



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE SITIOS APROPIADOS PARA EL APROVECHAMIENTO DEL VIENTO, EN LA PARTE NORTE DE LA REPÚBLICA MEXICANA

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

ALEJANDRO RUVALCABA GARCIA

TUTOR PRINCIPAL:

DR. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y CAMBIO CLIMÁTICO, UNAM

DR. MAURO VALDÉS BARRÓN

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DR. OSVALDO RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

DR. ARMANDO GARCÍA CHIANG

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA IZTAPALAPA, UAM-I

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE DEL 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE Figuras	3
ÍNDICE Tablas.....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO II. JUSTIFICACIÓN.....	11
CAPÍTULO III. OBJETIVOS.....	12
Objetivo General	12
Objetivos específicos	12
CAPÍTULO IV. HIPOTESIS	13
CAPÍTULO V. MARCO TEÓRICO.....	14
Situación de las energías renovables en México.	14
Capacidad instalada en México de parques eólicos para generar energía eléctrica	17
Determinación de un proyecto de aprovechamiento de energía eólica en México.	20
Ventajas y desventajas de la generación de energía eólica	28
CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA.....	30
Antecedentes	30
Módulo I. Selección de la zona de interés.....	32
Módulo II. Área de estudio	33
Módulo III. Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)	34
Módulo IV. Mapas de variables.....	37
Módulo 5. Algoritmo Genético (AG)	37
CAPÍTULO VII. RESULTADOS	39
Módulo I. Selección de la zona de interés.....	39
Módulo II. Área de estudio	39
Módulo III. Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)	43
Módulo IV. Mapas de variables.....	46
Módulo V. Algoritmo Genético (AG)	54
CAPÍTULO VIII. DISCUSIÓN	56
CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES.....	59
REFERENCIAS	61

ÍNDICE Figuras

Figura 1. Zonas potenciales para proyectos de energía eólica, de acuerdo con la velocidad del viento (GWA, 2021).	15
Figura 2. Sitios en México y su capacidad instalada de generación en energía eólica (AMDEE, 2020).	16
Figura 3. Potencial de la energía eólica en Oaxaca. La zona de La Ventosa en Oaxaca, cuenta con un recurso eólico de bueno a excelente, dentro de ella está La Venta que cuenta con un recurso eólico que se sitúa entre los mejores en el mundo (Borja,1997).	18
Figura 4. Datos anuales de generación y capacidad instalada de la energía eólica en México (PRODESEN, 2021).	19
Figura 5. Metodología propuesta para la búsqueda de sitios óptimos.....	32
Figura 6. La ubicación de los estados del norte en México considerados para el estudio.	40
Figura 7. Representación de las capas espaciales, considerando los criterios y restricción. ..	40
Figura 8. Selección de la zona preliminar (color café), subprovincia fisiográfica Saltillo Parras en la parte sur de Coahuila.....	41
Figura 9. Localización del área de estudio, de acuerdo con las capas espaciales, los criterios y restricción de la Tabla 4.....	42
Figura 10. Ubicación el área de estudio, de acuerdo a los vértices propuestos.	42
Figura 11. Modelo conceptual con sus celdas activas e inactivas, con un mallado de 100 km ² por cuadrícula.	43
Figura 12. Diagrama del PriEsT para las variables Técnicas, ordenados por sus pesos específicos.....	44
Figura 13. Diagrama del PriEsT para las variables Económicas, ordenados por sus pesos específicos.....	44
Figura 14. Diagrama del PriEsT para las variables Ambientales, ordenados por sus pesos específicos.....	45
Figura 15. Diagrama del PriEsT para las variables Sociales, ordenados por sus pesos específicos.....	45
Figura 16. Diagrama del PriEsT para las variables Técnicas, Económicas y Sociales, ordenados por sus pesos específicos.....	46
Figura 17. Mapa de variable CONSTRUCCIÓN y localización de sus sitios óptimos.	47
Figura 18. Mapa de variable VIABILIDAD y localización de sus sitios óptimos.	48
Figura 19. Mapa de variable COSTOS y localización de sus sitios óptimos.....	49
Figura 20. Mapa de variable RECUPERACIÓN y localización de sus sitios óptimos.	50
Figura 21. Mapa de variable GRUPOS y localización de sus sitios óptimos.	51
Figura 22. Mapa de variable INSEGURIDAD y localización de sus sitios óptimos.	52
Figura 23. Mapa de sitios óptimos, asociados a una tabla de colores para localizar las regiones para un proyecto eólico.....	53
Figura 24. Resultado del análisis del AG y el comportamiento para las seis variables seleccionadas.....	55

ÍNDICE Tablas

<i>Tabla 1. Distribución de costos de inversión en centrales eoloeléctricas (Borja et al., 1997)..</i>	22
<i>Tabla 2. Comparación de la experiencia en Dinamarca y en el Istmo de Tehuantepec con los parques eólicos (Diego, 2015).....</i>	27
<i>Tabla 3. Criterios y restricciones utilizados para la delimitación de la zona de interés.....</i>	33
<i>Tabla 4. Criterios y restricciones utilizados para la delimitación del área de estudio.</i>	33
<i>Tabla 5. Escala de asignación de importancia comparativa entre pares (Saaty y Vargas, 1991).</i>	35
<i>Tabla 6. Planteamiento de las 28 variables propuestas para el estudio clasificadas en cuatro grupos.....</i>	36
<i>Tabla 7. Valores utilizados para generar los mapas de las 6 variables más importantes del proyecto.....</i>	46
<i>Tabla 8. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable CONSTRUCCIÓN.</i>	47
<i>Tabla 9. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable VIABILIDAD.....</i>	48
<i>Tabla 10. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable COSTOS.</i>	49
<i>Tabla 11.. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable RECUPERACIÓN.....</i>	50
<i>Tabla 12. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable GRUPOS.....</i>	51
<i>Tabla 13. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable INSEGURIDAD.....</i>	52

RESUMEN

Incrementar el conocimiento en el ámbito de la energía eólica, permitirá en un futuro próximo un aumento de aceptación en el tema eléctrico, siendo una opción valiosa para nuestro país. La selección de sitios para la instalación de un desarrollo eólico requiere una serie de requisitos, restricciones y variables que se deben considerar y, en ocasiones, difíciles de evaluar.

La primera variable fundamental para este tipo de proyectos es el viento. En nuestro caso, se decidió contar con información de un modelo de pronóstico meteorológico, en un período de cinco años, con el fin de evaluar variaciones estacionales de mayor tiempo para considerar que la cantidad de viento es constante en la región. Dado que actualmente se han creado algunos desarrollos eólicos, principalmente en la zona costera del sur de México, se decidió reducir el área de estudio a los estados fronterizos de la frontera norte, excluyendo aquellos con zonas costeras. Se desarrolló una metodología computacional para establecer zonas factibles para la instalación de parques eólicos.

En el estudio se utilizó una gran cantidad de criterios conocidos y/o estimados: técnicos, económicos, ambientales y sociales, basados en información de anteproyectos para identificar las variables prioritarias más importantes. Mediante un Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ), se desarrolló un modelo jerárquico multicriterio, con el fin de estimar las características más importantes, simplificando un problema muy complejo en procesos más simples que pueden ser analizados de forma independiente, facilitando el trabajo de los tomadores de decisiones y contemplar alternativas viables. Una vez obtenidas las variables de mayor peso e importancia para el estudio, cada variable se transformó en mapas de factibilidad mediante la técnica del álgebra de mapas, junto con un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Posteriormente, se realizó un análisis matemático más robusto utilizando un Algoritmo Genético (AG) para evaluar las variables de mayor importancia en el proyecto y comparar sus resultados con el Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ). El PAJ ponderó la importancia de una variable social, mientras que la AG establece una variable técnica como la más importante. Los análisis multicriterio enfocados a la toma de decisiones en los procesos de planificación y caracterización de sitios de desarrollo eólico factibles, son algoritmos que optimizan la selección de las variables más importantes del proyecto. Permiten considerar elementos de decisión difíciles de evaluar o cuantificar.

El estudio estableció que Coahuila es el estado con mayor factibilidad para establecer parques eólicos, especialmente en cuatro de sus municipios (San Pedro, Matamoros, Torreón y Viesca). Los sitios identificados cumplen con todos los criterios y restricciones planteados. En el mapa de factibilidad elaborado existen varias opciones que no son completamente óptimas como las establecidas anteriormente, pero que en el futuro se podría considerar bajo ciertas restricciones, para instalar un parque eólico en la zona norte de México.

ABSTRACT

Increasing knowledge in the field of wind energy will allow an increase in the acceptance of electricity in the near future, being a valuable option for us. The selection of sites for the installation of a wind development requires a series of requirements, restrictions and variables that must be considered and, sometimes, difficult to evaluate.

The first fundamental variable for this type of project is the wind. In our case, it was decided to have information from a meteorological forecast model, in a period of five years, in order to evaluate seasonal variations of longer time to consider that the amount of wind is constant in the region. Given that currently some wind developments have been created, mainly in the coastal zone of southern Mexico, it was decided to reduce the study area to the border states of the northern border, excluding those with coastal areas. A computational methodology was developed to establish feasible zones for the installation of wind farms.

The study used a large number of known and / or estimated criteria: technical, economic, environmental and social, based on information from preliminary projects to identify the most important priority variables. Through an Analytic Hierarchy Process (AHP), a multi-criteria hierarchical model was developed, in order to estimate the most important characteristics, simplifying a very complex problem into simpler processes that can be analyzed independently, facilitating the work of the policyholders decision-making and consider viable alternatives. Once the variables of greatest weight and importance for the study were obtained, each variable was transformed into feasibility maps using the map algebra technique, together with a Geographic Information System (GIS).

Subsequently, a more robust mathematical analysis was performed using a Genetic Algorithm (GA) to evaluate the variables of greatest importance in the project and compare their results with the Analytic Hierarchy Process (AHP). The AHP weighted the importance of a social variable, while the GA establishes a technical variable as the most important. Multicriteria analyzes focused on decision making in the planning and characterization processes of feasible wind development sites are algorithms that optimize the selection of the most important project variables. They make it possible to consider decision elements that are difficult to evaluate or quantify.

The study established that Coahuila is the state with the greatest feasibility to establish wind farms, especially in four of its municipalities (San Pedro, Matamoros, Torreón and Viesca). The identified sites meet all the criteria and restrictions set out. In the feasibility map prepared there are several options that are not completely optimal as those established above, but that in the future could be considered under certain restrictions, to install a wind farm in the northern part of Mexico.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad a nivel mundial, la mayor parte de la energía eléctrica total generada, proviene de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), con una menor parte de la electricidad creada por los recursos naturales, en específico la energía que proviene de fuentes de energía renovable (principalmente solar y eólica) y un porcentaje mínimo con energía nuclear e hídrica. Afortunadamente en años recientes, estos números están cambiando rápidamente debido al auge que tienen las políticas implementadas para reducir los gases de efecto invernadero a nivel mundial, sobre todo en los países en desarrollo, como México (SENER, 2018).

A lo largo de la República Mexicana se dispone un potencial de energía renovable indiscutible, por las características de sus recursos naturales, su privilegiada ubicación en el Planeta y su entorno natural. En beneficio de reducir el consumo del petróleo en la generación de energía eléctrica, en el país, deben ser impulsadas las tecnologías para su aprovechamiento, de modo que estos recursos puedan ayudar en la diversificación de la generación energética, la eficiencia del uso de recursos renovables y la reducción del petróleo.

La preocupación creciente en México, por la elección de fuentes energéticas eficientes y de bajo impacto medioambiental, está potenciando el desarrollo y aplicación de las energías renovables, en particular la instalación de parques eólicos para la obtención de energía eléctrica. Este tipo de instalaciones, requieren estar acorde con políticas de diversificación energética y reducción de emisiones bajo organismos internacionales. Por esta razón, se han visto apoyadas por los Gobiernos Federales, Estatales y Municipales, afianzando el supuesto de la dependencia de las fuentes energéticas tradicionales y con ello limitar los efectos ambientales, indeseados.

En nuestro país se estableció una meta del 35% de participación mínima de energías limpias en la generación de energía eléctrica para el 2024, con metas intermedias para el 2018 de 25%, y para el 2021 de 30%, dichas metas son la base de la planeación energética. La generación hidroeléctrica a gran escala y la generación nuclear, hacen posible una mayor producción con energías limpias. Dentro de las actividades que conforman la industria nuclear se encuentra el aprovechamiento de los combustibles nucleares con fines energéticos como lo es la generación de electricidad. La Secretaría de Energía establece las políticas para promover la utilización de tecnologías de bajas emisiones de carbono, con el objetivo de impulsar la transición ordenada (PRODESEN 2021).

En particular, la generación de energía eléctrica a partir de un sistema eólico, es una tecnología compleja, por el diseño de cada aerogenerador y el tamaño de las torres con palas que giran suavemente manteniendo una compleja interacción de materiales ligeros, aerodinámicos bajo un control con monitores y ejecutables electrónicos.

México es un país rico en recursos renovables (sol, viento y sistemas hídricos entre otros) para la generación de energía. En algunos casos, considerablemente abundantes en comparación con otros países. Sin embargo, éstos no están distribuidos uniformemente sobre el territorio nacional; por ejemplo, la región del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, cuenta con un gran número de aprovechamientos de su recurso eólico, en Sonora y Chihuahua se identifican con lo solar, Chiapas con hidráulica y Baja California con geotermia (Huacruz, 2016).

El sector de las energías renovables, a pesar de ser una industria naciente en México, ha crecido favorablemente en los últimos años, en proyectos eólicos y en fechas recientes se impulsa con mayor fuerza la energía solar. Varias empresas del ámbito, tanto nacional como internacional, han desarrollado diversos proyectos en el país, lo que coloca a México como uno de los principales países de América Latina, para un destino de inversión (SENER, 2018).

Considerando la posición geográfica de México, sus condiciones hidrológicas, meteorológicas y topográficas, el país cuenta con gran potencial para generar energías renovables, las cuales deben promocionarse para su uso y desarrollo, en forma ordenada con el sistema eléctrico nacional. En México se tiene calculado un potencial de 5.5 kWh/m² para la energía solar, lo que hace factible su generación directa en los hogares, y de energía eólica dando lugar a la instalación de grandes parques principalmente en la zona del Istmo de Tehuantepec y el estado de Tamaulipas; así como el desarrollo de la producción de litio para el almacenamiento de energía eléctrica. En energía geotérmica, el País es actualmente cuarto lugar en el mundo con mayor potencial, los estudios más recientes estiman un potencial de alta entalpía de cerca de 10,000 MW probables y posibles. La biomasa es otra fuente energética, en el caso de residuos se estima un potencial de generación de 3,642 MW. La energía hidroeléctrica debe aumentar su participación con una adecuada administración de las presas, repotenciando las turbinas existentes e incrementando el número de plantas (PRODESEN 2021).

Respecto al impulso que ha recibido este sector, se han y se siguen realizando múltiples esfuerzos para promover el crecimiento de las energías renovables en México. Se ha contribuido al desarrollo de la industria en nuestro país mediante la adecuación del marco regulatorio, la creación de fondos enfocados a desarrollar diversos programas relacionados a eficiencia energética mediante recursos renovables, la apertura del mercado para las industrias extranjeras en el desarrollo de estos tipos de proyectos.

Las instalaciones generadoras de energía eléctrica basadas en recursos renovables han adquirido un papel protagónico en el campo energético en los últimos años, captando tanto la atención de las autoridades como de la sociedad en general. Los parques eólicos consisten en conjuntos de aerogeneradores, siendo la instalación más representativa de explotación de recursos eólicos. El viento representa actualmente la fuente renovable más utilizada, la energía eólica instalada en el mundo, con un crecimiento del 10% en 2019, hasta situarse en 651 GW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC, 2019).

En un análisis realizado por la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMEE), se precisa para el año 2018, una capacidad instalada de nueve mil 500 megavatios, con una ganancia estimada de los proyectos de 30 mil millones de dólares en inversión durante los siguientes siete años, para llegar a 15 mil megavatios de capacidad. Las empresas privadas como Acciona, Iberdrola y Gamesa, entre otras, así como la Comisión Federal de Electricidad (CFE) considerandos en su portafolio de proyectos para los próximos años. La meta planteaba que para 2020 se generarían 12 mil megavatios con energía eólica; con un beneficio de 170 mil millones de pesos en el producto interno bruto (AMEE, 2014).

El objetivo principal de los industriales para invertir en un parque eólico, es la rentabilidad económica del proyecto. En este sentido, la selección de los mejores sitios para un parque eólico constituye una de las fases más importantes para asegurar la máxima rentabilidad; los sitios disponibles que presenten los mejores valores de recurso eólico (mayores velocidades de viento y mayor frecuencia de los mismos) son los que aseguran normalmente una mayor producción de energía eléctrica (Fernández et al., 2009).

En la realización de un proyecto eólico, es importante la identificación y medición de los aspectos positivos o negativos para su realización, prácticamente es definir los contenidos del proyecto de forma secuencial, detallada, haciendo especial hincapié en los aspectos que pudieran llevar alteraciones de los factores ambientales y socioeconómicos existentes en su momento. El siguiente trabajo de tesis, considera utilizar herramientas principalmente computacionales, con la finalidad de tener un criterio global para la ubicación de sitios donde se pueda instalar un parque eólico, siendo estas herramientas, un complemento a las maneras tradicionales con que se eligen los sitios óptimos para la construcción de un parque eólico.

En este escrito, se enumeran las variables más importantes que intervienen en un proyecto de un parque eólico, en la etapa de ubicación del sitio. Una importancia de crear energía eólica, es la disminución de utilizar derivados del petróleo, ya que en su proceso contamina veinte veces menos que el petróleo y el carbón, y cuatro menos que el gas natural (Borja, 1999).

Se han elaborado trabajos con el uso de técnicas informáticas y herramientas computacionales para generar modelos de optimización de parques eólicos. Masetti *et al.* (1994) abordan el problema de la optimización de la disposición o emplazamiento (sitio) de los aerogeneradores en un parque eólico, su trabajo presenta un novedoso enfoque del problema que se presenta en los grandes parques eólicos, optimizando la distribución de las turbinas eólicas, en un emplazamiento dado para conseguir la máxima extracción de energía con los mínimos costos de instalación posibles.

En el 2004 Ozkurt y Norman, publican otro trabajo sobre optimización del emplazamiento de las turbinas en un parque eólico, utilizan el mismo modelo de costos que Masetti *et al.*, aunque su función objeto es ligeramente diferente, coincide con los autores mencionados, en la conveniencia de discretizar la superficie del terreno.

Las técnicas utilizadas en la selección de sitios para la instalación de un parque eólico, consideran dos factores primordiales: el primero se relaciona con una buena cantidad de viento; el segundo se enfoca a que el sitio tenga las condiciones favorables como son: los caminos de acceso y estar cercano a una estación eléctrica (Serrano, 2012).

Los sitios que frecuentemente son seleccionados, se determinan mediante la consulta cartográfica de los recursos naturales de la región, posteriormente se instala una estación anemométrica la cual verifica la cantidad y dirección (recolectando datos durante de doce meses) y finalmente utilizan software como WASP que realiza la evaluación del recurso eólico y el cálculo del rendimiento energético de los aerogeneradores; WindPRO que analiza el diseño y la planificación del parque o WindFarm que optimiza el incremento de la energía o la reducción del costo de la energía (Artillo, 2017).

De igual forma, se han desarrollado estudios más completos que emplean algoritmos computacionales y modelos matemáticos en la selección de los criterios para la elegir los sitios y diseñar los parques eólicos (Grady et al., 2005; Herrera et al., 2011; Guzmán, 2017).

Otros estudios, se han enfocado principalmente en los factores técnico-económicos para fortalecer la toma de decisiones de este tipo de proyectos, así como su rentabilidad. En este sentido, algunos análisis agregan complejidad al incluir características ambientales y sociales como criterios de viabilidad en el diseño y la construcción del parque eólico, lo que ha propiciado la búsqueda y uso de mejores herramientas técnicas computacionales que faciliten el aprovechamiento de este tipo energías renovables, considerando la rentabilidad económica del proyecto y su contribución al desarrollo social de las comunidades (Berumen y Llamazares, 2007).

En los últimos años, se están incorporando metodologías que consideran a los análisis multidisciplinarios en los proyectos eólicos, particularmente en los temas de la selección de sitios y la optimización de su funcionamiento (Falces, 2015). Se han realizado distintos estudios que determinan la posibilidad de la energía eólica, mediante modelos matemáticos computacionales y análisis multicriterios. Fernández et al. (2009) proponen para la selección de los aerogeneradores dentro del parque, se utilicen algoritmos genéticos y se implementen en un sistema de información geográfica. Herrera *et al.* (2011) describen un modelo de optimización de las configuraciones técnicas de un parque eólico, utilizando algoritmos para maximizar las condiciones del proyecto propuesto.

En México, es necesario emprender acciones para el desarrollo, los intereses recientes en proyectos de energías renovables, han encontrado un espacio en las esferas más altas de la política mexicana; sin embargo, son necesarios la implementación de estudios y análisis de elementos, técnicos y no técnicos, para entender en qué medida estas fuentes de energía podrán contribuir a los objetivos nacionales de seguridad energética, sustentabilidad ambiental, desarrollo económico y de las comunidades donde se ejecutan este tipo de proyectos.

CAPÍTULO II. JUSTIFICACIÓN

La metodología regularmente utilizada, para seleccionar un sitio donde se planea la construcción de un parque eólico, requiere básicamente dos condiciones: la primera es una cantidad aceptable de viento y la segunda que la zona de interés cuente con un infraestructura y apoyo de las Autoridades, requiriendo en particular: la existencia de caminos, una facilidad de arrendamiento de predios, la cooperación de las autoridades locales para agilizar los permisos y en algunos casos, una inversión que pueda facilitar para el proyecto.

En años recientes, se han desarrollado algunos trabajos de investigación sobre el tema de los parques eólicos utilizando modelos matemáticos. Herrera et al. (2011) describe un modelo de optimización para los distintos diseños de un parque eólico, utilizando como criterio la maximización de los valores del proyecto.

Serrano et al. (2012) abordan el problema de la configuración óptima de un parque eólico utilizando un algoritmo evolutivo cuyo objetivo es maximizar el valor actual neto de la planta eólica. Fernández et al. (2009) presentan un análisis para la selección en la localización óptima de los aerogeneradores dentro de los parques eólicos, basándose en el uso de algoritmos genéticos implementado en un sistema de información geográfica.

Si bien, en los trabajos consultados se estudia la optimización en un parque eólico, en la mayoría no se consideran realizar un análisis preliminar de sus factores involucrados. En ese caso y para este trabajo de tesis, se propone una metodología con algoritmos computacionales y el apoyo de un personal multidisciplinario con experiencia en distintos campos, para identificar los sitios óptimos para el desarrollo de energía eólica. Por lo anterior, se planea partir de distintas variables impuestas de los tipos ambientales, técnicas, económicas y sociales que cumplan con criterios determinados.

