponderado cubre una población máxima de (40 habitantes) y una distancia mínima de (0.3 km) por lo que en la normalización equivale a (0.0000 = No Adecuado).

En el caso del modelo Minisum los resultados obtenidos fueron una suma de distancia mínima de (109.6 km) por lo que la normalización equivale a (0.2162 = No Adecuado), por último, en la aplicación del Minisum ponderado se obtuvo una cobertura de la suma de la población de (64,211 habitantes) y una suma de distancia mínima de (109.6 km) por lo que en la normalización equivale a (0.5933 = No Adecuado).

Para la aplicación del análisis de redes, los resultados obtenidos fueron un área de cobertura de (5.0 km) cubriendo una población de (35,416 habitantes) por lo que en la normalización equivale a (0.7226 = No Adecuado).

Posteriormente para obtener los resultados de la matriz de los sitios adecuados se realizó la suma y división entre estos seis criterios obteniendo un valor de (0.4976), que normalizado en conjunto con los resultados de los demás sitios candidatos, con una oscilación que va de entre (0 y 1) obteniendo el valor de (0.6726 = Adecuado) siendo este el segundo sitio de adecuación para la construcción de la central de energía solar, según la matriz de comparación de estos modelos.

Se muestran los valores obtenidos mencionados anteriormente con respecto al segundo sitio adecuado, siendo este el sitio más adecuado de acuerdo a la Evaluación de criterios múltiples (MCE), a la justicia/equidad espacial con la aplicación de los modelos de localización-asignación y el método de análisis de redes (Tabla 30).

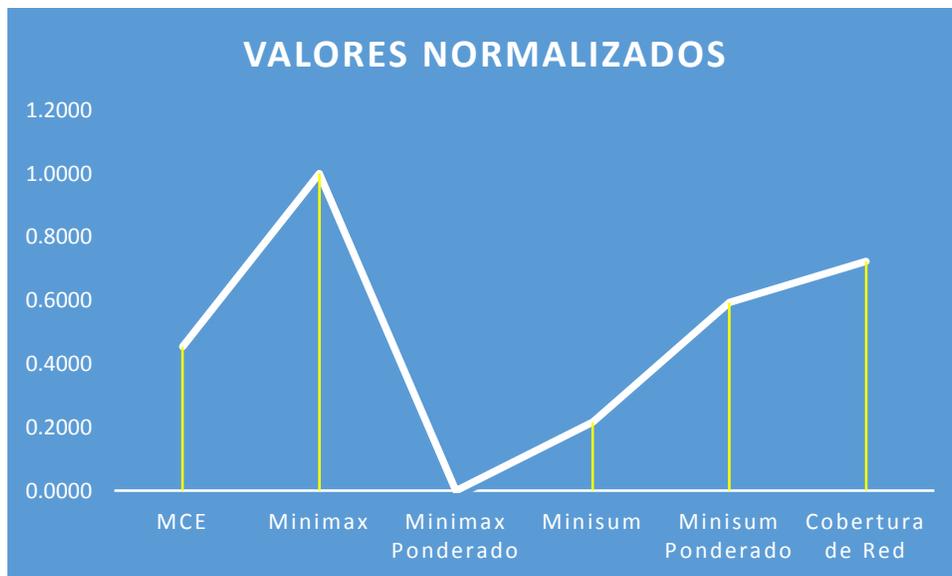
Tabla 30: N° 2. Cuarto sitio candidato adecuado

Segundo sitio adecuado				
	<i>Nivel de Adecuación</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Población (Habitantes)</i>	<i>Normalización</i>
MCE	0.62	N/A	N/A	0.4537
Minimax	N/A	0.3	N/A	1.0000
Minimax ponderado	N/A	0.3	40	0.0000
Minisum	N/A	109.6	N/A	0.2162
Minisum ponderado	N/A	109.6	64,211	0.5933
Análisis de redes	N/A	5.0	35,416	0.7226
			Suma	2.9858
			División	0.4976
			Normalización	0.6726

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los porcentajes obtenidos de la matriz de comparación de acuerdo a la normalización de cada modelo y método aplicado, siendo este sitio el primer sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca (Gráfica 9).

