



Universidad  
de Holguín

FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE PROYECTOS EÓLICOS EN NORTE ORIENTAL CON TÉCNICAS MULTICRITERIO AHP Y SIG

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN  
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Leandro Miguel Pérez Escalona

HOLGUÍN 2021





Universidad  
de Holguín

FACULTAD  
DE INGENIERÍA  
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

# SELECCIÓN ÓPTIMA DE PROYECTOS EÓLICOS EN NORTE ORIENTAL CON TÉCNICAS MULTICRITERIO AHP Y SIG

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN  
AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Leandro Miguel Pérez Escalona

Tutor: MsC Angel Eugenio Infante Haynes

HOLGUÍN 2021



## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores que fueron parte de mi formación como Ingeniero Mecánico en especial a mi tutor, a todas mis amistades y familia en especial a mi novia y mi madre.



## RESUMEN

En esta investigación se combinaron los Métodos Multicriterio de Ayuda a la Decisión, del inglés (MCDM) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la selección de zonas óptimas a instalar y generalizar Proyectos Eólicos en el Norte Oriental de Cuba. Lográndose un modelo conceptual y matemático, igualmente se determinó que de los parques objeto de estudio Gibara III es el más óptimo, por lo que finalmente estos modelos permitirán el desarrollo de proyectos para poder direccionar los recursos humanos, financieros y materiales, en mejores dirección.



## SUMMARY

In this research the English Multicriteria Decision Support Methods (MCDM) and Geographic Information Systems (GIS) were combined for the selection of optimal areas to install and generalize Wind Power Projects in the Eastern North of Cuba. Achieving a conceptual and mathematical model, it was also determined that of the wind farms under study Gibara III is the most optimal, so finally these models will allow the development of projects to be able to direct human, financial and material resources in the best direction.



## Índice

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO I .....	8
Estado de arte de los proyectos eólicos y las técnicas de selección multicriterio y SIG. ....	8
1.1 Fuentes energéticas a nivel mundial.....	8
1.2 La energía eléctrica en Cuba .....	10
1.3 Sostenibilidad energética .....	10
1.4 Fuentes renovables de energía en el mundo y en Cuba.....	11
1.5 El potencial eólico de Cuba.....	14
1.6 Aplicaciones de los SIG .....	21
1.7 Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica.....	22
Conclusiones del capítulo:.....	25
CAPITULO II .....	27
Metodología a aplicar la Selección de las zonas óptima para la instalación de proyectos eólico en el Norte Oriental de Holguín.....	27
2.1 Procedimiento para implementar el Método AHP:.....	27
2.2 Procedimiento para implementar el Método GIS. ....	29
Conclusiones del capítulo:.....	33
CAPITULO III .....	34
Implementación de la metodología propuesta. Caso de estudio.....	34
3.1 Resultado de la aplicación del método Análisis Jerárquico de Procesos. ....	36
3.2 Resultado de la aplicación del método Sistema de Información Geográfica.....	39
3.2.1 Recolección de datos .....	41
3.2.2 Realización de Buffers.....	44
3.2.3 Rasterización de Buffers. ....	48
3.2.4 Suma de los raster de cada variable.....	49
3.2.5 Suma de todos los rasters. ....	51
3.2.5 Vectorización. ....	53
3.3 Resultado .....	55
CONCLUSIONES .....	57



RECOMENDACIONES .....	58
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	59
ANEXOS.....	62



## INTRODUCCIÓN

Hoy por hoy la generación eléctrica en el mundo y en Cuba presenta serios desafíos a vencer, uno de ellos es la asequibilidad de las tecnologías, debido en primer lugar a los altos costos nivelados de la energía, incluyendo los costos de mantenimiento y de adquisición o gastos de inversiones, otros de los desafíos es la sostenibilidad de estos proyectos para ellos debe garantizar baja emisiones, planteándose aquí sustituir las plantas de carbón y petróleo y migrar a tecnologías de baja emisión de carbono acompañada de una alta eficiencia, no menos importante debe ser la flexibilidad en la generación, para poder ser inyectada por las fuentes renovables de energías (FRE), y por último todo esto debe garantizar la seguridad energética, cumpliendo el principio de ser fiables en el suministro, por lo que resumiendo se debe garantizar la asequibilidad, eficiencia, seguridad energética y la sostenibilidad en el tiempo.

Por lo que será necesario incrementar la eficiencia en el consumo de todos los clientes que son servidos, mejorar la eficiencia en la generación eléctrica, incrementado la flexibilidad en la generación e introducir las fuentes renovables de energía garantizando no solo su disponibilidad, sino también su fiabilidad.

Según datos de (Madlener, Antunes, & Dias, 2009), (Gkeka-Serpetsidaki & Tsoutsos, 2021) tabla 1 la generación mundial de energía bruta (1000 TWh), ha tenido el siguiente comportamiento, y se espera el siguiente crecimiento en %, el carbón alto emisor de gases de efectos invernadero, ha disminuido de un 36 % en el 2018, un uno % y se espera que para el 2040, llegue hasta un 27%, la tendencia de petróleo es a seguir disminuyendo, sin embargo el gas acompañante su tendencia es muy estable, la energía nuclear ha tenido un discreto aumento del uno %, hasta el 2020, pero a raíz de todas las catástrofe asociada y sus riesgo parece que su tendencia será disminuir para el 2040 hasta un 2%, la hidroeléctrica, siendo una fuente renovable convencional, que debería crecer está disminuyendo, debido a los cambios climáticos que ha hecho que las grandes reservas y nichos de fuentes





de aguas subterránea mermadas, grandes ríos y reservas también se han visto afectados, aquí están presente otros factores, como por ejemplo el uso y abuso indiscriminados de los recursos naturales por el hombre, que ha llevado a que existan en muchas regiones zonas de sequías y en otras inundaciones desmedidas, es por tanto el resultado de cambio climático que afecta las cuencas hidrográficas trayendo consigo que estos recursos hídricos sean mermados y por tanto las grandes hidroeléctricas se afecten su funcionamiento y por ende su eficiencia, por lo que ya en estos momentos estas energías no sean tan fiables, la energía Geotérmica, o energía del interior de la tierra, igualmente también se espera un incremento para el 2040, aunque su comportamiento haya sido hasta ahora de forma lineal, igual pasará con otros recursos renovables, donde también se encuentran las energías marinas.

En cuanto a las energías eólicas y solar como se puede apreciar, su crecimiento es bastante vertiginoso, toda vez que estas energías sus costos de adquisición han bajado considerablemente, entre otras cosas debido a los adelantos científicos técnicos, lo que ha permitido que países en vía de desarrollo puedan acceder a los mercados de producción de estas tecnologías. Caso aparte es la energía eólica por ser objeto de esta investigación, si en el año 2018 y 2020 su incremento fue de un 5 y 6 %, se espera un crecimiento de un 10 % para el 2030 y un 13 % para el 2040.

*Tabla 1. Generación mundial de las fuentes renovables de energía.*

Año	Carbón	Petróleo	Gas	Nuclear	Hidroeléctrica	Eólica	Solar	Geotérmica	Otros R.R
2018	36	3	24	10	16	5	3	3	26.1
2020	35	3	24	11	16	6	3	3	27.4
2030	31	2	24	9	14	10	6	3	34.5
2040	27	1	25	8	13	13	9	4	42.3



En Cuba más del 95 % de la generación se realiza con combustibles fósiles, teniendo un papel preponderante el crudo cubano, con el 45 %, la generación con motores fuel el 18 %, en segundo lugar, luego le sigue la generación de fuel térmica y el gas acompañante con una participación del 14 %, el diésel en menos proporción con un 3% y a partir de ahí vienen las FRE, con solamente 4,5% de participación, dentro de las cuales están las Solares y Fotovoltaica, las hidráulicas, las eólicas y la biomasa.

Dada la limitada disponibilidad de recursos fósiles, la falta de aprovechamiento hidroenergéticos y de otras alternativas existentes en Cuba, el país ha trazado la estrategia de migrar a las energías alternativas, limpias y renovables. Al triunfo de la Revolución, la capacidad instalada de generación de electricidad ascendía a solo 397 mW y garantizaba el abastecimiento a solo el 56 % de la población.

En el marco regulatorio relacionado con las fuentes renovables de energía se encuentra el Decreto Ley 345 de la República de Cuba "Desarrollo de las fuentes renovables y usos eficientes de la energía", está llamado a ser la revolución energética de nuestro tiempo, para convertirnos en un país de productores y no de meros consumidores.

El 95 por ciento de la electricidad que se genera hoy en el país es a partir de los combustibles fósiles, (Arronte Cruz L, (2021) la implementación de esta política tiene un atraso del 40 por ciento, se debía tener 506 (MW) en operación, pero solo se ha llegado a 302,6 MW. No obstante, el desarrollo de este programa cuenta con no pocas fortalezas, como la existencia e implementación de la Política del Gobierno para el desarrollo de las FRE y la eficiencia energética (EE) y su marco regulatorio, y un potencial de fuentes renovables de energía suficiente y diversificada. No menos importante es la alta preparación del capital humano en esta materia y el favorable entorno para incrementar la innovación y la cooperación intersectorial.



Según reunión del Consejo Nacional de Innovación (2021), Cuba puede llegar a generar toda la electricidad que necesita con fuentes renovables de energía (FRE) sin provocar dudas, el dilema está en cuándo se alcanzará esa potencia, el CNI, planteo al respecto: «Sí se puede (hacer), se debe (hacer) y (hay que hacerlo) a corto plazo».

Más adelante sentenció en el archipiélago abunda la radiación solar para abastecer los paneles fotovoltaicos; el viento es propicio en bastantes lugares para mover sin dificultad grandes y pequeños aerogeneradores; la biomasa no escasea para alimentar bioeléctricas (incluidas calderas y turbogeneradores de ingenios azucareros), y los residuales líquidos para echar en la panza de un biodigestor sobran. Lograr el cien por ciento en la generación de electricidad a partir de las FRE es la solución estratégica a la que está abocada la Isla para lograr su soberanía en un aspecto que es transversal a todos los ámbitos económicos y sociales. (Saaty, 1980)L, (2021)

La generación eléctrica a partir de fuentes renovables de energía conlleva elementos conceptuales, estructurales, y estos están muy vinculados a la soberanía, a la economía, a lo social y a lo medioambiental, Díaz-Canel. M, (2021)

Que Cuba alcance el cien por ciento de la generación de electricidad a partir de las FRE, integrándolas a todas (aunque manteniendo en reserva capacidades de generación con combustibles fósiles) Díaz-Canel. M, (2021) El problema energético, no es un problema sin solución, pero no solo se trata de generar a partir de estas fuentes renovables; esto debe verse como un asunto integral que implica el incremento de la eficiencia energética, con la introducción de nuevas tecnologías, y también una gran conciencia de ahorro. En Cuba, agregó al concluir el encuentro con los expertos y científicos en las ciencias energéticas, existe suficiente conocimiento para enfrentar el reto de las FRE y alcanzar el cien por ciento de la producción de energía a partir de ellas.



A continuación se enumera la **situación problemática** del Sistema Electroenergético Nacional (SEN) (Ministerio Energía y Minas, 2015)

1. Alta dependencia de los combustibles fósiles para la generación de electricidad con más del 95% de la energía generada.
2. Alta dependencia de los **combustibles importados** con lo cual se genera un porcentaje importante de la energía del país.
3. **Alto costo** promedio de la energía servida al cliente.
4. **Baja eficiencia** en la generación con centrales termoeléctricas con un índice de consumo promedio de 275 g/kWh.
5. **Alta contaminación** ambiental.
6. Aunque existen zonas referenciadas para el desarrollo de proyectos eólicos, no hay evidencia de su evaluación multicriterio.

Todo esto nos lleva a formular el siguiente **problema científico**: ¿Cómo realizar una evaluación multicriterio y geográfica, para la selección de zonas óptimas de proyectos eólicos en la región oriental de Holguín .

**Objeto de estudio:** Proyectos Eólicos en el Norte Oriental de Holguín.

**Campo de acción:** Los métodos multicriterio y de información geográfica (GIS) para la evaluación y selección de zonas óptimas para la instalación de proyectos eólicos.

**Hipótesis:** Si se analizan mediante técnicas multicriterio y GIS los Proyectos Eólicos aprobados por el SEN, entonces se podrá proponer las zonas óptimas en la región oriental de Holguín.



**Objetivo General:** Seleccionar mediante la modelación multicriterio y GIS las zonas óptimas para el desarrollo de proyectos eólicos en la región oriental de Holguín, y poder direccionar los recursos humanos, financieros y materiales.

**Las tareas de investigación son:**

1. Análisis histórico lógico sobre de proyectos del SEN.
2. Identificar las variables, dimensiones y criterios fundamentales que influyen en el desempeño eficiente de los proyectos eólicos de la UNE.
3. Identificar las dimensiones de sustentabilidad y su relación con el ciclo de vida de los proyectos eólicos en las zonas aprobada por ministerios de la Industria Básica, para instalar en la provincia de Holguín.
4. Diseñar y aplicar encuestas a los expertos para la obtención de los datos que estarán presente el caso de estudio a resolver.
5. Realizar la modelación matemática, para elegir el método multicriterio a aplicar en el caso de estudio.
6. Obtener el modelo conceptual y matemático que represente el problema antes descrito.
7. Obtener los resultados de la resolución del problema antes modelado.
8. Elaborar el informe final de la investigación.

**Métodos de la investigación científica.**

Los métodos de investigación que se aplicarán durante la realización de este trabajo serán los siguientes:

Métodos empíricos.

Observación científica: Para llegar al modelo conceptual, y matemático que rijan la situación o problema propuesto



Criterio de expertos: Permitió tener en cuenta opiniones, criterios, sugerencias de otros especialistas, para la selección de la dimensión, indicadores y criterios que serán evaluados juntos a las alternativas en cuestión.

Propuesta del Método Híbridos Análisis Jerárquicos de Procesos sistémico (AHP), a través del software Expert Choice y los Sistema de Información Geográfica (GIS)

## Teóricos

**Histórico-Lógico:** permite identificar los antecedentes, estado actual y tendencias de la matriz energética en análisis, así como las tecnologías o proyectos eólicos renovables aprobado para el norte oriental de Cuba.

**Análisis y síntesis de los sistemas de ingeniería:** permite integrar de manera coherente diferentes métodos y procedimientos, obteniendo los parámetros para la modelación conceptual del problema.

**Resultados esperados:** Identificar mediante la modelación multicriterio AHP y SIG los proyectos eólicos con zonas óptimas para su instalación en la provincia de Holguín, Cuba.

La **tesis está estructurada** en una introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.



## CAPITULO I

Estado de arte de los proyectos eólicos y las técnicas de selección multicriterio y SIG.