En el planteamiento de la selección de parques eólicos, se deben incluir los criterios geográficos, ecológicos y sociales más importantes y no solamente un par de criterios de los proyectos considerados indispensables desde la perspectiva de quienes los construyen, como se ha maneja por los constructores (Zárate y Fraga, 2016).

En el presente estudio se manejan modelos y algoritmos computacionales con la finalidad de considerar múltiples criterios organizados jerárquicamente con una escala numérica, que funcionen como herramientas alternativas para los proyectos de energías renovables, particularmente los parques eólicos.

Conocer los sitios óptimos bajo criterios determinados, permitirá obtener soluciones adecuadas que contemplen todo tipo de consideraciones y situaciones de las partes ambientales, técnicas y sociales involucradas.

El tema principal del trabajo es, evaluar la potencialidad de la región norte de México para la implementación de parques eólicos, ya que, en recientes años, se ha mostrado interés en la zona por parte de empresas de energías renovables; elaborando una metodología repetible que permita la evaluación de los criterios seleccionados y las condiciones territoriales, usando los métodos instrumentales que ofrecen las técnicas de evaluación multicriterio y los sistemas de información geográfica. El trabajo aquí desarrollado, servirá como una herramienta de fácil manejo y con una aplicación directa, en la toma de decisiones tanto para empresas y gobiernos involucrados, así como para la comunidad local.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS

Objetivo General

Desarrollar una metodología multidisciplinaria en la identificación de sitios óptimos en el norte de México, para el aprovechamiento del viento, bajo determinados criterios y restricciones técnicas, económicas, ambientales y sociales.

Objetivos específicos

- I. Seleccionar una zona de aprovechamiento al norte de México bajo criterios y restricciones determinados.
- II. Determinar y analizar una lista de criterios cualitativos y cuantitativos (variables propuestas) que intervienen en el proyecto.
- III. Aplicar la técnica del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) en las variables propuestas, para seleccionar las de mayor importancia y peso específico en el proyecto.
- IV. Elaborar mapas de sitios óptimos para las variables más importantes e identificar los sitios más factibles.
- V. Ubicar los sitios óptimos para instalación de un parque eólico mediante un mapa general.
- VI. Analizar las variables más importantes mediante un Algoritmo Genético (AG).

CAPÍTULO IV. HIPOTESIS

La producción de energía eólica en México se encuentra presente en 13 de sus estados, entre los que destacan Oaxaca, Tamaulipas y Nuevo León (GWA, 2021), pero en total 20 entidades cuentan con el potencial para transformar el viento en energía eléctrica si se instalan aerogeneradores.

Para desarrollar el potencial eólico en más estados de la república, son necesarias leyes y reglamentos incluyentes, con una planeación nacional y sin la intervención o requerimientos de industriales extranjeros, que en la mayoría de las veces (por mencionar una agravante) no cumple con los compromisos ofrecidos a las comunidades donde se instalan los parques eólicos.

La localización de sitios en la frontera norte para instalar parques eólicos, resulta una propuesta muy viable para la generación de energía eléctrica, el desarrollo industrial, la creación de empleos y mejorar la calidad de vida para la región.

Excluyendo a los estados donde se tiene comunicación con el mar (se excluyen, debido a la poca fricción y ausencia de objetos, lo cual favorece las velocidades del viento al no haber barreras físicas), el presente trabajo tiene el interés de ubicar sitios óptimos en los demás estados del norte de la república, mediante un análisis de variables.

Si consideramos que este tipo de proyectos de generación de energía provocan en una región impactos directos, tanto ambientales como sociales, es adecuado dar una mayor importancia a estos aspectos frente a las cuestiones técnicas, que en la mayoría de las veces se consideran más importantes y que son resueltas sin considerar las afectaciones al medioambiente principalmente.

La agrupación de un gran número de criterios de tipo: técnico, económico, ambiental y social, permitirá considerar todos los factores a interferir en el proyecto, su análisis permitirá seleccionar a las variables de mayor importancia. Utilizando un Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) se elaboró un modelo jerárquico multicriterio, que permitirá estimar las características más importantes y su aplicación, simplifica el problema.

La utilización de una metodología con un análisis computacional y un respaldo matemático aplicados a este tipo de proyectos complejos, son necesarios para ayudar a los desarrolladores (empresas extranjeras principalmente) en la ubicación de manera cómoda y rápida de los mejores sitios para el aprovechamiento de energía eólica. Integrando a los desarrolladores, grupos de interés, la sociedad local y demás involucrados en el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de energía eléctrica a partir del viento.

CAPÍTULO V. MARCO TEÓRICO

Situación de las energías renovables en México.

En comparación con otros, México es un país rico en lugares con recursos renovables para la generación de energía. Sin embargo, éstos, no están distribuidos uniformemente sobre el territorio nacional, por ejemplo, la región del Istmo de Tehuantepec en Oaxaca es importante en recurso eólico, Sonora y Chihuahua en solar, Chiapas en hidráulica y Baja California en geotermia (PRODESEN, 2021).

En el país se desarrollan proyectos con recursos de energías renovables: geotermia, sol, viento, potencia hidráulica, biomasa y distintas formas de energía en los océanos, por lo que, se están proponiendo en algunos círculos de investigación apoyar y utilizar estos recursos para disminuir la dependencia del carbón y petróleo por completo en la economía nacional.

El territorio mexicano dispone de un potencial en recursos renovables indiscutible, debido a su geografía y su conformación natural. Para beneficio nacional, deben ser impulsadas las diferentes tecnologías para su aprovechamiento, en sus diferentes etapas de desarrollo, de modo que estos recursos puedan ayudar en la diversificación de la central energética, la eficiencia del uso de recursos no renovables y la reducción de importaciones de energéticos.

Por ende, México tiene un potencial superior a los líderes en generación de energía fotovoltaica como España o Alemania. La capacidad instalada total fue de 70.053 MW en 2018, presentando una reducción del 7.4 % con respecto a 2017 (75.685 MW), de los que 28,9 % provenía de energías renovables, porcentaje superior al de 2017 (25,7 %) (SENER, 2018).

La capacidad instalada de la energía eólica, que lleva años de desarrollo en México, representa un 6,8 % frente al 2,6 % de la energía fotovoltaica, con una implementación más modesta y reciente, aunque con mayor peso en el último año, pasando de una capacidad de 241 MW en 2017 a 1.821 MW en 2018. Con respecto a la capacidad instalada de energía total por modalidad, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se encuentra dominando el mercado con un 59,2 % (41.471 MW), seguida de un 21,6 % de particulares (15.131 MW) y, posteriormente un 19,2 % de independientes (13.450 MW) en 2018 (SENER, 2018).

De manera estratégica, en el territorio nacional se está reconociendo la necesidad de emprender acciones en el marco del desarrollo sustentable que, propicien el bienestar de la población actual, sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras. Por lo que, el aprovechamiento de fuentes no convencionales de energía ofrece un potencial importante llamando la atención tanto de autoridades públicas, como la iniciativa privada y del público en general.

México cuenta con un gran potencial para la generación de energía eléctrica a partir de los recursos renovables. Gracias a la puesta en marcha de Reformas y Leyes se han desarrollado políticas públicas que permiten la implementación de más proyectos de energías limpias. Durante 2017, el 36% de las nuevas inversiones realizadas en Latinoamérica para el desarrollo de proyectos de energías renovables se realizó en México, colocando al país en el lugar 12 del índice Atractivo-París para energías renovables de Ernst & Young Global Limited y el lugar 10 entre los países líderes en nuevas inversiones del *New Energy Finance* de Bloomberg. Al término del 2018 la generación por fuentes limpias alcanzó 24.12% (40,499.01 GWh). Las tecnologías que mayor crecimiento presentaron fueron la fotovoltaica, la eólica y la cogeneración eficiente contribuyendo a que la capacidad instalada por fuentes limpias se incrementara 11.84% (2,550.41 MW) y la generación en 21.71% con respecto al primer semestre del 2017 (PRODESEN, 2021).

Por el tipo de tecnología, en México, la energía se clasifica en dos categorías: convencionales y limpias. Dentro del segundo tipo, son principalmente la eólica y fotovoltaica donde se tiene un gran potencial por los recursos nacionales disponibles. México es el cuarto país en Latinoamérica con mayor potencial eólico (Figura 1), destacando estados como Oaxaca, Tamaulipas, Coahuila y Yucatán con ráfagas de aire de hasta 10 m/s (el promedio mundial es de aproximadamente 6.5 m/s). Además, México se encuentra en el cinturón solar, con un promedio de irradiación solar superior al global, con más de 5 kW/h al día. Las zonas con mayor potencial son Chihuahua, Durango, Sonora y Baja California, superando incluso los 8 kWh/m² al día (GWA, 2021).

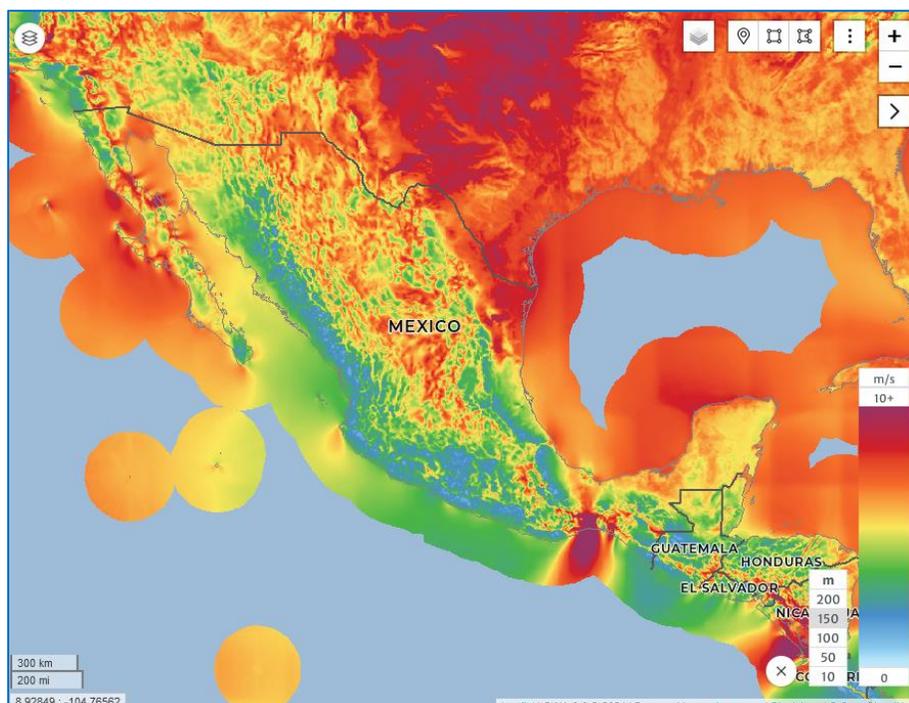


Figura 1. Zonas potenciales para proyectos de energía eólica, de acuerdo con la velocidad del viento (GWA, 2021).

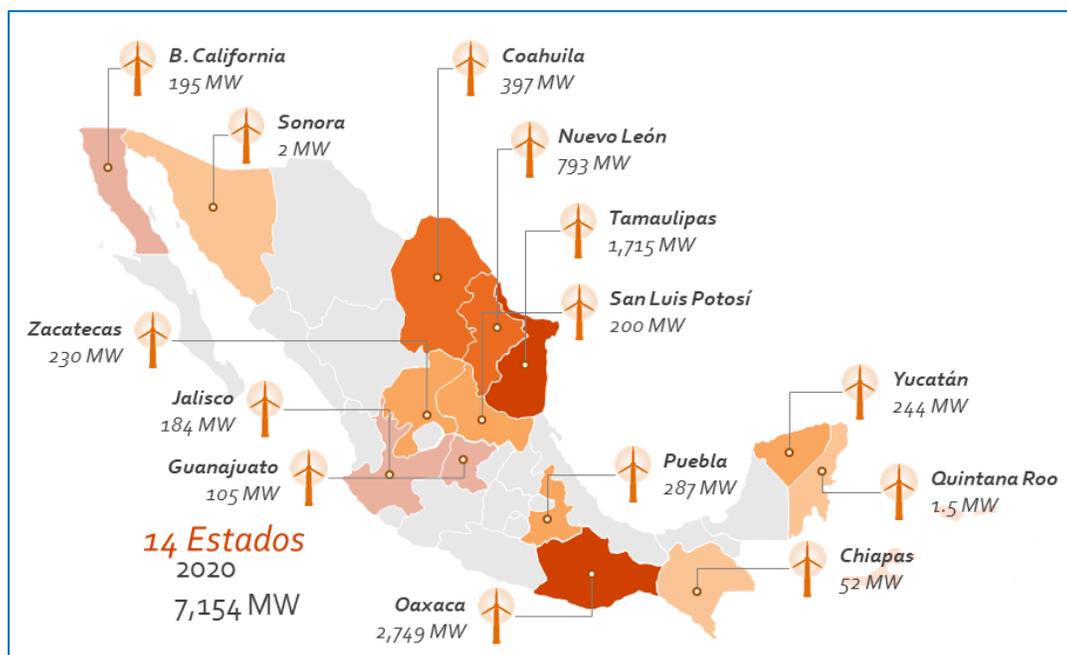


Figura 2. Sitios en México y su capacidad instalada de generación en energía eólica (AMDEE, 2020).

La Secretaría de Energía ha realizado análisis técnicos, económicos y regulatorios, estimando un escenario competitivo, en el que pueden instalarse más de 18,000 MW renovables hacia el 2018 en México, lo cual generaría una apuesta de nuevas inversiones por parte del sector privado, contribuyendo a la organización y desarrollo social de las distintas regiones con un recurso competitivo (SENER, 2013).

Los beneficios de instalar un programa nacional para el aprovechamiento del recurso eólico, tomaría entre 14 y 23 años considerando la meta de generar 5,000 MW eólicos a un ritmo de 1 y 0.6 MW/día. Considerando la parte ambiental, la operación de 5,000 MW eoloelectricos podría reducir la emisión a la atmosfera de aproximadamente 10 millones de toneladas de CO₂/año (Borja, 1998).

En la situación de las energías renovables en México, se requieren establecer políticas públicas congruentes con un apoyo en Leyes, así como utilización de tecnología asociadas a la eficiencia energética, además de programas que detallen los mecanismos a través de los cuales dichas políticas se llevarán a cabo, así como fondos y presupuestos para la ejecución de las actividades marcadas en los programas, siendo adecuadas con el impacto que el sector energético tiene en las emisiones de gases de efecto invernadero (SENER, 2013).

Para la industria mundial de renovables, México es una opción viable, rentable y atractiva (GWEC,2019). En general, convendría potenciar las distintas regiones con alto potencial eólico y el uso de energía solar.

Se considera delimitar el potencial nacional de fuentes renovables, aun cuando se tiene conocimiento que el Golfo de México cuenta con las condiciones necesarias para la generación eólica costa afuera, es necesario evaluar el potencial del aprovechamiento eólico de un modo más sistemático, estableciendo la posibilidad de realizar nuevos estudios de investigación, enriqueciéndolo y dándole continuidad a los proyectos ya iniciados en el Inventario Nacional de Energías Renovables.

Recientemente, se ha contado con el apoyo a la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías del sector por parte de los Institutos Nacionales y algunas Universidades, analizando los procesos de temporada abierta, los financiamientos al desarrollo de este tipo de proyectos y el establecimiento de metas a corto y largo plazo.

Con el cambio de gobierno en México (a partir del 2018), las expectativas del uso de energías renovables han disminuido considerablemente. Las investigaciones y la utilización de las actuales tecnologías ya verificadas en otros países, se aprovecha el extenso potencial que posee el país. Para tener un impulso valdría la pena buscar una cooperación multinacional, lo que se traduciría en un mejor desempeño de la industria incrementando en mayor medida la inversión extranjera en el desarrollo nuevos proyectos.

Capacidad instalada en México de parques eólicos para generar energía eléctrica

En México durante los últimos años se han llevado a cabo importantes acciones que han permitido mejorar considerablemente la situación del sector energético. Se han multiplicado las inversiones en actividades exploratorias, las cuales han permitido revertir la disminución natural de la producción y alcanzar un nivel de restitución de reservas probadas superior al 100% (SENER, 2013).

Los primeros desarrollos eólicos en México se inician con los proyectos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) inicialmente con Guerrero Negro (Puerto Viejo) en Baja California Sur, seguido de La Venta en Oaxaca, inaugurados en 1982 y 1994 respectivamente (Borja, 1997). Estos fueron los únicos proyectos hasta que el año de 2009, cuando, a partir del desarrollo de la primera temporada abierta de reserva de capacidad en el estado de Oaxaca se inauguraron múltiples proyectos eólicos con participación privada.

Dada la extensión del territorio mexicano, las mediciones eólicas enfocadas a la evaluación y caracterización de este recurso, con miras a la instalación de centrales eolieléctricas, son muy limitadas. Sin embargo, en los siguientes años se identificaron otras regiones con mayor potencialidad, con base en las mediciones ejecutadas por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la CFE y estudios indirectos realizados por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos (Borja, 1997).

En la caracterización del recurso eólico, existe el Atlas Eólico Mexicano (AEM, 2015) el cual se describe como un atlas eólico nacional para la planeación de la explotación del recurso eólico y la generación eléctrica en México. El mejor lugar en nuestro país para el aprovechamiento del viento, se conoce como La Ventosa en el estado de Oaxaca en el sur del Istmo de Tehuantepec, es un sitio que desde 1984, fue señalado por el IIE como la región con mayor recurso eólico en México (Figura 4).

Hasta 2010, México tenía una capacidad instalada operando de 519 mega watts (MW) de energía eólica, y con expectativas de que para 2011 se duplicará y para 2015 se multiplique al menos cinco veces.

Esta tendencia representa el reto a nuestro país de lograr un crecimiento sostenido para consolidar esta industria. En los próximos 15 años, el gobierno mexicano tiene como meta, que 35% de la energía generada sea de origen sustentable, y en este contexto la eólica es la que más inversión ha recibido hasta el momento (AMDEE, 2017).

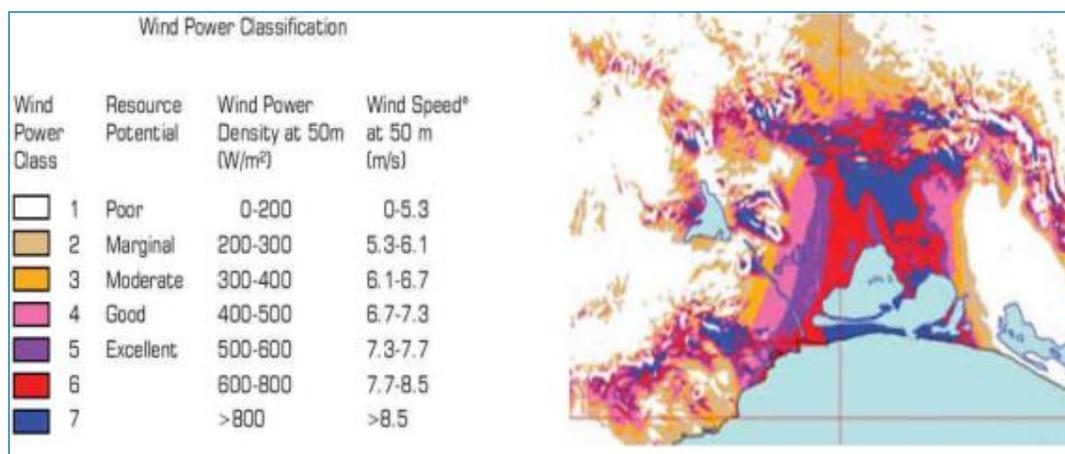


Figura 3. Potencial de la energía eólica en Oaxaca. La zona de La Ventosa en Oaxaca, cuenta con un recurso eólico de bueno a excelente, dentro de ella está La Venta que cuenta con un recurso eólico que se sitúa entre los mejores en el mundo (Borja,1997).

Datos recientes indican que la inversión rebasó en el último quinquenio los dos mil millones de dólares, y se espera que en la próxima década supere los 20 mil millones. Según cifras de la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE, 2017), los costos de generación se han reducido de forma considerable en los últimos 15 años, al grado de alcanzar competitividad en comparación con fuentes convencionales de energía.

En 2013 la SENER, desarrolló el Inventario Nacional de Energías Renovables, con la colaboración de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil de CFE, integrando información de los recursos renovables del país a través de un Sistema de Información Geográfica que permite la actualización de la información conforme se desarrollen nuevos estudios y mediciones cada vez más detalladas.

De acuerdo con WindPower (2012), en el periodo de 2015 a 2018, se estiman inversiones superiores a 12,000 mdd en el país. Para 2014, el país atrajo 2,100 mdd en inversión en energías renovables, 40% más que en 2013, de acuerdo con el informe Tendencias globales de inversión en energías renovables 2015, esto sitúa a México por arriba de otras economías emergentes como Indonesia, Turquía, Chile y Kenia. Retomando las circunstancias de México y el tema eólico, los cinco estados que generarán más megavatios con energía eólica en 2018 son (AMDEE, 2017):

1. Oaxaca: 5,564 megavatios.
2. Tamaulipas: 1,350 megavatios.
3. Coahuila: 1,080 megavatios.
4. Nuevo León: 642 megavatios.
5. Jalisco: 399 megavatios.

La inversión en infraestructura, productos y procesos a favor del desarrollo de la energía eólica dan lugar a ventajas competitivas que pueden capitalizarse para que las empresas reduzcan costos energéticos y sean más rentables. En México existen incentivos importantes para quienes invierten en eólicas y actualmente varias empresas ya tienen un papel importante en el contexto de generación y uso de la energía del viento; se puede mencionar a Acciona, Cemex, EDF, Femsa-Macquarie, Gamesa, Iberdrola, Peñoles, WalMart, Grupo Bimbo, Grupo Modelo, Mittal, Cemex y Grupo Herdez.

Hasta el momento, en México se han invertido 13,000 millones de dólares en la capacidad eólica actual, que representa poco más del 8% de la instalación eléctrica nacional. Al concluir la administración pasada (2018), y dado el potencial del viento en regiones como Tamaulipas y Oaxaca, entre otros, se esperaba superar el 10% de la capacidad instalada al 2024, pero los arreglos que se obtuvieron como exceso de socios de autoabasto o exención del pago de transmisión por considerarse energía renovable, han llevado a que la CFE tenga pérdidas al otorgar apoyos a privados que invierten en el sector, lo que ha provocado los desacuerdos y las modificaciones legales que hoy se desahogan en el poder judicial (García, 2021).