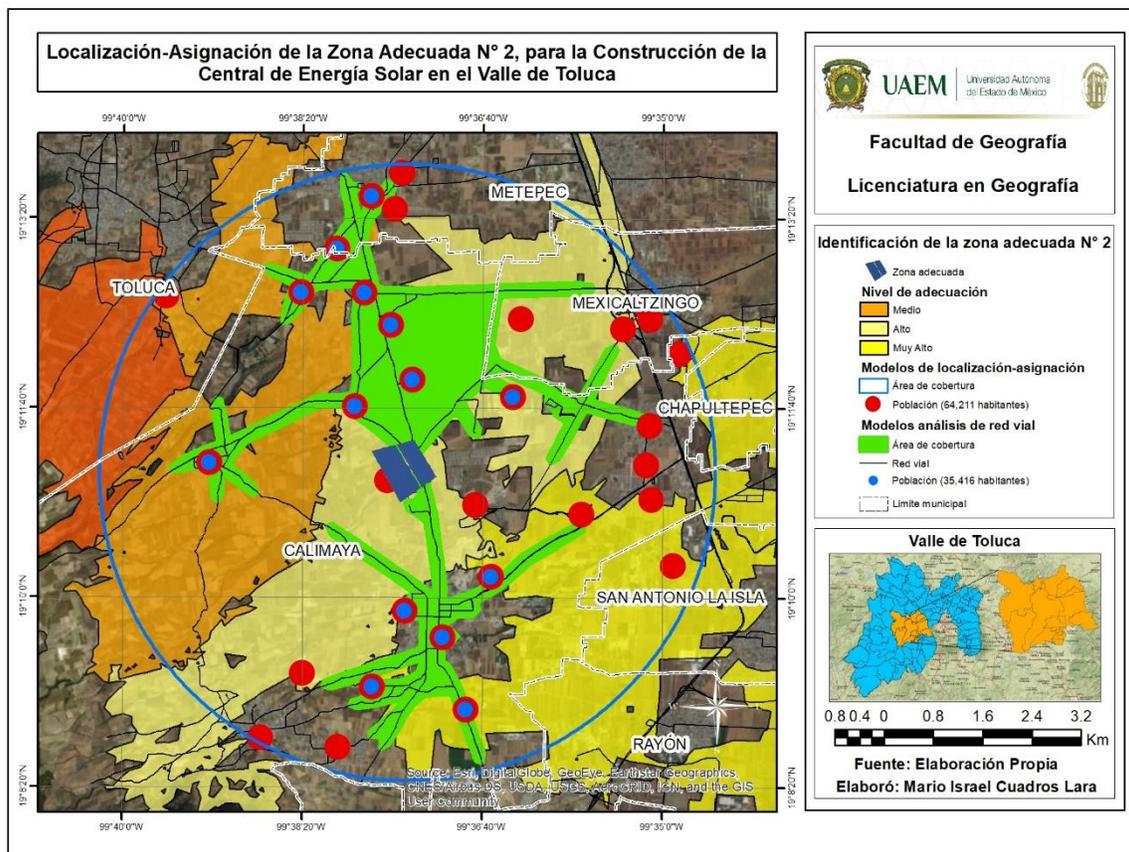
Gráfica 9: Valores normalizados



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestra la localización-asignación del segundo sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar del valle de Toluca como resultado del análisis de las tres etapas anteriores, donde se observa la localización del sitio adecuado ubicado en el municipio de Calimaya, de esta misma forma se muestra el nivel de adecuación que corresponde a un nivel alto, así como el área de cobertura y su población según la aplicación de los modelos de localización-asignación Minimax y Minisum y el área de cobertura y población según a aplicación del método análisis de redes (Mapa 20).

Mapa 20: Localización-asignación de la zona adecuada N° 2, para la construcción de la central de energía solar en valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

N° 3: El quinto sitio candidato es el sitio adecuado número tres, con los siguientes resultados de la Evaluación de criterios múltiples (MCE) con un nivel de adecuación Alto que corresponde a (0.63) y una normalización de (0.4971 = No Adecuado),

En la aplicación del primer modelo de Localización-asignación Minimax obteniendo la mínima distancia de (0.8 km) y una normalización de equivalente a (0.7059 = No Adecuado), posteriormente en la aplicación del Minimax ponderado cubre una población máxima de (595 habitantes) y una distancia mínima de (0.8 km) por lo que en la normalización equivale a (0.0195 = No Adecuado).