La energía primaria es la que se encuentra disponible en la naturaleza antes de ser transformada, como la energía contenida en combustibles fósiles, la solar, la eólica, la geotérmica, la hidráulica y la biomasa. La energía secundaria es la que el hombre obtiene a partir de la transformación de la energía primaria, para un consumo específico: gasolina, electricidad, calor, gasoil, fueloil, entre otras (Altomonte, Coviello, & Lutz, 2003). Es importante señalar que la electricidad es una fuente de energía secundaria y solo es parte de una problemática energética más general, los combustibles fósiles como fuente de energía primaria se utilizan para producir calor, electricidad y en el transporte. En la tabla 1.1 (IEA, 2017), se aprecia que las fuentes de energía fósil (carbón, gas, petróleo) comprenden 85.1 % de las energías primarias y 64.5 % de la electricidad; la mayor parte de la generación eléctrica mundial se basa en carbón y gas natural. Además del carbón, también la nuclear, la hidroenergía y otras fuentes renovables se utilizan en un porcentaje mayor para la generación de electricidad, mientras que el petróleo, en todas sus formas (crudo, fuel, gasolina, diésel), se emplea muy poco (menos de 4 %) y cada vez menos, para la generación de electricidad, sino como combustible para el transporte.

### 1.1 Fuentes energéticas a nivel mundial

El consumo eléctrico mundial, tabla 2 se caracteriza por grandes diferencias entre los países; solo Estados Unidos, desde hace mucho tiempo, consume alrededor de 25 % del total mundial. Los países desarrollados consumen ochenta veces más que los subdesarrollados (Algora, 2017). Cerca de una cuarta parte de la población mundial continúa consumiendo unas tres cuartas partes de la energía eléctrica. El consumo energético en los países subdesarrollados, a pesar del aumento experimentado, pasó de 17 % en 1973 a 23 % en 1990, del total mundial (Darkazalli G et al, 1991) y continúa teniendo una diferencia abismal con los países



desarrollados; no existe la capacidad de reemplazar a corto plazo las fuentes de energías fósiles (de Anguita d'Huart et al., 2006).

Tabla 2. *Porcentaje de participación por fuentes en energías primarias y de electricidad en 2017, fuente IEA, 2018.*

Fuente	Primaria	Eléctrica
Carbón	27.6 %	38 %
Gas natural	23.3 %	23.1 %
Petróleo	34.2 %	3.4 %
Nuclear	4.4 %	10.3 %
Hidroenergía	6.8 %	15.9 %
Resto de las renovables	3.6 %	8.4 %

El tipo de energía que se consume lo continúan dictando tecnológicamente los países desarrollados.

Cuba importa gran parte del combustible para la generación de electricidad (ONEI, 2016); es uno de los países del mundo que produce la mayor parte de su generación eléctrica quemando combustibles fósiles, con mayor proporción de petróleo crudo (Fig. 1).

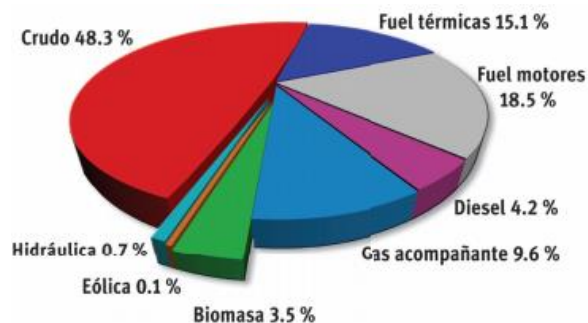


Figura 1. *Estructura de la generación eléctrica en Cuba en 2013. Fuente: MINEM, mayo 2015.*

La nación cubana no posee soberanía energética (Pelaéz O, 2011). La electricidad está altamente subvencionada, con grandes erogaciones en moneda libremente convertible (MLC).





## 1.2 La energía eléctrica en Cuba

En el caso de Cuba, la carga base no ha sido ni por carbón ni nuclear, sino por petróleo crudo más gas y fuel, fundamentalmente ((Marcelino et al., 2019) et al, 1991). Cuba ha sido un gran importador de petróleo. Antes de 1958 consumía mucho menos, época en la que por una tonelada de azúcar se adquirían 7 toneladas de petróleo. En 1958, la generación eléctrica anual era de 1760 GWh, en 1965 de 2592 GWh, en 1970 de 3609 GWh y en 1975 de 5412 GWh (Cabrasas Ruíz, 2016). El consumo eléctrico por sectores era: industrial 36 %, residencial 29.5 %, comercial 28.5 %, agropecuario 4.5 % y alumbrado 1.9 %. Mucho después, en los años noventa, en el mercado mundial, por una tonelada de azúcar se adquiría algo más de 1.4 toneladas de petróleo. La producción nacional de petróleo aumentó posteriormente, lo que ha sido de gran ayuda; pero todavía no alcanza, ya que es pesado y con alto contenido de azufre, que se quema en gran parte para generar electricidad. Para Cuba satisfacer sus necesidades de energía, importaba alrededor de 13 millones de toneladas de crudo al año. Hoy en el país existen industrias de refinación, pero una parte no se refina por ser petróleo pesado. Se realizan trabajos de prospección que, de encontrarse, resolvería un tremendo problema; pero sin olvidar que se acabará en algún momento. Esto se debe tener muy en cuenta en la definición de una estrategia energética del país a más largo plazo. En la generación hidroeléctrica, el país está haciendo un esfuerzo para explotarlo al máximo, pero realmente el potencial es de unos pocos cientos de megawatt.

## 1.3 Sostenibilidad energética

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, establece una visión transformadora hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental de los 193 Estados Miembros que la suscribieron y será la guía de referencia para el trabajo de la institución en pos de esta visión durante los próximos 15 años. (Avila-Flores & Medellin, 2004) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe 2016. En su objetivo número 7, plantea: Garantizar el



acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos, dentro de sus metas igualmente se plantea energía asequibles para todos, aumentar las energías renovables, la eficiencia energética y promover las inversiones en las infraestructuras energéticas, por otro lado la utilización de las fuentes renovables de energías constituyen un lineamiento de la política energética de Cuba, por tanto el desarrollo de esta fuentes es de vital importancia para el país.

#### 1.4 Fuentes renovables de energía en el mundo y en Cuba

Algunos autores consideran (Debrayan Bravo Hidalgo, 2015) que el empleo y perfeccionamiento de la utilización de las fuentes renovables de energía podría ser considerado como el inicio de una tercera "Revolución Industrial" la transición a una economía de baja emisión de dióxido de carbono permite dar un giro trascendental en la lucha contra el cambio climático, mejorar la seguridad energética, y reducir significativamente las tensiones geopolíticas del presente, por lo que la utilización de la energía solar y del viento están llamada a ser las únicas alternativas viables o posibles a las exigencias energética del país, no solo de cara al desarrollo sostenible, sino como alternativa de garantía para la independencia energética.

Entre todas las FRE, la eólica y la fotovoltaica son las que mundial mente se han desarrollado más rápido, con el pronóstico de que puedan aportar más al cambio paulatino y futuro de la matriz energética, para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Para la generación de electricidad las más prometedoras para Cuba en la actualidad son la biomasa cañera, la eólica y la fotovoltaica (Stolik, 2019).

##### **Biomasa**

La biomasa se refiere a cualquier material de origen biológico (excluyendo los fósiles) que contiene energía química almacenada, originalmente aportada por el Sol y que después es convertida en energía secundaria (calor, electricidad, combustible), frecuentemente denominadas bioenergías derivadas de las biomásas en forma sólida, líquida o gaseosa.



El origen vegetal o animal de la biomasa se clasifica en:

- Natural: se produce en la naturaleza sin intervención humana.
- Residual: la que genera cualquier actividad humana (agrícolas, ganaderas, basuras y aguas residuales).
- Producida (cultivos energéticos): que produce calor o se transforma en combustible (IEA, 2017).

La utilización con fines energéticos de la biomasa requiere de su adecuación para utilizarla en los sistemas convencionales como una fuente de energía renovable. Los desperdicios de las industrias y la tala legal de árboles se pueden utilizar como combustible. Son muy económicos de mantener, de generar energía y, al mismo tiempo, deshacerse de desperdicios que se podrían convertir en basura. La biomasa agrícola se forma por acción de la energía solar debido al proceso de la fotosíntesis, que almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada puede, después convertirse en calor, electricidad o combustibles de origen vegetal, liberar de nuevo el dióxido de carbono almacenado. La biomasa es renovable; ¿pero es realmente una energía limpia?, alrededor de esta pregunta hay una polémica, la quema de biomasa crea también gases de carbono (humos negros) que también son muy contaminantes. No obstante, se plantea a favor que emiten mucho menos carbono que los combustibles fósiles y que se compensa en una especie de ciclo cerrado con la absorción de CO<sub>2</sub> durante el crecimiento.

### **Hidroeléctrica**

La hidroeléctrica actualmente tributa alrededor de 17 % a la generación mundial de electricidad, el resto de las FRE lo hace para 7 %, la más grandes hidroeléctricas del mundo esta las Tres Gargantas, en China, con 22 GW de potencia, le siguen otras dos gigantes de América del Sur, Itaipú con 14 GW y el Guri con algo más de 10 GW. En Cuba se hace un gran esfuerzo para generar electricidad por esta vía,



pero lamentablemente es poco el potencial del país al respecto; sin embargo se puede utilizar también para cubrir huecos de generación por intermitencias de otras FRE como la fotovoltaica y la eólica.

## **Eólica**

El viento ha sido utilizado por el hombre desde las primeras civilizaciones, tanto como las velas en las primeras embarcaciones marítimas o los molinos de bombeo de agua y medievales de trigo. Los aerogeneradores actuales se comenzaron a desarrollar a comienzos de la década de los ochenta del siglo pasado. Con el tiempo se fueron perfeccionando, disminuyendo el costo del kilowatt hora generado. Hacia el año 2000, el costo había disminuido unas cinco veces con respecto al año 1980. También se fueron incrementando en potencia de generación eléctrica; primero en medianas de 100 kW a 300 kW, posteriormente mayores de 1 MW. Las primeras experiencias internacionales con aerogeneradores de varios megawatt tuvieron sus tropiezos (4); pero después se obtuvieron buenos resultados en lugares de viento estable con velocidades mayores de 25 km/horas. Los aerogeneradores deben continuar abaratando su producción en economía de escala y su capacidad de producir 8 MW por unidad con el aumento de potencias mayores. Hoy el récord en potencia es 9.5 MW de la empresa Vestas (compañía danesa dedicada a la fabricación, venta, instalación y mantenimiento de aerogeneradores).

La eólica comenzó su fuerte desarrollo en la década de los noventa y ha continuado posteriormente. El aumento de instalaciones eólicas mundiales pasó de 6.1 GW en 1996 a cerca de 540 GW en 2017, o sea, aumentó noventa veces en los últimos 21 años, velocidad de crecimiento solo superado por la fotovoltaica, que pasó de unos 0.31GW en 1996 a 400 GW fotovoltaicos en 2017, es decir, aumentó en alrededor de 1290 veces durante esos 21 años (Fig. 2)



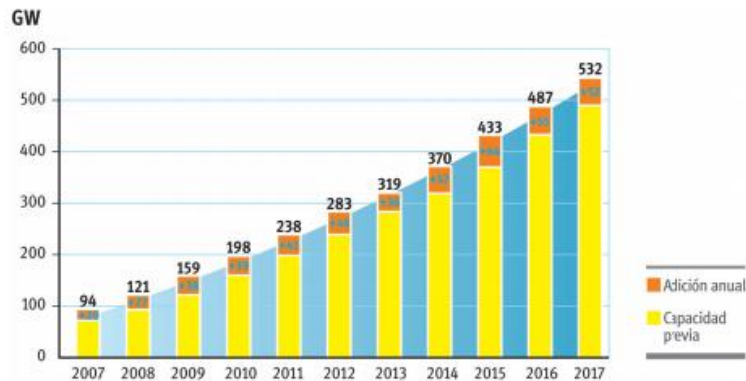


Figura 2. Instalaciones acumuladas eólicas 2007-2017.  
Fuente: REN 21, GSR, Renovables 2018.

El por ciento correspondiente de los productores de turbinas eólicas en 2017 son: Vestas (Dinamarca) 16.7 %; Siemens–Gamesa (Alemania-España) 16.6 %; Goldwind (China) 10.5 %; GE (EE.UU.) 7.6 %; Enercon (Alemania) 6.6 %; Envision (China) 6 %; Nordex Acciona (Alemania) 5.2 %; Mingyang (China) 4.7 %; Senvion (Alemania) 3.7 %; Suzlon (India) 2.6 %; resto del mundo 3.4 %.

### 1.5 El potencial eólico de Cuba

La determinación del potencial eólico de Cuba ha sido un proceso que comenzó con el estudio del potencial eólico teórico del archipiélago cubano; se estimó en el mapa eólico de 2006 elaborado por el Instituto de Meteorología de Cuba conjuntamente con otras instituciones; se procesaron datos de 49 estaciones de la Red Meteorológica Nacional mediante el software del modelo de microescala WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), elaborado por el Laboratorio Nacional Risoe, de Dinamarca. Este modelo es usado internacionalmente; la extrapolación vertical de la densidad de potencia y la velocidad promedio del viento a 50 m de altura se representó en mapas por provincias y de toda la isla, estimándose un potencial total entre 4000 y 12 000 MW, donde se incluyeron zonas costeras, interiores, montañosas y en los cayos alrededor de la isla de Cuba (2019)

Se identificaron 23 zonas geográficas con potenciales eólicos excelente (500-600 W/m<sup>2</sup>, 6.2-6.8 m/s) y excepcional (600-800 W/m<sup>2</sup>, 6.8-7.5 m/s), ubicadas en zonas



costeras y montañosas, especialmente en la costa norte de la provincia habanera, en la costa norte de las provincias de Camagüey, Holguín y Guantánamo, y en la costa sur de las provincias de Granma y Guantánamo, con una pequeña área en Pinar del Río. El resto del potencial se concentra en las zonas montañosas de las provincias orientales y en Pinar del Río. A partir de la determinación de la extensión en kilómetros cuadrados de las áreas consideradas entre moderadas y excelentes, se determinó el potencial teórico eólico de Cuba, que fluctúa entre 5000 y 14 000 MW.

En noviembre de 2005 se inició una campaña de mediciones intensivas del viento en 32 zonas de Cuba previamente seleccionadas. En la provincia de Pinar del Río: Cabo de San Antonio, Arroyo de Mantua y Cajalbana; en la Isla de la Juventud: Los Canarreos; en Artemisa: Bauta-Mariel; en Mayabeque: Boca de Jaruco; en Matanzas: oeste de la ciudad de Matanzas; en Villa Clara: Corralillo y Sagua la Grande; en Ciego de Ávila: Turiguanó, Cunagua y Punta Alegre; en Camagüey: Sola, el Rubí-San Miguel, Vial Sur; en Las Tunas: de Puerto Padre a Manatí y de Herradura a Chaparra; en Holguín: Gibara, Freyre, Punta Vino, Cabo Lucrecia, Punta Mulas, Frank País, Moa, Cupey, Nipe, Pinares de Mayarí; Guantánamo: Punta de Maisí, Maqueyera, Bate-Bate-Tortuguilla y San Antonio del Sur y en la provincia de Granma en la Llanura del Cauto. En total se instalaron 82 torres anemométricas, cada una con tres niveles de medición, 10, 30 y 50 m de altura equipados con sensores Thies de primera clase. La magnitud de la velocidad se midió en los tres niveles, y la dirección en la mayoría de los casos en un solo nivel (48,5 m). Todos los mástiles de medición estaban equipados con *data-logger* o sistemas de adquisición de datos que registraba las mediciones cada 10 min. Estaban ubicadas 37 estaciones a menos de 3 km de la costa, y 54 se localizaron en la costa norte. En la costa sur del oriente del país se instalaron siete estaciones de medición. Esta prospección extensiva permitió estimar con mayor precisión el recurso técnicamente posible que se debía explotar en zonas próximas a la costa norte, con base en mediciones directas de frecuencias de velocidades y rumbos del



viento alrededor de las estaciones de prospección, simulando el rendimiento de parques eólicos con varios modelos de aerogeneradores y considerando:

- Factores físico-geográficos relevantes, como la rugosidad superficial, obstáculos naturales, características ingeniero-geológicas regionales y locales, frecuencia e intensidad pronosticada de eventos meteorológicos extremos y otros.
- Restricciones de uso del terreno (económicas, sociales e interés de la defensa).
- Infraestructuras existentes, capacidades para soportar los desarrollos eólicos previstos, posibilidades y exigencias para su desarrollo.
- Escenarios de evolución de los precios de combustibles fósiles a desplazar por la energía eólica.