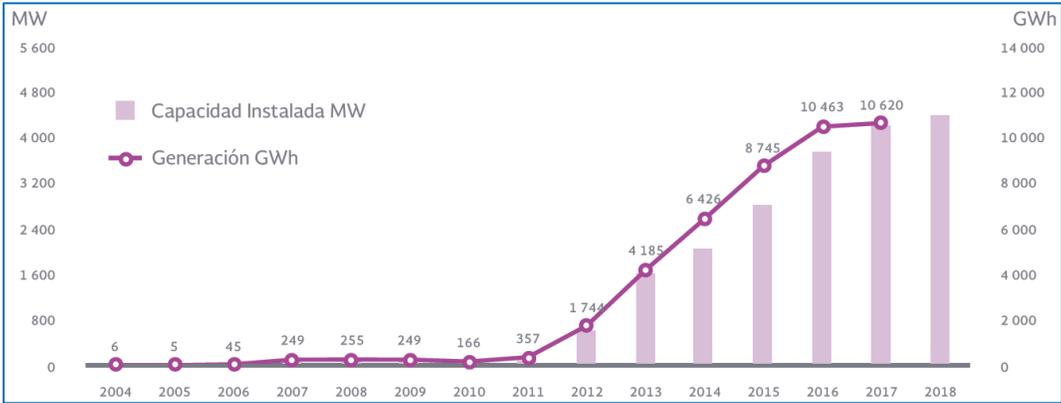


Figura 4. Datos anuales de generación y capacidad instalada de la energía eólica en México (PRODESEN, 2021).

Determinación de un proyecto de aprovechamiento de energía eólica en México.

En los países con desarrollo tecnológico, leyes energéticas y experiencia en los temas de energías renovables; han desarrollado una metodología para determinar la realización de un proyecto eólico en un sitio seleccionado.

La metodología a continuación descrita para un proyecto eólico, se tomó de distintas memorias descriptivas de este tipo de proyectos. En general un desarrollo eólico incluye: aerogeneradores, subestación eléctrica principal, subestación de maniobras, línea de transmisión, caminos de acceso (caminos y zanjas conteniendo los circuitos de recolección que interconectan los aerogeneradores) y en algunos casos tienen taller de mantenimiento, almacén de refacciones y patio de maniobras.

A continuación, se describen los procesos y detalles generales sobre la ubicación, planeación y procesos que se requieren para desarrollar de un proyecto de energía eólica en México.

I) Selección del sitio

La selección del sitio en donde se instalará el proyecto de generación de energía, considera la disponibilidad de la superficie requerida y las características fisiográficas del lugar. Para conocer las características del viento, se instala una torre de medición propia. Es conveniente mantener mediciones anemométricas del viento de manera permanente en el periodo de un año, ya que esto permitirá contar con la información de las cuatro estaciones anuales en un sitio determinado (Borja, 1997).

Cuando no es posible realizar mediciones en sitio, se utilizan paquetes computacionales para aplicar un modelo microescalar que permite obtener mayor detalle y producir así un mapa (o malla) detallado del recurso eólico en cierta región. Un paquete utilizado con frecuencia es el MASS (Mesoscale Atmospheric Simulation System), que implementa un modelo atmosférico no-hidrostático que ha sido utilizado numerosas aplicaciones comerciales y de investigación. Otros programas para la evaluación del recurso eólico son Windpro, Windfarm, el más utilizado se basa en el modelo WASP (del inglés Wind Atlas Analysis and Application Program).

II) Terrenos

Una vez identificadas zonas con buenas condiciones de viento (velocidad mayor a 5 m/s), es necesario analizar la tenencia de la tierra en esas zonas, identificando la totalidad de los terrenos seleccionados para el desarrollo del proyecto.

En general se realizan las negociaciones de la tierra haciendo convocatorias a asambleas ejidales (si los terrenos seleccionados corresponden a un solo núcleo ejidal), para conocer las condiciones de renta en los predios, de preferencia los de uso común de la comunidad o, de ser el caso, los convenios pueden hacerse con propietarios particulares que cuentan con grandes extensiones de parcelas (ENERTHI, 2010).

En las negociaciones se explican a los dueños de los terrenos y las intenciones del proyecto, se plantean sus características, los beneficios a la comunidad y se presentan las ayudas económicas para los propietarios con un contrato de usufructo. El contrato de usufructo es por el cual el propietario legítimo de un bien, otorga a una persona el derecho real y temporal de utilizar y disfrutar de sus beneficios, adquiriendo el dueño de la posesión la facultad de hacer suyo todo lo que produzca el bien, con la obligación de mantener su utilidad y/o frutos.

Una vez seleccionado y comprometido el sitio, se desarrollan actividades que incluyen estudios físicos, ambientales y sociales como son: determinación de la flora y la fauna, la medición de la velocidad y dirección del viento, el trazo de caminos de acceso, desmonte y despalme del lugar, la nivelación y compactación del terreno.

La principal obra de desarrollo en esta etapa, es la excavación para los aerogeneradores; se requieren excavar fosas cuadrangulares de 20 m de lado para la cimentación de cada aerogenerador, con una profundidad de las fosas (dependiendo de la composición del suelo y características del mismo puede variar entre 3 y 6 m).

III) Infraestructura

De lo mencionado anteriormente, se derivan las diferentes obras y actividades que se requieren en este tipo de proyecto; de tal forma, y categorizando por rubro obtenemos las siguientes (ENERTHI, 2010):

- a) Construcción de la Obra Civil:
 - Accesos y viales interiores
 - Plataformas y cimentaciones de aerogeneradores
 - Canalizaciones para cables y red de tierras
 - Edificio de operación y mantenimiento
- b) Generación de energía eléctrica
- c) Aerogeneradores
- d) Sistema de control e instrumentación
- e) Transformación de energía eléctrica
- f) Subestación de recolección
- g) Transformadores por generador
- h) Subestación principal

La mayoría de los proyectos de centrales eoloelectricas en el mundo, se han desarrollado con inversión privada. En ellos, tanto las condiciones de financiamiento (tasa de interés, plazo del préstamo), como la tasa interna de retorno requerida por el inversionista, son factores que influyen en el costo de la electricidad producida. Generalmente, los inversionistas privados toman decisiones con base en el flujo de efectivo, el tiempo de recuperación de la inversión y las expectativas de utilidades netas. En la Tabla 1, se muestran los indicadores de la distribución del costo de inversión en centrales eoloelectricas, la cual varía de un proyecto a otro (Borja et al., 1997).

Concepto del proyecto	(%) de la inversión
Aerogeneradores	60-70
Gastos de importación	1-1.5
Transportación con seguros	0.5-3.5
Obra civil	8-13
Obra eléctrica	8-12
Obra de interconexión	6-8
Instalaciones	1-2
Control centralizado	0.2-0.5
Ingeniería y administración	2-4
Costos legales	1-2
Cuotas bancarias	0.5-15
Interese durante la construcción	1-2.5
Garantía extendida	0.5-1
Contingencias	1-3

Tabla 1. Distribución de costos de inversión en centrales eoloelectricas (Borja et al., 1997).

IV) Funcionamiento

El trabajo del parque eólico se basa en:

- La operación de los aerogeneradores,
- La obtención de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía cinética del viento y,
- La conducción y transformación de la energía eléctrica.

Sobre el mantenimiento del parque eólico, se programa de manera semestral o anual dependiendo de los requerimientos de los aerogeneradores. Este mantenimiento implica la revisión y verificación del estado físico de la infraestructura y sus componentes (aerogeneradores, línea de transmisión, subestaciones, caminos entre otros). Principalmente el mantenimiento es hacia los aerogeneradores, se realiza un mantenimiento preventivo y correctivo de los elementos electromecánicos, a fin de no incrementar el ruido y no existan derrames de aceites y lubricantes (ENERTHI, 2010).

V) Termino

La vida útil estimada y los convenios de funcionamiento para los proyectos eólicos en promedio son de 30 años a partir del año en el que se inicien las operaciones. En este periodo, la operación está sujeta a extender su funcionamiento de acuerdo al tipo de obras de mantenimiento, renovación y reemplazo de equipo.

Impactos y afectaciones de un proyecto eólico.

En la ejecución de cualquier infraestructura, se deben considerar las condiciones y efectos ambientales del sitio, además de las regulaciones, condiciones, restricciones y oportunidades para un determinado proyecto y terreno o zona. Para considerar las circunstancias mencionadas, se requiere el análisis previo del sitio respecto a los factores físicos y ambientales (ubicación, flora, fauna, clima, suelos, geología, grado de conservación o alteración); así como un análisis de tipo social como área de influencia y población; sin olvidar los aspectos legales y normativos ambientales y de uso de suelo, Planes Regionales y Locales de Desarrollo, entre otros, con el objeto de evaluar todas las posibilidades de desarrollo, así como las condicionantes, oportunidades y restricciones que pudiera tener un determinado proyecto (Ramírez, 2009).

I) Implicaciones ambientales de la energía eólica

En México se hace mucho énfasis en el grado de compatibilidad entre las instalaciones eólicas y la capacidad de carga de los ecosistemas naturales.

En comparación con las fuentes de energía convencionales, los impactos ambientales de la energía eólica son locales y, por lo tanto, se pueden monitorear y mitigar con relativa facilidad. En particular, las turbinas eólicas no emiten residuos tóxicos o gases, por lo que no causan contaminación del aire, del agua y del suelo, sin contribuir al efecto invernadero y calentamiento global. Sin embargo, existen otros impactos derivados del aprovechamiento de la energía eólica que no deben obviarse en el diseño de un proyecto eólico.

En proyectos de grandes parques eólicos (más de 100 MW), las acciones que generan más problemas ambientales son las referidas a obras civiles: vías de acceso, cunetas, edificaciones de control y subestación. Todas estas intervenciones causan una alteración del suelo y de la cubierta vegetal y, en ocasiones, pequeñas modificaciones geomorfológicas por desmontes o aplanamientos y en algunos casos, el acceso principal se encuentra en carreteras ya existentes (BUN-CA, 2002).

A continuación, se mencionan algunas de las implicaciones ambientales que pueden presentarse debido a los proyectos eólicos:

Ruido

La emisión de ruido acústico puede llegar a ser un inconveniente cuando los aerogeneradores están instalados cerca de lugares habitados. Esto ha llegado a ser una limitación importante en países que tienen poca extensión territorial (Dinamarca, Holanda entre otros), así como en aquellos donde la incorporación de la generación eolieléctrica se ha llevado a cabo de manera importante cerca de zonas muy pobladas (Alemania). En los países con gran extensión territorial que poseen recurso eólico en zonas alejadas de lugares habitados, prácticamente este problema no existe, como en California Estados Unidos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), considera los 50 dB como el límite superior deseable. Las cifras medias de las legislaciones euro-peas, marcan como límite aceptable 65 dB durante el día y 55 dB durante la noche. En el caso de México los límites máximos permisibles del nivel sonoro de acuerdo con la NOM-081-SEMARNAT-1994 son de 68 durante el día y 65 dB durante la noche (NOM-081, 2003).

El ruido producido por los aerogeneradores, producto de la rotación de las aspas, ha tenido mejoras en diseños recientes, por ejemplo, en la calidad de los sistemas mecanizados y los tratamientos superficiales de los materiales que forman las aspas, el ruido producido por una turbina se ha disminuido significativamente. En general, una turbina grande a 250 metros de distancia produce un ruido equivalente al compresor de un refrigerador doméstico estándar (BUN-CA, 2002).

Predios

En el caso de un parque eólico, se instalan aerogeneradores, subestaciones eléctricas, caminos de acceso y líneas de transmisión ocupando un área pequeña y dejando el resto del terreno libre para que los propietarios realicen actividades productivas como la agricultura o la ganadería. En los terrenos, por cada 1,000 hectáreas contratadas solo se utilizan 30 de ellas, es decir, que alrededor del 3% de las tierras se dedican exclusivamente a la generación de energía. Dependiendo la infraestructura requerida para el parque eólico (aerogeneradores, cableado y líneas), se define cuánto espacio es utilizado. Es importante asegurar los pagos justos a los propietarios, además de apoyar el desarrollo de las comunidades donde se instala a partir de acciones en temas de salud, educación, cultura y medio ambiente (Iberdrola, 2020)

Los parques eólicos, por lo general, están ubicados en posiciones próximas a las partes altas, en donde se suele manifestar un alto potencial del recurso. En estas zonas el grado de conservación natural suele ser bueno y, en ocasiones, con alto impacto paisajístico, por lo que la ocupación del terreno de las instalaciones del parque eólico es un factor importante por su posible impacto en los recursos naturales, paisajísticos o culturales de la zona (Ramírez, 2009).

Fauna

La construcción de un parque eólico hace que la fauna (mamíferos superiores principalmente), durante la fase de construcción, se desplace temporalmente, pero se ha comprobado que, finalizada la obra, regresa al área del parque eólico a pesar del ruido y de las labores de mantenimiento en la instalación. Esto incluye a las aves locales, no así a las migratorias que pueden ser más afectadas por el riesgo de colisión contra las aspas, torres y tendidos eléctricos; si bien, esto depende de su tamaño, tipo de visión y agilidad de vuelo.

Los grupos de organismos con mayor vulnerabilidad a la instalación de parques eólicos son los denominados fauna voladora, incluyéndose aves, murciélagos y algunos insectos siendo todos protegidos. Los datos disponibles indican que, aún en zonas de paso de grandes bandadas de aves migratorias, los impactos observados son pequeños y los riesgos para aves locales o animales voladores nativos casi nulos.

De acuerdo a la Asociación Europea de Energía Eólica: "Las turbinas eólicas, a pesar de su tamaño y de sus aspas en movimiento, no presentan un problema especial, de acuerdo a estudios realizados en Alemania, Países Bajos, Dinamarca y el Reino Unido. Las líneas de transmisión de energía eléctrica presentan una amenaza mucho mayor que los aerogeneradores (WEAR, 1995)".

II) Implicaciones técnicas de la energía eólica

Las aeroturbinas con aspas de acero, han sido señaladas como causa de interferencia electromagnética en sistemas de televisión, radio, microondas y de navegación. Debido a esto, los constructores han tenido que demostrar que ellas no causarán interferencias significativas en los nuevos sitios. No se prevé un serio impedimento para el desarrollo de las aeroturbinas, dado que la mayoría de las aspas en la actualidad, son de fibra de vidrio o de madera laminada, por lo cual no producen el mismo efecto (Ramírez, 2009).

La generación eoloelectrónica en países europeos ha comprobado ser una actividad que tiene un amplio potencial para la creación de nuevas fuentes de empleo, sobre todo en la empresa mediana y pequeña. En cuanto a la fabricación e instalación de aerogeneradores, el indicador para creación de fuentes de empleo es de 6 personas por año, por cada nuevo MW generado. Respecto a la operación y mantenimiento se habla de un potencial de generación de empleo de 100 a 450 personas por año por cada TWh generado (en función del tipo de máquinas que se utilicen) (Martínez, 1997).

Se estima que por cada puesto de trabajo en la fabricación, instalación, operación y mantenimiento de aerogeneradores se crea al menos otro puesto de trabajo en sectores asociados (asesorías, investigación, finanzas, etc.).

Un estudio de la Asociación de Fabricantes Daneses de Aerogeneradores, concluyó que la industria eólica danesa emplea a más de 8,500 personas durante el proceso y crea otros 4,000 puestos de trabajo fuera de su país (Martínez, 1997).

La disponibilidad del recurso eólico en una región, abre la posibilidad de establecer una industria eoloeléctrica local con importantes beneficios económicos y sociales. Este es uno de los elementos que con frecuencia se cita en la formulación de los planes eoloeléctricos de las comunidades autónomas españolas, que en conjunto constituyen uno de los planes más ambiciosos para el aprovechamiento del recurso eólico en el plano internacional (JEE, 1997).

De los 35,000 aerogeneradores instalados en centrales eoloeléctricas alrededor del mundo, algunos ya tienen operando más de 15 años. Si bien, es cierto que han ocurrido fallas catastróficas de aerogeneradores, también lo es que ello no ha ocasionado daños a personas ajenas a las centrales. En cuanto a la seguridad pública, una falla catastrófica que llegue a destruir todos los aerogeneradores de una central eoloeléctrica no significaría nada al compararse con una catástrofe en otro tipo de centrales o un gran incendio que involucre cantidades importantes de combustibles fósiles (MacQueen, 1983).

Estudios realizados en Dinamarca indican que un aerogenerador moderno de 600 kW produce durante los primeros tres o cuatro meses de su operación una cantidad de energía equivalente a la que habría de gastarse en su fabricación, instalación, mantenimiento y desmantelamiento. Así, durante sus 20 años de vida útil, un aerogenerador produce por lo menos 80 veces la energía gastada. Asimismo, se encontró que el balance de energía en el proceso de desmantelamiento y reciclado de materiales es positivo (DWT, 1997).

III) Implicaciones sociales de la energía eólica

En México, las fuertes oposiciones a la instalación de algunos parques eólicos han llevado a los actores públicos y privados implicados a considerar la importancia de la aceptabilidad social, al momento de poner en marcha sus proyectos. Particularmente en Oaxaca, donde La construcción de centrales eólicas en el istmo de Tehuantepec es liderada por empresas privadas, fundamentalmente extranjeras. Los intereses de estas empresas frecuentemente chocan con los de las comunidades locales donde se pretenden erigir los proyectos. Ello se refleja en el descontento social creciente ante el despliegue masivo de aerogeneradores, luego de constatar que el desarrollo eólico no ha beneficiado en la medida esperada a los pobladores locales (Diego, 2015).

A manera de realizar una comparativa, entre la mejor región eólica y otro país como Dinamarca, que ha desarrollado el tema desde los años 70's, su gobierno ha brindado todo el apoyo a las iniciativas comunitarias para que se beneficien tanto para el autoconsumo como para la comercialización de la electricidad generada por sus aerogeneradores.

Este apoyo ha sido legal y jurídico y también ha incluido el uso de recursos públicos, así como del crédito público y privado, además de diversos subsidios, capacitación y asesoría técnica, con el fin de incentivar la autosuficiencia eléctrica de las comunidades (DWT, 1997).

A continuación, se presenta en la Tabla 2, una comparación para mostrar una perspectiva entre dos maneras de manejar el tema de los proyectos eólicos en sus países, las experiencias en Dinamarca y el Istmo de Tehuantepec:

Asunto	Dinamarca	Istmo de Tehuantepec
Historicidad	100 años de vivencias con eólicas	Experiencia previa inexistente
Movilización	70s movilización social masiva contra energía nuclear y a favor de la eólica	Movilización social contra Empresas Transnacionales (ETs) coludidas con el gobierno de Felipe Calderón para implantar parques eólicos
Identidad	Ideales ecologistas, comunitarios, autogestionarios.	Lucha por el territorio, por sus instituciones comunitarias, por su autonomía.
Adjetivación	Movimiento social, toma de las eólicas como su movimiento ecologista.	Comunidades del Istmo toman a las eólicas como símbolo de sometimiento e imposición.
Organización y anatomía	Comunidades se organizan local y regionalmente como cooperativas y construyen sus propias eólicas. El manejo de los parques es autogestionario.	Comunidades y organizaciones regionales se organizan y luchan contra las eólicas. Una comunidad, Ixtepec, busca construir sus parques más es bloqueada por el Estado.
Territorialidad	Las comunidades y cooperativas controlan su territorio, tienen sus instituciones y ejercen su gobernanza sobre eólicas.	Las comunidades del Istmo ven amenazadas su territorialidad por la implantación y los intentos de las eólicas, ejercen su gobernanza contra los parques eólicos.
Papel del estado	El estado apoya en todos los sentidos (financiero, infraestructura, capacitación, trámites), el desarrollo de parques eólicos comunitarios y cooperativos.	El estado apoya en todos los sentidos la implantación de parques eólicos de ETs e impide la creación de parques eólicos comunitarios.
Beneficios económicos	La población involucrada recibe todos los beneficios económicos: autoconsumo de energía eléctrica y venta de excedentes a la red pública.	Las ETs y los funcionarios involucrados reciben casi todos los beneficios económicos. Los pobladores reciben un pago bajo por la renta de la tierra.
Impacto ambiental	Planeación regional, Integración al paisaje, Impacto mínimo de flora y fauna, Retiro y procesamiento del aceite, Control de mortalidad de pájaros.	Saturación espacial, Deterioro del paisaje, impacto negativo en flora y fauna, posible contaminación al aire y suelo durante el mantenimiento, Mortalidad de pájaros.

Tabla 2. Comparación de la experiencia en Dinamarca y en el Istmo de Tehuantepec con los parques eólicos (Diego, 2015).

De acuerdo con la tabla anterior, el gobierno mexicano representa en los hechos el otro lado de la moneda, al obstaculizar y negar su apoyo a las pocas iniciativas comunitarias por hacerse de su propio parque eólico. Cabe mencionar que desde 2018, en la región no se han desarrollado proyectos nuevos, debido al conflicto social de las comunidades de Oaxaca.

Los conflictos entre las empresas y las comunidades se han incrementado, siendo preocupante en el caso de las comunidades del Istmo que históricamente se han caracterizado por estar bien organizadas y ser combativas, tal como lo demostraron en su lucha por hacerse del gobierno local en los años 70's con la Coalición Obrero-Campesina-Estudiantil del Istmo (COCEI) (Campbell, 1989)

Ventajas y desventajas de la generación de energía eólica

En el medio internacional se sabe que la generación eólica, al igual que otras tecnologías para generar electricidad, ofrece una serie de beneficios adicionales a los ambientales. En la práctica, algunos de los beneficios no ambientales han sido el móvil principal que ha conducido a países menos desarrollados a emprender y apoyar la generación eoloeléctrica:

Las ventajas y desventajas ambientales y sociales de la generación eoloeléctrica han sido los elementos principales que los países industrializados han utilizado para su promoción o su inconformidad. A continuación, se describen las más importantes:

Ventajas (Borja, 1997; Ávalos, 2000).

- Es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón (considerado tradicionalmente como el combustible más barato), las centrales de combustible fósil e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costes de reparar los daños medioambientales.
- La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosión. Durante el funcionamiento, no se produce ningún contaminante que incida sobre este, ni tampoco descargas sobre mantos acuíferos.
- No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes. La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de litros de petróleo y al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas.
- La generación de electricidad a partir del viento hacia el ambiente no produce gases tóxicos y no causa ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación de residuos o descargas.
- En la generación de energía, se utiliza una fuente de energía renovable, su infraestructura es de instalación rápida y se puede ubicar en cualquier espacio en el que las condiciones del viento sean adecuadas.

-
- Debido a que se genera por procesos atmosféricos perennes esta energía es inagotable, al trabajar en la superficie, no requiere procesos de extracción y su manejo y posibles accidentes en su aprovechamiento no implican riesgos ambientales de alto impacto, tales como derrames por transporte, explosiones, incendios, etcétera.
 - El sistema de energía eólica no requiere mayor mantenimiento, aparte de una revisión periódica de las baterías, en caso de tenerlas, y una limpieza de las aspas en épocas secas.

Desventajas (Borja, 1997; Ávalos, 2000).

