



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial**

Análisis y determinación de las zonas óptimas para la instalación de un proyecto eólico en Ecuador a través de métodos de toma de decisión multicriterio

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor: Fernanda Vaca Aldas

Director: Dra. Socorro García-Cáscales



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, 4 de Octubre de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo General	2
2.2. Objetivos Específicos	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1. Métodos de Toma de Decisión Multicriterio (MDMC)	3
3.2. Clasificación de los Métodos de Toma de Decisión Multicriterio	4
3.2.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)	5
3.3. Sistemas de Información Geográfica	9
3.3.1. Elementos de los Sistemas de Información Geográfica	10
3.3.2. Representación de datos en un SIG	11
3.3.3. Aplicaciones de los SIG	12
4. ESTADO DEL ARTE.....	12
4.1. SIG relacionado con las energías renovables.....	13
4.2. MDMC relacionado con las energías renovables	14
4.3. Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica	15
4.4. Energía eólica en Ecuador	17
4.4.1. Parque eólico San Cristóbal	18
4.4.2. Parque Eólico Baltra – Santa Cruz	19
4.4.3. Parque Eólico Villonaco	20
4.5. Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica	21
en Ecuador.....	21
5. ÁREA DE ESTUDIO	22
6. METODOLOGÍA	26
6.1. Recopilación de información	27
6.2. Establecimiento de restricciones	27
6.3. Determinación de factores de selección.....	27
6.4. Ponderación y establecimiento de alternativas	28
6.5. Selección de zona óptima	28
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
7.1. Análisis de Sensibilidad.....	60
8. CONCLUSIONES	67
9. BIBLIOGRAFÍA.....	69
10. ANEXOS	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de Preferencia de Saaty	6
Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la matriz (n)	7
Tabla 3. Integración de los SIG con los MDMC relacionado con la energía eólica	16
Tabla 4. Identificación de criterios de restricción y selección	29
Tabla 5. Rango de ponderación para velocidad del viento.....	37
Tabla 6. Rango de ponderación para pendiente	37
Tabla 7. Rango de ponderación para red de carreteras.....	38
Tabla 8. Rango de ponderación para líneas de subtransmisión	38
Tabla 9. Rango de ponderación para subestaciones	38
Tabla 10. Perfil de cada experto.....	43
Tabla 11. Cálculo de peso de los criterios Experto 1	44
Tabla 12. Cálculo de peso de los criterios Experto 2	44
Tabla 13. Cálculo de peso de los criterios Experto 3	45
Tabla 14. Porcentaje de inconsistencia.....	46
Tabla 15. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 1	51
Tabla 16. Síntesis de prioridades globales Experto 1	52
Tabla 17. Matriz normalizada ponderada Experto 1	53
Tabla 18. Ranking de alternativas Experto 1	53
Tabla 19. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 2	53
Tabla 20. Síntesis de prioridades globales Experto 2	55
Tabla 21. Matriz normalizada ponderada Experto 2.....	55
Tabla 22. Ranking de alternativas Experto 2.....	55
Tabla 23. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 3	55
Tabla 24. Síntesis de prioridades globales Experto 3	57
Tabla 25. Matriz normalizada ponderada Experto 3.....	57
Tabla 26. Ranking de alternativas Experto 3.....	57
Tabla 27. Pesos de los criterios para Análisis de sensibilidad Experto 1	60
Tabla 28. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 1 ..	61
Tabla 29. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 1 ..	61
Tabla 30. Nuevo ranking de alternativas Experto 1	61
Tabla 31. Pesos de los criterios Análisis de Sensibilidad Experto 2.....	62
Tabla 32. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 2 ..	63
Tabla 33. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 2 ..	63
Tabla 34. Nuevo ranking de alternativas Experto 2.....	63
Tabla 35. Pesos de los criterios Análisis de Sensibilidad Experto 3.....	64
Tabla 36. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 3 ..	65
Tabla 37. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 3 ..	65
Tabla 38. Nuevo ranking de alternativas Experto 3.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de complejidad en los procesos de decisión multicriterio ..	3
Figura 2. Jerarquización	6
Figura 3. Elementos de un SIG	10
Figura 4. Central Eólica San Cristóbal	19
Figura 5. Central Eólica Baltra - Santa Cruz.....	20
Figura 6. Parque Eólico Villonaco	21
Figura 7. Zona de estudio.....	23
Figura 8. Potencial eólico factible a corto plazo	25
Figura 9. Procedimiento a seguir.....	26
Figura 10. Pesos de los criterios	45
Figura 11. Posibles zonas para instalación de proyecto eólico	49
Figura 12. Alternativas seleccionadas.....	50
Figura 13. Ubicación geográfica de cada alternativa.....	58
Figura 14. Comparativa sobre respuestas de expertos	59
Figura 15. Comparativa de ratio de consistencia	59
Figura 16. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 1	62
Figura 17. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 2	64
Figura 18. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 3	66

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Área de Restricción a zonas urbanas.....	30
Mapa 2. Área de Restricción a aeropuerto	31
Mapa 3. Área de Restricción a bosques protectores	32
Mapa 4. Área de Restricción a áreas de inundación	33
Mapa 5. Área de Restricción a cuerpos de agua.....	34
Mapa 6. Áreas restringidas y no restringidas	35
Mapa 7. Ponderación de velocidad de viento.....	39
Mapa 8. Ponderación de pendiente.....	40
Mapa 9. Ponderación de red de carreteras	41
Mapa 10. Ponderación de líneas de subtransmisión	42
Mapa 11. Ponderación de emplazamiento	47
Mapa 12. Restricción y ponderación de emplazamiento	48

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuesta de selección.....	72
--	----

1. INTRODUCCIÓN

El uso del recurso eólico para la generación de energía eléctrica es una tecnología prometedora que cada vez adquiere mayor importancia dentro del escenario energético que ha sido ampliamente dominado por los combustibles fósiles. En la actualidad, el interés por un recurso energético renovable, como es el caso de la energía eólica, acapara gran interés, ya sea por aspectos políticos y económicos como puede ser el aumento en los precios de los combustibles fósiles y la inseguridad de su abastecimiento; por otro lado, los temas sociales y medioambientales consecuencia del incremento de la sensibilización social frente a los efectos nocivos de la emisión de gases de efecto invernadero.