Se confirmó que las condiciones integralmente más ventajosas para emplazar parques eólicos se localizan en 21 zonas próximas a la costa norte.

- a) Trece zonas aptas para instalar a corto o mediano plazos hasta 600 MW eólicos (incluyendo los parques que ya funcionan), próximas a la costa norte de las regiones oriental y central, desde Banes (Holguín) hasta la Isla de Turiguanó (Ciego de Ávila), cuyo desarrollo hasta 2022 se adecua al pronóstico de incremento de demandas y desarrollo de capacidades de generación y transmisión del SEN, a las infraestructuras existentes y posibilidades de rápida evolución, además de factores climáticos ventajosos, como la relativamente baja incidencia de huracanes de gran intensidad.
- b) Seis zonas aptas para instalar a mediano y largo plazos hasta 400 MW eólicos adicionales, también próximas a la costa norte de las regiones oriental y central, y que incluyen zonas en Punta de Maisí (Guantánamo), Manatí (Las Tunas), Punta de Ganado (Camagüey) y Cayo Coco Cayo Romano (Ciego de Ávila), cuyas complejidades de infraestructuras u otras limitaciones deberán analizarse en detalles.



- c) Dos zonas aptas para instalar a mediano y largo plazos hasta 100 MW eólicos adicionales, próximas a la costa norte en el municipio de Santa Cruz del Norte, provincia de Mayabeque, en la región occidental, donde se obtendrían rendimientos inferiores, pero de interés usando aerogeneradores de clase especial, que por su diseño resistan huracanes de gran intensidad y puedan alcanzar una generación anual relativamente alta con vientos de baja a media velocidad. Esos emplazamientos totalizan un potencial técnico de 1100 MW, y son los de mejores condiciones evaluadas hasta hoy, pero puede haber otros aptos para su explotación futura. Este potencial estimado se basó en asumir el uso de aerogeneradores con potencia unitaria de 1,5 MW y altura de buje hasta 70 m sobre el terreno, y en los resultados de la prospección eólica preliminar o extensiva.

Más recientemente se modelaron en algunas zonas aerogeneradores con potencia unitaria hasta 3 MW y altura de buje hasta 90 m a partir de 2015-2016, lo que mostró la conveniencia de aumentar la potencia de los aerogeneradores a instalar en los próximos años alcanzándose mayores valores del potencial eólico considerando que es la tendencia que deberá prevalecer a corto-mediano plazo, por lo que al usar aerogeneradores de mayor potencia unitaria y con mayor generación por unidad de potencia instalada aumentaría el potencial estimado, la generación neta anual y el combustible a desplazar en iguales extensiones de terreno. También algunas zonas en las regiones central y occidental en que hoy se estiman bajas generación y rentabilidad pudieran ser interesantes en un escenario futuro de muy altos precios de los combustibles fósiles a desplazar. Por diferentes factores, tales como la alta turbulencia y lo alejado de las redes eléctricas, no es aconsejable considerar el potencial eólico en las montañas, al igual que el potencial eólico en los mares adyacentes por cuanto en estos momentos prevalecen instalaciones hoteleras para el desarrollo turístico y además de la gran profundidad del mar en las zonas de interés eólico.





El mapa eólico de cualquier región o país es necesario actualizarlo cada cierto tiempo por cuanto los modelos físico-matemáticos se van también mejorando y actualizándose y las turbinas eólicas también van en aumento en cuanto a tamaño y potencia unitaria. También las condiciones meteorológicas varían. Así como se planteó anteriormente, el Instituto de Meteorología completó otro mapa eólico en el 2013 empleando el modelo de reanálisis.

Todo este proceso de evaluación del potencial eólico cubano ha permitido establecer el Programa Eólico Cubano, cuyo objetivo es aprovechar a gran escala la energía del viento en las zonas de mejor recurso del país, instalando 14 parques eólicos hasta 2030 para alcanzar una potencia de 656 MW, que contribuirán a cambiar la estructura actual de generación de electricidad del país para reducir su costo, las erogaciones para comprar combustibles fósiles y las emisiones de gases y otros contaminantes. Al completarse la instalación de los 656 MW del programa, la energía eólica en Cuba pudiera aportar anualmente más de 1068 GWh de energía limpia y evitar el consumo de más de 1,67 millones de toneladas de combustibles fósiles.

El viento y su velocidad no siempre son los factores determinantes para la ubicación de un proyecto eólico, se citan algunas experiencias negativas relacionadas más bien por deficientes estudios de localización y de impacto ambiental y no por las características propias de la generación eólica. También se expresa que el cuestionamiento se ha basado en que no se ha tomado en cuenta otros potenciales usos integrales del espacio, llegándose a la conclusión que otros factores locacionales deben ser evaluados, que aunque subordinados al viento como factor determinante tienen cierta influencia en el desarrollo racional e integral de los parques eólicos y como tal son considerados en los estudios de localización.

Dentro de los factores determinantes están en primer lugar el mapa eólico de Cuba, donde se tienen en cuenta las velocidades y dirección del viento, otros de los



factores son los datos históricos de huracanes, surgencias del mar, niveles de corrosión, esto es algo a tener en cuenta por las afectaciones en los parques experimentales de Gibara, así como las condiciones sísmica y las descargas eléctricas, y no menos importantes las posibles afectaciones ambientales al entorno.

El desarrollo del proyecto de un parque eólico conectado a la red se organiza en cinco fases:

1. Identificación y selección del sitio del proyecto: Esta fase comienza con investigaciones de escritorio donde se observan los datos del viento existente, cartas topográficas e imágenes de satélite. Se continúa con el trabajo de campo, donde se visitan los sitios previamente definidos, observando la rugosidad, presencia de construcciones, obstáculos para seleccionar finalmente el sitio de proyecto.
2. Medición del viento y evaluación del recurso eólico: La medición del viento comienza cuando se concluye la primera fase. Este trabajo se inicia con la selección del sistema de medición (anemómetros, sensores y data logger), torre e instalación. Continúa con una campaña de medición de un año.
3. Microlocalización y estimación de la generación de energía: En esta fase se seleccionan los modelos de turbinas que serán empleadas y las configuraciones del parque en proyecto (micrositing o microlocalización). Se realiza entonces la estimación de la generación de energía. Al final de esta fase se tienen los escenarios de producción de energía del proyecto.
4. Análisis económico-financiero del parque eólico: Se presentan los costos de instalación del parque eólico, los costos de operación y mantenimiento y un análisis de viabilidad de la inversión de la instalación eólica, indicando la tasa de rentabilidad para cada modelo de turbina determinado en la fase 3.
5. Construcción y explotación del parque eólico:



En el trabajo ((Ribeiro Muhongo, García, Arzola Ruiz, & Oliva Merencio, 2018); (Ribeiro Muhongo et al., 2018)) Selección óptima del equipamiento energético para territorios aislados, en su recomendaciones, se plantea definir la ubicación física del equipamiento, las distancias a recorrer y las líneas de transmisión de la energía dentro del territorio y otros factores complementarios, por lo que en este trabajo se buscará a través de los sistema de información geográfica, encontrar las mejores opciones de zonas para la instalación de Proyectos Eólicos, en el norte de Holguín.

Los SIG son sistemas informáticos que permiten: administrar, actualizar, visualizar y manejar la información geográfica. De acuerdo a (Sastre, 2010) un Sistema de Información Geográfica es una integración organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñada para capturar, almacenar, manejar, analizar, modelar y representar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. Según (Pinedo Pascua, 2010) un SIG es una tecnología de tratamiento de información geográfica formada por equipos electrónicos (hardware) programados adecuadamente (software) que permiten manejar una serie de datos espaciales (información geográfica) y realizar análisis complejos con estos siguiendo los criterios impuestos por el equipo humano (personal) que busca alcanzar un objetivo concreto.

El conjunto de un SIG necesita los métodos a utilizarse para completar las tareas y los procedimientos. Para la creación de mapas se puede utilizar un formato raster o un formato vector; la fuente de obtención de los mapas puede ser: escaneando imágenes, comprando los mapas, a través de GPS, utilizando teledetección o utilizando web servicio; pero es importante definir los métodos que se utilizan en cada proceso.

Por lo que existen solo dos formatos para representar y sistematizar los SIG en una base de datos geográfica a saber, estos formatos son: el modelo vector y el modelo raster. (Forero-Núñez, Alberto-Valencia, & Sierra-Vargas, 2016); {PÉREZ, 2012 #2679})



Modelo raster: el modelo raster divide en una red regular de unidades diferenciadas, de igual tamaño y forma, denominadas píxeles o celdas.

Modelo vectorial: Las entidades con que se clasifica el mundo real se representan mediante vectores. Para ello se utilizan las denominadas primitivas geométricas de dibujo (puntos, líneas, polígonos), referenciadas a un sistema de coordenadas.

## 1.6 Aplicaciones de los SIG

Los SIG han alcanzado un gran crecimiento debido a su amplio potencial para agrupar y presentar gran cantidad de información geográfica y por ayudar a resolver problemas relacionados con varias áreas. A continuación, se muestra algunos ejemplos de aplicaciones de los SIG:

- Recursos naturales: Los SIG apoyan con sus funcionalidades a determinar las zonas protegidas, los sitios donde existen especies en peligro de extinción, la ubicación de los bosques que más han sufrido la tala de árboles, los lugares más contaminados entre otros.
- Agricultura: Los SIG pueden ser utilizados en la agricultura para visualizar las plantas enfermas, las zonas más productivas, los cultivos de la plantación, las nuevas plantaciones, los lugares que han sido fertilizados, los sitios que necesitan que se realice una labor o que se pase una maquinaria.

Por otro lado, los métodos de toma de decisión multicriterio (MDMC) están basados en criterios explícitos para evaluar varias alternativas, se utiliza cuando un grupo de personas debe tomar una decisión importante en la que concurren distintos y complejos aspectos, especialmente en las etapas de selección y evaluación de alternativas. En los modelos multicriterio el decisor podrá estimar las posibles implicaciones que puede tomar cada curso de acción, de modo que se pueda obtener una mejor comprensión de las vinculaciones entre sus acciones y sus objetivos.



A continuación, se presentan los estudios realizados donde se han aplicado las metodologías mencionadas (SIG y MDMC) por separado y finalmente se presenta la revisión bibliográfica de cómo ambas han sido fusionadas y usadas dentro del ámbito de las energías renovables. En este ámbito sobresalen los estudios para la localización de emplazamientos óptimos para parques eólicos, evaluación de la biomasa o electrificación a partir de energía solar fotovoltaica.

(Silva, Domínguez, Gómez, Olguín, & Durán, 2019)) Aplicó el modelo IntiGIS para definir la tecnología más conveniente para cubrir las necesidades de electrificación de la Isla Zapara. (Bravo & JAVIER, 2017), Realizaron un estudio en el que el objetivo era desarrollar un modelo geográfico que evalúe la posibilidad de generar energía eléctrica en entornos urbanos, delimitando zonas con las mejores condiciones para instalar sistemas fotovoltaicos. Otro estudio fue realizado por (Bravo & JAVIER, 2017) el objetivo principal de esta investigación fue analizar el papel de los sistemas de información geográfica en la integración de las energías renovables en el sistema energético y territorial. (Bravo & JAVIER, 2017), Pinedo Pascua, & Augusto González, 2008).

### 1.7 Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica

(A. Bennui, Rattanamanee, Puetpaiboon, Phukpattaranont, & Chetpattananondh, 2007; P. Bennui, 2007) aplicaron las técnica GIS y AHP en Tailandia con el objetivo de evaluar el potencial eólico, teniendo en cuenta dimensiones económicas, sociales y ambientales, teniendo como resultado las zonas óptima para el desarrollo de turbinas de vientos; (Ramírez-Rosado et al., 2008), igualmente con GIS y AHP, en la Rioja España, con iguales indicadores de sostenibilidad, demostraron que solo el 1,4 % del área de estudio recibe el mayor puntaje para los parques eólicos; Georgiou, Polatidis & Haralambopoulos, 2012 (Georgiou, Polatidis, & Haralambopoulos, 2012) con los métodos GIS-AHP estudiaron el potencial eólico es el adecuado para las plantas eólicas; (Lahdelma, Salminen, & Hokkanen, 2000; Latinopoulos & Kechagia, 2015) con GIS-AHP, en Unidad regional de Kozani, estudian el potencial económico eólico y solar, con las dimensiones sociales y



ambientales, demostrando que el área en estudio es más idónea para las energías solar, que para la eólica y finalmente (Watson & Hudson, 2015) en el centro sur de Inglaterra, Reino Unido; (Silva et al., 2019), plantea que las energías renovables están muy vinculadas a temas como la descentralización energética, la electrificación rural, esta dependencia geográfica hace que los SIG puedan jugar un papel muy importante en la localización de emplazamientos, la planificación regional, la evaluación de impactos, los análisis socioeconómicos, los análisis multicriterio, etc.

Por lo que las energías renovables disponen de unas especiales cualidades geográficas para su tratamiento con SIG, la potencia de estas herramientas se manifiesta netamente en la incorporación del análisis geográfico a la planificación estratégica de nuevas instalaciones y en la simulación de escenarios de oferta demanda con diferentes posibilidades tecnológicas de satisfacción

Las técnicas de evaluación multicriterio (EMC) han sido aplicadas en diferentes procesos de planificación y a diferentes escalas: la localización de rellenos sanitarios (Mena Frau, Gajardo Valenzuela, & Ormazábal Rojas, 2006) la ubicación del nuevo aeropuerto de la ciudad de México (Bojórquez-Tapia, Sánchez-Colon, & Florez, 2005), la planificación y gestión ambiental (Lahdelma et al., 2000), la clasificación de cuencas hidrográficas del (Arias, 2017) de acuerdo a peligros hidrogeológicos (Novillo & Sarandón, 2002), la ordenación y conservación de los recursos naturales para la determinación de futuros espacios protegidos en Madrid (Maldonado, 2012), la planificación de usos de la tierra en áreas costeras considerando criterios sociales, ambientales y económicos bajo diferentes escenarios (Pourebrahim, Hadipour, & Mokhtar, 2011). Para buscar soluciones óptimas a problemas de asignación de usos de la tierra con objetivos múltiples, algunos autores exploraron y demostraron la utilidad de diferentes herramientas y enfoques. (Sánchez Lozano, García-Cascales, & Lamata, 2017) Utilizaron técnicas de optimización multiobjetivo. Otros autores incorporaron algoritmos genéticos (AG, (Kaim, Cord, & Volk, 2018).