En el caso del modelo Minisum los resultados obtenidos fueron una suma de distancia mínima de (80.3 km) por lo que la normalización equivale a (0.5183 = No Adecuado), por último en la aplicación del Minisum ponderado se obtuvo una cobertura de la suma de la población de (54,936 habitantes) y una suma de distancia mínima de (80.3 km) por lo que en la normalización equivale a (0.2664 = No Adecuado).

Para la aplicación del análisis de redes, los resultados obtenidos fueron un área de cobertura de (5.0 km) cubriendo una población de (34,357 habitantes) por lo que en la normalización equivale a (0.7009 = No Adecuado).

Posteriormente para obtener los resultados de la matriz de los sitios adecuados se realizó la suma y división entre estos seis criterios obteniendo un valor de (0.4513), que normalizado en conjunto con los resultados de los demás sitios candidatos, con una oscilación que va de entre (0 y 1) obteniendo el valor de (0.5467 = Adecuado) siendo este el tercer sitio de adecuación para la construcción de la central de energía solar, según la matriz de comparación de estos modelos.

Se muestran los valores obtenidos mencionados anteriormente con respecto al tercer sitio adecuado, siendo este el sitio más adecuado de acuerdo a la Evaluación de criterios múltiples (MCE), a la justicia/equidad espacial con la aplicación de los modelos de localización-asignación y el método de análisis de redes (Tabla 31).

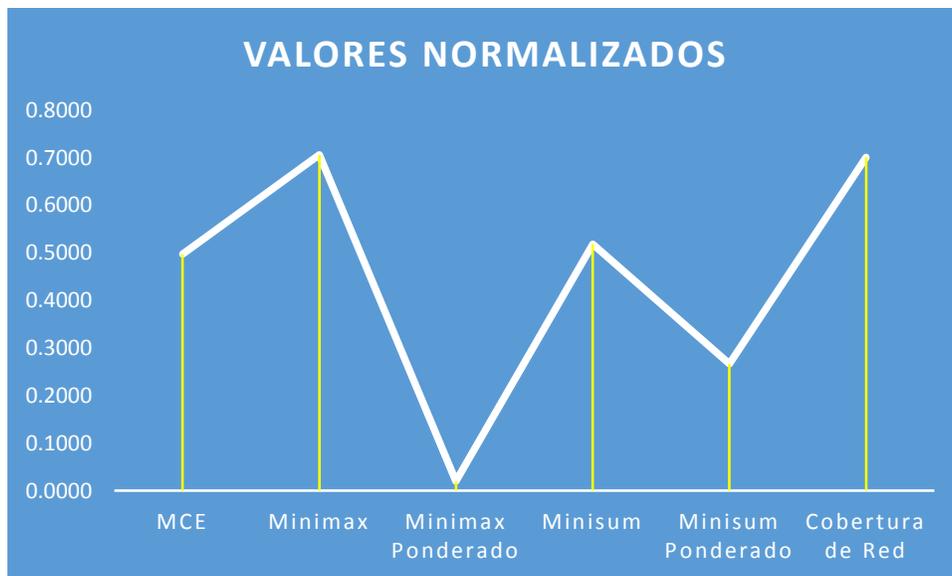
Tabla 31: N° 3. Decimo sitio adecuado

Segundo sitio adecuado				
	<i>Nivel de Adecuación</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Población (Habitantes)</i>	<i>Normalización</i>
MCE	0.63	N/A	N/A	0.4971
Minimax	N/A	0.8	N/A	0.7059
Minimax ponderado	N/A	0.8	595	0.0195
Minisum	N/A	80.3	N/A	0.5183
Minisum ponderado	N/A	80.3	54,936	0.2664
Análisis de redes	N/A	5.0	34,357	0.7009
			Suma	2.7080
			División	0.4513
			Normalización	0.5467

Fuente: (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los porcentajes obtenidos de la matriz de comparación de acuerdo a la normalización de cada modelo y método aplicado, siendo este sitio el primer sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca (Gráfica 10).