- Un proyecto eólico tiene un alto costo inicial en comparación con fuentes térmicas de generación, aunque en algunas ocasiones a lo largo de su vida útil puede resultar más económico por sus bajos costos de operación y mantenimiento.
- La inversión inicial requerida puede ser una barrera para la realización del proyecto, sobre todo en zonas rurales aisladas.
- En caso de presentarse una inconstancia del viento se requiere de un mecanismo de almacenamiento en batería de la energía generada, para poder disponer de energía cuando no haya suficiente viento. Esto representa un costo adicional al sistema.
- En los parques eólicos la variabilidad del viento impacta en la calidad de la electricidad que se pueda entregar a la red eléctrica, la estabilidad del voltaje y la frecuencia. A pesar de los avances en el diseño de las turbinas eólicas para disminuir el impacto de la variabilidad del viento, ésta representa un riesgo en la inversión al no poder suplir los compromisos; adicionalmente, no se puede disponer de energía, siempre que el sistema lo demande.
- Impone un impacto visual desfavorable desde el punto de vista estético, produciendo un efecto visual inevitable. El desarrollo del parque eólico puede producir una alteración sobre el paisaje debido a la maquinaria postrada en colinas y valles.
- Los aerogeneradores del parque producen sonidos muy fuertes y provocan molestias que van desde el desagrado y la incomodidad, hasta daños irreversibles en el sistema auditivo. La presión acústica se vuelve dañina a unos 75 dB-A y dolorosa alrededor de los 120 dB-A. El límite de tolerancia recomendado por la Organización Mundial de la Salud es de 65 dB-A (OMS, 1999).
- La maquinaria especializada del parque (torres, aerogeneradores y plataformas) que no presentan sensores, pueden afectar la fauna del sitio por migración, fragmentación del ecosistema y para aves y murciélagos muerte por colisión.
- Finalmente, el viento es intermitente y no puede ser utilizada como única fuente de energía. La cantidad de viento es una opción factible y rentable sólo en sitios con suficientes corrientes, lo cual significa que no se puede aplicar en cualquier lugar.

CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA

La selección de un sitio óptimo que cumpla con un conjunto de condiciones para desarrollar un proyecto de energía eólica, es un problema sumamente complejo y multidisciplinario. Es necesario considerar a todas las condicionantes involucradas, realizando el análisis y evaluación de gran cantidad de variables interrelacionadas entre sí.

Por ello, el resultado esperado de un sitio óptimo, se puede ver afectado de forma considerable en función del modo en el que dichas variables sean estimadas dentro de un problema multicriterio. El diseño de este tipo de instalaciones incluye componentes geográficos, naturales y sociales importantes, por ello, es muy importante considerar estudios de ingeniería, economía, medioambiente y política.

Conforme se avanza en la investigación aplicada, para estos tipos de proyectos, es necesario contemplar el uso de herramientas y modelos matemáticos computacionales, como son los sistemas de información geográfica, cartografía digital, software de procesos analíticos y algoritmos computacionales.

Todo lo anterior, permite establecer de una forma metódica procedimientos para obtener sitios óptimos considerando variables que normalmente no se consideran, asegurando así el éxito y la inclusión en este tipo de proyectos.

Antecedentes

La revisión de trabajos relacionados a modelos matemáticos computacionales en estudios de parques eólicos, han permitido examinar la utilización de algoritmos para optimizar el funcionamiento de un parque eólico. En algunos casos para ubicar los sitios de los aerogeneradores, reducir costos de instalación, considerado terrenos planos para analizar las variables que intervendrían en el proyecto. También se menciona el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como instrumento para el manejo de datos espaciales y la generación de mapas.

A continuación, se mencionan las diferentes aportaciones matemáticas en investigación aplicada para proyectos eólicos, que han servido como base para la propuesta en este trabajo de tesis:

- Guzmán (2003) busca determinar la factibilidad técnica y económica para la instalación de un parque eólico en Colombia, partiendo de los datos de viento disponibles en las estaciones meteorológicas determina el potencial eólico en diversas zonas, eligiendo una zona de estudio. Posteriormente, analiza las condiciones climatológicas, económicas y físicas que definen la viabilidad y rentabilidad del proyecto.

-
- Castro *et al.* (2007) presenta un algoritmo evolutivo para el diseño óptimo de parques eólicos. Su objetivo es optimizar las ganancias dadas inversión en un parque eólico, donde el valor actual neto es usado como una cifra de los ingresos. Todos estos factores dependen del diseño preliminar del parque eólico (número, tipo, altura de la torre, disposición y situación de los generadores eólicos), que son las variables a establecer.
 - Oyarzo (2008) estudia más la parte técnica de un parque eólico, desarrollando sistemas que permiten formular modelos matemáticos simplificados, para lograr la eficiencia aerodinámica de las aeroturbinas de eje horizontal, con el propósito de evaluar la producción energética de sistemas eólicos e híbridos de eólico diésel.
 - Bilbao *et al.* (2011) en su análisis muestran dos tipos de algoritmos metaheurísticos aplicados al diseño inteligente de un parque eólico. La idea básica, es utilizar un modelo de costos empleando las técnicas metaheurísticas y algoritmos genéticos para obtener la mejor configuración de aeroturbinas dentro del parque de manera de maximizar la energía total producida y minimizar la cantidad de aeroturbinas utilizadas.
 - Fernández *et al.* (2011) presentan una herramienta para la selección de los sitios de los aerogeneradores o aeroturbinas de los parques eólicos, basada en el uso de algoritmos genéticos acoplados con un sistema de información geográfica. La función objetivo planteada en el trabajo, es el valor esperado de la energía anual generada, cálculo que toma en cuenta la pérdida de energía como consecuencia de efectos de sombra, entre aerogeneradores.
 - Falces (2015) propone una interesante metodología, que combina los métodos de optimización basados en técnicas evolutivas acoplado con sistemas de información geográfica, con el fin de facilitar el proceso de diseño y la planificación de nuevos parques eólicos. Tradicionalmente ambas técnicas han sido utilizadas por separado en la resolución de múltiples problemas reales. Concretamente las técnicas evolutivas han demostrado ser una poderosa aliada para resolver problemas altamente complejos, en los que se busca una solución óptima con gran número de variables.

La metodología planteada en este trabajo de tesis, considera herramientas existentes que ya han sido probadas para resolver problemas con componentes multidisciplinarios, que permitan localizar sitios óptimos con la ayuda de cartografía digital, incluyendo variables tipo técnico, social, económico y de medio ambiente del sitio, para finalmente ejecutar un algoritmo genético que permita para optimizar los resultados del estudio.

La Figura 5 representa un diagrama de flujo que permite facilitar la comprensión de los cinco módulos propuesto en este trabajo. A continuación, se describen los procesos utilizados en este trabajo. Permitiendo presentar una metodología con una base matemática computacional robusta, dentro de un esquema que contempla un conjunto de cinco módulos, para la ubicación de los mejores sitios para el aprovechamiento de energía eólica.

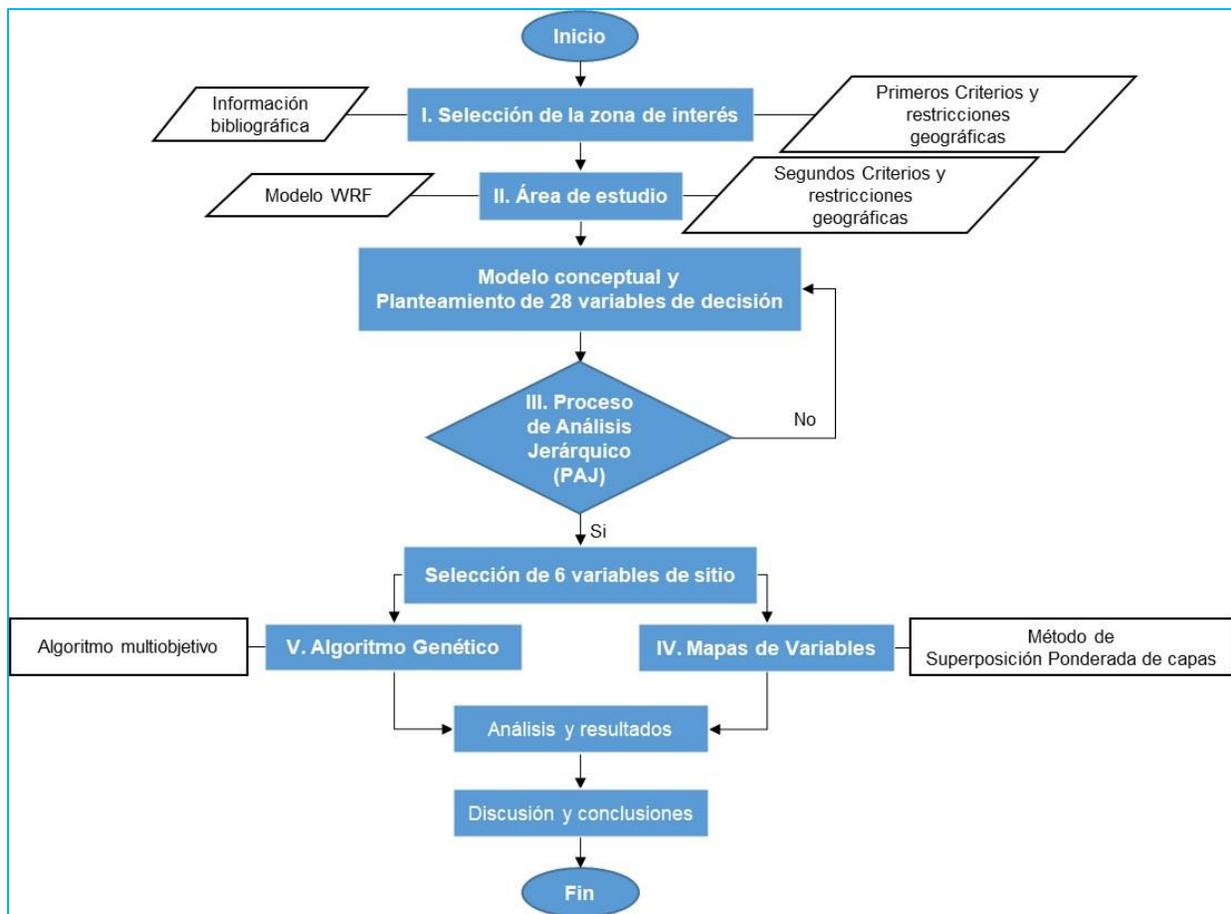


Figura 5. Metodología propuesta para la búsqueda de sitios óptimos.

Módulo I. Selección de la zona de interés

La finalidad de este estudio para seleccionar una zona de interés, tiene el enfoque de no investigar sitios en lugares donde existiera alguna capacidad eólica instalada. Dado que en México el desarrollo eólico se ha impulsado principalmente en el sur, se decidió estudiar los estados de la frontera norte con los Estados Unidos de América, aplicando los criterios y restricciones de la Tabla 3. Aunado de que, la región del norte de México, en los últimos años ha sido contemplada por las autoridades nacionales como una zona de gran potencial y desarrollo de energía eólica (SENER, 2013).

A partir de la información bibliográfica recopilada y utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG), se aplicaron los primeros criterios y restricciones geográficos de la Tabla 3, utilizando capas de información de dependencias nacionales como: Secretaria de Energía (SENER), Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), incluyendo los comentarios de juicios de expertos, en energías renovables.

Criterios	Aplica	Información cartográfica digital	Fuente
1. Estados al norte de México	SI	Estados y Municipios	INEGI, 2014
2. Límites subprovincias fisiográficas.	SI	Subprovincias fisiográficas	INEGI, 2014
3. Estados costero	NO	Estados de la República	INEGI,2014
4. Límites con Área Natural Protegida y Zonas de conservación	SI	ÁNP, Sitios RAMSAR, Zona conservación, Áreas de importancia aves y murciélagos	INEGI, 2014 CONABIO, 2014
5. Conflicto social con Regiones Terrestres Prioritarias	SI	Regiones terrestres prioritarias	INEGI, 2014
6. Interferencia con los cuerpos y corrientes de agua	SI	Regiones hidrológicas, cuerpos y corrientes de agua	INEGI, 2014
7. Cercanía a zonas urbanas	SI	Población por municipio	INEGI, 2014
8. Existencia de proyectos	NO	Ubicación de parques eólicos	SEGOB, 2013

Tabla 3. Criterios y restricciones utilizados para la delimitación de la zona de interés.

Módulo II. Área de estudio

El análisis realizado en el módulo anterior, tendrá como resultado delimitar una zona determinada, bajo ciertos criterios. A la zona resultante se le aplicarán, unos segundos criterios y restricciones geográficos de la Tabla 4 incorporando igualmente un SIG con cartográfica de INEGI y CONABIO principalmente. También en el análisis del área de estudio, se incluirán los datos diarios de dirección y cantidad del viento del modelo de pronóstico Weather Research and Forecasting Model (WRF, 2016) en un periodo de 5 años (del 2008 al 2012).

Criterios	Información cartográfica digital	Fuente
1. Carreteras y caminos	Vialidades	INEGI, 2014
2. Clima	Unidades climáticas	INEGI, 2014
3. Uso de suelo y vegetación	Uso de suelo y vegetación	CONABIO, 2014
4. Edafología	Suelos	INEGI, 2014
5. Elevación del terreno	Topografía	INEGI, 2014
6. Datos de viento	WRF modelo	WRF, 2008-2012
7. Líneas de Transmisión	Distribución de la red eléctrica de alta tensión	PRODESEN 2021

Tabla 4. Criterios y restricciones utilizados para la delimitación del área de estudio.

La medición del viento se realiza con los datos del modelo de pronóstico WRF, dado que no existe una cobertura adecuada de información en las estaciones meteorológicas en la zona de estudio. Los datos calculados del viento, serán validados contra la información del GWA (2021).

El modelo atmosférico de mesoescala WRF es un sistema de predicción numérica del tiempo, diseñado para satisfacer las necesidades tanto de previsión meteorológica, así como de investigación atmosférica. Está caracterizado por tener múltiples núcleos dinámicos, en un sistema de asimilación de datos variacional tridimensional (3DVAR), con una arquitectura que permite paralelismo computacional (Skamarock et al., 2008).

El WRF es utilizado por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la República Mexicana, además, es el más utilizado en el mundo para el pronóstico de campos de variables meteorológicas a escala regional (Moya y Ortega, 2015). Los requerimientos del modelo son: malla de 20 x 20 km, con los límites de frontera para los estados de Coahuila y Nuevo León, datos medidos a 10 m de superficie, utilizando el promedio de los datos en 5 años de la velocidad del viento (los valores de presión atmosférica y temperatura que arroja el modelo, no serán considerados). Las mediciones calculadas para el periodo de 2008 a 2012, serán facilitadas por el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) de manera digital en archivos “.nc”, trabajando los promedios y gráficos en el paquete MATLAB.

Con la finalidad de definir adecuadamente el área de estudio, se propuso desarrollar un modelo conceptual específico para representar los componentes que se consideran en el desarrollo de un parque eólico. Este modelo conceptual ofrece representar el problema de manera gráfica a través de la descomposición de conceptos y la forma de comprender o simular un suceso.

El modelo puede identificar el funcionamiento, permitiendo solucionar la problemática planteada; en este caso, tendrá las siguientes características:

- Dividir el área de estudio en una malla uniforme (renglones y columnas), donde cada cuadrícula representará las condiciones técnicas, medioambientales y sociales.
- Con un área de estudio cuadriculada, el mallado uniforme es fácil de crear en el ordenador y además los resultados y comportamiento de un mallado uniforme son más fáciles de interpretarse, logrando clasificar diferentes sitios óptimos malla uniforme.

Módulo III. Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

El Proceso Analítico Jerárquico (PAJ) que en inglés se conoce como Analytical Hierarchy Process (AHP), es una técnica utilizada en la toma de decisiones con atributos múltiples. Permite la desintegración de un problema en tantos componentes como se desee (jerarquías) asegurando que los aspectos cualitativos y cuantitativos del problema sean incorporados en el proceso de evaluación, realizando sistemáticamente comparaciones entre pares (Saaty 1980).

El PAJ es una metodología de decisión compensatoria. Las alternativas posibles con respecto a uno o más objetivos pueden compensarse mediante su desempeño con respecto a otros objetivos. El PAJ permite la aplicación de datos, experiencia, conocimiento, e intuición de una forma lógica y profunda dentro de una jerarquía, como un todo.

El funcionamiento principal del PAJ, consiste en una comparación de atributos entre pares ordinales. Para un objetivo dado, las comparaciones son realizadas en pares de subindicadores, planteando la pregunta “¿Cuál de los dos es el más importante?” y segundo “¿Por cuánto?”. La posición de la preferencia en los atributos es expresada en una escala semántica de 1 a 9 (Saaty 1987).

Como se muestra en la Tabla 5, la preferencia de 1 indica igualdad entre dos subindicadores, mientras que una preferencia de 9 indica que un subindicador es 9 veces más grande o más importante que aquel con el que es comparado. De esta forma las comparaciones están siendo realizadas entre pares de subindicadores, donde la percepción es lo suficientemente significativa para hacer una distinción (Saaty 1987).

Juicio de Importancia	Puntaje
Extremadamente más importante	9
	8
Muy fuertemente más importante	7
	6
Fuertemente más importante	5
	4
Moderadamente más importante	3
	2
Igualmente, importante	1

Tabla 5. Escala de asignación de importancia comparativa entre pares (Saaty y Vargas, 1991).

La metodología usada y propuesta por Saaty (1977), realiza gran número de comparaciones entre pares de variables. En la metodología empleada se consideraron 28 variables, la asignación a cada variable para este estudio, surge de trabajos consultados y desarrolladores en el tema de proyectos eólicos (Moragues y Rapallini, 2004; Álvarez, 2006; Castillo, 2011; Caballero y García, 2012; ERM, 2014; Artillo, 2017; Obando, 2017). Estas variables incluyen temas y consideraciones que intervienen en la selección de un sitio para el desarrollo de un parque eólico. Estos argumentos estarán divididos en los tipos: técnico, económico, ambiental y social (Tabla 6).

Existen numerosas herramientas basadas en PAJ, uno de los más utilizados es un software de código abierto llamado PriEsT (Priority Estimation Tool). Es una herramienta interactiva de apoyo al análisis de toma de decisiones, con la finalidad de estimar prioridades a partir de juicios de comparación por pares. Ayuda a los tomadores de decisión a estimar sus preferencias para clasificar opciones e ingresar juicios para cada criterio y llegar a obtener una clasificación final. Ofrece una amplia gama de soluciones óptimas basada en la optimización multiobjetivo, a diferencia de otras que solo ofrecen una sola solución (Siraj et al., 2015).

De acuerdo a la clasificación de la Tabla 6, las 28 variables se dividieron en cuatro grupos: técnicas, económicas, ambientales y sociales. A cada grupo se les aplicó la técnica del PAJ en el software PriEsT, el cual permite analizar los patrones matriciales jerárquicos comparando, por pares los constituyentes en cada nivel con sus prioridades y calculando la contribución de cada alternativa.

Las variables, se clasifican en 7, para cada tipo, de cada grupo analizado (mediante el PAJ utilizando el PriEsT), serán seleccionadas las dos variables de mayor ponderación, considerándose las más importantes y de acuerdo a su peso específico en el tema eólico. Siendo 8 variables resultantes (siendo dos de cada tipo), se aplicará un procedimiento similar utilizando PriEsT, para establecer la priorización de las variables finales del sitio.

Variable	Descripción general de las variables del proyecto	Grupo
1. CONSTRUCCIÓN	Se refiere a la necesidad de construir caminos e infraestructura adicionales para el proyecto.	TÉCNICO
2. VIABILIDAD	Estimar bajo condiciones técnicas mínimas la viabilidad técnica de proyecto.	
3. UBICACIÓN	Identificar la disponibilidad de la mejor ubicación de un parque eólico.	
4. VIDA ÚTIL	Calcular bajo condiciones ideales el periodo de vida útil del proyecto.	
5. EJECUCIÓN	El tiempo de ejecución para las etapas preparación y construcción del parque eólico.	
6. INFORMACIÓN	Búsqueda de la información bibliográfica relacionada y hacer del conocimiento de la gente sobre la aplicación del proyecto.	
7. AEROGENERADORES	Analizar la cantidad y tipo de aerogeneradores a utilizar en el parque eólico.	
1. IMPACTOS	Identificar los impactos económicos iniciales en la región, generados por el proyecto.	ECONÓMICO
2. DISEÑO	Proponer un diseño rentable del parque eólico de acuerdo al sitio.	
3. COSTOS	Considerar los costos básicos de inversión en el parque eólico.	
4. ENERGÍA	Estimar la cantidad de energía eléctrica generada por el parque eólico y el precio al cual se puede ofrecer.	
5. EMPLEOS	Es la cantidad de empleos nuevos generados durante las distintas etapas el proyecto.	
6. RECUPERACIÓN	Calcular el periodo máximo de recuperación del capital invertido.	
7. PERMISOS	Deducir los gastos requeridos para los permisos, trámites y facilidades por las autoridades legales y grupales del sitio.	
1. AMORTIGUAMIENTO	Delimitar el área de amortiguamiento ambiental considerando las principales especies de flora y fauna de la región.	AMBIENTAL
2. RUIDO	Identificar los niveles de ruido medibles generados por el parque eólico.	
3. VIENTO	Cuantificar la cantidad y dirección del viento en la región.	
4. LÍMITES	Considerar los límites de distancia y ubicaciones respecto a zonas naturales protegidas y áreas de conservación.	
5. BIODIVERSIDAD	Estimar la disminución o desaparición de la diversidad animal.	
6. VEGETAL	Estimar la disminución o desaparición de la cobertura vegetal.	
7. SUELO	Modificaciones físicas y químicas del suelo ocasionadas por la remoción y actividades en el terreno.	
1. TERRENOS	Las actividades gerenciales para la adquisición de los terrenos requeridos para el proyecto.	SOCIAL
2. CERCANÍA	Considerar la cercanía del parque eólico y la afectación a las	
3. GRUPOS	Identificar y contactar a los grupos sociales, culturales y dirigentes locales que se localizan en la región del proyecto.	
4. PAISAJE	Hacer del conocimiento a la comunidad y considerar los cambios en el paisaje regional que el proyecto va a ocasionar.	
5. SINIESTROS	Presuponer los accidentes que tendrían la fauna nativa y las personas, durante las distintas etapas del proyecto.	
6. CONFLICTO	Manejar los conflictos de intereses por la comunidad y autoridades debido al uso de los predios seleccionados.	
7. INSEGURIDAD	Considerar la inseguridad en los terrenos y la presencia del crimen organizado en la región del proyecto.	

Tabla 6. Planteamiento de las 28 variables propuestas para el estudio clasificadas en cuatro grupos.

Módulo IV. Mapas de variables

El uso de mapas permitirá visualizar las variables de sitio más significativas en el área de estudio. Una vez obtenidas las variables más importantes resultantes del proceso jerárquico, sus valores numéricos serán transformados a valores espaciales y posteriormente a mapas vectoriales, con la finalidad de obtener mapas tipo raster de cada variable, requisito para aplicar el álgebra de mapas y obtener como resultado final los Mapas de Variables.