De acuerdo al atlas eólico del Ecuador realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador en el año 2013 se estima un potencial eólico de 1.670 MW a nivel nacional, concentrados principalmente en la zona a lo largo de la cordillera de los Andes. Sin embargo, a pesar del potencial eólico, el desarrollo de proyectos de aprovechamiento de energía eólica ha sido lento y principalmente se ha debido a iniciativas puntuales. Actualmente se cuenta con una potencia instalada de 20,8 MW, distribuidos en tres proyectos: Villonaco en la provincia de Loja; y San Cristóbal y Baltra ubicados en las Islas Galápagos, de este total el 76% proveniente del Parque Eólico Villonaco están integrados al Sistema Nacional Interconectado y el resto en las Islas Galápagos como sistemas eólicos aislados. El mismo atlas eólico coloca a la provincia de Loja como la provincia con mayor potencial eólico factible con 893,62 GWh/año.

En los últimos años gracias al progreso tecnológico, el desarrollo y masificación de herramientas geográficas ha sido posible integrar metodologías para la toma de decisiones y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la determinación de zonas óptimas para el aprovechamiento del recurso eólico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es analizar y determinar las zonas óptimas en que se podrían instalar proyectos eólicos específicamente en la provincia de Loja a través de la integración de métodos de toma de decisión multicriterio (MDMC) y Sistemas de Información Geográfica (SIG), considerando que de acuerdo a información emitida por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) a través del Atlas Eólico la zona con mayor potencial factible se concentra en Loja.

2.2. Objetivos Específicos

- Establecer los criterios de restricción que prohíban el diseño e implementación de un parque eólico a partir de un modelo digital tomando en cuenta factores medioambientales y sociales.
- Definir los factores de selección que serán tomados en cuenta para la evaluación de las posibles alternativas para la elección de zonas óptimas para la instalación de proyectos eólicos en la provincia de Loja.
- Identificar las zonas con mayor potencial para la instalación de un parque eólico a través del modelamiento de mapas y la asignación de pesos de los criterios.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Métodos de Toma de Decisión Multicriterio (MDMC)

La toma de decisiones multicriterio es un problema crítico de la vida real, en el día a día realizamos actividades que involucran diferentes alternativas en términos de un conjunto de criterios de decisión, donde muy frecuentemente estos criterios están en conflicto unos con otros. Este tipo de problemática, tiene como finalidad la selección de la mejor solución de un conjunto de alternativas disponibles, para lograrlo se emplean determinados juicios en la verificación del cumplimiento de requisitos de alternativas.

La Figura 1, representa la situación compleja a la que se ve enfrentado el responsable de tomar una decisión, se puede evidenciar que éste se encuentra influenciado por sus patrones o modelos mentales, por la influencia de quienes se encuentran en una posición jerárquica superior o inferior, incluyéndose también el estado de ánimo y sus relaciones familiares y sociales, lo cual determina las prioridades al momento de abordar el problema, y añaden desde luego, mayores elementos de complejidad. (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008)

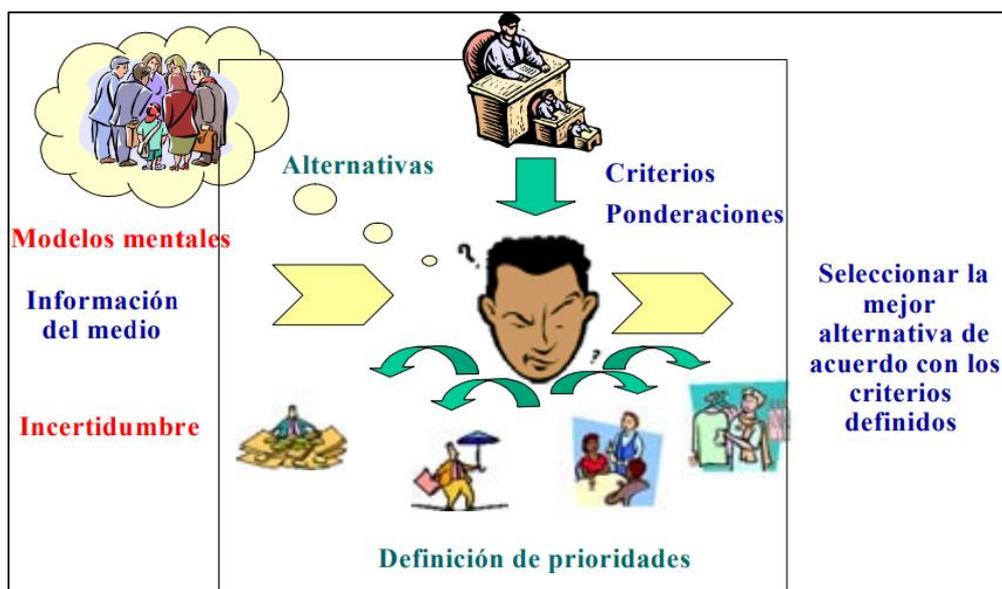


Figura 1. Elementos de complejidad en los procesos de decisión multicriterio
Fuente: (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008)