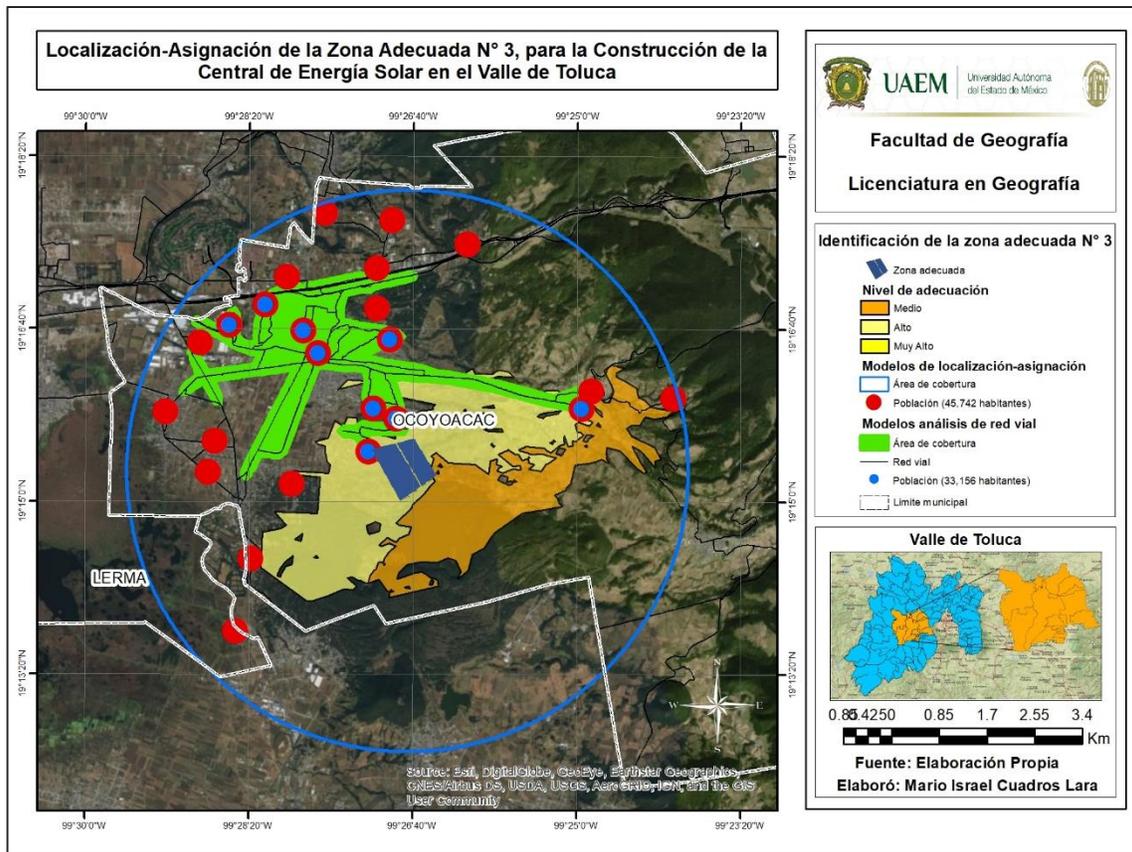
Gráfica 10: Valores normalizados



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestra la localización-asignación del tercer sitio adecuado para la construcción de la central de energía solar del valle de Toluca como resultado del análisis de las tres etapas anteriores, donde se observa la localización del sitio adecuado ubicado en el municipio de Ocoyoacac, de esta misma forma se muestra el nivel de adecuación que corresponde a un nivel alto, así como el área de cobertura y su población según la aplicación de los modelos de localización-asignación Minimax y Minisum y el área de cobertura y población según a aplicación del método análisis de redes (Mapa 21).