Desde un punto de vista metodológico, la utilización de técnicas de EMC basadas en SIG, han sido particularmente eficientes para la asignación óptima de usos de la tierra (S.-M. Chen & Tan, 1994) Sin embargo, las técnicas EMC basadas en SIG son procesos multidisciplinarios y de varias etapas y que poseen por lo tanto muchas fuentes de incertidumbre: (Cáceres, Delgado, & Rocha, 2011) la selección de criterios, la precisión de los datos de entrada, los métodos de estandarización, los pesos o ponderaciones de los criterios y los métodos de agregación (S.-J. Chen & Hwang, 2012).

El análisis de incertidumbre (AI) cuantifica la variabilidad de los resultados dada la incertidumbre de las entradas del modelo, mientras que el análisis de sensibilidad (AS) subdivide esta variabilidad y la adjudica a la incertidumbre de las entradas (Feizizadeh, Jankowski, & Blaschke, 2014). Conceptualmente los análisis de sensibilidad e incertidumbre representan dos enfoques complementarios para cuantificar el efecto de las distintas fuentes de incertidumbre en los resultados del modelo (Sánchez Lozano, García-Cascales, & Lamata, 2017). Los análisis de incertidumbre y sensibilidad son fundamentales para mejorar la robustez y credibilidad de los resultados (Plata-Rocha, Gómez-Delgado, & Bosque-Sendra, 2011).

Por otro lado resultan de utilidad para la validación y la calibración de los modelos de decisión multicriterio (Delgado y Bosque Sendra, 2004; Zoras et al.

Para nuestro estudio, tomando como referencia los trabajos de (Baban & Parry, 2001), aplicado a 60 agencias públicas y 12 empresas privadas del sector de la energía eólica en el Reino Unido, las siguientes restricciones:

- Zonas óptimas <10 km de la red eléctricas.
- Evitar cresta de alta colina.
- Pendiente < 10%
- Velocidades de vientos mayores de 5 m/s.
- 10 km hasta la carretera.



- 10 km hasta la red eléctricas.
- 400 metros hasta los acuíferos.
- 1km del área de valor ecológico o de zona de especial interés científico.
- Suelo de grado 1 o 2

Por su parte otros autores, igualmente restringe el problema a las siguientes consideraciones:

- Incompatibilidad en el uso del suelo, espacio protegidos, o con alto valor ambiental.
- Zonas situadas a menos de 300 metros de un núcleo urbano o zona residencial, para minimizar el impacto visual y acústico.
- Zona situada a menos de 100 metros de una masa forestal, para evitar las turbulencias.
- Zonas con restricciones aeronáuticas, teniendo en cuenta la seguridad aérea, interferencia radioeléctrica, seguridad civil y militar.

Por todo lo antes expuesto se propone la combinación de los métodos AHP y GIS para la selección de las mejores zonas para la instalación de los futuros parques eólicos aprobados por la SEN, teniendo en cuenta los siguientes criterios y restricciones: Distancia Puertos, Distancia Vías, distancia núcleo poblacional, Distancia a redes eléctricas y como criterio más importante a tener en cuenta la velocidad de viento del área en estudio.

#### Conclusiones del capítulo:

1. Dentro de la diversidad de fuentes renovable de energía que existen, las energías solares fotovoltaicas y eólicas son las más factibles de aplicar en el entorno cubano, específicamente en el norte oriental de Holguín, dada el potencial existente en el territorio.
2. La combinación del método de Procesos Jerárquicos con los Sistema de Información Geográfica, es una buena propuesta para el estudio de las zonas





óptima para la instalación de futuros parques eólicos en el norte oriental de Holguín.

3. Los criterios y restricciones propuestas pudieran ayudar a la obtención no solo de un modelo conceptual, sino a la modelación matemática para la solución del problema en cuestión.



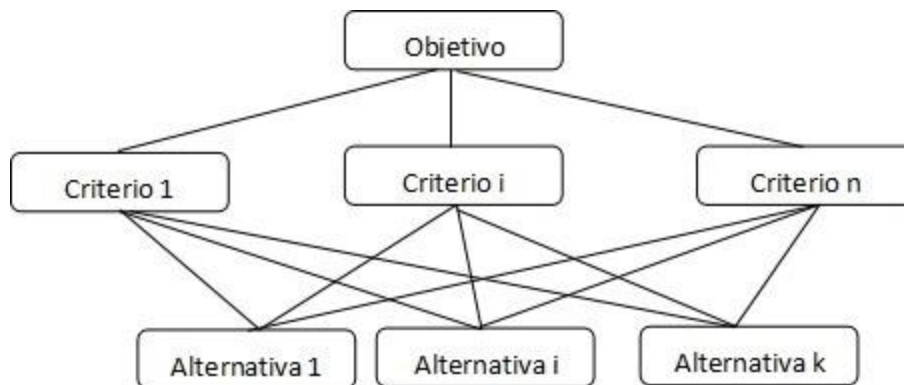
## CAPITULO II

Metodología a aplicar la Selección de las zonas óptima para la instalación de proyectos eólico en el Norte Oriental de Holguín.

La propuesta metodológica aplicar se basa primeramente en la aplicación del método AHP, para encontrar los pesos de cada criterio o restricción con vista a su evaluación dentro del sistema de información geográfica.

### 2.1 Procedimiento para implementar el Método AHP:

**Paso 1. Modelación de la estructura jerárquica, adoptando la siguiente forma, figura 3.**



*Figura 3. Modelo Jerárquico para el análisis, fuente Saaty, 1980.*

En el nivel superior como se muestra en la gráfica se encuentra el objetivo o las metas a ser alcanzado para la resolución del problema, un nivel más abajo se encuentra los criterios que primeramente serán evaluados entre sí, y más tarde respecto a las alternativas, estos criterios también puede ser disgregados en subcriterios, en el último nivel se encontraran las alternativas que serán seleccionada por nivel de prioridad, y por el resultado de la ponderación que serán fruto cada criterios.

**Paso 2. Establecimiento de las prioridades entre los criterios.**



En este paso, tabla 3 se construye un vector prioridad para la evaluación de la importancia que entrega cada experto a cada criterio, este valor numérico debe ser lo más ajustado posible, mediante la asignación directa, a través de una escala

*Tabla 3. Importancia relativa de evaluación, según Saaty, 1980.*

Importancia	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte importancia
7	Muy fuerte o importancia demostrada
9	Importancia extrema
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes
Valores recíprocos	Sera el inverso cuando el criterio a comparar es mejor que el criterio comparado

Las comparaciones entre pares determinaran los pesos de cada criterio y se presentaran como una matriz cuadradas, donde cada elemento se compara entre sí.

Uno de los inconveniente de este método es que no siempre existe coherencia entre los juicios emitido por el decisor por lo que se hace necesario medir la consistencia de los juicios, llamado razón de consistencia (CR), porque para esto primero se calcula el índice de consistencia (CI), como se muestra en la ecuación 1.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots\dots\dots(1)$$

Y donde para la mejora de la consistencia de los juicios se compara el índice de consistencia aleatorio (RI), con el tamaño de la matriz n, como se pude apreciar en la tabla 4.

*Tabla 4. Índice de consistencia aleatoria.*

**Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la dimensión de la matriz (n).**



n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,841	1,404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1,452	1,484	1,518	1,535	1,555	1,570	1,588	1,595

Finalmente se calcula la razón de consistencia (CR), por la siguiente ecuación 2

$$RC = \frac{CI}{RI} \dots\dots\dots(2)$$

Este término debe ser menor que 0,10 para que los resultados sean confiables y sean reconocidos como aceptables {Sánchez-Lozano, 2016 #2348}; {Parodi de Camargo, 2013 #2684}). Luego de análisis de la consistencia si se cumple la condición se procede con el método, evaluando de forma pareada cada criterio, y llegando a una ponderación que nos da el grado de importancia de un criterio sobre otro, realmente lo que hace el software expert choice, es luego de la la obtención de la puntuación de los experto normaliza por la suma las columnas, dividiendo luego cada elemento xij, sobre la suma, de esta forma queda cada criterio en una solo rango para poder operar cada criterio, luego de esto se suman los valores normalizados de cada criterio, convirtiéndose en la ponderación del mismo, de igual forma, se suman los valores normalizados de cada columna, obteniéndose el peso de cada alternativa, finalmente se opera cada alternativa por los pesos de cada criterio, y la alternativa que mayor valor tenga, será la mejor.

Para nuestro caso, solo evaluaremos los criterios, las alternativas serán evaluadas a través del GIS.

## 2.2 Procedimiento para implementar el Método GIS.

Lo destacable de los SIG es que permiten trabajar con información espacial georeferenciada. Es decir, pueden presentar un mapa digital, en el que todos los objetos tengan un identificador común, y a su vez sus propios atributos. Esto permite que la información pueda separarse y almacenarse independientemente por capas



temáticas, que con su superposición (siempre bajo un mismo sistema de referencia) conformen el mapa digital. Con ello se consigue trabajar con la información de forma muy versátil, de sencillo acceso y facilitando al usuario el generar nueva información relacionada con la ya existente, figura 4.

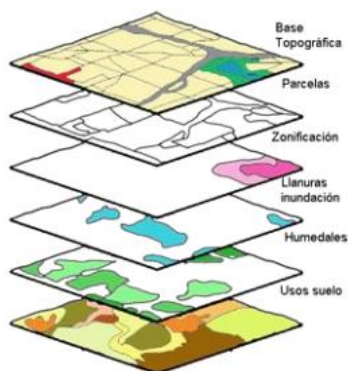
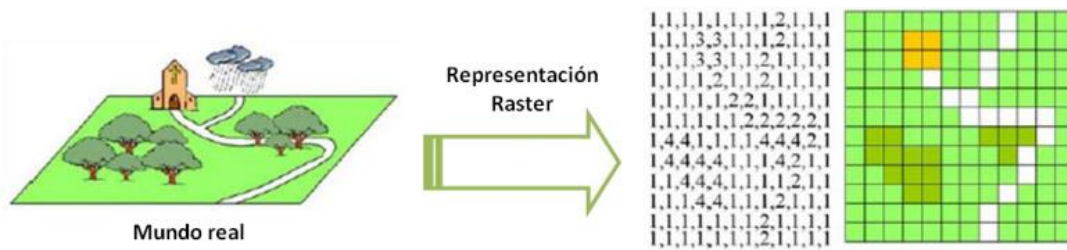


Figura 4. Superposición de capas en los sistemas GIS, fuente: **García-Cascales**, 2013.

Para entender mejor el procedimiento explicaremos que son los datos raster y vectorial, {Sánchez-Lozano, 2013 #2342}.

Un tipo de **datos raster** es una imagen representada en una matriz de bits. Cada bit corresponderá a un pixel, que es la unidad de menor información en una imagen. Una combinación de estos píxeles creará una imagen. Cabe aquí introducir el concepto de **resolución**, que es el número de píxeles o bits que componen la imagen en cada dimensión. El mayor inconveniente de los datos raster es que la precisión de la información depende en gran medida de la resolución con la que se muestrea o digitaliza, pues resoluciones bajas resultarán en mapas “pixelados”, con poca definición de información por unidad de superficie. No obstante, los datos raster figura 5 son extensamente utilizados en los SIG para representar ortofotos, sobre las que realizar las labores de digitalización de carreteras, caminos, parcelas, etc.



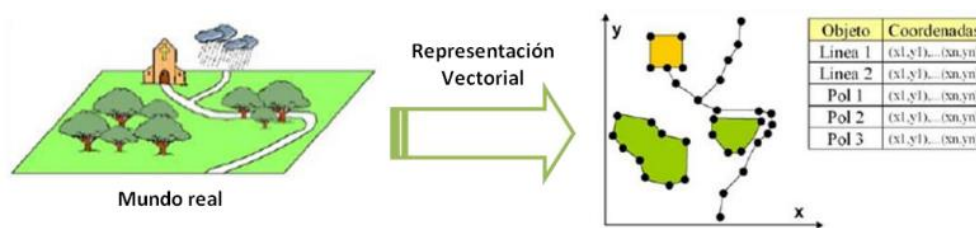


*Figura 5. Datos Raster.*

Los datos raster se almacenan en diferentes formatos como TIFF (Tagged Image File Format), JPEG (Joint Photographic Experts Group) o BLOB (Binary Large Objects).

### Datos vectoriales.

El formato ESRI Shapefile (SHP) Para mantener las características geométricas de los elementos de un mapa digital, sus límites se definen mediante vectores. Con esto se consigue procesar información geográfica con una alta precisión espacial, figura 6.



*Figura 6. Modelo Vectorial.*

Los elementos geométricos vectoriales utilizados son: puntos, líneas, polígonos y multipolígonos.

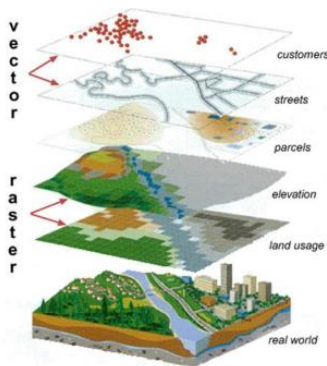
- Puntos:** Los puntos son utilizados para indicar referencias simples, como por ejemplo, una localización particular, un punto de interés, pozos, etc. Estos constituyen el tipo de elemento vectorial más simple, por lo que poseen la menor cantidad de información posible.



- **Líneas o polilíneas:** Las líneas son entidades unidimensionales que se emplean para representar elementos de tipo longitudinal, como ríos, carreteras, caminos, etc. También pueden utilizarse para aplicaciones similares a la definición de curvas de nivel, isobaras o medir distancias. Las polilínea no son más que la unión de diferentes líneas simples para crear formas lineales más complejas.

- **Polígonos o multipolígonos:** Se trata de elementos bidimensionales contruidos a partir de una unión cerrada de polilíneas, definiendo la forma geométrica de un polígono. Se utilizan para representar elementos en los que el área proyectada es importante, como parcelas, lagos, zonas protegidas, etc. Los multipolígonos son polígonos en los que se ha definido a su vez otro polígono dentro de ellos, consiguiendo así elementos con huecos vacíos por dentro. Con los elementos vectoriales detallados pueden crearse capas de elementos que representen un mismo tipo de información: elevación, temperatura media, carreteras nacionales.

Si los datos vectoriales y datos rasters, se combinan se obtiene una representación muy intuitiva y sencilla de cara al tratamiento de información por parte del usuario, figura 7.



*Figura 7. Digitalización de mapas con datos raster y vectorial.*

**El formato ESRI Shapefile (SHP):** El Shapefile (López, 2018) es un formato de archivo informático de datos vectoriales de gran interés para este proyecto. Fue



desarrollado por la compañía ESRI (Infante Gómez, 2021), creadora y comercializadora del famoso Sistema de Información Geográfica ArcGIS, de la misma familia del Quantum GIS.