Se puede afirmar que un individuo o colectivo tiene un problema de decisión cuando se plantea un conjunto bien definido de alternativas o cursos de acción posibles, al menos dos, y un conflicto tal que es necesario elegir una de las alternativas, o bien establecer en ese conjunto unas preferencias. (García Cascales, 2009)

Los MDMC pueden servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente una serie de alternativas a partir de criterios que hayan sido considerados pertinentes en una evaluación. (Pozzobon & Gutiérrez, 2003). En proyectos de ingeniería la toma de decisión es una actividad intelectual esencial, sin la cual el proyecto no puede progresar. Durante el desarrollo de un proyecto se toman decisiones complejas; dicha complejidad viene marcada por la trascendencia que muchas de estas decisiones tienen para el proyecto, por las responsabilidades que ello implica para los directores o encargados de dicho proyecto, por los agentes implicados o afectados por la decisión adoptada y por los diferentes criterios o puntos de vista que hay que tener en cuenta y que a menudo están en conflicto. (García Cascales, 2009)

3.2. Clasificación de los Métodos de Toma de Decisión Multicriterio

➤ Escuela Americana

Los MDMC que pertenecen a este grupo, tienen la característica o la concepción que el decisor maximiza una función de utilidad de tal forma que se obtiene la agregación de la información de los diferentes criterios. Entre los métodos que se encuentran en esta categoría podemos destacar el de suma ponderada y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

➤ Escuela Europea

Este grupo, está representado fundamentalmente por la escuela francesa, que desarrolla una metodología de ayuda a la decisión multicriterio a partir de las dificultades que generaba la construcción de la función de valor, expuesta por la Escuela Americana. (Campos Guzmán, 2016)

3.2.1. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico fue desarrollado a finales de los 60 por Thomas Saaty, quien a partir de sus investigaciones en el campo militar y su experiencia docente formuló una herramienta sencilla para ayudar a resolver el tratado de reducción de armamento estratégico entre los Estados Unidos y la ex Unión Soviética.

El AHP es un método matemático creado para evaluar alternativas cuando se tienen en consideración varios criterios y está basado en el principio de que la experiencia y el conocimiento de los actores son tan importantes como los datos utilizados en el proceso; así mismo, este método utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. (Osorio Gómez & Orejuela Cabrera, 2008)

Este método parte de establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar, así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás. Después se determina el vector propio principal, el cual establece los pesos y el vector valor que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores.

Las etapas generales propuestas por Saaty para esta metodología son las siguientes:

- Modelización.
- Valorización
- Priorización y síntesis
 - Prioridades locales
 - Prioridades globales
 - Prioridad fin o total
- Análisis de Sensibilidad

A continuación, se presentan los pasos a seguir en el método AHP:

Paso 1. Estructurar el problema como una jerarquía

El primer paso del método AHP se basa en modelar el problema de decisión que se busca resolver como una jerarquía. Este hecho es una de las principales características del método, de ahí el término “jerárquico” aparece en su denominación.

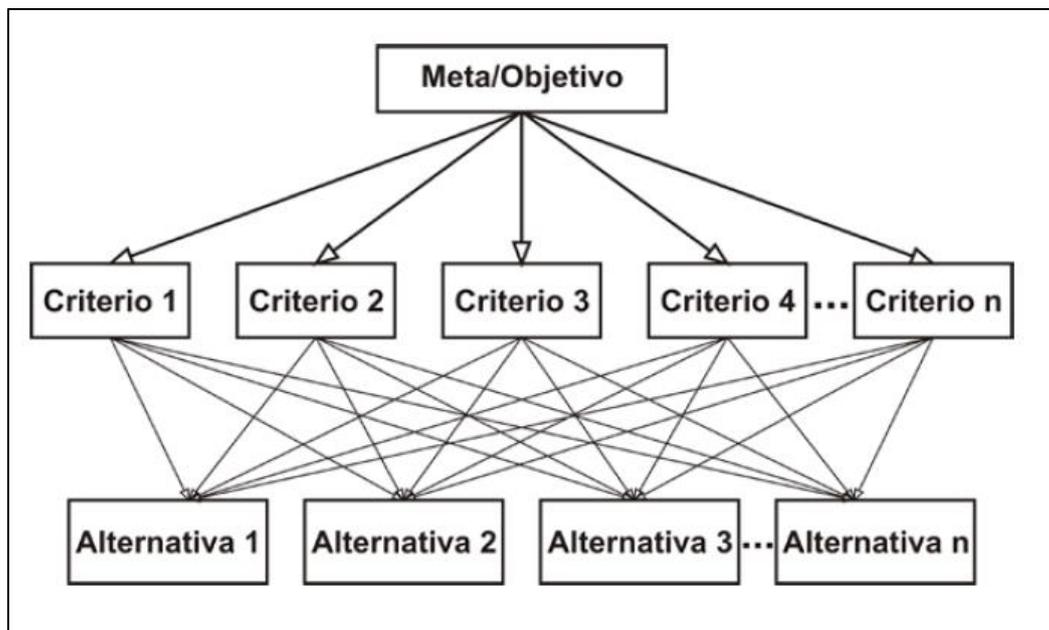


Figura 2. Jerarquización

Fuente: (Saaty, 1980)