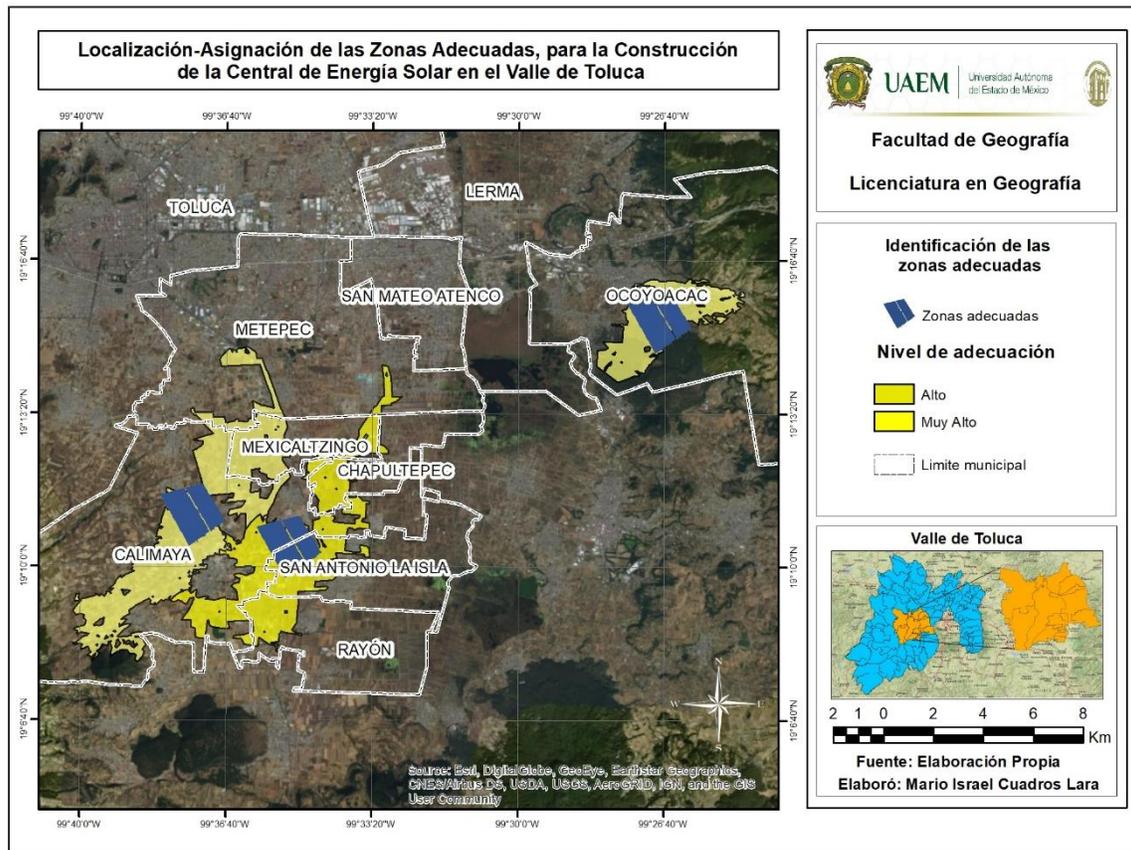
Mapa 21: Localización-asignación de la zona adecuada N° 3, para la construcción de la central de energía solar en valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

Se muestra a continuación como resultado final y cubriendo el objetivo general que es “Desarrollar y aplicar una metodología para determinar el nivel de adecuación del territorio para la localización de una central de energía solar en el Valle de Toluca” los tres sitios candidatos adecuados y los niveles de adecuación que corresponden a cada uno de estos siendo el segundo, cuarto y quinto sitios Adecuados, es así como concluye este análisis, para ayuda de tomadores de decisiones y posteriores estudios (Mapa 22)

Mapa 22: Localización-asignación de las zonas adecuadas, para la construcción de la central de energía solar en el valle de Toluca



Fuente: (Elaboración propia)

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las conclusiones que se presentan a continuación se basan en los resultados obtenidos de acuerdo a la investigación anterior, mediante el desarrollo de la metodología para la aplicación de las tres etapas y el análisis comparativo, de esta forma se concluye que la metodología cumple con lo necesario para cubrir los objetivos planteados al inicio de esta tesis obteniendo como resultado la localización de zonas adecuadas para la construcción de una central de energía solar en el valle de Toluca.

Para la primera etapa, los factores y restricciones de localización son criterios esenciales es por ello que la normalización es un proceso sumamente importante para la homogenización de información de tal forma que la herramienta de evaluación de criterios múltiples (MCE) tenga un resultado concreto y fiable, en este caso los resultados obtenidos son un producto nuevo con valores aceptables y medibles para el nivel de adecuación de una central de energía solar, por tanto, se concluye que la evaluación de criterios múltiples en un ambiente SIG es capaz de combinar diferentes tipos de información para obtener como resultado un producto final nuevo, que sirva como apoyo a la toma de decisiones y/o como base para nuevas investigaciones en relación con el tema.

En la segunda etapa, los modelos de localización-asignación hacen referencia a la justicia/equidad espacial, por lo que tienen un peso fundamental para la ubicación de sitios adecuados, en el caso del análisis anterior, la aplicación de cada uno de los modelos matemáticos tuvo un resultado concreto de acuerdo a la metodología de los mismos, por lo que se concluye que los modelos matemáticos Minimax y Minisum son apropiados para este tipo de análisis ya que el modelo determina el mejor resultado estadístico de adecuación, siendo el modelo Minisum ponderado el adecuado para cubrir el segundo objetivo que corresponde a la evaluación de sitios candidatos para la construcción de una central de energía solar y que sirva este de apoyo a la toma de decisiones valida en procesos de planificación.