Utilizando la zona de estudio del Módulo II, se asignarán los valores de optimización de acuerdo con la Tabla 3 en cada rejilla, para cada uno de los mapas raster. Posteriormente se determinará una escala de tres colores de acuerdo a los valores numéricos obtenidos. De esta manera, se considera: óptimo (verde = 9), medianamente óptimo (amarillo = 5) y no óptimo (rojo = 1). Con esta clasificación se obtendrán mapas individuales (7) y uno general (1) para cada tipo de variables con información vectorial, en los cuales se realizará un proceso de superposición ponderada de capas en el Sistema de Información Geográfica utilizando el software QGIS. La superposición ponderada permitirá efectuar las evaluaciones multicriterio para resolver el problema de decisión, donde intervienen numerosos factores con distintas valoraciones (Castellanos, 2017).

Finalmente, la herramienta Superposición Ponderada permite implementar varios pasos del proceso del análisis de superposición general, en una única herramienta. A continuación, se detallan los procesos realizados:

1. Reclassifica los valores en los raster de entrada, en una escala de evaluación común de adecuación o preferencia, riesgo, o algo similar a una escala unificadora.
2. Multiplica los valores de celda de cada mapa raster de entrada, por el peso de importancia correspondiente.
3. Suma los valores resultantes de celda, para producir el mapa raster de salida.

Módulo 5. Algoritmo Genético (AG)

Los Algoritmos Genéticos (AG) son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en los procesos genético presentes en la evolución de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de la selección natural y la supervivencia de los más fuertes, postulados por Darwin (1859).

Este tipo de análisis ha sido utilizado y planteado en distintos estudios para la optimización de recursos económicos y técnicos en el campo de las energías renovables, buscando fundamentalmente la optimización de variables que puedan indicar un sitio de selección adecuado. Los principios básicos de los Algoritmos Genéticos fueron establecidos por Holland (1975), y descritos en varios textos (Goldberg, 1989; Davis, 1991; Michalewicz, 1992; Reeves, 1993).

Los AG son una representación simple de la evolución biológica, en la que un par de padres de una población de individuos demarcados en una generación (selección), dan origen a un par de hijos con características de los padres (cruzamiento).

Los individuos que forman la próxima generación se escogen por competencia, en el que gana el que tenga mejor aptitud (llamándolo fitness) frente a los criterios del evaluador, con lo que la optimización va evolucionando hacia mejores valores en las próximas generaciones. Antes de la evaluación del fitness, se considera un porcentaje pequeño de mutación con el que hay un probable cambio de alguna característica del individuo (Cantillo *et al.*, 2009).

Al igual que en el procedimiento de los Mapas de Variables, las variables más importantes resultado del análisis del PAJ (resultado del Módulo 3), serán utilizadas para el proceso de optimización con el AG. El algoritmo utilizado, es el desarrollado por Sastry (2007) en la Universidad de Illinois USA. Particularmente, el algoritmo empleado es del tipo simple, multiobjetivo y programado en C ++. Permite construir el grupo de soluciones óptimas a partir de la asignación de pesos de importancia, para cada función objetivo.

En la estructura y funcionamiento del algoritmo desarrollado por Sastry (2007), se modifican únicamente las instrucciones de la función objetivo y los valores de las variables a utilizar. En este caso, la función objetivo planteada será la minimización de los impactos ambientales y las variables a utilizar serán, las de mayor peso específico de acuerdo con el análisis del Proceso de Análisis Jerárquico del Módulo III. Los elementos para el funcionamiento del AG utilizado se describen a continuación:

Minimizar la función objetivo (*fobj*) sujeta a una serie de restricciones:

$$fobj = V_1 * W_1 + V_2 * W_2 + \dots + V_n * W_n \dots \dots \dots (1)$$

Dónde: w_1, w_2, \dots, w_n son los pesos asignados y
 V_1, V_2, \dots, V_n , son las variables seleccionadas.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \dots \dots \dots (2)$$

$$V_i \geq 0 \text{ siendo } i = 1, n \dots \dots \dots (3)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i \geq 1 \dots \dots \dots (4)$$

Con tamaño de la población: 10

Con máximo de generaciones: 10

Obtener los valores mínimos de las variables planteadas.

El análisis del AG permitirá conocer el comportamiento de las variables de sitio al interactuar entre sí mediante a cruzamientos de sus poblaciones, para obtener las de mayor importancia para el parque eólico, desde un enfoque matemático.

CAPÍTULO VII. RESULTADOS

A continuación, para la localización de sitios óptimos donde instalar un parque eólico de la parte norte de México, se presentan los resultados obtenidos de la metodología propuesta en cada Módulo:

Módulo I. Selección de la zona de interés

Los criterios y restricciones propuestas en la Tabla 3, se aplicaron a los siguientes estados del norte de México (Figura 6):

- Baja California
- Sonora
- Chihuahua
- Coahuila de Zaragoza
- Nuevo León
- Tamaulipas

La información cartográfica y el modelo de capas espaciales manejados en el SIG, sirvieron para excluir e identificar las zonas propicias para construir un parque eólico (criterios No. 4 al No. 8 de la Tabla 3), utilizando como condición inicial, una afectación nula o muy baja a los sistemas medioambientales de la región (Figura 7). De acuerdo al criterio 3, los estados de Baja California, Sonora y Tamaulipas quedaron excluidos del análisis, de esta manera, el área analizada considerará información solo en Chihuahua, Coahuila, Durango y Nuevo León.

Proponiendo el análisis de las condiciones fisiográficas en cuanto al paisaje, relieve, cuerpos naturales entre otros aspectos (criterio No. 2), se utilizaron los límites de la Subprovincias Fisiográficas de México. Como resultado, se identificó la zona que mejor cumple los criterios y restricciones definidos, la cual corresponde a la subprovincia Saltillo Parras localizada al sur del estado de Coahuila de Zaragoza (Figura 8).

Módulo II. Área de estudio

La utilización de los segundos criterios y restricciones de la Tabla 4 permitieron estimar un sitio irregular de 28,258 km² que considera una estabilidad ambiental y condiciones de infraestructura básica de la región, con pocas perturbaciones ambientales y sociales a las comunidades cercanas (Figura 9).

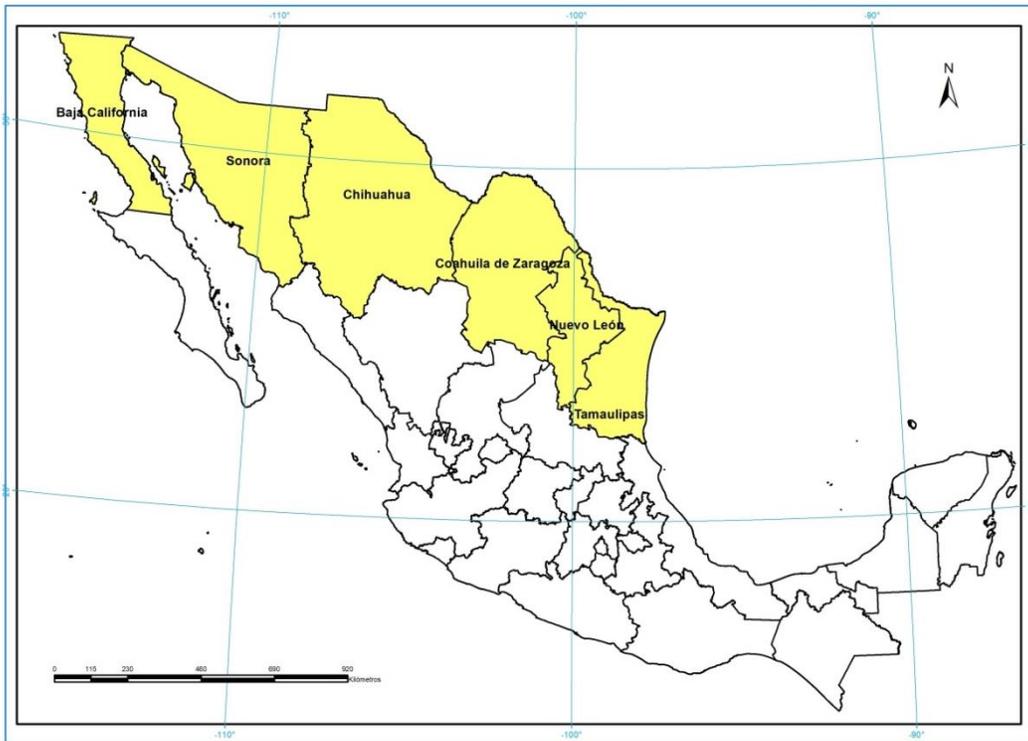


Figura 6. La ubicación de los estados del norte en México considerados para el estudio.

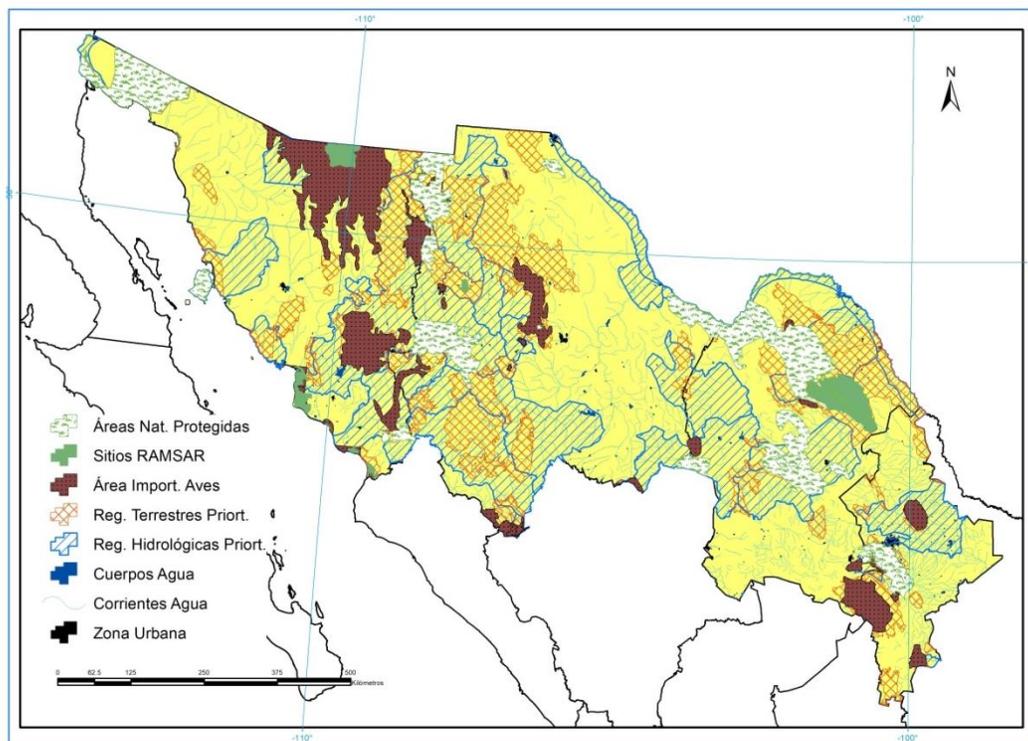


Figura 7. Representación de las capas espaciales, considerando los criterios y restricción.

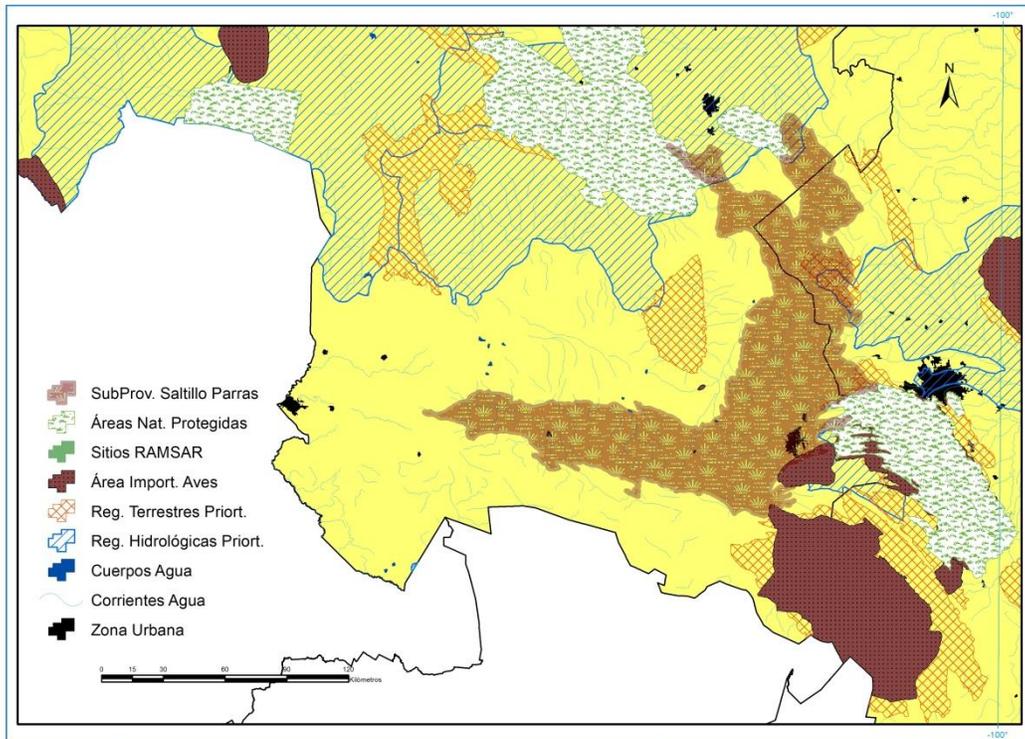


Figura 8. Selección de la zona preliminar (color café), subprovincia fisiográfica Saltillo Parras en la parte sur de Coahuila.

El análisis realizado por el modelo de WRF sobre la información del viento en la región, proporciona una zona uniforme con valores de 13 a 15 m/s, como se muestra en la Figura 9. En la comprobación de estos los valores y en la misma región, se comparó la información con dos plataformas digitales de información del viento, la primera es el GWA (2021), el cual se calcula una distribución de valores de 12 m/s como máximo y 3 m/s como mínimo; respecto a la segunda plataforma, se utilizó el modelo del INEL (2021) que calculó un rango de valores de 3.5 a 5.5 m/s.

El WRF sobrevalora la velocidad y generaliza el viento en la zona de estudio, debido a que su análisis es a gran escala (20 x 20 km de cada celda), interpretando que el viento localizado en las partes altas de la zona, es de igual velocidad que en las partes bajas.

Considerando la forma irregular del área de estudio, se propuso establecer una malla regular para los vértices: 26°08'41.78"N, 103°32'47.74"O y 24°38'44.58"N, 100°20'25.56"O. La malla se intercepta con los estados de Durango, Coahuila de Zaragoza y Nuevo León y los municipios de Torreón, Matamoros, Viesca, Parras, San Pedro, General Cepeda, Carmen, Ramos Arizpe, Saltillo, García, Mina, Hidalgo, Abasolo y General Escobedo (Figura 10).

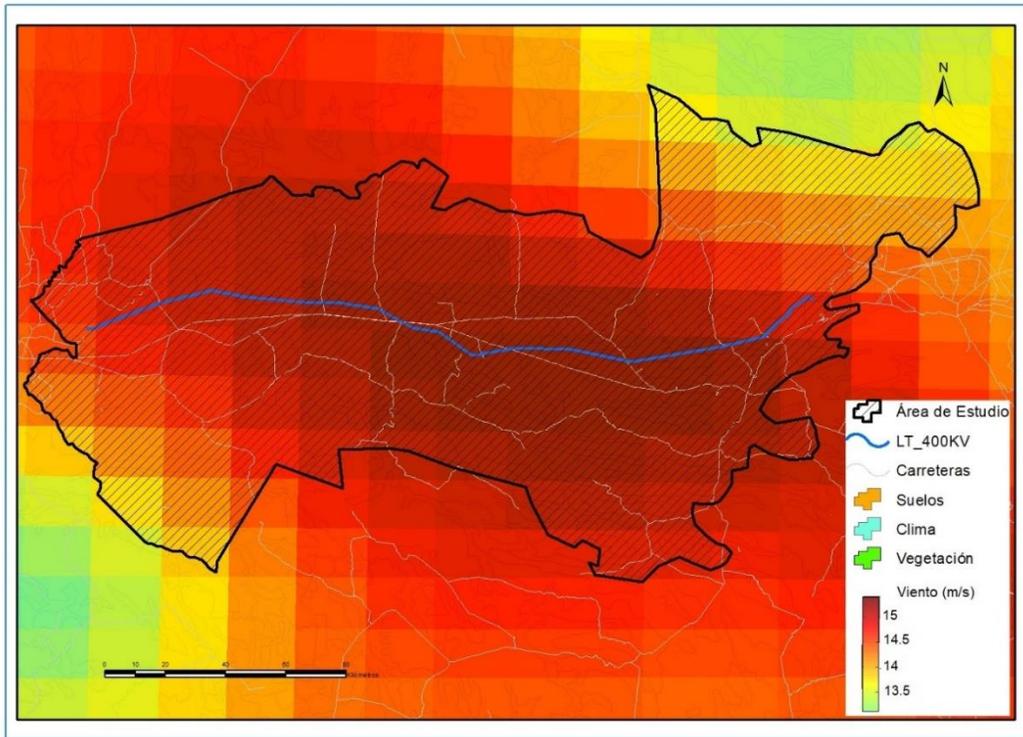


Figura 9. Localización del área de estudio, de acuerdo con las capas espaciales, los criterios y restricción de la Tabla 4.

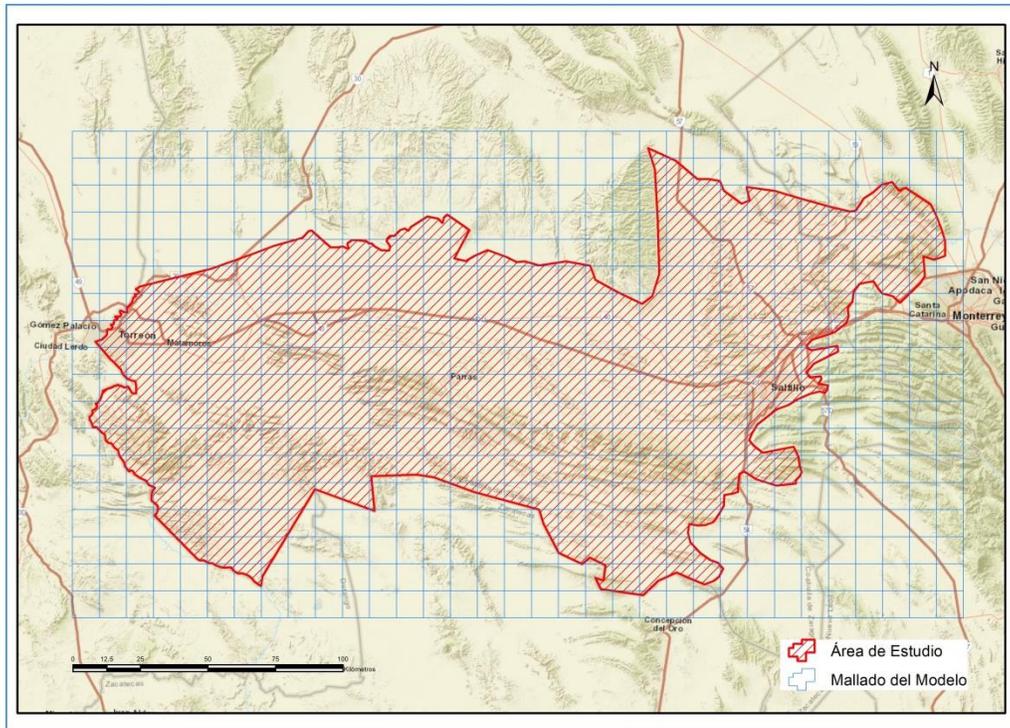


Figura 10. Ubicación el área de estudio, de acuerdo a los vértices propuestos.

Definidos los límites del mallado para la zona de estudio, se considera un modelo conceptual. Elaborar el modelo conceptual, permitió idealizar y simplificar sus componentes (siendo sus variables) técnicos, económicos y sociales que intervienen en un proyecto eólico.

La malla del modelo conceptual, presentó una forma rectangular cubriendo un área total de 59,400 km² (330 por 180 kms) donde celda medirá 100 km² (10 mil ha). Debido a que el área de estudio es muy extensa, se determinó considerar celdas grandes, procurando que estas celdas se encuentran dentro de áreas de este tipo donde existen parques ya construidos (por ejemplo: el Centro de Energía Eólica Horse Hollow. 735,5 MW. Texas en EUA es de 19 mil ha). Como resultado, el modelo conceptual sería una cuadrícula de 31 columnas y 16 renglones, donde las zonas donde no coincidan con el área de estudio, se considerarán como inactivas (Figura 11).

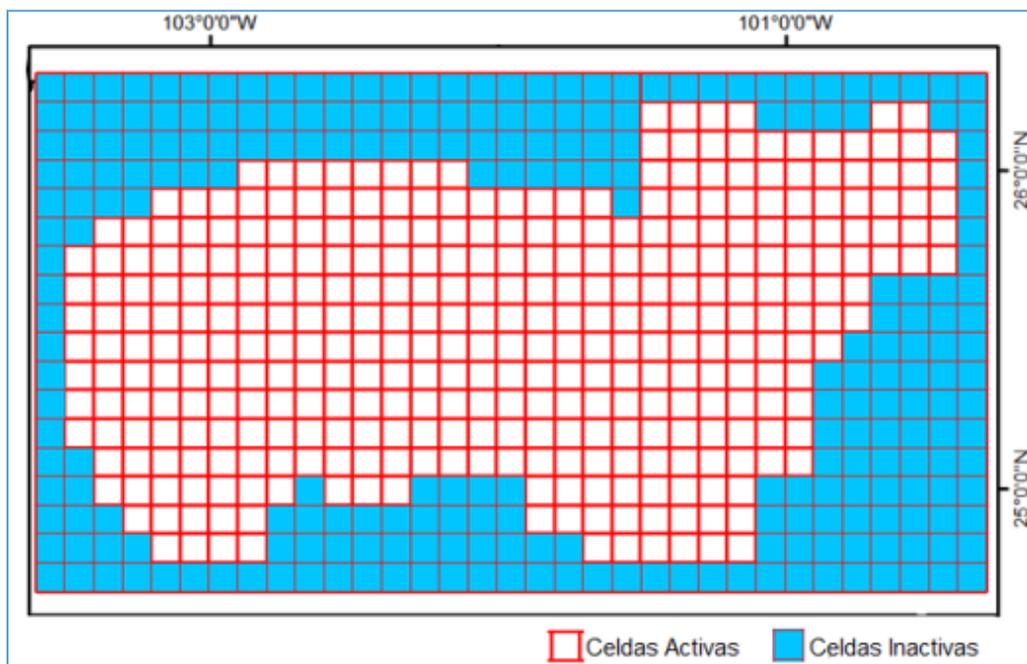


Figura 11. Modelo conceptual con sus celdas activas e inactivas, con un mallado de 100 km² por cuadrícula.