Así, el Shapefile es un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos. Se trata de un formato multiarchivo, por lo que queda definido a partir de varios archivos informáticos. Se requieren 3 ficheros como mínimo para definir un Shapefile, cuyas extensiones son:

- .shp: Archivo que almacena las entidades geométricas de los objetos.
- .shx: Archivo que almacena el índice de las entidades geométricas.
- .dbf: Archivo en formato dBASE que almacena la información de los atributos de las entidades geométricas.

#### Conclusiones del capítulo:

El método AHP es una herramienta poderosa para la obtención de los pesos de criterios y alternativa a la hora de evaluar proyectos, con un robusto software Expert choices que no solo evalúa a cada expertos, sino que trabaja en la disminución de la incertidumbre que se introduce en el proceso de evaluación de los criterios propuesto.

1. Igualmente la metodología GIS, permite tener un acercamiento a la realidad, donde pudieran instalarse los proyectos objetos de estudio.





## CAPITULO III

### Implementación de la metodología propuesta. Caso de estudio

Para la implementación de la metodología propuesta comenzaremos por la caracterización de los proyectos objeto de estudio.

Como caso de estudio para la aplicación de los métodos, se tomó un data obtenida de varias presentación hecha en la **Conferencia Internacional de Energía Renovable por la Unión Nacional Eléctrica, (UNE 2020)** donde se brindan data con indicadores y alternativa para la instalación y explotación de proyectos Eólicos y teniendo en cuenta lo planteado por (Cuero Aparicio, 2018), para un análisis multidisciplinario de esta problemática en, la actualidad desde la perspectiva de los estudios sociales de la ciencia y la tecnología, no solo debe valorarse el aspecto económico, sino además tener en cuenta las consecuencias sociales y los daños medioambientales que provocan.

#### **Caracterización de las alternativas que serán evaluadas.**

Para la planificación de la infraestructura eléctrica de la energía producida por los Parques Eólicos (PEs) en Cuba, se tiene como propuesta la construcción de 8 PEs, de los cuales este estudio se centra en la infraestructura de los tres PEs “*Río Seco - Punta Caleta Honda*”, “Cabo Lucrecia - Punta de Mulas”, “Punta de Mulas – Playa Puerto Rico”, en la región Oriental, en el municipio de Banes y Gibara III en el municipio de Gibara de la provincia Holguín. La configuración de la infraestructura de los cuatros PEs, cada uno con potencia de 51 MW; con 34 Aero-Generadores (AGs) con potencia unitaria de 1,5 a 2 mW y altura de buje de 70 metros o mayor. La zona se ha dividido en 3 regiones para la construcción de los PEs, que comprende una media luna desde Río Seco al Este y casi en la latitud de Cabo Lucrecia, hasta Punta Caleta Honda al Noroeste, desde 200 m de la costa y hasta 2 km en profundidad, con una longitud estimada en 6 km y una extensión superficial aproximada de 13 km<sup>2</sup>, denominadas:

- ***Río Seco - Punta Caleta Honda.***
- ***Cabo Lucrecia - Punta de Mulas.***



• **Punta de Mulas - Playa Puerto Rico**

**Alternativas objetos de estudio:**

1. **Planta Eólica Gibara III:** Situada en el municipio Gibara, se encuentran situado a 40 km al noreste de la provincia de Holguín, se espera la generación de 51 mW y su puesta en marcha está planificada para el año 2022, según dos estadístico de la UNE
2. **Planta Eólica Cabo de Lucrecia:** Situada en punta de mula, municipio Banes, provincia Holguín, comprende una media luna desde Cabo Lucrecia casi en la latitud de Cabo Lucrecia, hasta Punta de Mula al Noroeste, desde 200 m de la costa y hasta 2 km en profundidad, con una longitud estimada en 6 km y una extensión superficial aproximada de 13 km<sup>2</sup>, representativa del litoral holguinero posee vientos sostenidos durante todo el día, condición que diferencia a este territorio del litoral Sur, por cuanto, la llegada de los vientos Alisios no se ve afectada por las montañas y además, durante el periodo diurno coincide la dirección del viento con la brisa marina, lo que contribuye a que se incremente la velocidad del viento, resultados obtenidos a partir de la base de datos estudiada, los vientos medios en Cabo Lucrecia son de 17 km/h (4.7 m/s), condición favorable para obtener energía eléctrica a partir del viento utilizando máquinas de baja (inferiores a 100 Kw) y moderada potencia (100-500 Kw), Un sector económico de esta zona gran consumidor de electricidad es el Turismo, partiendo del análisis anterior puede observarse que coincide el periodo de máximo aprovechamiento con el periodo de máxima demanda por encontrarse el Turismo enfrascado en su temporada alta, elemento de singular importancia como solución estratégica para reducir la carga de “los picos eléctricos” y además, como el turismo que nos visita posee frecuentemente mucho interés por el Medio Ambiente y su protección, pues constituye un atractivo saber que su consumo eléctrico está generado por una fuente renovable de energía.
3. **Planta Eólica Punta de Mula:** Situada en la playa Puerto Rico Libre, municipio Banes, provincia Holguín



4. **Planta Eólica Río Seco I:** Situada en Punta Caleta Honda, municipio Banes, provincia Holguín, el Parque Eólico Río Seco tendrá una potencia de 51 MW y tendrá 34 AGs de 1,5 a 2 mW, con una configuración en 2 filas casi paralelas a la costa y a no menos de 300 m de ésta, con sus AGs en las posiciones más ventajosas para eludir condiciones geotécnicas desfavorables, dar cumplimiento al Decreto Ley N o 212 Gestión de la Zona Costera, minimizar el impacto de la marea de tormenta provocada por eventos meteorológicos peligrosos (huracanes, etc.)

### 3.1 Resultado de la aplicación del método Análisis Jerárquico de Procesos.

Para comprobar la consistencia de la evaluación de los expertos, se utilizó el software Expert, en su configuración pequeña, en caso de no existir se realiza nuevamente el proceso, figura 8 y 9.

Analytic Hierarchy Template: n= 5		Criteria
<b>Fundamental Scale (Row v Column)</b>		
Extremely less important	1/9	
	1/8	
Very strongly less important	1/7	
	1/6	
Strongly less important	1/5	
	1/4	
Moderately less important	1/3	
	1/2	
Equal Importance	1	
	2	
Moderately more important	3	
	4	
Strongly more important	5	
	6	
Very strongly more important	7	
	8	
Extremely more important	9	

Figura 8. Evaluación en Mini expert choice, fuente Elaboración propia.

Jerarquizar criterios para la evaluación de zonas a instalar Parques					
Pairwise Comparison Matrix					
	Distancia a Puerto	Distancia a Vías	Distancia a núcleo	Distancia a red	Velocidad de viento
Distancia a Puertos	1	5	1/5	1/3	1/7
Distancia a Vías de comunicación	1/5	1	1/3	1/3	1/5
Distancia a núcleo poblacional	5	3	1	4	1/3
Distancia a redes eléctricas	3	3	1/4	1	1/5
Velocidad de vientos	7	5	3	5	1

Figura 9. Evaluación en Mini expert choice, fuente Elaboración propia.

Igualmente el resultado de él análisis de consistencia, igual a 0.21, ligeramente superior a 0,10 que es el ideal, pero puede ser considerado para este estudio, figura 10.



AHP		Consistency check	AHP-1	CA	Lambda	CI	CI/RI
1	0.101	10.1%	0.101	1.63636	5.970944528	0.2427361	0.216728689
2	0.056	5.6%	0.056	0.9476			
3	0.249	24.9%	0.249	1.19281		Randomness Index, RI	
4	0.123	12.3%	0.123	1.31044		3 0.58	1.12
5	0.471	47.1%	0.471	0.88374		4 0.9	
						5 1.12	

Figura 10. Resultado de la aplicación de Mini expert choice, fuente Elaboración propia.

Resumiendo la aplicación del método AHP, en la tabla 6, se muestran los pesos de cada criterio a tener en cuenta en el proceso

Tabla 6. Pesos relativos encontrados por la evaluación de los criterios, fuente Elaboración propia.

Objetivo: Jerarquizar criterios para la evaluación de zonas a instalar Parques Eólicos							
#	Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	Distancia Puertos	1	5	1/5	1/3	1/7	
C2	Distancia Vías (Ferro, Carret.	1/5	1	1/3	1/3	1/5	
C3	Distancia núcleo poblacional	5	3	1	4	1/3	
C4	Distancia a redes eléctricas	3	3	0.25	1	1/5	
C5	Velocidades de vientos	7	5	3	5	1	
	Suma.	16.00	17.00	4.25	10.00	1.00	
#	Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	
C1	Distancia Puertos	1	5	0.2	0.333	0.142	
C2	Distancia Vías (Ferro, Carret.	0.2	1	0.333	0.333	0.2	
C3	Distancia núcleo poblacional	5	3	1	4	0.333	
C4	Distancia a redes eléctricas	3	3	0.25	1	0.2	
C5	Velocidades de vientos	7	5	3	5	1	
	Suma.	16.20	17.00	4.78	10.67	1.88	
	Normalizando					Promedio	
C1	Distancia Puertos	0.062	0.294	0.042	0.031	0.076	0.101
C2	Distancia Vías (Ferro, Carret.	0.012	0.059	0.070	0.031	0.107	0.056
C3	Distancia núcleo poblacional	0.309	0.176	0.209	0.375	0.178	0.249
C4	Distancia a redes eléctricas	0.185	0.176	0.052	0.094	0.107	0.123
C5	Velocidades de vientos	0.432	0.294	0.627	0.469	0.533	0.471
							=1.000



**Los criterios o restricciones a tener en cuenta en la modelación GIS, se muestran a continuación.**

**Criterios de variables.**

1. Que se encuentren en los estratos Gibara III, Rio Seco I, Punta de Lucrecia y Punta de Mula.
2. Que los puertos se encuentren cerca de las áreas de emplazamiento para garantizar el trasiego de los recursos importados por el país, distancia de 40 km, considerando que este será el óptimo con valor igual a 5, entre 40 y 50 km valor igual a 3, y más de 60 km, valor igual a 1, a tener en cuenta para los buffer.
3. Que las futuras instalaciones estén cerca de líneas de comunicación tales como carreteras y líneas férreas, igualmente para garantizar que lleguen los insumos al lugar de la instalación, entre 0 y 3 km, con valor de 5, entre 3 y 5 km valor de 3 y más de 5 km valor 1.
4. Que las futuras instalaciones estén cerca de los núcleos poblacionales, (potenciales consumidores) y no solo en comunidades aisladas, debido a que la energía generada debe ser consumida o cedida a la red, para distancia de 2 km, valor de 5, de 2 km a 3 km valor de 3, más de 3 km valor de 1.
5. Que las futuras instalaciones estén cerca de la red eléctrica para abaratar los costos nivelados de energía, valores de 5, para distancia de 5 km, entre 5 y 8 km, valores de 3 y más de 8 km, igual a 1.
6. Que las futuras instalaciones las velocidades de vientos sean las óptima, a partir de estudio de vientos, fundamentado en el mapa eólico de Cuba, para velocidades entre 5 y 6 m/s, valor de 1, para velocidades entre 6,5 y 7 m/s, valores de 3 y mayores que 7 m/s, valores de 5.
7. Que las futuras instalaciones no intercepten corredores aéreos migratorios de aves.
8. Que las futuras instalaciones, no intercepten zonas de reservas de flora y faunas.



## Origen del dato para la modelación conceptual a través del GIS, tabla 7.

Tabla 7. Origen del dato para la modelación GIS, fuente Elaboración propia.

Insumos	Tipos de datos
Estratos 1,2,3 y 4	Shapefile de polígonos
Puertos	Shapefile de polígonos
Malla vial	Shapefile de líneas
Núcleo poblacional	Shapefile de polígonos
Mallas de líneas eléctricas	Shapefile de líneas
Velocidades de vientos	Mapa eólico de Cuba
Corredores aéreo migratorios	Google Earth

### 3.2 Resultado de la aplicación del método Sistema de Información Geográfica.

En la figura 11, se muestra los diferentes proyectos, dos parques en explotación, Gibar I y Gibara II, dos más en ejecución Herradura I y Herradura II, otros 10 parques aprobados por la SEN, para su ejecución según cronograma aprobado en el año 2017, pero a raíz de la pandemia, solo se avanzó en el parque eólico de Herradura I, donde en estos momentos se han fundido más de 25 bases, con serios problemas de inundación, en azul aparecen 10 proyectos que fueron negociados con la inversión extranjera, la firma Gamesa, será la ejecutora, estaba pactada para su terminación el año 2023, pero dado los problemas antes mencionado, el cronograma cambiará, importante destacar que la potencia sea 656 mW, con una generación asociada de 1968 gW/ año, sustituyendo 540 MTon/año, y evitando 1,67 MMton CO<sub>2</sub> al año.

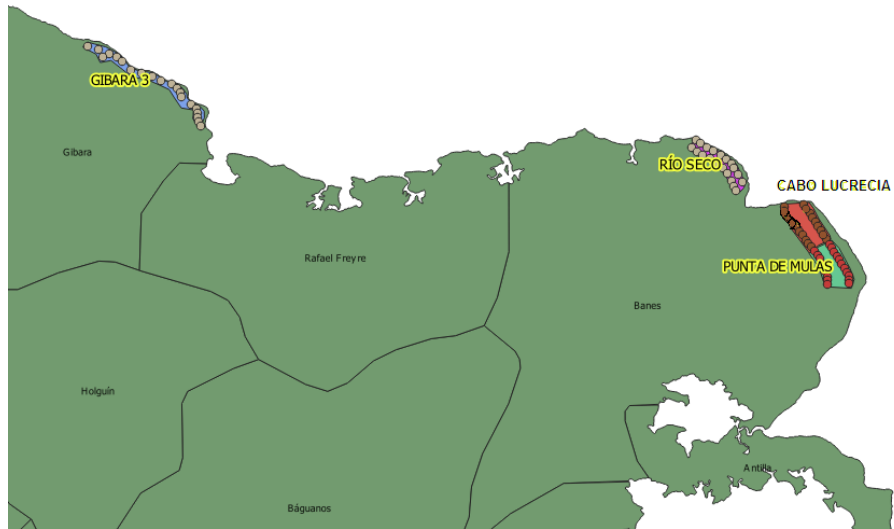




Figura 11. Proyectos Eólicos aprobados por la SEN, para su ejecución según cronograma, fuente UNE, 2017.

En la figura 12 se aprecia un estrato de la provincia de Holguín, que será objeto de nuestro trabajo, el estrato de Gibara III, cerca de los parques experimentales Gibara I y II, así como el estrato de Río Seco, Punta Lucrecia Y Punta de Mula, estos último en el municipio de Banes.