Paso 2. Establecimiento de las prioridades entre los criterios

Tabla 1. Escala de Preferencia de Saaty

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente preferida	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo

3	Moderadamente preferida	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro
5	Fuertemente preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente a un elemento sobre el otro
7	Preferencia muy fuerte o demostrada	Un elemento es mucho más favorecido que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extremadamente preferida	Preferencia clara y absoluta de un criterio sobre otro
2,4,6,8		Intermedia entre valores anteriores

Fuente: (Saaty, 1980)

Índice de consistencia

Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio (RI) en función de la matriz (n)

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0,525	0,882	1,115	1,252	1,341	1,404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1,452	1,484	1,513	1,535	1,555	1,570	1,583	1,595

Fuente: (García Cascales, 2009)

El índice de consistencia aleatorio (RI) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty (1/9, 1/8,..., 1,...,8,9).

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RI), se obtiene el denominado ratio de consistencia (CR).

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Si este cociente vale 0,10 o menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido. Para $n=3$ el umbral se fija en 0,05 y para $n=4$ en 0,08. Para $n \geq 5$, si CR es mayor que 0,10 se debe estudiar el de nuevo el problema y revisar los juicios emitidos.

Paso 3: Establecimiento de las prioridades locales y globales entre los subcriterios

En este caso se deberán realizar las comparaciones en pares entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. De este modo, es posible calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio "padre". Es lo que se ha denominado prioridad local.

Una vez calculada la importancia relativa de los criterios respecto a la meta del problema, en el paso 2, y la importancia relativa de los subcriterios respecto al criterio del que dependen, para calcular la importancia relativa global de cada subcriterio respecto a la meta del problema bastará calcular el producto de los diferentes pesos de cada uno de los criterios y subcriterios que se recorran en la jerarquía desde el subcriterio del que se quiere calcular su peso hasta la cúspide de la jerarquía, procedimiento que se denomina composición jerárquica.

Paso 4: Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas

Una vez obtenida la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se plantea la matriz R de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo que explicado en el paso 2, pero esta vez se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma también.

Paso 5: Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa

Cuando se dispone de toda la información de la matriz de valoración, para finalizar el método AHP, solo resta aplicar cualquiera de los métodos de la bibliografía para calcular las prioridades totales asociadas a cada alternativa, que representan la importancia de las alternativas con respecto a la meta. Saaty propone que el método a utilizar sea el método de la suma ponderada.

Paso 6: Análisis de sensibilidad

Como último paso de la metodología AHP puede realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar. En todos estos análisis el procedimiento es el mismo: se realizan variaciones en el valor de un peso (no mayores al 10%) y se observa numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de alternativas. La diferencia entre un análisis de sensibilidad y otro se reduce a la forma de representar la información.

3.3. Sistemas de Información Geográfica

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.

3.3.1. Elementos de los Sistemas de Información Geográfica

Los SIG se encuentran formados por los siguientes componentes:

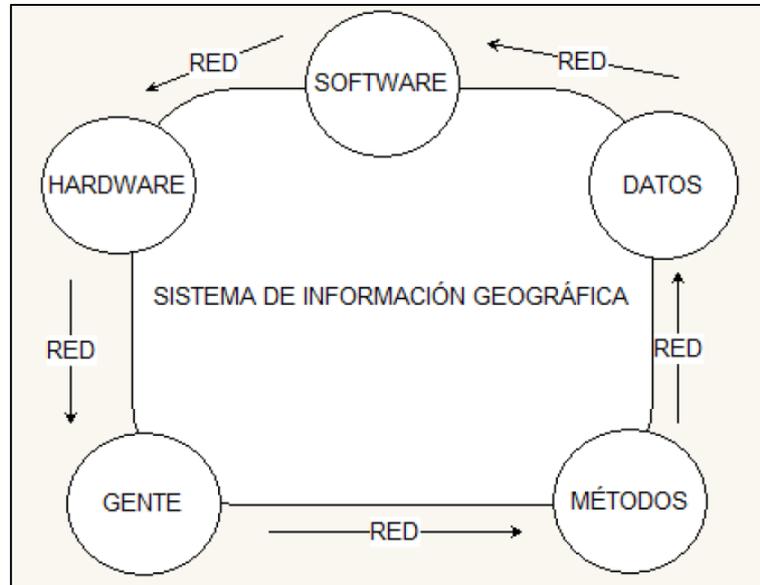


Figura 3. Elementos de un SIG

Fuente: (Ortega Salas, 2013)

- **Hardware:** Consiste en los recursos tangibles como computadores y servidores en los cuales se instala y ejecuta la aplicación del SIG y la base de datos geográfica; en este componente se debe escoger un equipo que tenga memoria, procesador y almacenamiento adecuados para correr el software.
- **Software:** Se encarga de realizar las operaciones y la manipulación de los datos, este componente proporciona una aplicación que tiene: las funcionalidades y herramientas necesarias para almacenar, administrar, analizar y visualizar la información geográfica. El programa del SIG puede ser un cliente que se instala en cada computador personal también puede ser una aplicación web de intranet o internet en este caso el software debe instalarse en un servidor robusto y los usuarios acceden a través de un navegador.
- **Datos:** Los datos se componen de registros que tienen la información geográfica y atributos no espaciales, esta información puede estar almacenada en archivos o en base de datos.