Módulo III. Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ)

Como se planteó en la metodología, a las variables planteadas, se estudiaron por dos procesos de análisis jerárquico utilizando el paquete PriEsT. El primer proceso analizó el total de las 28 variables clasificadas en cuatro tipos: técnicas, económicas, ambientales y sociales para obtener las 8 de mayor peso e importancia para el proyecto. Para el segundo proceso se analizaron solo a 6 variables; debido a que ya se habían aplicado criterios ambientales al sitio en la determinación de la zona de estudio se excluyeron a la BIODIVERSIDAD y el VIENTO.

Los resultados del primer proceso jerárquico con todas las variables son los siguientes:

Variables Técnicas

El análisis del PAJ para este grupo técnico, determinó que las dos variables con mayor peso específico para el proyecto son: CONSTRUCCIÓN (0.279) y VIABILIDAD (0.266).

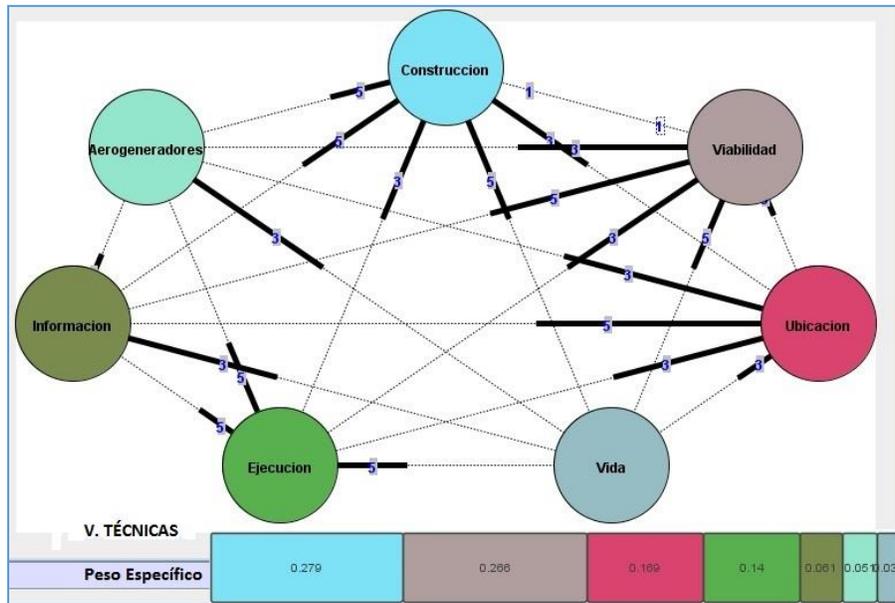


Figura 12. Diagrama del PriEsT para las variables Técnicas, ordenados por sus pesos específicos.

Variables Económicas

El análisis del PAJ para este grupo económico, determinó que las dos variables con mayor peso específico para el proyecto son: COSTOS (0.254) y RECUPERACIÓN (0.237).

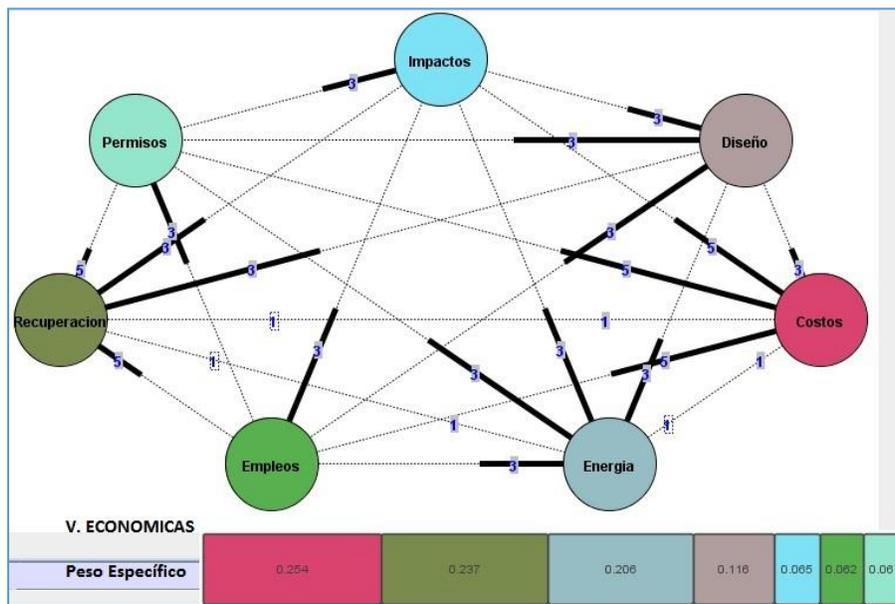


Figura 13. Diagrama del PriEsT para las variables Económicas, ordenados por sus pesos específicos.

Variables Ambientales

El análisis del PAJ para este grupo económico, determinó que las dos variables con mayor peso específico para el proyecto son: BIODIVERSIDAD (0.364) y VIENTO (0.231).

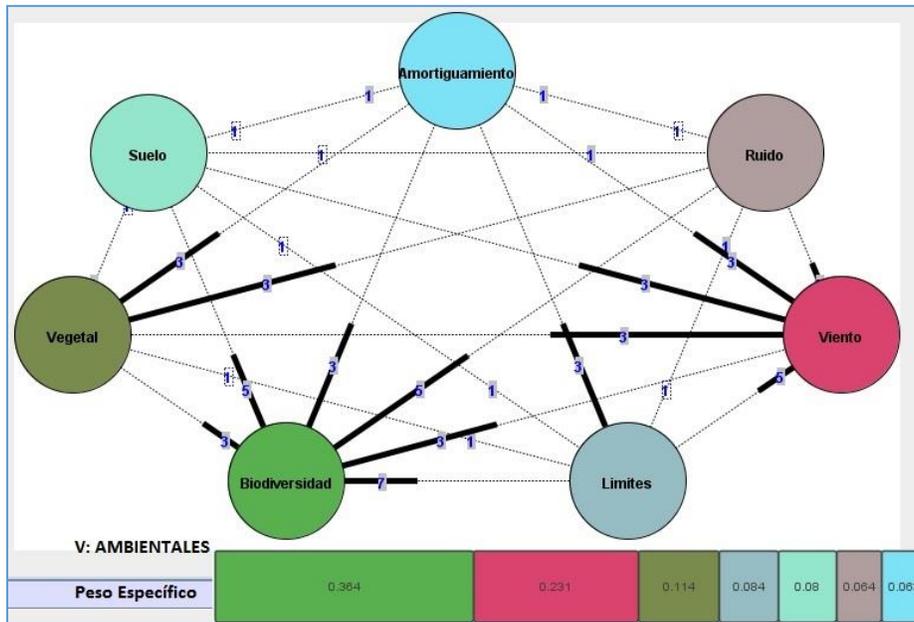


Figura 14. Diagrama del PriEsT para las variables Ambientales, ordenados por sus pesos específicos.

Variables Sociales

El análisis del PAJ para este grupo económico, determinó que las dos variables con mayor peso específico para el proyecto son: INSEGURIDAD (0.407) y GRUPOS (0.183).

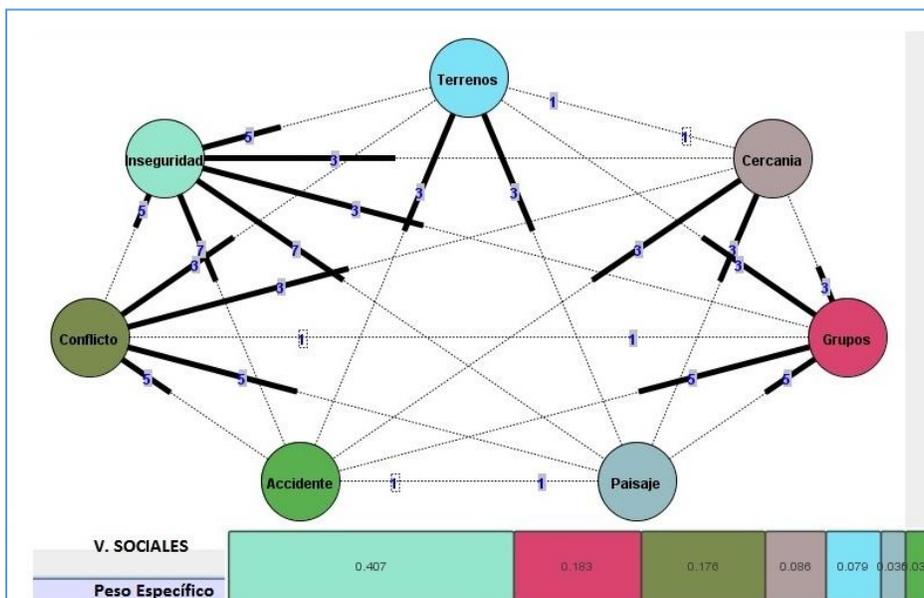


Figura 15. Diagrama del PriEsT para las variables Sociales, ordenados por sus pesos específicos.

Análisis jerárquico de 6 Variables

Los resultados del segundo proceso jerárquico, excluyendo a las variables Ambientales, arroja que las dos variables de mayor importancia e influencia en la realización del proyecto son: INSEGURIDAD (0.259) y GRUPOS (0.179).

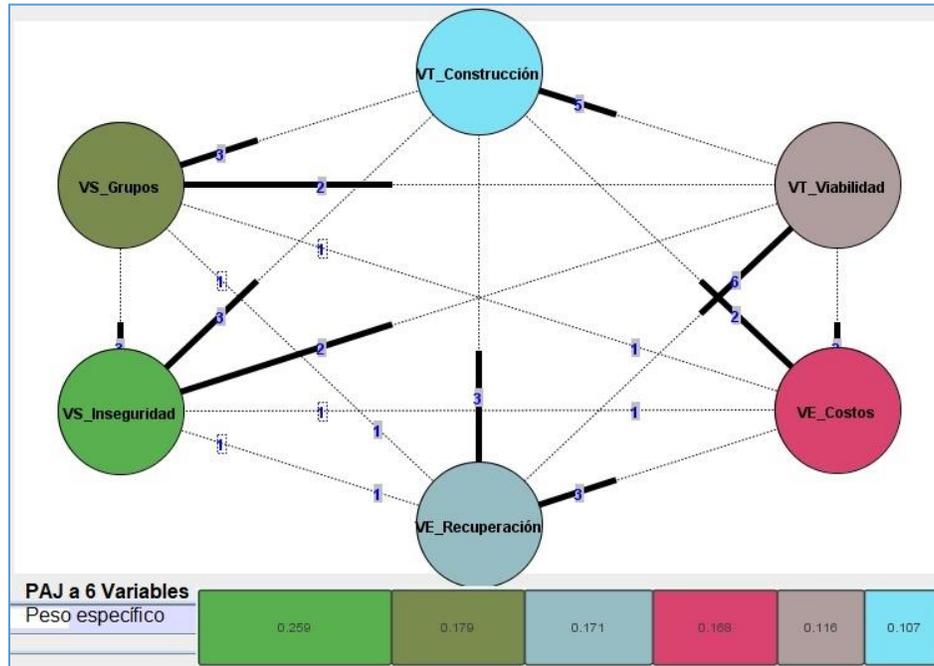


Figura 16. Diagrama del PriEsT para las variables Técnicas, Económicas y Sociales, ordenados por sus pesos específicos.

Módulo IV. Mapas de variables

Posteriormente, se elaboraron los mapas vectoriales de las 6 variables más importantes de acuerdo al análisis jerárquico realizado, para lo cual fue necesario utilizar la información de las capas cartográficas de cada variable, sus pesos específicos y la herramienta SIG de la Supervisión Ponderada. Los elementos utilizados para la elaboración de los mapas se muestran en la Tabla 7:

TIPO	Variable	Peso específico PAJ	Información utilizada
TÉCNICA	CONSTRUCCIÓN	0.107	Carreteras y caminos (INEGI, 2014).
	VIABILIDAD	0.116	Usos de suelo (INEGI, 2014).
ECONÓMICA	COSTOS	0.168	Población (INEGI, 2014).
	RECUPERACIÓN	0.171	Infraestructura (INEGI, 2014).
SOCIAL	GRUPOS	0.179	Rezago social (CONEVAL, 2010).
	INSEGURIDAD	0.259	Robo y homicidio (INEGI, 2014).

Tabla 7. Valores utilizados para generar los mapas de las 6 variables más importantes del proyecto.

Los mapas de las variables se elaboraron por cada variable y permiten visualizar la factibilidad para instalar un parque eólico bajo los criterios que se establecen. A continuación, los mapas muestran sus criterios y las distribuciones de los sitios óptimos (Figuras 17 a 22):

Mapa de Variable CONSTRUCCIÓN

Los criterios y restricciones para crear este mapa, fueron la información de carreteras y caminos en la zona de estudio, clasificando cada celda un valor y peso específico, donde:

CONSTRUCCIÓN		
Criterio	Valor / color	Peso específico
Cercanía de carreteras y caminos	Óptimo / Verde	7 a 9
Alejado de carreteras y caminos	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
Sin carreteras y caminos	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 8. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable CONSTRUCCIÓN.

El mapa de CONSTRUCCIÓN (Figura 17), establece la región Oeste de la zona de estudio como óptima, la parte central resulta ser medianamente óptima y hacia el Este hay sitios no óptimos.

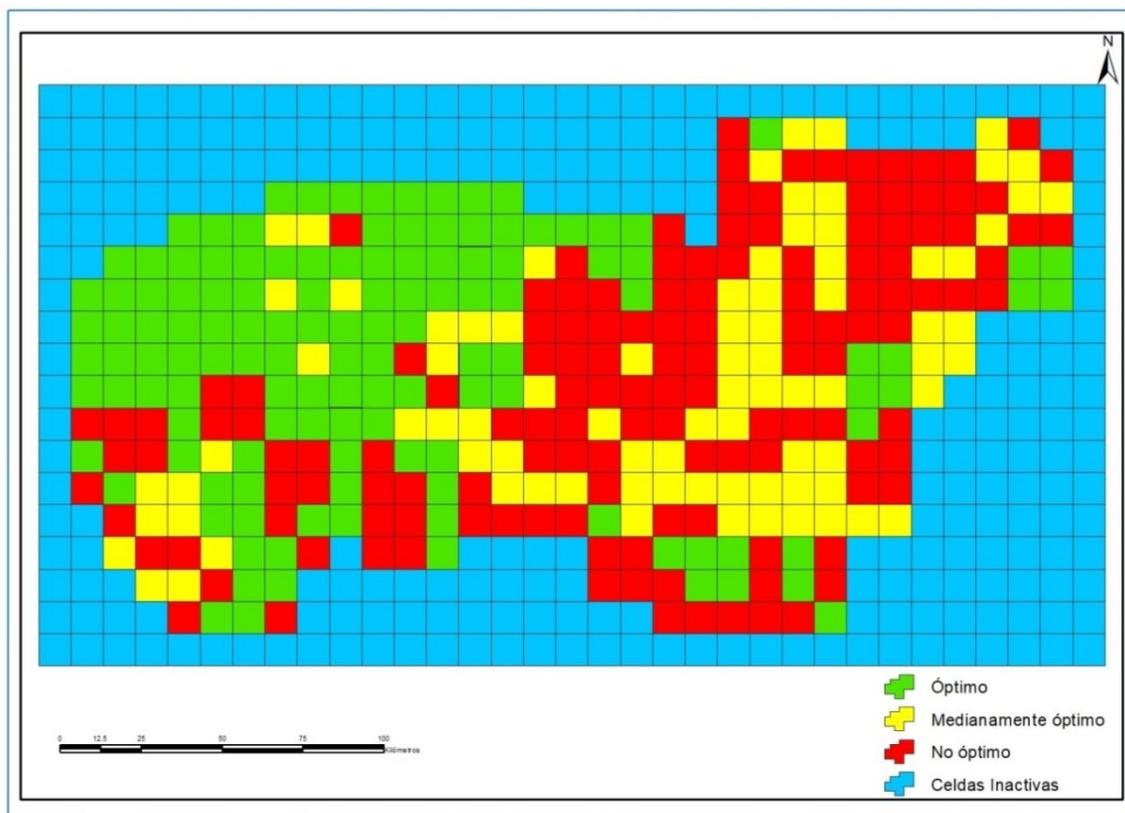


Figura 17. Mapa de variable CONSTRUCCIÓN y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de Variable VIABILIDAD

Los criterios y restricciones para crear este mapa, consideran los usos de suelos en la zona de estudio, clasificando cada celda un valor y peso específico, donde:

VIABILIDAD		
Criterio	Valor / color	Peso específico
Agrícola	Óptimo / Verde	7 a 9
Matorral y pastizal	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
Bosque, chaparral, vegetación densa y zona urbana	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 9. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable VIABILIDAD.

El mapa de VIABILIDAD (Figura 18), establece que en general, prevalecieron los sitios medianamente óptimos. Los sitios óptimos representan la misma cantidad de los no óptimos y dispersos en el área de estudio.

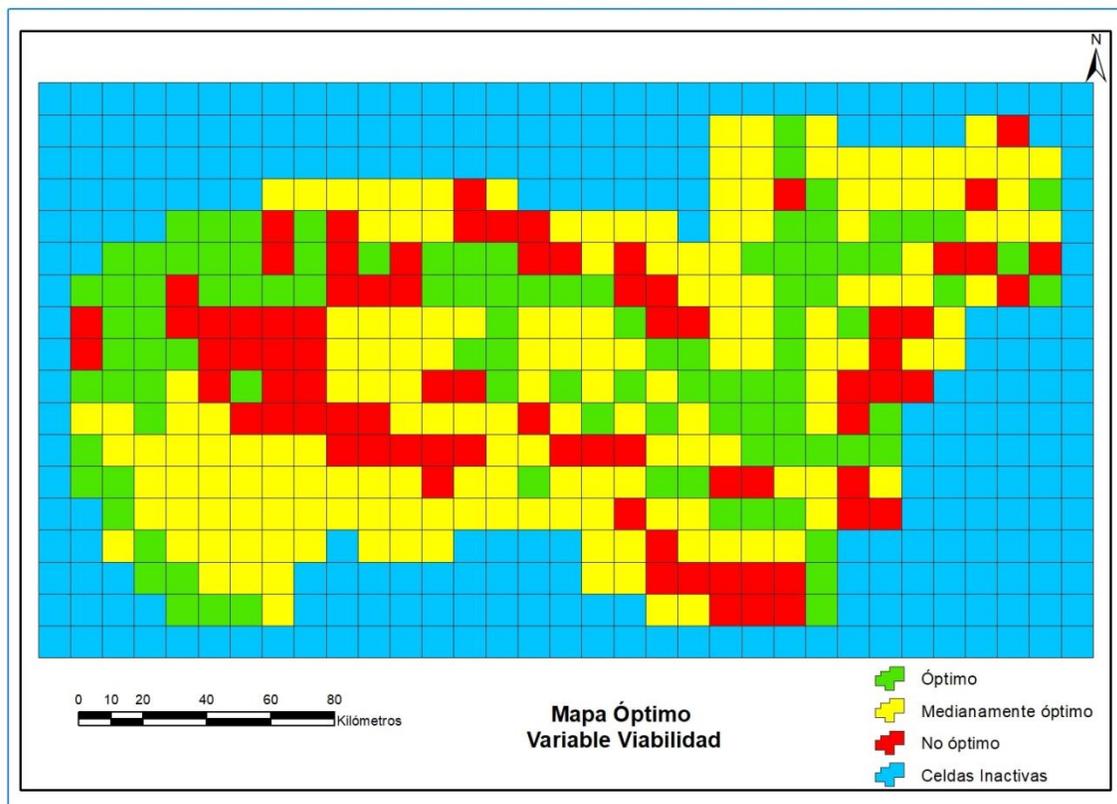


Figura 18. Mapa de variable VIABILIDAD y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de la Variable COSTOS

Los criterios y restricciones para crear este mapa, fueron las actividades económicas (presencia de industrias) y la cantidad de población, clasificando en cada celda un valor y peso específico, donde:

COSTOS		
Criterio	Valor / color	Peso específico
Actividades económicas y más de 100 mil habitantes	Óptimo / Verde	7 a 9
Actividades económicas y de 100 mil hasta 10 mil habitantes	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
Actividades económicas y menor a 10 mil habitantes	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 10. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable COSTOS.

El mapa de COSTOS (Figura 19), muestra la parte Este y Oeste de la zona de estudio como óptima, la parte central resulta ser medianamente óptima.

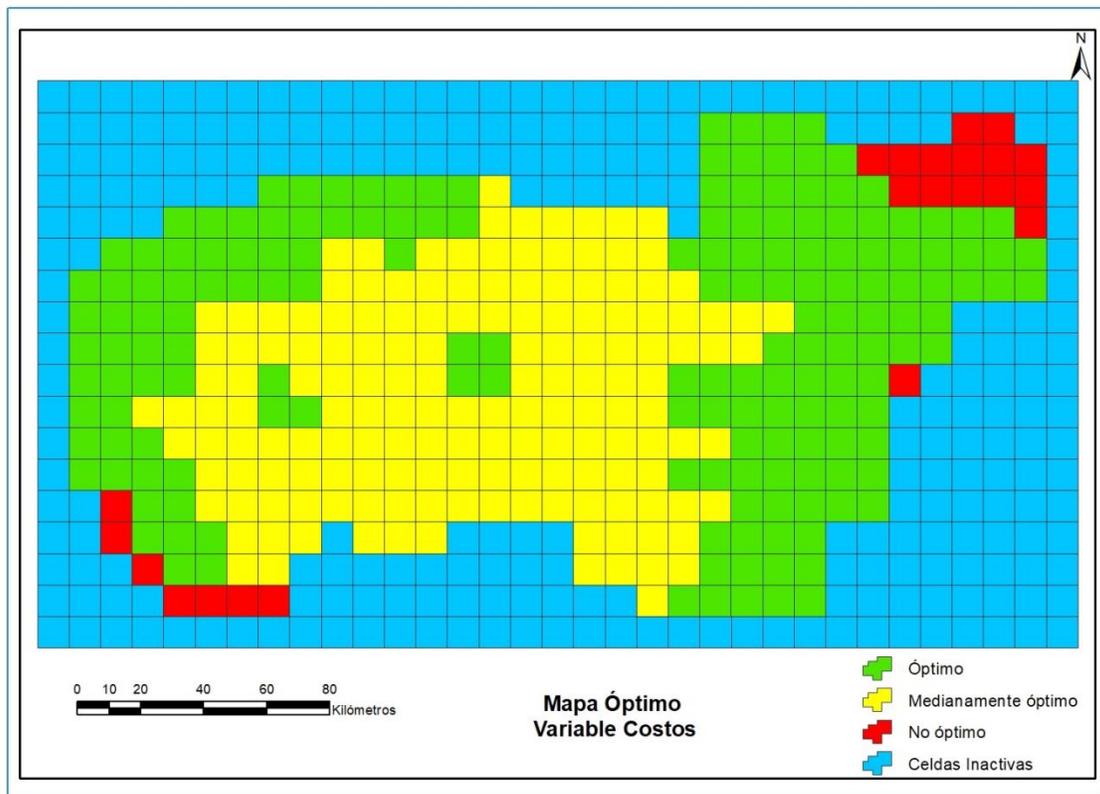


Figura 19. Mapa de variable COSTOS y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de Variable RECUPERACIÓN

Los criterios y restricciones para crear este mapa, suponen la inversión en obras que hacen los municipios. Así, se clasificó cada celda con un valor y peso específico, donde:

RECUPERACIÓN		
Criterio	Valor / color	Peso específico
Inversión de más del 15% de sus ingresos	Óptimo / Verde	7 a 9
Inversión de hasta el 15 y el 10% de sus ingresos	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
Inversión menor del 10% de sus ingresos	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 11.. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable RECUPERACIÓN.