En la tercera etapa, la red vial es un factor esencial es por ello que es importante realizar la corrección de errores antes de aplicar el análisis de cobertura de red, para obtener un resultado fiable, este análisis es un proceso metodológico sencillo y más realista en comparación con la distancia euclidiana, sobre todo en este tipo de análisis donde las vías de comunicación juegan un papel decisor, por lo que se concluye que la herramienta Network Analyst es apropiada para un resultado real de cobertura, que sirva como apoyo para la toma de decisiones y/o como base de nuevas investigaciones en relación con el tema.

Para el análisis comparativo, se retomaron los resultados de las tres etapas anteriores, donde a través de una matriz de comparación y un preorden determinado se asignó un peso para cada criterio establecido, con la finalidad de obtener una razón de consistencia aceptable, mediante este proceso metodológico, que permite determinar la aceptabilidad de criterios a través de un peso para cada uno de estos, por lo que se concluye que la elección de sitios candidatos mediante esta herramienta se obtienen un resultado fiable y concreto.

En conclusiones generales la metodología desarrollada y los resultados finales de este análisis cumplieron con los objetivos planteados al inicio de esta investigación, los cuales constituyen un aporte importante en el campo de la aplicación de modernas tecnologías para la evaluación del territorio.

5.2. Recomendaciones

En relación al análisis expuesto anteriormente y a los resultados obtenidos de la identificación de zonas adecuadas en esta investigación se recomienda:

- A partir de los factores de localización (geográficos, meteorológicos y socioeconómicos) y restricciones de localización (ambientales, sociales e infraestructura) se recomienda sumar otra serie de criterios para que el análisis sea aún más detallado y con mayor factibilidad.
- El análisis de la primera etapa se realizó mediante la evaluación de criterios múltiples MCE mediante la suma lineal ponderada por lo que se recomienda utilizar o sumar otro tipo de evaluaciones.
- A través de los modelos matemáticos de localización-asignación Minimax y Minisum se obtuvieron resultados estadísticos concretos, por lo que se recomienda incluir otros modelos de localización de instalaciones deseables.
- De acuerdo a la identificación de zonas adecuadas se recomienda como base para otro tipo de análisis más detallados de acuerdo al tema o en relación al mismo.
- Además de los resultados obtenidos se recomienda realizar análisis más detallados, por ejemplo, de topografía y un estudio de impacto ambiental.
- Para obtener un resultado más completo se recomienda el trabajo de campo, ya que este servirá como validación dándole más fiabilidad al análisis, así como la mejora para nuevas investigaciones para la identificación de zonas adecuadas.

Referencias:

- Barba Romero, Sergio y Jean Pomerol, (1997) *Decisiones Multicriterio en la Gestión*. España: Universidad de Alcalá de Henares. ISBN 978-1-4613-7008-6, 235 p.
- Bosque Sendra, Joaquín y Moreno Jiménez, A. (1990) *Facility Location Analysis and Planning: a GIS Approach EGIS'90*. European Conference on Geographical Information Systems Utrecht. EGIS Foundation.
- Bosque Sendra, Joaquín, (1992) *Sistemas de información geográfica*. Madrid, Ediciones Rialp, 451 p.
- Bosque Sandra, Joaquín y Franco Maass, Sergio, (1995) *Modelos de Localización-Asignación y Evaluación Multicriterio para la Localización de Instalaciones no Deseables*. Serie Geográfica, N° 5, 97-112 p.
- Bosque Sendra, Joaquín, (2002) *Interrelación de SIG y Técnicas de Evaluación Multicriterio para la Planificación Territorial y Ambiental*. Madrid: Universidad de Alcalá.
- Bosque Sendra, Joaquín y Antonio Moreno Jiménez, (2004) *Sistemas de Información Geográfica y Localización Óptima de Instalaciones y Equipamientos*. Madrid: RA-MA. ISBN: 978-84-9964-113-3, 417 p.
- Bosque Sendra, Joaquín, Palm F y Gómez Delgado Montserrat, (2007) *LOCALIZA: una Herramienta SIG para Resolver Problemas de Localización Óptima*. Alcalá.
- Censo de Población y Vivienda, (2010), Instituto de Estadística y Geografía (INEGI)
- Comisión Estatal de Parques Naturales y de la Fauna (2014) *Áreas Naturales Protegidas del Estado de México*. Gobierno del Estado de México. 21 p.
- Current, J, Min H, y Schilling D. (1990). "Multiobjective Analysis of Facility Location Decisions". *European Journal of Operational Research*, 49, (295-307). Europa.
- Del Río Portilla, Antonio (2013). *Instituto de Energías Renovables (IER)*. Morelos. UNAM.
- Fest R. y Brown (2017). *Monitoreo del sistema de calentamiento dólár de la alberca de la UNAM*. Instituto de Energías Renovables. UNAM.