- **Métodos:** 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 service; pero es importante definir los métodos que se utilizan en cada proceso.

- **Gente:** son las personas que gestionan y desarrollan las posibilidades que ofrecen la interacción entre los elementos, para producir resultados, soluciones a situaciones problema.

- **Red:** Este componente es la unión y comunicación de todos los elementos anteriores, la red permite comunicar y compartir información rápidamente.

3.3.2. Representación de datos en un SIG

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. (Del Bosque, Fernandez, Forero, & Pérez, 2012)

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.

3.3.3. 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.

4. ESTADO DEL ARTE

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan una aplicación práctica de las nuevas tecnologías para la producción y uso de cartografía inteligente ya que, en una misma base de datos, se guarda la información gráfica/geoespacial y la alfanumérica asociada, lo que permite el mantenimiento simultáneo y coherente de toda la información georeferenciada, así como su fácil explotación en todos los campos que requieran el uso de cartografía.

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.

En el presente estudio se busca analizar cómo se integran estas dos metodologías para lograr un solo objetivo dentro de las energías renovables específicamente con relación a la energía eólica, para ello se ha realizado revisión bibliográfica de artículos científicos con aplicaciones concretas en este tema que involucran las dos metodologías por separado y su integración.

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 como ambas han sido fusionadas y usadas dentro del ámbito de las energías renovables.

4.1. SIG relacionado con las energías renovables

En la actualidad existen numerosos proyectos que partiendo de las energías renovables toman como base de su análisis a los SIG, varios de ellos tienen un carácter sectorial y buscan la aplicación de los SIG a la resolución de problemas como evaluación de recursos para fuentes determinadas o problemas relacionados con la localización. 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. Existen estudios que buscan modelizar el territorio desde una visión de integración de distintas fuentes renovables en el sistema energético regional.

A menudo los modelos para la evaluación de recursos eólicos y la selección de los emplazamientos más óptimos para su explotación incorporan herramientas de análisis geográfico. De igual forma existen herramientas habituales en la evaluación de estos recursos incorporan módulos de análisis de rugosidad y topografía, para ello se han incorporado SIG comerciales con los que se pretende realizar un análisis más global de las posibilidades de explotación de los recursos. En algunos casos, el estudio se centra en la propia evaluación de

los recursos disponibles teniendo en cuenta las limitaciones para la instalación de parques y con el principal objetivo de elaborar un mapa de recursos eólicos.

Varias investigaciones que incorporan el uso de SIG y su integración con las energías renovables se han realizado, a continuación, se mencionan algunos estudios: (Rincón, Domínguez, Amador, Arribas, & Pinedo, 2011) el objetivo de este estudio fue aplicar el modelo IntiGIS para definir la tecnología más conveniente para cubrir las necesidades de electrificación de la Isla Zapara como resultado se obtuvo que el sistema diésel central fue la mejor opción de electrificación para la demanda actual de la isla. Otros investigadores (Martín Ávila & Domínguez Bravo, 2015) 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 (Domínguez Bravo, 2002) 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. (Domínguez Bravo , Pinedo Pascua, & Augusto González, 2008)

En este estudio se pretendía usar herramientas SIG (Inti-Gis) para la integración de recursos de energías renovables en electrificación rural.

4.2. MDMC relacionado con las energías renovables

En esta sección se citan algunos casos de estudio donde los MDMC han sido aplicados con sus diferentes variantes, principalmente usando la metodología AHP para la contribución a la toma de decisiones dentro de las energías renovables.

Como ejemplo de un estudio de caso se puede nombrar al realizado por (Tubet, 2016) que está enfocado principalmente a la sostenibilidad energética, a través del uso de la metodología AHP se determinó que la mejor alternativa es el llamado escenario de “Medidas”. En otro estudio (Yajure Ramírez & Arlenis Guzmán, 2017) en el que se realizó una comparación de técnicas de toma de

decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad se tuvo como resultado que la jerarquía obtenida con la técnica AHP es similar a la jerarquía obtenida con la técnica PROMETHEE.

Otros expertos (Kaya & Kahraman, 2011) desarrollaron otro caso de estudio en el que emplearon una metodología híbrida con números difusos: AHP-VIKOR-Fuzzy con matrices de conjuntos difusos en la evaluación de los criterios, además de evaluar las áreas de forestación como alternativas en Estambul, mediante esta metodología encontraron que la cuenca de Ömerli es el distrito más adecuado para la forestación en Estambul. Otros investigadores (Guerrero & Faxas-Guzmán, 2015) en este estudio se realizó un análisis de toma de decisión con AHP/ANP enfocado a las energías renovables en República Dominicana, el resultado que arrojó fue que de acuerdo a la complejidad del caso se pudo identificar consideraciones tales como la producción energética y el suministro de la demanda obteniendo así un resultado más efectivo con ANP. Por otro lado (Juan Escrivá, 2016) realizó una investigación sobre la aplicación del proceso AHP relacionado al dimensionamiento de sistemas renovables, dicha metodología ha resultado efectiva para sistemas híbridos.

En el estudio realizado por (Ospina Blandón, 2012) el enfoque fue la valoración económica de los activos ambientales empleando la metodología AHP y GP, el proceso (AHP) puede considerarse como un procedimiento comparativo que combina la cuantificación de variables cualitativas y la incorporación de los pesos en las preferencias, mientras que la Programación por metas (GP) captura la información proporcionada por los escasos elementos disponibles y la medición del experto en el proceso de valoración. Es la técnica más aproximada para encontrar la satisfacción de las metas.