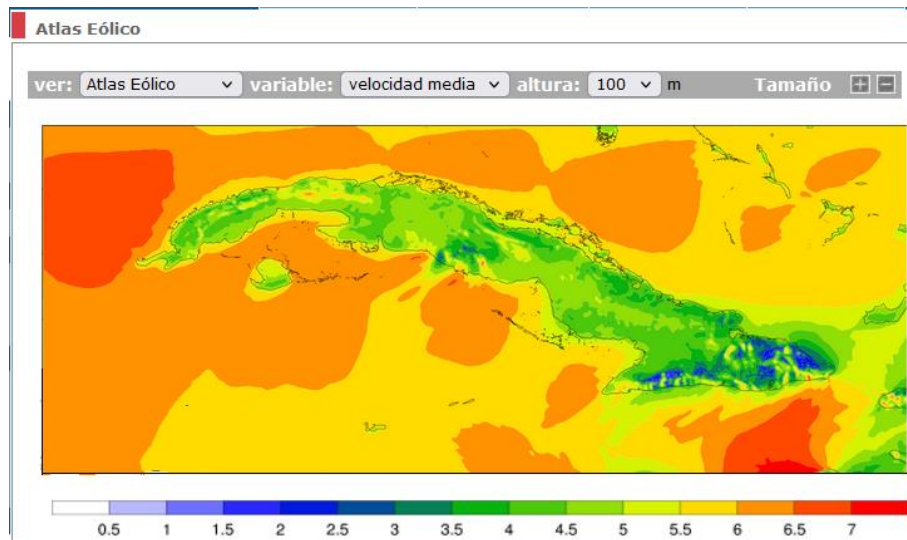
*Figura 12. Parques Eólicos en estudio, fuente Elaboración propia.*

### 3.2.1 Recolección de datos

En la figura 13 muestra los datos de promedio anual de la velocidades del viento en m/s a 100 metros de altura, proporcionados por el Atlas Eólico de Cuba, donde se puede observar las mediciones hechas en los estratos de los casos de estudio.







*Figura 13. Atlas Eólico de Cuba, fuente Elaboración propia.*

En la figura 14 se observa la localización de los polígonos de los núcleos poblacionales más cercanos a los proyectos de parques eólicos en la zona norte oriental de Holguín, ellos son: poblado de Gibara, en el municipio del mismo nombre, Los Angeles y Cañada Honda, ubicados estos últimos en el municipio de Banes.



*Figura 14. Localización de los núcleos poblados más cercanos a los casos de estudio, fuente Elaboración propia.*

La figura 15 muestra la maya eléctrica principal de la provincia de Holguín, dato muy importante a tener en cuenta cuando realizamos este tipo de estudio ya que los aerogeneradores insertan corriente eléctrica a estas líneas principalmente.



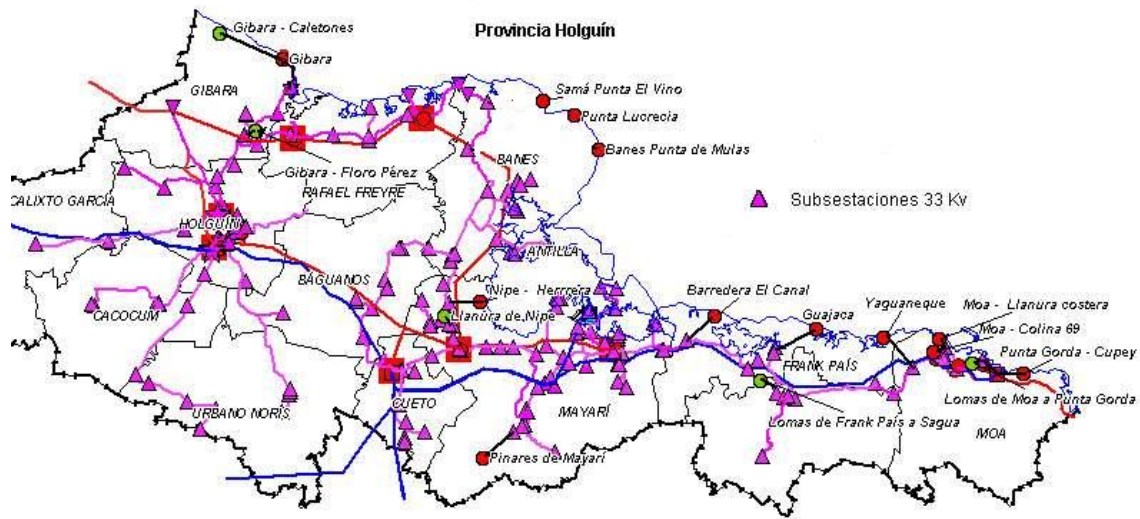


Figura 15. Red Eléctrica principal de la provincia de Holguín, fuente UNE.

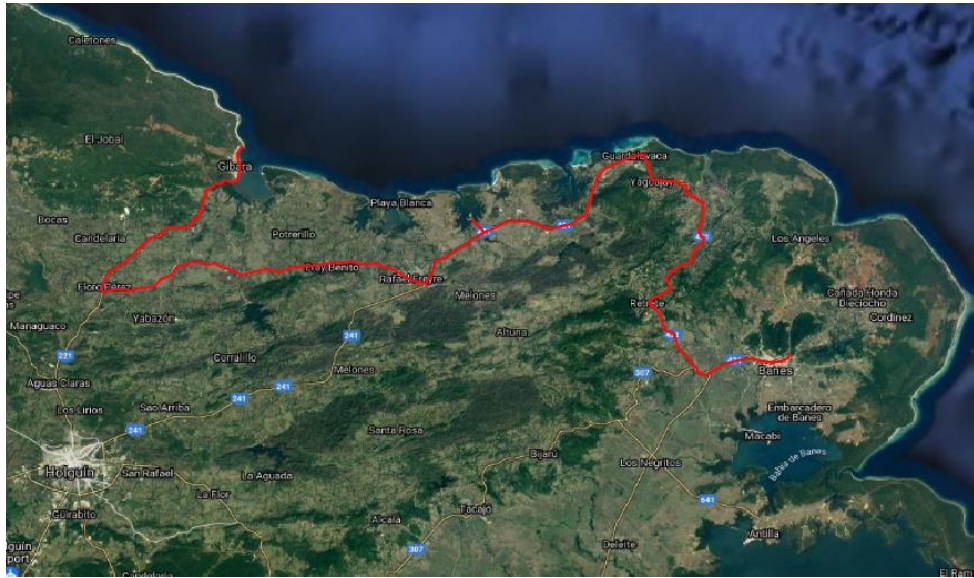
La figura 16 muestra la localización de los polígonos de los puertos más cercanos a dichos proyectos través de Google Satélite Híbrido los cuales son el Puerto de Vita ubicado en Rafael Freire y el Puerto de Antillas ubicado en el municipio del mismo nombre.



Figura 16. Localización de puertos más cercanos, fuente Elaboración propia.

En la Híbrido. Figura 17 se observa el shapefile de línea de las carreteras principales más cercanas a dichos parques a través de Google Satélite Híbrido.





*Figura 17. Localización de carreteras principales más cercanas, fuente Elaboración propia.*

### 3.2.2 Realización de Buffers

Con los datos obtenidos se procede en el software QGIS a realizar los buffer de cada variable.

En la Figura 18 se muestra los buffers realizados a la poligonal de la velocidad del viento, área de la poligonal de velocidad del viento con un criterio de 5, buffer de 1 km criterio de 3 y buffer de 2 km evaluado con un criterio de 1.

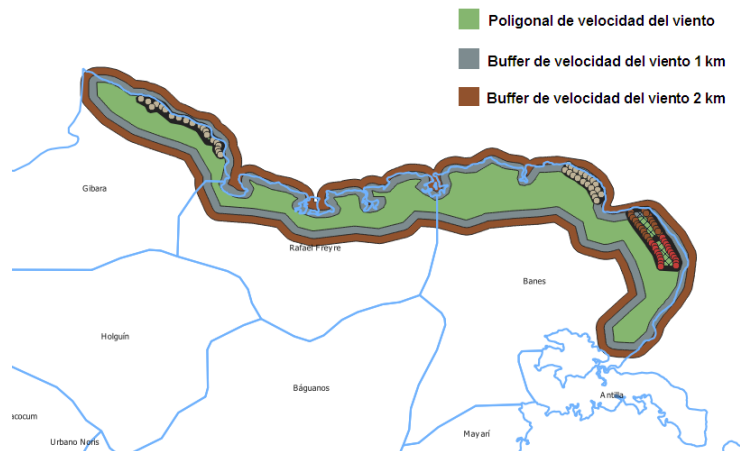


Figura 18. Buffer a la velocidad del viento, fuente *Elaboración propia*.

En la figura 19 se observa los buffers realizados a los shapefile de polígonos de los núcleos poblacionales, se le otorgo al buffer de 2km criterio de 5, buffer de 3 km criterio de 3 y buffer de 5 km criterio de 1.

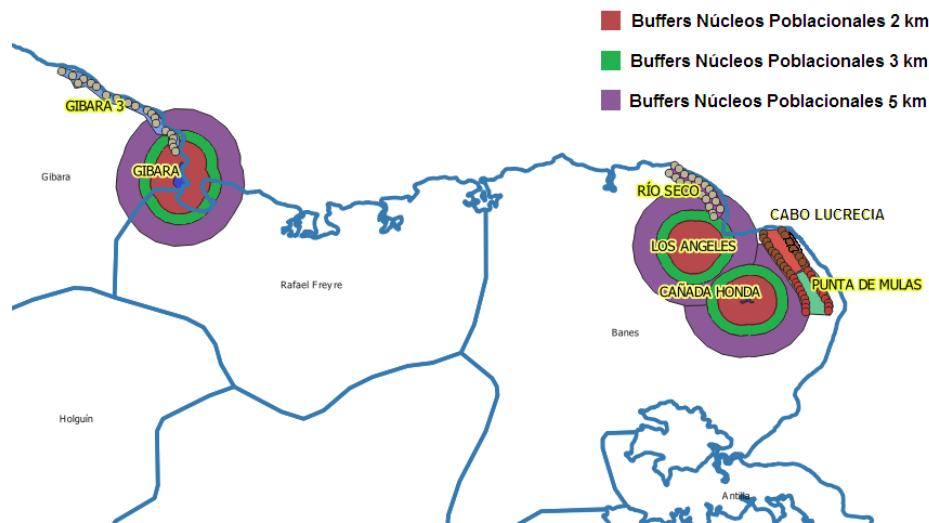


Figura 19. Buffers de núcleos poblacionales, fuente *Elaboración propia*.

En la figura 20 se muestra los buffer realizados a los shapefile de líneas de las mayas eléctricas, otorgando un criterio de 5 al buffer de 5 km, al buffer de 8 km criterio de 3 y buffer de 10 km criterio de 1.



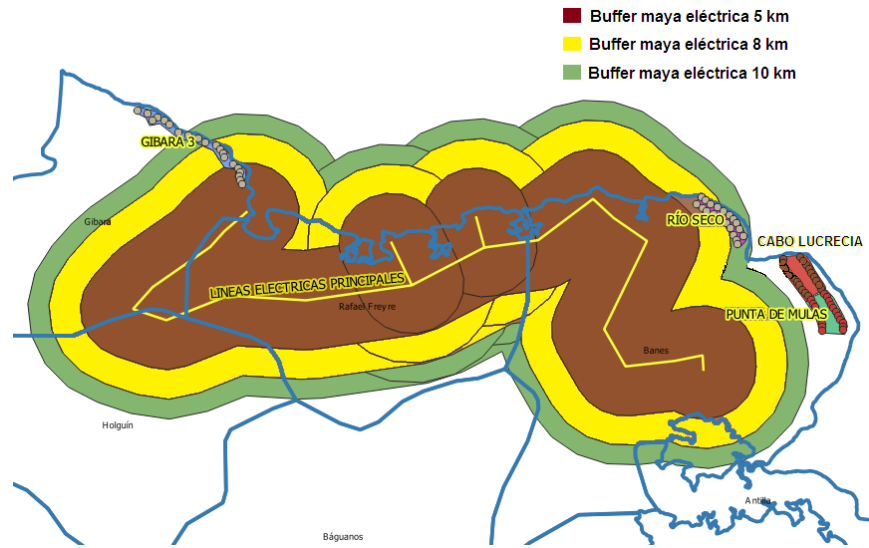
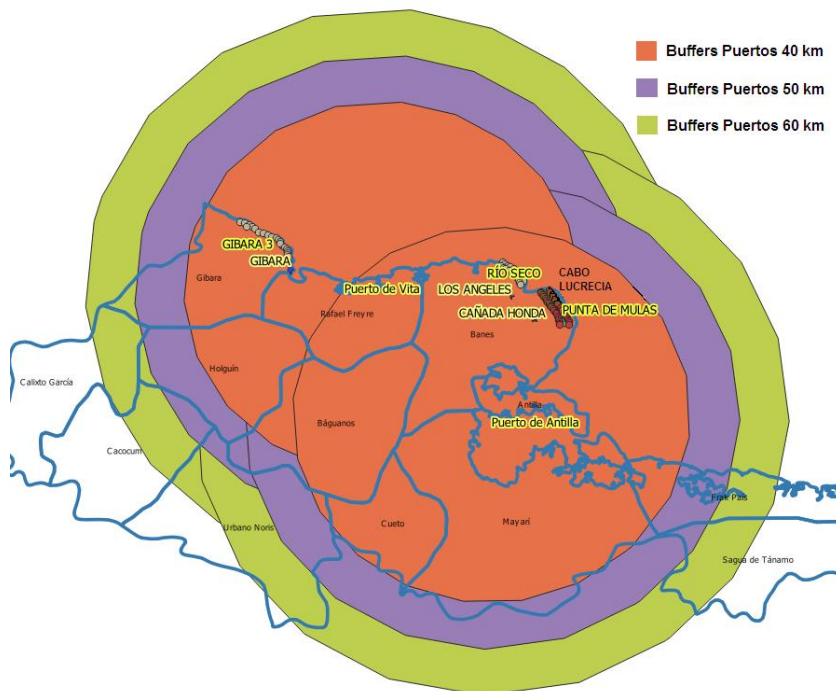


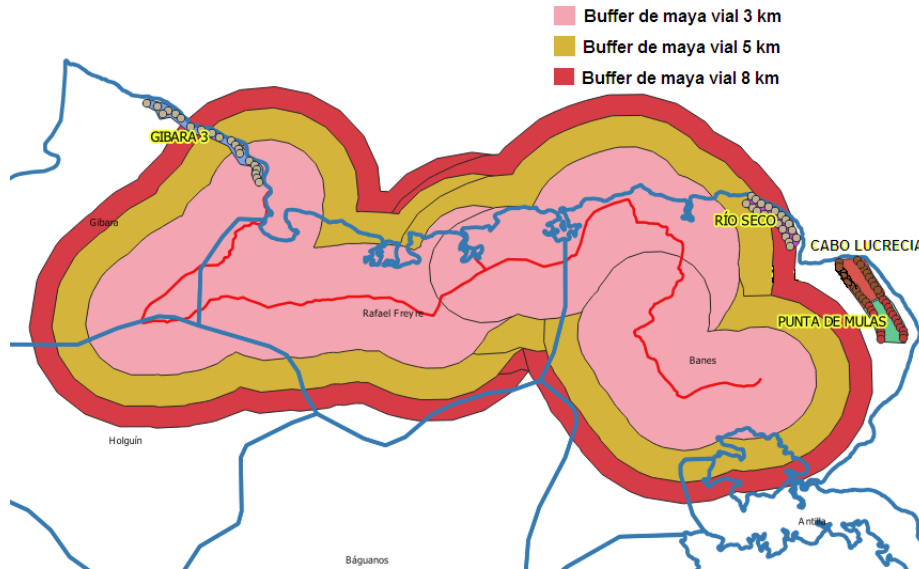
Figura 20. Buffers de líneas eléctricas, fuente *Elaboración propia*.