- García, Cruz y Lacal, Roberto. (2001). *Energía solar termoeléctrica*. Europa: Greenpeace. ISBN: 90-733661-82-6, 52 p.
- García Gutiérrez, Rafael (2015). *Producción de electricidad solar mediante sistemas de disco parabólico, a partir de fotoceldas de alta eficiencia y dispositivos termoiónicos avanzados*. Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIE-Sol). Hermosillo, Sonora.
- Gobierno de la República, (2014). *LEY DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA (LIE)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Gobierno de la República, (2015). *LEY DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA (LTE)*. México: Diario Oficial de la Federación.
- Gómez Delgado, Montserrat y Barredo Cano, José Ignacio, (2005) *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio*. Madrid: RA-MA. 276 p.
- Grupo NAP (Grupo Nuevas Actividades Profesionales), (2007) *Energía Solar Fotovoltaica*. Madrid: Francisco Mellado García. ISBN: 978-84-935049-6-0, 122 P.
- Hernández Valdez, Juan Edgar, (2017) *Desarrollo de una Herramienta para la Ubicación de Áreas Geográficas Potenciales para la Implementación de Plantas Solares Termoeléctricas de Torre*, Estado de México, Tesis, Maestría en Análisis Espacial y Geo informática, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Junta de Caminos del Estado de México (2018). *Infraestructura Carretera*, Estado de México.
- Lugo Hubp, Jose I, (1988) *Elementos de Geomorfología Aplicada. (Métodos cartográficos)*. México D.F. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN: 938-36-05-60-5.
- Malczewski, Jacek, (1999) *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Canadá: University of Western Ontario. ISBN: 0-471-32944-4, 387 p.
- Martín Ávila, Ana María, (2014) *Modelo Geográfico para la Estimación del Potencial Fotovoltaico en Tejados*. Madrid, Tesis, Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad Complutense de Madrid.

- McAllister, Donald, (1996) Equity and Efficiency in Public Facility Location. Geographical Analysis, Vol. 8, 63 p.
- NMX-AA-164-SCFI-2013
- Plan Regional de Desarrollo Urbano del Valle de Toluca (2005). Estado de México. Vol. I, 117 p.
- Perpiña Castillo, Carolina, (2012) *Metodologías para la Ubicación de Plantas de Biomasa Mediante Modelos de Localización Basados en Programación Lineal y Evaluación Multicriterio en el Entorno de los Sistemas de Información Geográfica*. Valencia. Tesis Doctoral. Doctorado en Geodesia, Cartografía y Sistemas de Información Geográfica. Universidad Politécnica de Valencia.
- Recarte Allué, Josu, (2013) *Central Fotovoltaica de 500 KW*. España, Tesis, Master en Ingeniería Industrial. Universidad de la Rioja.
- Revelle, Charles y Eiset, HA, (2005) *Location Analysis*. A synthesis and survey, European Journal of Operational Research. 165 p.
- Saaty L. Thomas, (1980). *The Analytical Hierarchilcal Process*. New York: McGraw Hill International. Ediciones Revisadas. Publicaciones RWS.
- Segui Pons, Joana María, (1992). *Geografía de Redes y Sistemas de Transporte*. Madrid: Síntesis, ISBN: 84-773-810-70, 231 p.
- Tejada, Adalberto y Azpeitia Gabriel, (2015) *Prontuario Solar de México*. Universidad de Colima y Veracruz. ISBN: 978-607-8356-45-4. 149 p.
- Voogd, H. J., (1982) *Multicriteria Evaluation For Urban And Regional Planning*. London: Delftsche Uitgevers. ISBN: 90-6562-016-8, 384 p.