4.3. Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica

En los últimos años, se han realizado varios estudios sobre aspectos de localización y ubicación óptima para instalaciones de generación de energía. A continuación, se realiza una revisión general de los diferentes estudios

relacionados a los problemas de selección de sitios adecuados para la explotación de energía eólica. Todos los artículos científicos revisados se relacionan específicamente a la integración de la metodología AHP con SIG para la determinación de sitios óptimos para la instalación de parques eólicos.

Tabla 3. Integración de los SIG con los MDMC relacionado con la energía eólica

Estudio y autor	Técnicas aplicadas	Ubicación del caso de estudio	Objetivo del estudio	Resultados obtenidos
(Bennui, Rattanamanee, Puetpaiboon, Phukpattaranont, & Chetpattananondh, 2007)	SIG y AHP	Tailandia	Potencial eólico económico, social e idoneidad ambiental	La costa este de Tailandia y las regiones montañosas son las regiones más adecuadas para el desarrollo de turbinas de viento
(Ramírez-Rosado, y otros, 2008)	SIG y AHP	La Rioja (España)	Potencial eólico económico, social e idoneidad ambiental	Solo un 1.4% del área de estudio recibe el puntaje más alto
(Georgiou, Polatidis, & Haralambopoulos, 2012)	SIG y AHP	Distrito de Larnaca (Chipre)	Potencial eólico económico, social e idoneidad ambiental	Solo el 0.1% del área de estudio es muy adecuado para parques eólicos
(Latinopoulos & Kechagia, 2015)	SIG y AHP	Unidad regional de Kozani	Potencial eólico económico, social e idoneidad ambiental	Todos los proyectos de parques eólicos ya autorizados son aceptables con respecto a la idoneidad general
(Watson & Hudson, 2015)	SIG y AHP	Centro sur de Inglaterra, (Reino Unido)	Potencial económico eólico y solar, social e idoneidad ambiental	El área de estudio es más adecuada para la energía solar que para la eólica

Elaboración propia

4.4. Energía eólica en Ecuador

En el Ecuador existen zonas con un alto potencial eólico debido a su ubicación geográfica, en la que destacan las Islas Galápagos y la zona a lo largo de la cordillera de los Andes. En el año 2013, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable desarrolló y publicó el primer Atlas Eólico del Ecuador, los resultados obtenidos a partir de este trabajo fueron la estimación de un potencial disponible bruto total de 1.670 MW y un potencial factible a corto plazo de 884 MW. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013).

Al hablar de Ecuador en particular, el uso de la energía eólica es relativamente reciente y estadísticamente poco significativo. De acuerdo a datos publicados en el Balance Energético Nacional, esta energía representa aproximadamente 0,017% del total de la producción de energía primaria junto con la energía solar y tan solo 0,24% de la estructura de generación eléctrica. La potencia efectiva representa 0,4% del total nacional, equivalente a 19,6 MW. En 2007 inició la producción de energía eólica, que para este primer año fue de 0,962 GWh, llegando a 56,7 GWh en 2013.

De acuerdo al Atlas Eólico (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013), la orografía del Ecuador divide el territorio en cuatro zonas climáticas bien definidas, que confieren unas características particulares.

De Este a Oeste, estas zonas son:

- La Zona Oriental o Amazónica, en que la frondosa vegetación selvática influye de forma decisiva en la disminución de la velocidad de los vientos alisios en los niveles más cercanos al suelo.

- La Zona de la Sierra, donde la Cordillera de los Andes comprime los vientos, resultando en una aceleración de los mismos, en una clara manifestación de lo que se conoce en física de fluidos como efecto Venturi. Estos elevados vientos, sin embargo, se producen en emplazamientos muy elevados, donde además de la dificultad del acceso a los mismos, la energía del viento

disminuye proporcionalmente al descenso de la densidad que se produce con la altitud.

➤ La Zona de la Costa, donde interaccionan los vientos alisios del Este con dos circulaciones locales: la brisa que se establece por el contraste de temperaturas entre el continente y el océano, y la circulación valle- montaña por la influencia de la Cordillera de los Andes. La combinación del viento global con el local en este caso da lugar a una mayor variación espacial del recurso y a la localización de algún área con velocidades algo superiores al entorno.

➤ Islas Galápagos, que agrupan tres características importantes para entender su distribución de viento: son islas, volcánicas y bajo la influencia de los alisios. Por el hecho de ser islas, reciben un viento global menos perturbado que en el continente; sin embargo, los vientos alisios a esta latitud tan baja son de limitada intensidad.

Por último, su carácter de archipiélago volcánico, hace que las pendientes sean considerables y que en conjunto configuren un laberinto por el que el viento converge y diverge (por lo que se acelera y se frena) en un espacio relativamente pequeño, presentando además diversos cambios de dirección.