El mapa de RECUPERACIÓN (Figura 20), muestra la parte Este y Oeste de la zona de estudio como óptima, la parte central resulta ser medianamente óptima y hacia los extremos con mínimos sitios no óptimos.

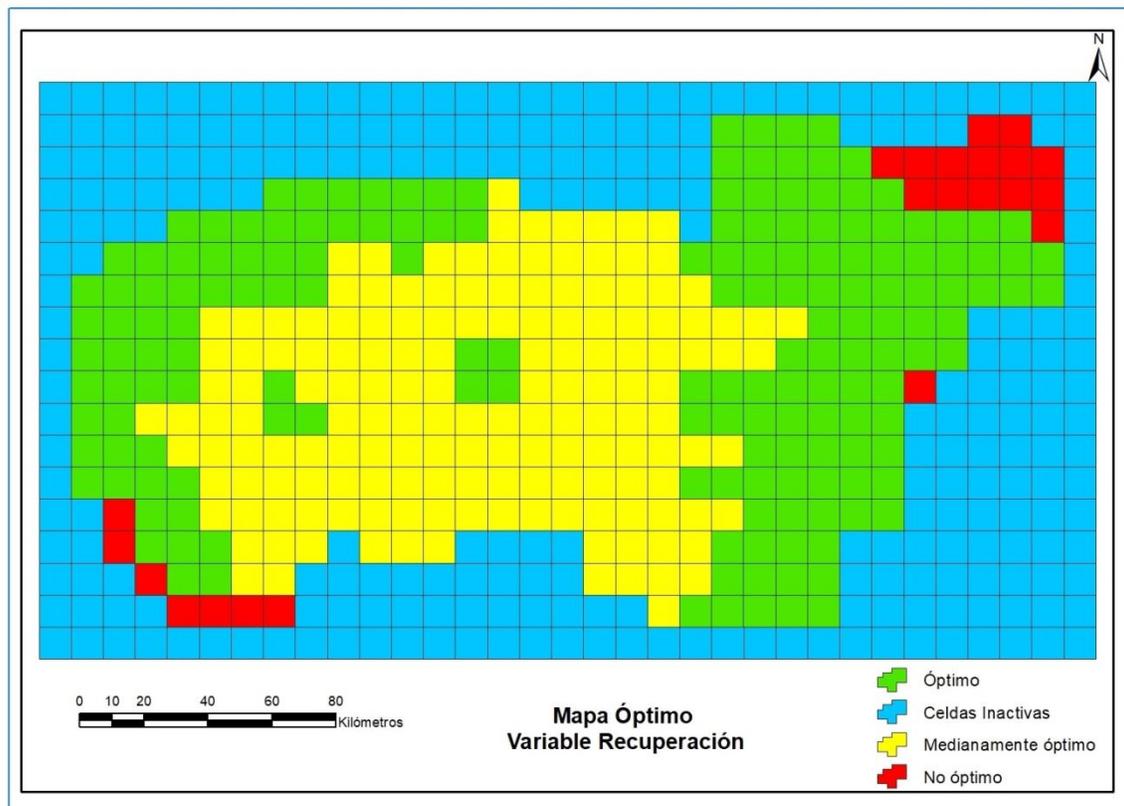


Figura 20. Mapa de variable RECUPERACIÓN y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de Variables GRUPOS (Sociales)

Los criterios y restricciones para crear este mapa, utilizan temas sociales como el rezago y falta de educación en las comunidades en la zona de estudio, clasificando en cada celda un valor y peso específico, donde:

GRUPOS (Sociales)		
Criterio	Valor / color	Peso específico
Rezago Alto	Óptimo / Verde	7 a 9
Rezago Medio	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
Rezago Bajo	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 12. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable GRUPOS.

El mapa de GRUPOS sociales (Figura 21), se muestra que en general la parte Oeste es óptima. Las zonas medianamente óptimas están dispersas y un gran número de celdas son no óptimas.

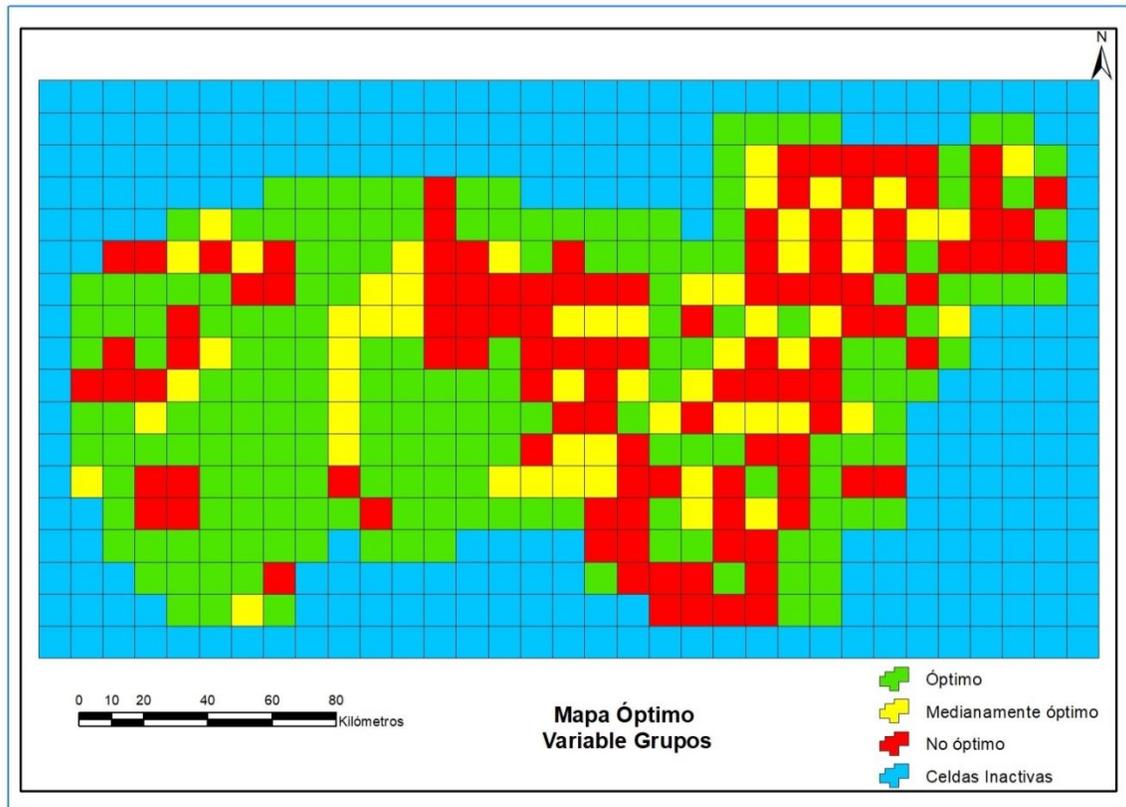


Figura 21. Mapa de variable GRUPOS y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de variables INSEGURIDAD

Los criterios y restricciones para crear este mapa, consideran a los números de los homicidios denunciados los municipios y comunidades, para clasificar en cada celda un valor y peso específico, donde:

INSEGURIDAD		
Criterio	Valor / color	Peso específico
De 0 a 9 muertes anuales	Óptimo / Verde	7 a 9
De 10 a 20 muertes anuales	Medianamente óptimo / Amarillo	4 a 6
De 30 a 200 muertes anuales	No Óptimo / Rojo	1 a 3

Tabla 13. Descripción de las características utilizadas para clasificar el mapa de la variable INSEGURIDAD.

El mapa de INSEGURIDAD (Figura 22), muestra que las celdas de la parte central en general son óptimas. Al Norte se presentan áreas medianamente óptimas y hacia el Oriente y Poniente sitios no óptimos.

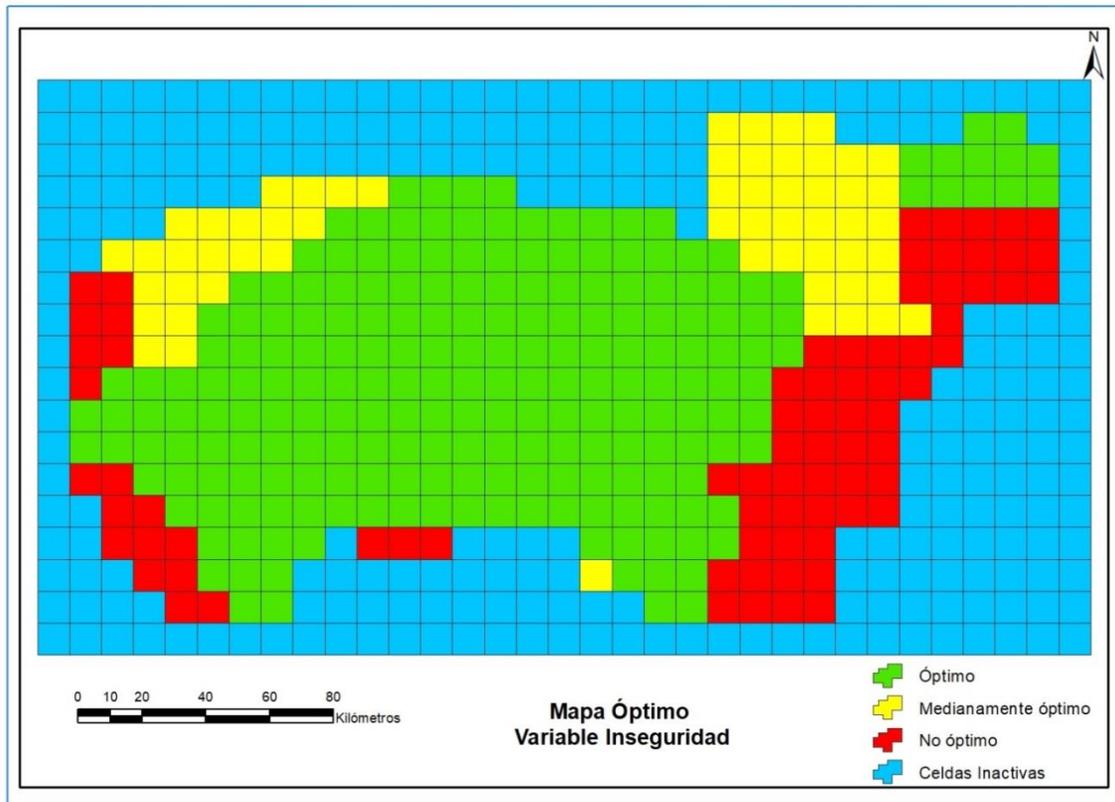


Figura 22. Mapa de variable INSEGURIDAD y localización de sus sitios óptimos.

Mapa de factibilidad de parques eólicos

Una vez obtenidos los mapas óptimos para las 6 variables más importantes utilizando la técnica de álgebra de mapas y una Supervisión Ponderada, se elabora un mapa general de factibilidad de sitios óptimos y su utilidad sería identificar las áreas más adecuadas para desarrollar un parque eólico (Figura 23).

La observación de la Figura 23 nos indica que las regiones Oeste y Noroeste presentan la mayor viabilidad para el desarrollo de parques eólicos con sitios de moderados a muy óptimos. En el mapa final, la distribución de las celdas verdes claro indica una factibilidad óptima y en general una buena distribución de celdas amarillas siendo sitios moderadamente óptimos.

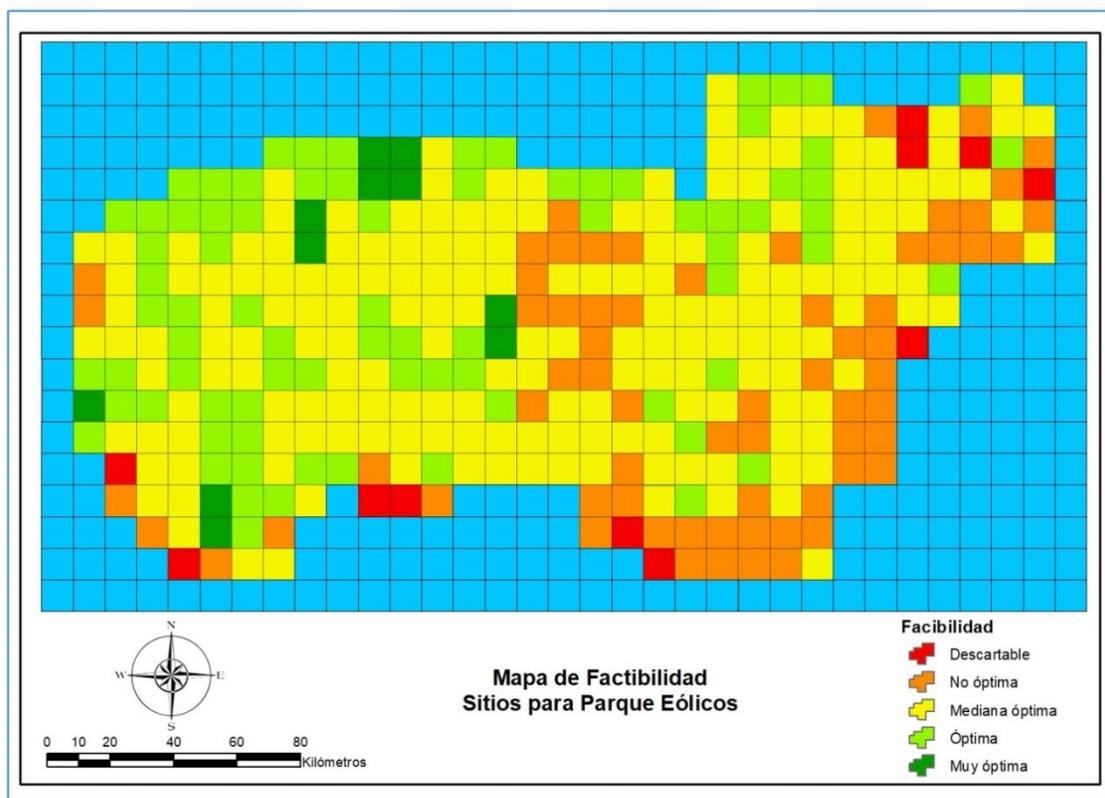


Figura 23. Mapa de sitios óptimos, asociados a una tabla de colores para localizar las regiones para un proyecto eólico.

Es de resaltar el hecho que el mapa de factibilidad, está orientado a favorecer a las características ambientales, además en toda la zona de estudio presenta una cantidad de viento normal requerida. Respecto a las condiciones sociales, los sitios de óptimos y de mayor factibilidad eliminan la influencia de grupos sociales vulnerables, además de una inseguridad muy baja.

Hay que recalcar el hecho de que las condicionantes mencionadas (ambientales y sociales) presentan mayores pesos relativos que variables las técnicas y económicas, por disponerlo así, en el proyecto.

En relación a los sitios menos factibles para la instalación de un parque eólico, se ubican en la parte central y Sureste, donde la factibilidad es no óptima, que de acuerdo a la información del estudio (zonas de color naranja-rojizo) son zonas con problemas sociales como robo y criminalidad. Otro factor primordial es que la cantidad de viento es mínima a la deseada (con la cantidad de 3 m/s) y técnicamente presentaría un riesgo de viabilidad para ejecutar el proyecto.

Finalmente, en la parte Noroeste existen 6 celdas verde oscuro que cumplen con las mejores condiciones de factibilidad siendo sitios muy óptimos. Las cuales a nivel municipal (INEGI, 2015), corresponderían al Suroeste de Coahuila específicamente a los municipios de San Pedro (106 142 hab.), Matamoros (108 950 hab.) Torreón (679 288 hab.) y Viesca (21 549 hab.), estas zonas son consideradas como, las más propicias para proponer el desarrollo de un parque eólico.

Módulo V. Algoritmo Genético (AG)

El análisis que realizó el AG, considera los resultados del Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) de la Tabla 7 y como se ha mencionado, son seleccionadas las variables más importantes del proyecto. El análisis de las 6 variables (CONSTRUCCIÓN, VIABILIDAD, COSTOS, RECUPERACIÓN y GRUPOS) por el algoritmo genético desarrollado por Sastry (2007), entrega sus resultados (de acuerdo a su proceso matemático) en un archivo tipo “.txt”, el cual se manejó como un sistema de coordenadas (X, Y) para graficar el resultado de cada variable.

Analizando el comportamiento grafico que tienen las variables, se seleccionaron las mejores de acuerdo a su estabilidad, siendo que las variables más estables tienen menor número de iteraciones durante los cruces por generaciones. De acuerdo con lo anterior, las dos variables con mayor estabilidad y por ello las de mayor importancia, son CONSTRUCCIÓN y GRUPOS (Figura 24).

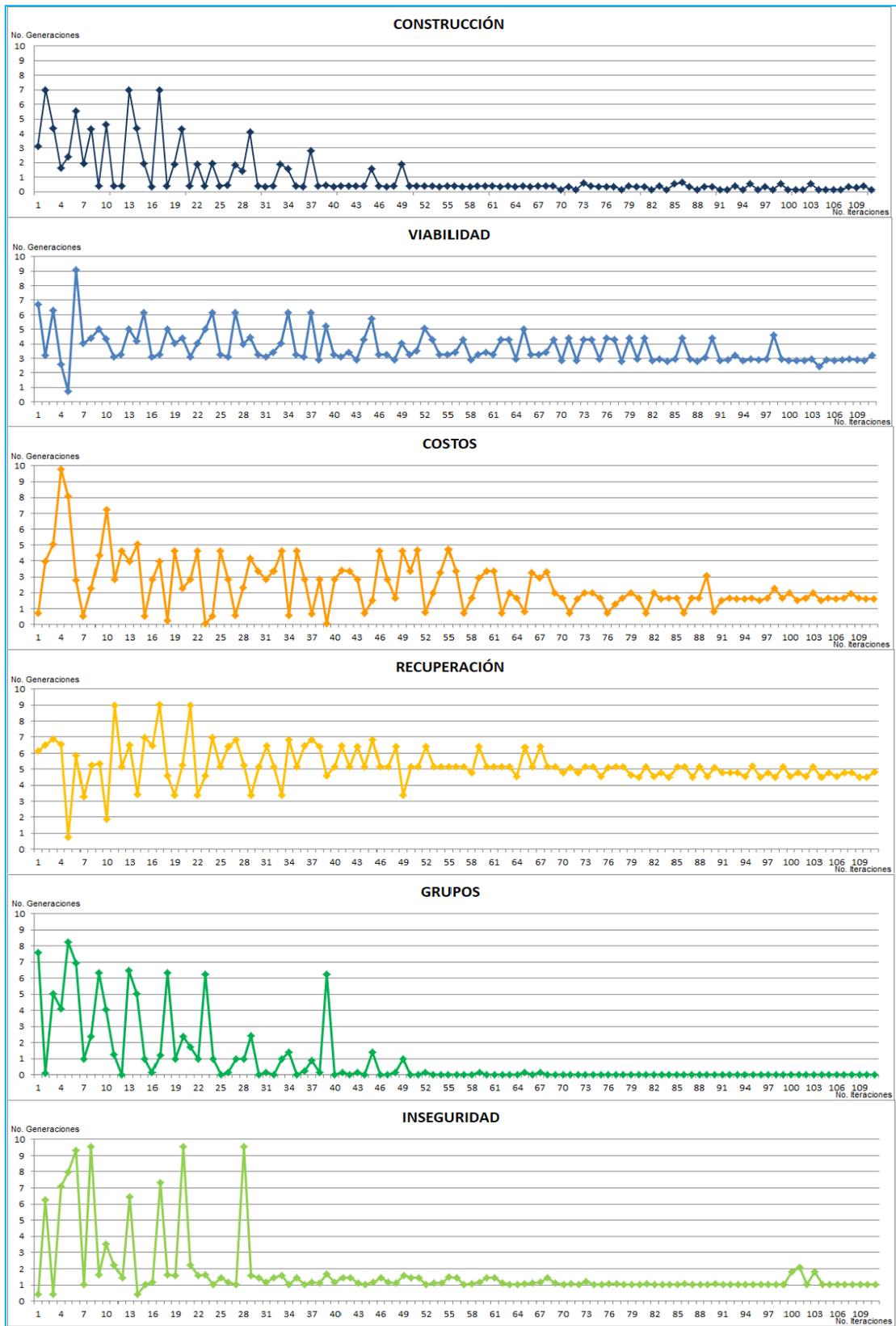


Figura 24. Resultado del análisis del AG y el comportamiento para las seis variables seleccionadas.

CAPÍTULO VIII. DISCUSIÓN

La transición hacia el aprovechamiento de la energía renovable en el País, ofrece la oportunidad de realizar estudios que conlleven a la instalación de infraestructura (parques solares y eólicos, principalmente) financiada por el gobierno federal y/o empresas de prestigio mundial, para transformar los recursos naturales, en energía eficiente para el consumo en regiones donde ésta es escasa o de alto precio.

Analizar la situación en el tema eólico para los estados del norte de México (con excepción de Baja California Norte, Sonora y Tamaulipas excluidos por tener fronteras costeras), permite conocer otra faceta de su disponibilidad en el tema energético. El estudio realizado muestra con un análisis multivariable y cartografía digital (ver Tabla 3), la factibilidad de los estados de la frontera norte para el desarrollo de energía eléctrica mediante la instalación de parques eólicos. Es conveniente, cumplir con todos los requerimientos, condiciones naturales, de infraestructura y cantidad de viento, además, de ciertos criterios y restricciones necesarios (ver Tabla 4) con la posibilidad de cubrir grandes extensiones de terreno a bajo costo.

La medición del factor viento es crítica. En general, las empresas desarrolladoras hacen el análisis de un año para confirmar este parámetro, instalando una torre anemométrica en el sitio de interés. El uso de un modelo de pronóstico del tiempo como es el WRF (Weather Research and Forecasting Model), permite determinar periodos más amplios de tiempo en las mediciones (según los requerimientos por años o décadas), lo cual permite ubicación regional de los sitios óptimos. Sin embargo, la resolución del WRF es de decenas kilómetros y aunque se puede disminuir la escala de análisis, la herramienta se debe considerar como un análisis previo y de gran escala, el cual debe confirmarse con la instalación de torres anemométricas con mediciones de preferencia, mayores a un par de años.

Los criterios planteados se dividieron en cuatro grupos que contemplan, los aspectos más importantes en el área técnica, económica, ambiental y social (Tabla 6). Con base a una consulta bibliográfica y participaciones personales, cualitativas y a veces muy complejas en este tipo de proyectos, se asignaron valores representativos para las variables.