En la figura 21 se observa los buffers de los shapefile de polígonos de los puertos, se le otorga al buffer de 40 km un criterio de 5, al buffer de 50km un criterio de 3 y al buffer de 60 km un criterio de 1.



*Figura 21. Buffers de los puertos, fuente Elaboración propia.*

En la figura 22 se muestra los buffers realizados a las shapefile de líneas de la maya vial, al buffer de 3 km se le otorgo un criterio de 5, al buffer de 5 km criterio de 3 y al buffer de 8 km criterio de 1.



*Figura 22. Buffers de la maya vial, fuente Elaboración propia.*

A continuación en la tabla de atributos de cada buffer realizado se le agrega una columna donde se le introduce a cada uno el valor alcanzado por dicha zona según los criterios, en la figura 23 se muestra un ejemplo de la tabla de atributos del buffer de la maya vial puntuada con un valor de 5.



maya vial 3km — Features Total: 17, Filtered: 17, Selected: 0

	fid	id	valor
1	1	1	5
2	2	2	5
3	3	3	5
4	4	4	5
5	5	5	5
6	6	6	5
7	7	7	5
8	8	2	5
9	9	3	5
10	10	2	5
11	11	2	5
12	12	2	5
13	13	4	5
14	14	4	5
15	15	9	5
16	16	4	5
17	17	9	5

Mostrar todos los objetos espaciales

*Figura 23. Tabla de Atributos, fuente Elaboración propia.*

### 3.2.3 Rasterización de Buffers.

Se procede a convertir cada buffer a una imagen raster con el valor alcanzado según su criterio, esta operación se lleva a cabo con la herramienta de conversión que cuenta dicho software llamada rasterizar. En la figura 24 se muestra un ejemplo de la rasterización del buffer de 2 km de los núcleos poblacionales.

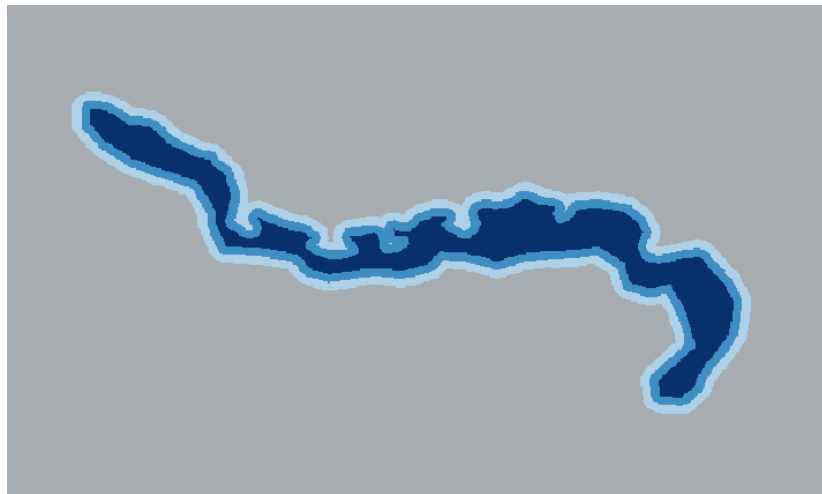


*Figura 24. Raster de 2 km a los núcleos poblaciones, fuente Elaboración propia.*

### 3.2.4 Suma de los raster de cada variable.

Se suman en la herramienta del software QGIS llamada calculadora raster las imágenes raster de cada variable, en la figura 25 se muestra la calculadora raster en el procedimiento de suma de los rasters hechos a los buffers de los núcleos poblacionales.

En la figura 25 se muestra el resultado de la suma de los raster de la variable velocidad del viento.



*Figura 25. Suma raster de la velocidad del viento, fuente Elaboración propia.*

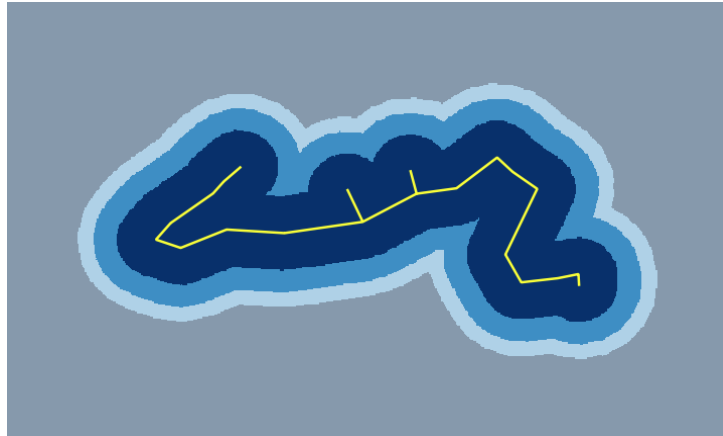
En la figura 26 se muestra el resultado de la suma de los raster de la variable núcleos poblacionales.





*Figura 26. Suma raster de los núcleos poblacionales, fuente Elaboración propia.*

En la figura 27 se observa el resultado de la suma de los raster de la variable Líneas eléctricas.



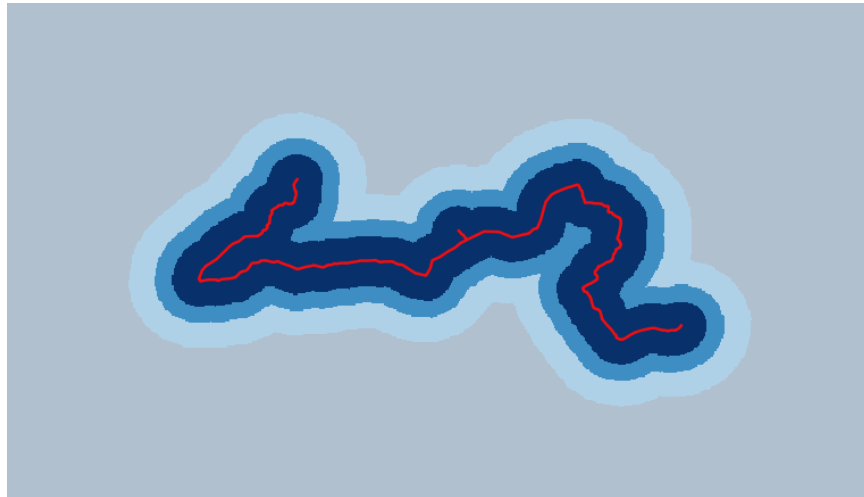
*Figura 27. Suma raster de las líneas eléctricas, fuente Elaboración propia.*

En la figura 27 se observa el resultado de la suma de los raster de la variable puertos.



*Figura 27. Suma raster de los puertos, fuente Elaboración propia.*

En la figura 28 se muestra el resultado de la suma de los raster de la variable maya vial.

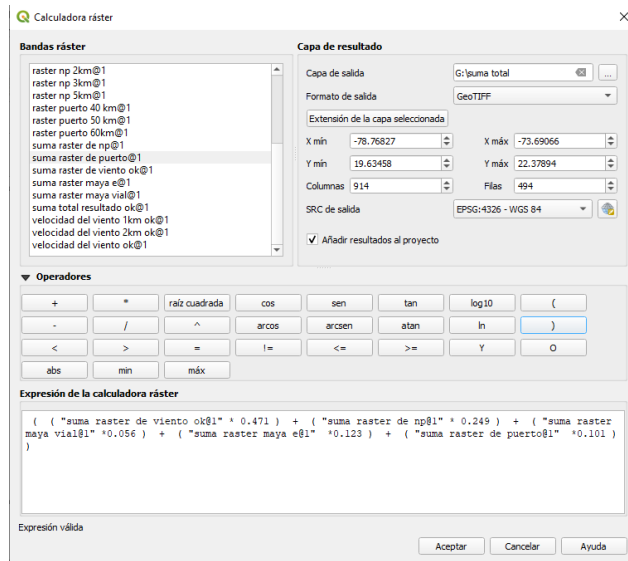


*Figura 28. Suma raster de la maya vial, fuente Elaboración propia.*

### 3.2.5 Suma de todos los rasters.

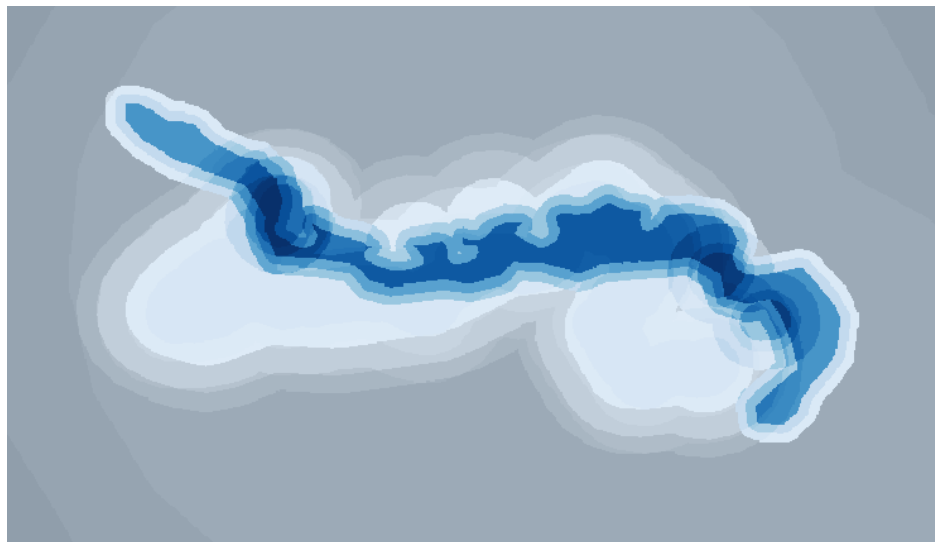
Con las sumas de los raster de cada variable se procede a sumarlas todas, cada una multiplicada por el peso de su variable obtenido por el método AHP para obtener una imagen raster de todas las variables. En la figura 29 se observa la calculadora raster en la realización de dicha operación.





*Figura 29. Calculadora ráster, fuente Elaboración propia.*

En la figura 30 se muestra la imagen ráster de la suma de todos los rasters de cada variable donde ya se puede observar en la tonalidad de azul oscuro las zonas con mayor concentración de variables con sus mejores criterios.

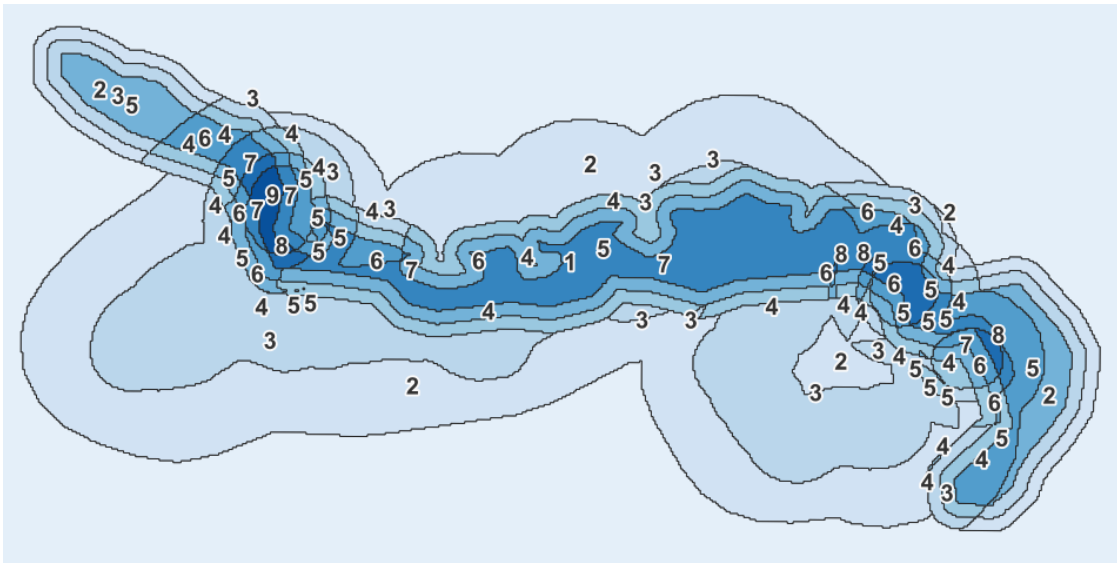


*Figura 30. Raster total, fuente Elaboración propia.*



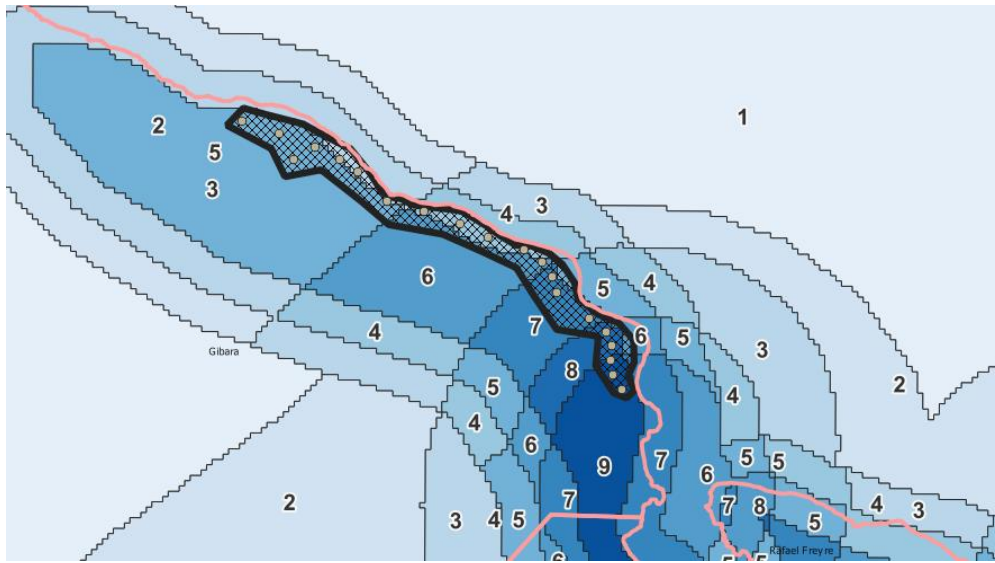
### 3.2.5 Vectorización.

Se vectoriza la imagen raster para hallar los polígonos con mayor contenido de variables y sus criterios donde se etiquetó los polígonos con su valor alcanzado desde el 1 menor contenido de variables hasta el 9 mayor contenido de variables (figura31).



*Figura 31. Vectorización del raster total, fuente Elaboración propia.*

En la figura 32 se muestra una imagen ampliada de la vectorización donde se aprecia el polígono del proyecto de parque eólico Gibara III el cual encierra en su área un polígono con un valor de 9, es decir que cumple con todas las variables en su criterio más alto.