El país cuenta actualmente con tres parques eólicos funcionando, los cuales se encuentran situados en las zonas más favorables para el uso del viento, a continuación, se describen dichos parques:

4.4.1. Parque eólico San Cristóbal

Constituye el primer parque eólico construido en el Ecuador, fue inaugurado en octubre de 2007 en la isla San Cristóbal del Archipiélago de Galápagos, cuenta con 3 aerogeneradores marca MADE de fabricación española con una potencia instalada de 2,4 MW y una energía media estimada de 3.20 GWh/año. Este proyecto tuvo un gran impacto ya que permitió cubrir 30% de la demanda de electricidad en la isla, además, la producción de energía eléctrica ha evitado la emisión de 6.521 toneladas de CO₂ en los últimos tres años. (Erazo Mogrovejo, 2017)



Figura 4. Central Eólica San Cristóbal

Fuente: INER

4.4.2. Parque Eólico Baltra – Santa Cruz

Por su relevancia ambiental, el MEER se estableció como meta satisfacer toda la demanda eléctrica de las Islas Galápagos con energías renovables a través del programa “Cero Combustibles Fósiles en Galápagos”. Tras estudios de prefactibilidad, factibilidad y *micrositing* se desarrolló el proyecto Baltra-Santa Cruz, que entró en operación en 2010, la misma cuenta con tres aerogeneradores de 750 KW tipo full converter y de magneto permanente, con una potencia instalada de 3,2 MW. El proyecto aporta una cantidad de energía de al menos 4.650 MWh/año, representando una reducción de 450.000 galones diésel/año – equivalentes a 25% del consumo de diésel previsto para la central Térmica de Puerto Ayora (MEER, 2015).



Figura 5. Central Eólica Baltra - Santa Cruz

Fuente: INER

4.4.3. Parque Eólico Villonaco

En 2011, se inició la construcción del proyecto eólico Villonaco que constituye el primer proyecto eólico en Ecuador continental, además de ser el primero en el mundo con una velocidad promedio anual de 12.7 m/s. El proyecto se encuentra ubicado en la provincia de Loja, cantón Loja.

Este proyecto entró en operación a mediados del año 2012 y contempla 11 aerogeneradores del tipo GW70/1500, a lo largo de la línea de cumbre del cerro Villonaco con una distancia aproximada de 2 km. La subestación de elevación Villonaco 34,5 kV/69 kV tiene una capacidad de 25 MVA y presenta un esquema de conexión de barra principal y transferencia. La subestación Loja, contempla la instalación de una bahía de 69 KV, la cual recibe la energía proveniente de la subestación Villonaco para ser conectada al Sistema Nacional de Transmisión.

Se constituye en un proyecto emblemático del Estado Ecuatoriano, mismo que se encuentra operando de forma normal y continua sobre la base de los

requerimientos del sistema eléctrico ecuatoriano, aportando al Sistema Nacional una energía neta de 332,38 GWh desde su entrada en operación a julio de 2017, reduciendo emisiones de CO₂ en aproximadamente 32 mil Ton/año, sustituyendo la importación de energía y creando 254 fuentes de empleo directo, adicionalmente beneficia a más de 200 mil habitantes correspondientes al cantón Loja. (Soto, 2017)



Figura 6. Parque Eólico Villonaco

Fuente: INER

4.5. Incorporación de los SIG con los MDMC vinculado a la energía eólica en Ecuador

En el año 2017 el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables principal organismo gubernamental encargado de la promoción e investigación de energías renovables en Ecuador publicó un artículo científico en la reconocida revista científica *Renewable Energy*, el estudio lleva como título: Ubicación de idoneidad de parques eólicos utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG), basado en métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM): caso de Ecuador continental, de acuerdo a los autores de este artículo (Villacreses, Gaona, Martínez-Gómez, & Jijón, 2017) la investigación tuvo como objetivo implementar un sistema de información geográfica con métodos de toma

de decisión multicriterio, para seleccionar la ubicación más factible para la instalación de plantas de energía eólica en Ecuador. Además, se realizó un proceso de estandarización, que consiste en establecer un índice de rendimiento general para evaluar los resultados.

Los métodos de toma de decisión multicriterio (MCDM) aplicados a esta investigación fueron los siguientes: AHP método que se implementó para calcular los pesos, el (OWA) Acciones Repetitivas Ocupacionales (OCRA), VIKOR y TOPSIS, se aplicó también un índice de rendimiento global (OPI) para evaluar los resultados. Finalmente, la correspondencia mutua entre MCDM métodos ha sido evaluado por un coeficiente de correlación de Pearson.

Los resultados que se obtuvieron revelaron que el sitio con el índice de rendimiento general más alto es la Región andina de Ecuador. El resultado del rendimiento general indica que los cuatro métodos de toma de decisiones multicriterio seleccionados proporcionaron resultados similares, donde el valor fue igual o mayor al 75% de la puntuación máxima de una ubicación ideal. En este contexto, los métodos analizados convergen en soluciones similares e indican que los métodos de toma de decisión multicriterio son una herramienta poderosa para seleccionar ubicaciones ideales para parques eólicos.

5. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio seleccionada para la realización del presente trabajo es la provincia de Loja, se encuentra ubicada al sur de la cordillera oriental de los Andes, aproximadamente en la latitud 04° Sur; limita al Norte con las provincias de Azuay y El Oro, al Sur y al Oeste con la República del Perú, al Este con Zamora Chinchipe, en el contexto nacional, esta provincia representa el 4,30% del área total del territorio nacional distribuido en: 16 cantones, 24 parroquias urbanas y 78 parroquias rurales. De acuerdo a los resultados del censo del 2010 la provincia de Loja cuenta con 448.966 habitantes ocupando el décimo lugar en cantidad de población a nivel nacional, representando el 3,1% con respecto al

total nacional; y regionalmente ocupa el segundo lugar, con una equivalencia del 39,2%. (Prefectura de Loja, 2015)



Figura 7. Zona de estudio

Fuente: Google Earth, 2018

En el año 2013 el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable elaboró el Atlas Eólico del Ecuador el cual presenta las condiciones anuales de viento para todo el territorio ecuatoriano con una resolución de 200m x 200m. Mediante la integración de los mapas digitales, utilizando recursos de geo-procesamiento, cálculo de desempeño y producción de energía eléctrica a partir de las curvas de potencia de turbinas eólicas existentes en el mercado, se ha llegado a estimar un potencial de generación eléctrica nacional a partir de parques eólicos instalados en las zonas con mejor recurso de viento. (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013).