Como se ha justificado en capítulos anteriores, la utilización de un Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) en el estudio, permite obtener buenos resultados en un proceso, permitiendo incorporar gran número de criterios para la toma de decisiones y organizando de una manera eficiente y gráfica la información, respecto de un problema de decisión. La construcción de mapas de variables, facilitó el manejo e interpretación de la información (Xu et al., 2012), obteniendo las mejores alternativas en un proyecto complejo. El PAJ facilita y optimiza el proceso de toma de decisiones. Permite evaluar diferentes criterios jerarquizando un proceso, que optimiza la toma de decisiones gerenciales, como objetivo final.

Aunque en la mayoría de los proyectos eólicos, los criterios técnicos y económicos son considerados los más importantes, en este estudio se consideró dar mayor importancia a las variables ambientales y sociales. Fundamentalmente, con la idea de realizar un proyecto sustentable de la región con beneficios a la población local, generando empleos, activando su economía y disminuyendo el consumo de energía tradicional. Recordemos que la solución no es única y que existen un conjunto de probabilidades, que son jerarquizadas de acuerdo a todos los criterios evaluados y que son analizados de acuerdo a las necesidades, requerimientos e intereses económicos de los involucrados.

La metodología propuesta representa una eficaz herramienta en la toma de decisiones multicriterio. Permite evaluar aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. Simplifica el problema reduciendo decisiones complejas a un conjunto de comparaciones para jerarquizar los distintos criterios evaluados. Permite resolver una problemática que incluye aspectos multidisciplinarios y ofrece una solución fácil de entender, aceptable para los grupos involucrados (Janke, 2010, Kang et al., 2011; Díaz et al., 2017). Contrasta con algunos estudios de factibilidad de sitios para parques eólicos donde solo consideran aspectos técnico-económicos para conocer la ubicación de los aerogeneradores, con la finalidad de calcular las pérdidas económicas e incrementar la eficiencia de aprovechamiento del parque eólico, entre otros (EWEA, 2009).

El área de estudio comprendió los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango y Nuevo León. Coahuila presenta la mayoría de sitios y opciones, factibles para la instalación de parques eólicos con pocos conflictos ambientales (en el tema de las zonas naturales protegidas principalmente). Su instalación podría proporcionar un estímulo al desarrollo industrial instalado en la región (Grupo Industrial Lala, Grupo Acerero del Norte (GAN), Grupo Industrial Monclova (GIMSA), Grupo México y Grupo Modelo Met-Mex Peñoles, por mencionar algunos). Reconociendo estas condiciones, se fortalecen la posibilidad que este tipo de proyectos sean apoyados por los inversionistas.

Esta investigación arroja seis sitios (considerándose los más óptimos). Sin embargo y de acuerdo con la disponibilidad de las velocidades del viento mostradas (13 a 15 m/s), se puede observar que, en el mapa final de factibilidad, existen gran número de lugares con una disponibilidad medianamente óptima, los cuales podrían ser importantes y adecuados, bajo algunas condiciones, para la construcción de un sitio de aprovechamiento de energía eólica. Los valores calculados en el mapa, cumplen con los requerimientos de los aerogeneradores de entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "cut-in speed", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "cut-out speed" (CECU, 2021).

La Figura 23, muestra el mapa de sitios óptimos con la localización espacial de posibles parques eólicos. Es una herramienta valiosa para la toma de decisiones, convenios y permisos entre las partes involucradas (empresas desarrolladoras, autoridades y la

comunidad local). Permitiendo visualizar las características y criterios considerados importantes.

Posteriormente, el Algoritmo Genético (AG) permite realizar una comprobación matemática frente al proceso jerárquico del análisis de variables, estimando cuáles de las seis variables utilizadas, son las más importantes para la realización del proyecto, favoreciendo los criterios medio-ambientales y sociales, ya que son los parámetros considerados más vulnerables, al desarrollar un proyecto eólico.

Los resultados del AG, difieren de los establecidos al utilizar PAJ, ya que el algoritmo genético consideró, CONSTRUCCIÓN como la variable más importante, mientras que para el análisis jerárquico la INSEGURIDAD, resulta la más significativa, aun y cuando se favorecen los criterios medio-ambientales y sociales en el estudio, no se tuvo el resultado esperado (considerando que se favorecieron a la variables ambientales y sociales en el estudio) para el AG ya que, su análisis considera una variable técnica como la más importante.

A finales del año 2016, entró en operación el proyecto de generación eólica “Coahuila S.A. de C.V.” de la empresa EDP Renovables e Industria Peñoles, ubicado en los municipios de General Cepeda y Ramos Arizpe en Coahuila (EDPR, 2018). La ubicación de este desarrollo fue cotejada con el mapa final de sitios óptimos (Figura 23) y la plataforma del GWA (donde se calculan vientos de 3.5 m/s), habiendo una correlación con las zonas de buena factibilidad obtenidas. Este resultado confirma que la metodología planteada puede ser una herramienta confiable y de gran utilidad.

CAPÍTULO IX. CONCLUSIONES

En México, el proceso para seleccionar sitios factibles para la instalación y desarrollo de parques eólicos es una actividad compleja, debido a las regulaciones y requisitos que se deben cumplir. De ahí que la aplicación de este tipo de estudios sea una buena opción para considerar un análisis robusto a realizar, sobre gran cantidad de los aspectos y condiciones involucrados.

La región de la frontera norte de México establecida, presenta buenos resultados y posibilidades para el desarrollo de proyectos eólicos para la generación de energía eléctrica y autoconsumo en sus regiones.

El planteamiento y agrupación de las variables en cuatro tipos: técnicas, económicas, ambientales y sociales permitió clasificar y reconocer los procesos involucrados en un proyecto que resalte y contemple el aprovechamiento de los recursos naturales, el desarrollo tecnológico y los beneficios sociales. Si bien, es difícil considerar todos los aspectos involucrados, se han propuesto como variables de estudio a los más importantes. Este tipo de selección y ponderación de las variables involucradas, debería estar presente e incluido, en todo tipo de obras donde se desarrollen grandes inversiones, permitiendo un análisis preliminar de la viabilidad y riesgos del proyecto.

El Proceso de Análisis Jerárquico (PAJ) utilizando el software PriEsT, resultó una herramienta útil para la selección de las variables más relevantes para el Proyecto. Dicho proceso permite estimar prioridades, basadas en juicios de comparación por pares de variables, ofreciendo una amplia gama de soluciones óptimas basadas en la optimización multiobjetivo.

El uso de algoritmos jerárquicos computacionales multicriterio como el PAJ, facilita la tarea de los tomadores de decisiones para seleccionar las mejores soluciones en la ubicación de un parque eólico. Las ventajas de esta metodología radican en ser de gran utilidad, cuando los elementos de decisión son poco conocidos, difíciles de cuantificar y evaluar, permitiendo calcular la contribución de cada variable con respecto a las demás. La versatilidad de esta metodología de selección, permitiría aplicarla en diferentes regiones del País, siempre y cuando que las variables de interés estén bien definidas y evaluadas.

La utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para acoplar el análisis de las mejores variables (PAJ), produce buenos resultados en la determinación de los sitios factibles. La interpretación de los resultados del análisis jerárquico resulta indicativa, debido a que la selección de sitios óptimos mediante mapas resulta muy adecuada. La técnica de PAJ aplicada a un problema multicriterios y acoplada en un SIG en este estudio, dio resultados muy satisfactorios.

El uso de Algoritmos Genéticos (AG) en proyectos ambientales, resulta una herramienta eficaz para obtener buenos resultados considerando efectos, de acuerdo a lo requerido.

La ventaja de los AG en este estudio, permite un manejo rápido de las variables, para optimizar las mejores selecciones para la instalación de un parque eólico. La comparación del análisis del PAJ y el AG, a las variables más importantes, muestra diferentes resultados, teniendo como variables de mayor importancia a la Inseguridad y la Construcción respectivamente.

El mapa de factibilidad de parques eólicos obtenido en este estudio (Figura 23), representa una herramienta confiable (dependiendo de las variables utilizadas), para localizar sitios óptimos. Sin embargo, la distribución de zonas “medianamente óptimas” que prevalecen en cantidad y distribución, podrían ser prospectos adecuados, a futuro, bajo ciertos criterios. El mapa debe considerarse como un análisis preliminar con la limitante de ser a nivel regional, por lo que se considera realizar estudios a microescala y detalle en los sitios óptimos identificados.

El estudio de factibilidad realizado, para localizar los mejores lugares para la instalación de parques eólicos en los estados fronterizos del norte de México, favorece al estado de Coahuila. En su parte Noroeste del Estado presenta los mejores lugares localizados en cuatro municipios (San Pedro, Matamoros, Torreón y Viesca). En particular, destaca el municipio de San Pedro, que cuenta con una superficie potencial de 300 km² donde se podría instalarse un parque eólico, con una capacidad de generación de 200 MW utilizando alrededor de unos 100 aerogeneradores. En la infraestructura eléctrica de la zona, se localizan la subestación san Pedro (115 y 13.8 kV), dos Líneas de transmisión una de 230 kV (Saltillo-Andalucía) y otra de 40 kV (Torreón), las cuales podrían recibir la energía generada por el parque.

REFERENCIAS

- AEM, (2015). Atlas Eólico Mexicano. Inventario Nacional de Energías Limpias INEL. Disponible en: <https://dgel.energia.gob.mx/inel/mapa.html?lang=es> (consultado el 20 de septiembre del 2021).
- Álvarez C., (2006). Manuales de Energías Renovables, Tomo 3, Energía eólica. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid España. 180 pp.
- AMDEE (2017). Asociación Mexicana de Energía Eólica A.C “AMDEE”. Disponible en <https://amdee.org/> (consultado el 24 de agosto del 2021)
- AMDEE. (2020). Asociación Mexicana de Energía Eólica. El potencial eólico mexicano Oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico. Sector eólico en México.
- Artillo G. M., (2017). Estudio del Potencial Eólico y Viabilidad de Parque Eólico en Andalucía Tesis de pregrado Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla. Sevilla España.
- Artillo, G. M. (2017). Estudio del Potencial Eólico y Viabilidad de Parque Eólico en Andalucía. Proyecto Fin de Grado, Ingeniería de la Energía. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla. 131 p.
- Ávalos C. R. (2000). Presentación en el 1er Coloquio Internacional sobre Oportunidades para el Desarrollo Eoloeléctrico de La Ventosa, Oaxaca, México. Oaxaca de Juárez, México.
- Berumen S.A. y Llamazares R. F., (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente, Cuadernos de Administración, vol. 20, n° 34, p. 65-87.
- Bilbao M., Alba E., (2011). Algoritmos Evolutivos Aplicados al Diseño Inteligente de Parques Eólicos. CACIC 2011 - XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación. Buenos Aires, Argentina. 110 pp.
- Borja D. M. (1999). Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica. 1ª ed. Cap. 4. Instituto de Investigaciones Eléctricas. UNAM. México. pp. 183-184.
- Borja Díaz, M.A. et al. (1998). Estado del Arte y Tendencias de la Tecnología Eoloeléctrica. Editado por la Universidad Nacional Autónoma de México / Programa Universitario de Energía en colaboración con el Instituto de Investigaciones Eléctricas. ISBN 968-36-7433-X. México.

-
- Borja M.A., Huacuz, J., et al. (1997). Estudio de prefactibilidad de una central eoloelectrónica de 150 MW para la zona de La Ventosa, México, Instituto de Investigaciones Eléctricas, informe IIE/01/14/10741/I002/F, México.
 - BUN-CA. (2002). Manuales sobre energía renovable: Eólica/ Biomass Users Biomass Users Network (BUN-CA). -1 ed. -San José, C.R.: ISBN: 9968-904-00-7 Cap. 7.
 - Caballero G. E. y García C. M., (2012). Estudio de localización de un parque eólico offshore en la costa asturiana mediante análisis multicriterio. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, 11-13 de julio de 2012. Valencia, España.
 - Campbell H. B., (1989). La COCEI: cultura y etnicidad politizadas en el Istmo de Tehuantepec. En: Revista Mexicana de Sociología, 51/2, p. 247-263.
 - Castillo J. E., (2011). Problemática en torno a la construcción de parques eólicos en el Istmo de Tehuantepec. DELOS Vol. 4. Nº 12. Disponible en: www.eumed.net/rev/delos/12 (consultado el: 28 de noviembre del 2018).
 - Castro M. J., Calero B. J. M., Riquelme S. J. M., Burgos P. M., (2007). An evolutive algorithm for wind farm optimal design. Electrical Department of the University of Seville, Escuela Superior de Ingenieros, Camino de los Descubrimientos, s/n 41092 Sevilla, España.
 - CECU, (2021). Confederación de Consumidores y Usuarios, España. Disponible en: <https://cecu.es/laenergiaquenosune/index.php/energia-eolica> (consultado el: 12 de septiembre del 2021).
 - CONABIO (2014). Portal geoinformación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (consultado el: 12 de septiembre del 2014).
 - Darwing C. M. A., (1859). On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. Editorial JohnMurray. Reino Unido, Gran Bretaña. 502 pp.
 - Davis L., (1991). Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York.
 - Diaz, L., González, A., Romero, C. (2017), Measuring systems sustainability with multi-criteria methods: Acritical review. European Journal of Operational Research, 258, pp 607-616.
 - Diego Q. R., (2015). Energía "limpia" o energía perversa: actores sociales y parques eólicos en Dinamarca y en el Istmo de Tehuantepec. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. México p. 22.
-

-
- DWT. (1997). Danish Wind Turbine. The energy balance of modern wind turbines. The Danish Wind Turbine Manufacturers Association, ISNN 1397-1697. Dinamarca.
 - EDPR (2018). México: Eólica de Coahuila. edp renewables. Disponible en <https://www.edpr.com/north-america/eolica-de-coahuila-wind-farm> (consultado el 05 de junio del 2018).
 - ENERTHI. (2010). Proyecto eólico Energías Limpias de Malpaso, Memoria descriptiva. Zacatecas México p. 320.
 - ERM, (2014). Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Regional para el Proyecto “Parque Eólico de Coahuila” ubicado en el Municipio de General Cepeda en el Estado de Coahuila. Environmental Resources Management Group Inc. (ERM) México. 319 pp.
 - EWEA (2009). Wind energy and job creation in the EU by the European Wind Energy Association. January 2009. 52 pp.
 - Falces A. A., 2015. Planificación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y algoritmos genéticos. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Universidad La Rioja, España.
 - Fernández J. L., Falces A. A., Mendoza V. A., A. Muñoz J. A., Lara S. P., Zorzano S. P. (2009). Optimización del diseño de parques eólicos por medio de algoritmos genéticos y sistemas de información geográfica. ResearchGate2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267377496> (consultado el 21 noviembre del 2018).
 - Fernández J. L., Falces A. A., Mendoza V. A., A. Muñoz J. A., Lara S. P., Zorzano S. P., (2009). Optimización del diseño de parques eólicos por medio de algoritmos genéticos y sistemas de información geográfica. ResearchGate2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267377496> (consultado el 21 noviembre del 2018).
 - Fernández J. L., Falces A. A., Mendoza V. A., A. Muñoz J. A., Lara S. P., Zorzano S. P., (2009). Optimización del diseño de parques eólicos por medio de algoritmos genéticos y sistemas de información geográfica. ResearchGate2018. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267377496> (consultado el: 21 noviembre del 2018).
 - García K., (2021). Crecimiento eólico en México se frenará a partir del 2022. El Economista. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Crecimiento-eolico-en-Mexico-se-frenara-durante-la-presente-administracion-AMDEE-20210518-0057.html> (consultado el 23 de septiembre del 2021).
-

-
- Goldberg D.E., (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, Reading, MA.
 - Grady, S. A., Hussaini, M. Y., Abdullah, M. M., (2005). Placement of wind turbines using genetic algorithms. Renewable Energy 30 (2). p. 259-270.
 - Guzmán A. A., 2017. Análisis multivariante en parques eólicos. Trabajo final de master. Ingeniería computacional y matemática. Universitat Oberta de Catalunya. Cataluña España. 44 p.
 - Guzmán G. C., (2003) Estudio de factibilidad para la construcción de un parque eólico en Colombia. Proyecto de Grado de Ingeniería Industrial. Universidad de la Sabana Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Industrial. santafe de bogotá, Colombia. 122 pp.
 - GWA, (2021). Global Wind Atlas. Disponible en: <https://globalwindatlas.info/> (consultado el 20 septiembre del 2021).
 - GWEC. (2019). Global Wind Report 2019. The flagship annual report for the global wind industry from GWEC Market Intelligence. Disponible en: <https://gwec.net/global-wind-report-2019/> (consultado el 06 septiembre del 2019).
 - Herrera S. O., Sarmiento S. A., González F. V., y Wolfgang S. 2011. Modelo de optimización de parques eólico. Ingeniería Mecánica. Vol. 14. No. 3, septiembre-diciembre, 2011, p. 189-198.
 - Herrera S. O., Sarmiento S. A., González F. V., y Wolfgang S. 2011. Modelo de optimización de parques eólico. Ingeniería Mecánica. Vol. 14. No. 3, septiembre-diciembre, 2011, p. 189-198.
 - Holland J., (1975). Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, Ann Arbor.
 - Huacuz V. J. (2016). Energías renovables en el IIE, punto de apoyo para la transición energética de México. Instituto de Investigaciones Eléctricas. ISBN: 978-607-8182-07-7. Edición 2016. Cuernavaca Morelos, México.
 - Iberdrola, (2020). Transparencia y calidad en la generación de energía, Las tierras donde Iberdrola genera la energía. Disponible en: <https://www.iberdrolamexico.com/te-interesa/las-tierras-donde-iberdrola-genera-la-energia/> (consultado el: 17 de septiembre del 2021).
 - INEGI, (1983). Síntesis Geográfica del Estado de Coahuila Dirección General de Geografía México, D.F., marzo de 1983. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 15 pp.

-
- INEGI, (2014). Datos vectoriales escala 1:1,000,000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/default.aspx> (consultado el: 06 de septiembre del 2014).
 - INEL, (2021). Inventario Nacional de Energías Limpias. Mapa Potencial de recurso, Eólica. México. Disponible en: <https://dgel.energia.gob.mx/inel/mapa.html?lang=es> (consultado el 20 septiembre del 2021).
 - Janke. J. R. (2010). Multi-criteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renew Energy*; pp 35.
 - JEE (1997). Jornadas de Energía Eólica. Libro de Ponencias, Santiago de Compostela, España.
 - Kang, H., Hung, M., Pearn, W., Lee, A., Kang, M. (2011), An integrated multi-criteria decision making model for evaluating wind farm performance. *Energies*, 4, pp 2002-2026.
 - MacQueen, J., (1983). Risks associated with wind turbine blade failures, *IEEE proceedings A* 130.
 - Martínez A. (1997). Situación y perspectivas de la energía eólica en Europa. *European Wind Energy Association*, libro de ponencias, Jornadas de Energía Eólica, Santiago de compostela, España.
 - Martínez A. (1997). Situación y perspectivas de la energía eólica en Europa. *European Wind Energy Association*, libro de ponencias, Jornadas de Energía Eólica, Santiago de compostela, España.
 - Moya A. A. y Ortega L. J., (2015) Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de ciencias & sociedad*. Vol. 5 núm. 1; 2015, enero-junio. México. pp. 135-145.
 - Michalewicz Z., (1992). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, SpringerVerlag, Berlin Heidelberg.
 - Moragues J. A. y Rapallini A. T., (2004). Aspectos ambientales de la energía eólica. *ResearchGate* 2018. Disponible en : <https://www.researchgate.net/publication/267833018> (consultado el: 25 de noviembre del 2018).
 - Mosetti, G., Poloni, C. Diviacco, B.(1994) "Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 51, p. 105-116.
-

-
- NOM-081, (2003). NORMA Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994, Que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. México.
 - Obando C. M., (2017). Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico. Tesis de pregrado Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales, Caldas Colombia.
 - OMS (1999). Organización Mundial de la Salud. Guías para el ruido urbano es el resultado de la reunión del grupo de trabajo de expertos llevada a cabo en Londres, Reino Unido, Se basa en el documento “Community Noise”, preparado para la y publicado en 1995 por la Stockholm University y el Karolinska Institute. Organización Mundial de la Salud, Ginebra.
 - Oyarzo P. H., (2008). Modelización matemática para evaluar energías para sistemas eólicos e híbridos eólico-diesel. Tesis Doctoral. Ingeniería Mecánica. ETIS Agrónomos UPM. Madrid, España.
 - Ozturk, U. A. y Norman, B. A. (2004). Heuristic methods for wind energy conversion system positioning. Electric Power Systems Research 70 (3). p. 179-185.
 - Ramírez V. E. (2009). Guía para la implementación de una planta eólica. Tesis Ingeniero Industrial. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ingeniería, México.
 - Reeves C., (1993). Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, Blackwell Scientific Publications
 - Saaty T.L. y Vargas L.G., (1991). Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports. Boston: Kluwer Academic Publishers.
 - Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of Mathematical Psychology, 15(3):234 281.
 - Sastry K. (2007). Single and Multiobjective Genetic Algorithm Toolboxfor Matlab in C++. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
 - SENER (2018). Secretaría de Energía. Reporte de avance de energías limpias. Primer semestre 2018. México.
 - SENER (2013). Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027. Secretaría de Energía, México, 97 pp. Disponible en: <https://www.energiaadebate.com/wp-content/uploads/2013/02/ENE2013-2027.pdf> (consultado el 11 octubre del 2014).

-
- Serrano, G. J. (2012). Diseño óptimo de parques eólicos de gran dimensión incluyendo análisis de riesgos. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sevilla. 290 p.
 - Siraj, S., Mikhailov, L and Keane, JA (2015) PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments. *International Transactions in Operational Research*, 22 (2). pp. 217-235. DOI.org/10.1111/itor.12054.
 - Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 University Corporation for Atmospheric Research. Colorado USA. 125 pp. DOI:10.5065/D68S4MVH.
 - WASP. (2014). Wind resource assessment, siting & energy yield calculations. Disponible en: <https://www.wasp.dk/wasp> (consultado el 24 agosto del 2014).
 - WEAR. (1995). Report Executive Committee for the Implementing Agreement for Cooperation in the Research and Development of Wind Turbine Systems. Wind Energy Annual. International Energy Agency.
 - WindPower, T. (2012). Base de datos de turbinas eólicas y parques eólicos. Disponible: http://www.thewindpower.net/country_america_es.php. (consultado el 16 agosto del 2013).
 - WRF, (2016). Datos del pronóstico meteorológico. Weather Research and Forecasting Model (WRF) version 3.9. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM. México.
 - Xu, D. et al. (2012) “A simulation study integrated with analytic hierarchy process (AHP) in an automotive manufacturing”, *Simulation*, vol. 88, nº 4, pp. 450–463.
 - Zárate T. E. y Fraga J., (2016). La política eólica mexicana: Controversias sociales y ambientales debido a su implantación territorial. Estudios de caso en Oaxaca y Yucatán. *Trace* 69, CEMCA, Enero 2016, pp. 65-95.