*Figura 32. Gibara III en la vectorización, fuente Elaboración propia.*

En la figura 33 se muestra una imagen ampliada de la vectorización donde se aprecia los polígonos de los proyectos de parques eólicos del municipio de Banes, se observa que el proyecto de parque eólico Río Seco encierra en su área un polígono con un valor de 7 y en las áreas de Cabo Lucrecia y Punta de Mulas el polígono que tiene mejor valor es de 6.



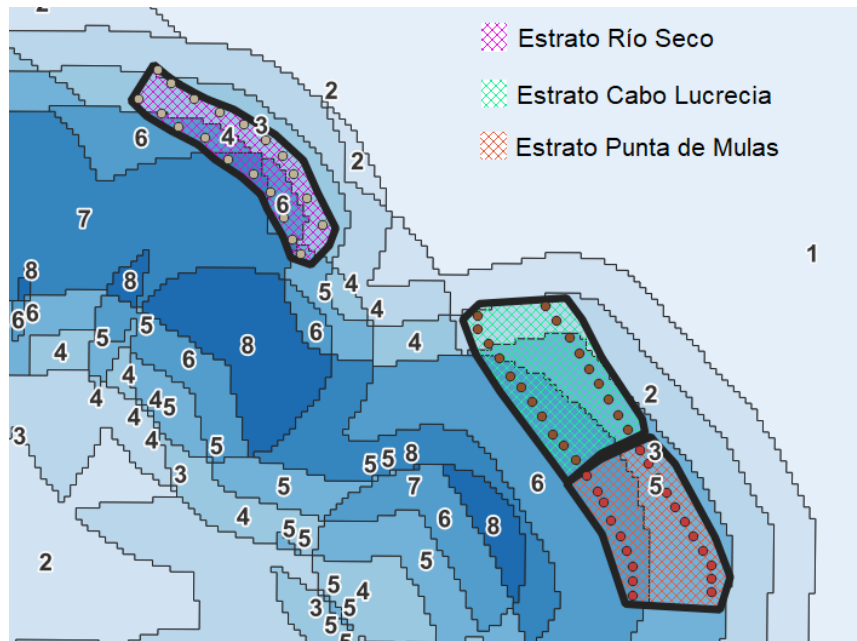


Figura 33. Río Seco, Cabo Lucrecia y Punta de Mulas en la vectorización, fuente Elaboración propia.

### 3.3 Resultado

Se obtuvo como resultado que el proyecto de Parque Eólico Gibara III fue el proyecto con las zonas óptimas en la región oriental de Holguín ya que encierra en su estrato zonas con todas las variables y sus mejores criterios con un valor de 9. El proyecto de Río Seco encerró en su estrato zonas con un valor máximo de 7, esto quiere decir que no cumple con todas las variables en sus mejores criterios, a lo igual que Cabo Lucrecia y Punta de Mulas con zonas con valor máximo de 6.

En la tabla No. 8 se observa los proyectos de Parques Eólicos en lo que podría ser un orden de prioridad en su construcción por sus zonas óptimas según los variables y sus criterios evaluado en la investigación.

Tabla 8. Resultado de la investigación, fuente Elaboración propia.

Proyecto de Parque Eólico	Prioridad
Gibara III	1



Río Seco	2
Cabo Lucrecia	3
Punta de Mulas	4



## CONCLUSIONES

1. Se logró un modelo conceptual matemático para la selección óptima de zonas mediante los métodos multicriterio y GIS.
2. Se determinó que de los parques objeto de estudio Gibara III es el más óptimo.
3. Estos modelos permitirán el desarrollo de proyectos eólicos en la región oriental de Holguín, y poder direccionar los recursos humanos, financieros y materiales.





## RECOMENDACIONES

1. Continuar la investigación para futuros proyectos.
2. Tener en cuenta esta investigación para la elaboración y puesta en marcha de nuevos proyectos eólicos.



## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

2019, C. M. F. AVANCES TECNOLÓGICOS Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA EÓLICA. RETOS

PARA CUBA

- Altomonte, H., Coviello, M., & Lutz, W. F. (2003). *Energías renovables y eficiencia energética en América Latina y el Caribe: restricciones y perspectivas*: CEPAL.
- Arias, A. (2017). OLADE: enfoque para proyectos de electrificación rural. *ENERLAC. Revista de energía de Latinoamérica y el Caribe*, 1(1), 6-23.
- Avila-Flores, R., & Medellín, R. A. (2004). Ecological, taxonomic, and physiological correlates of cave use by Mexican bats. *Journal of Mammalogy*, 85(4), 675-687. doi: 10.1644/Bos-127
- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). *Site selection for large wind turbine using GIS*. Paper presented at the PSU-UNS international conference on engineering and environment.
- Bennui, P. (2007). A survey on first-year students' opinions concerning causes of their low performance in listening in the English II course at Thaksin University, Phatthalung.
- Bravo, J. D., & JAVIER, F. (2017). *Cogeneración de energía, eléctrica y térmica, mediante un sistema híbrido biomasa-solar para explotaciones agropecuarias en la Isla de Cuba*: Ciemat.
- Chen, S.-J., & Hwang, C.-L. (2012). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications* (Vol. 375): Springer Science & Business Media.
- Chen, S.-M., & Tan, J.-M. (1994). Handling multicriteria fuzzy decision-making problems based on vague set theory. *Fuzzy sets and systems*, 67(2), 163-172.
- de Anguita d'Huart, P. M., Abril, C. P. A. G., Rivera, S., Martín, M. Á., León, R. R. C. M., Guerrero, D., . . . Carmona, B. P. (2006). *Desarrollo rural sostenible*: McGraw-Hill/Interamericana de España.
- Forero-Núñez, C.-A., Alberto-Valencia, J., & Sierra-Vargas, F.-E. (2016). Revisión de las estrategias de modelamiento y análisis aplicados a sistemas híbridos de energía. *Ingeniería Mecánica*, 19(1), 59-67.
- Gkeka-Serpetsidaki, P., & Tsoutsos, T. (2021). 13 Sustainable site selection of offshore wind farms using GIS-based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process. Case study: Island of Crete (Greece) *Low Carbon Energy Technologies in Sustainable Energy Systems* (pp. 329-342).
- Madlener, R., Antunes, C. H., & Dias, L. C. (2009). Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 197(3), 1084-1094. doi: 10.1016/j.ejor.2007.12.051
- Maldonado, Y. A. M. (2012). *Optimización de recursos energéticos en zonas aisladas mediante estrategias de suministro y consumo*. Universitat Politècnica de València.
- Marcelino, C. G., Pedreira, C. E., Baumann, M., Weil, M., Almeida, P. E. M., & Wanner, E. F. (2019). A Viability Study of Renewables and Energy Storage Systems Using Multicriteria Decision Making and an Evolutionary Approach *Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (pp. 655-668).
- Ministerio Energía y Minas, U. (2015). Desarrollo de Capacidades para la Integración de Objetivos de Desarrollo Sostenible de Energía, Metas e Indicadores en los Programas Nacionales de Estadísticas en Países de América Latina.



- Ribeiro Muhongo, V., García, L. E., Arzola Ruiz, J., & Oliva Merencio, D. (2018). Análisis sistémico de la selección de instalaciones de energías renovables en territorios aislados. *Ingeniería Energética*, 39(3), 186-194.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process (AHP) for decision making*. Paper presented at the Kobe, Japan.
- Silva, A. J. V., Domínguez, L. P., Gómez, E. A. M., Olgúin, I. J. C. P., & Durán, S. N. A. (2019). Una revisión de literatura de 1980 a 2018 de los métodos Multi-criterio. *Mundo FESC*, 9(18), 89-102.
- Baban, S. M. J., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable energy*, 24(1), 59-71.
- Bojórquez-Tapia, L. A., Sánchez-Colon, S., & Florez, A. (2005). Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis. *Environmental management*, 36(3), 469-481.
- Cáceres, J. P. O., Delgado, M. G., & Rocha, W. P. (2011). Posibilidades de aplicación de un análisis de sensibilidad secuencial a un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio (2011): *La Innovación Geotecnológica Como Soporte Para la Toma de Decisiones en el Desarrollo Territorial. XIII CONFIBSIG (Toluca, México)* (pp. 1-24).
- Cuero Aparicio, Á. (2018). Análisis y Estudio del Impacto Territorial de los Parques Eólicos en Cantabria Bajo un Entorno SIG.
- Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Computers & geosciences*, 64, 81-95.
- Georgiou, A., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. (2012). Energy sources, Part A: recovery, utilization, and environmental effects wind energy resource assessment and development: decision analysis for site evaluation and application wind energy resource assessment and development: decision analysis for site evaluation and application. *Energy*, 34(19), 37-41.
- Gis, T. Y. C. Especialista En arcGis 10 aplicado al MEDio aMBiEntE Modalidad online.
- Infante Gómez, P. (2021). Análisis multicriterio para la localización, en Andalucía, de una central hidroeléctrica a través de un sistema de información geográfica.
- Kaim, A., Cord, A. F., & Volk, M. (2018). A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation. *Environmental Modelling & Software*, 105, 79-93.
- Lahdelma, R., Salminen, P., & Hokkanen, J. (2000). Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environmental management*, 26(6), 595-605.
- Latinopoulos, D., & Kechagia, K. (2015). A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece. *Renewable Energy*, 78, 550-560.
- López, J. M. (2018). Técnicas de evaluación multicriterio, lógica difusa y Sistemas de Información Geográfica como herramientas para el ordenamiento territorial.
- Mena Frau, C., Gajardo Valenzuela, J., & Ormazábal Rojas, Y. (2006). Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, 14(1), 81-89.
- Novillo, M. G., & Sarandón, R. (2002). Evaluación ambiental regional. Metodologías utilizadas en el estudio regional de riesgos hidrogeológicos del Noroeste Argentino, 27 p.
- Plata-Rocha, W., Gómez-Delgado, M., & Bosque-Sendra, J. (2011). Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: A case study of the Madrid region, Spain. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(6), 1012-1031.



- Pourebahim, S., Hadipour, M., & Mokhtar, M. B. (2011). Integration of spatial suitability analysis for land use planning in coastal areas; case of Kuala Langat District, Selangor, Malaysia. *Landscape and Urban Planning, 101*(1), 84-97.
- Ramírez-Rosado, I. J., García-Garrido, E., Fernández-Jiménez, L. A., Zorzano-Santamaria, P. J., Monteiro, C., & Miranda, V. (2008). Promotion of new wind farms based on a decision support system. *Renewable Energy, 33*(4), 558-566.
- Sánchez Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2017). ANÁLISIS SIG-MULTICRITERIO PARA IMPLANTAR PARQUES EÓLICOS EN RESERVAS DE LA BIOSFERA. CASO DE ESTUDIO ISLA DE LA PALMA.
- Watson, J. J. W., & Hudson, M. D. (2015). Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landscape and Urban Planning, 138*, 20-31.



ANEXOS

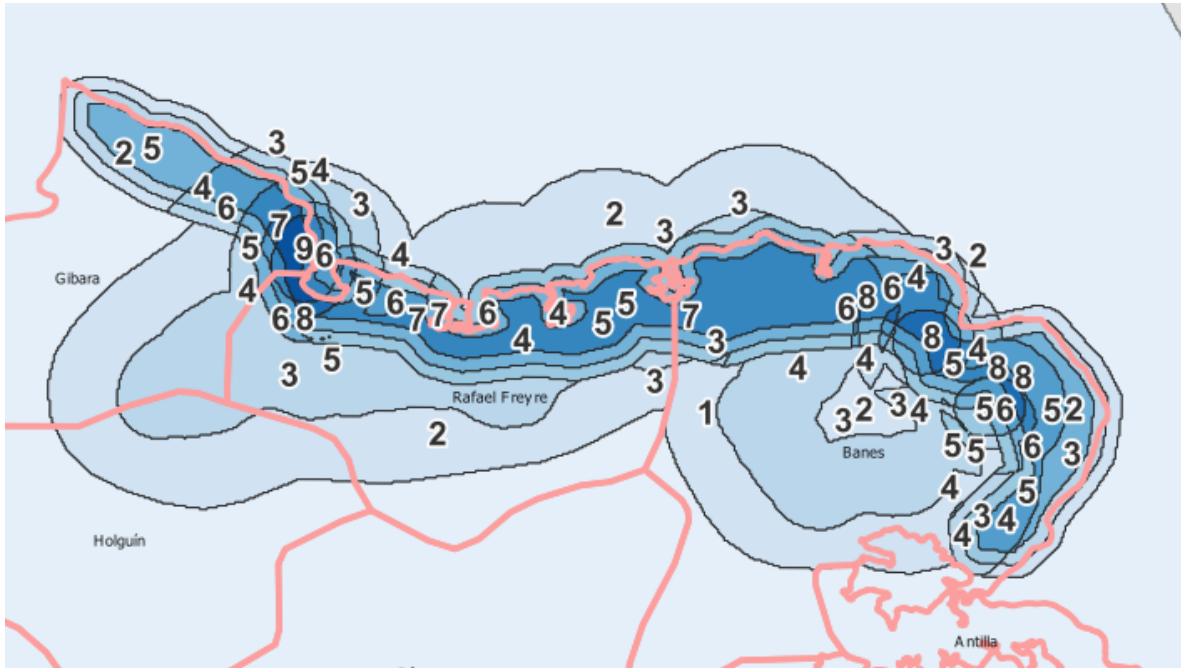


Figura 34. Vectorización en el estrato de Holguín, fuente elaboración propia.

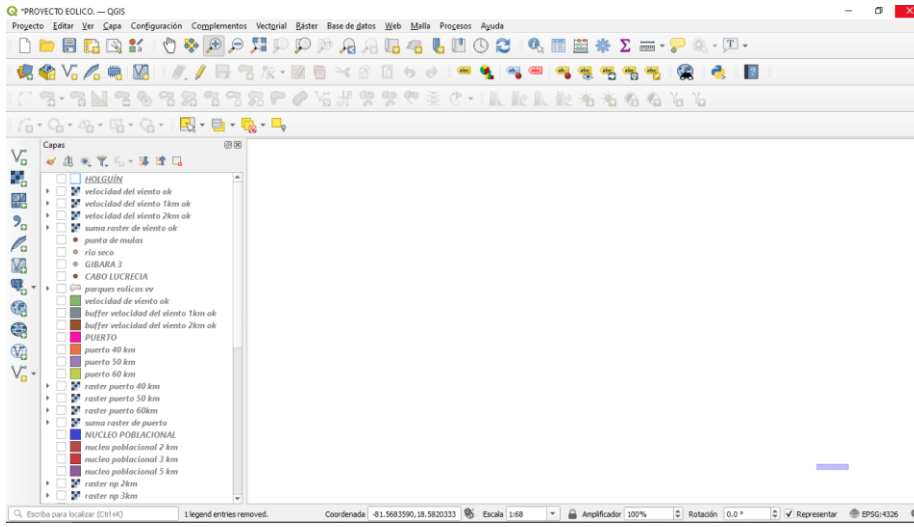


Figura 35. Software QGIS, fuente elaboracion propia.