Como antecedente se menciona que Loja es la única provincia en el Ecuador continental que ha implementado un parque eólico en su territorio, estamos

hablando del Parque Eólico Villonaco construido a una altura de 2720 metros sobre el nivel del mar, incorpora energía renovable al Sistema Nacional Interconectado, beneficiando principalmente a los habitantes de las provincias de Loja y Zamora Chinchipe, posee una potencia nominal de 16,5 MW suministrada por 11 generadores tipo GoldWind 70/1500. (Soto, 2017)

Como se puede observar a continuación en la Figura 8 la provincia con mayor potencial eólico factible a corto plazo es Loja con 893,62 GWh/año, es por esta razón que se ha escogido esta provincia para el presente análisis y determinación de zonas idóneas para instalación de proyectos eólicos, además de que al ser la provincia pionera en desarrollar esta tecnología, cuenta con experiencia para poder ampliar la construcción de más parques eólicos dentro de su territorio.

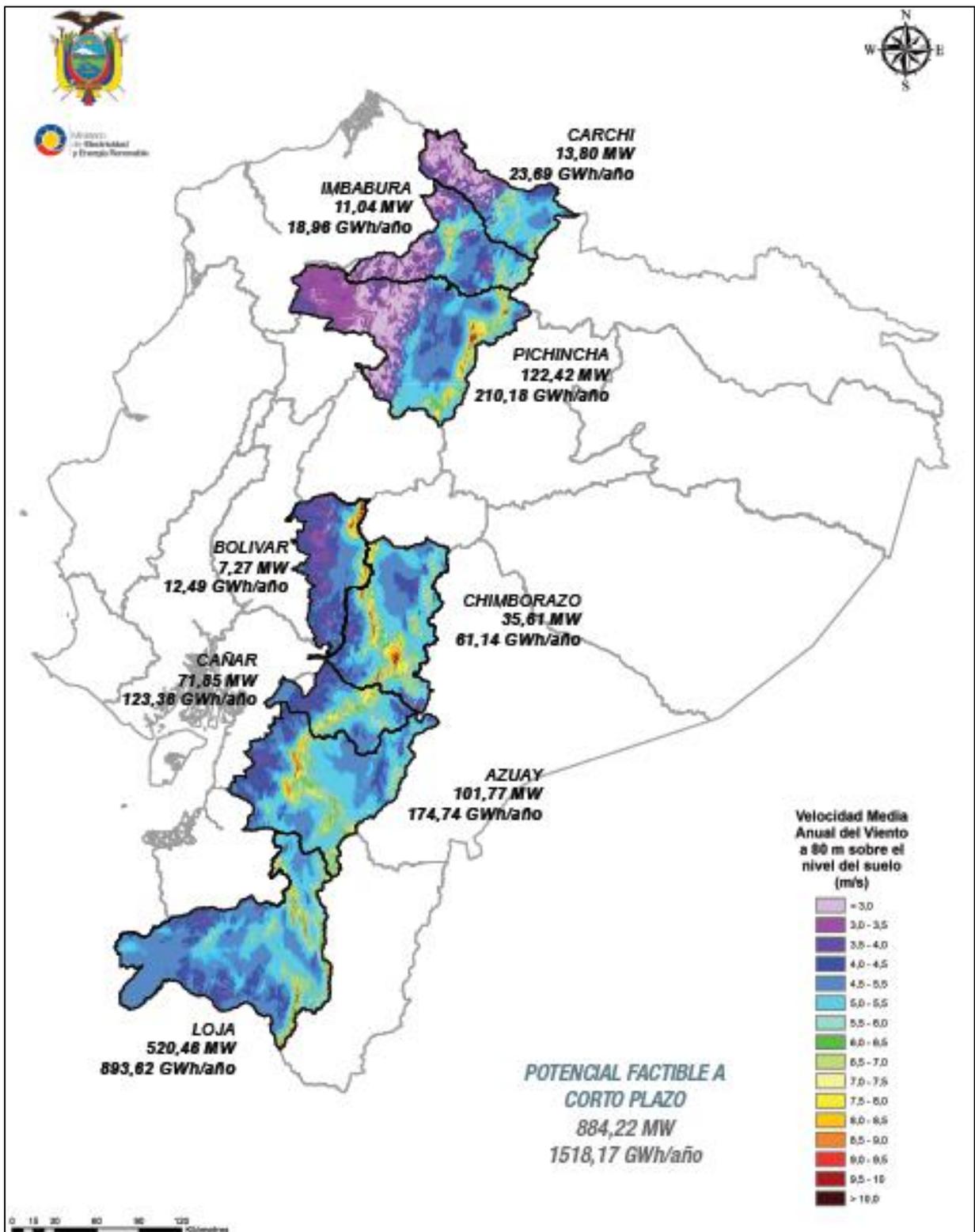


Figura 8. Potencial eólico factible a corto plazo
Fuente: (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013)

6. METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente las metodologías que se emplearán para la elaboración del presente trabajo serán los Sistemas de Información Geográfica integrados con un método de toma de decisión multicriterio en este caso el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

En primer lugar, se determinarán los elementos que influyen en la decisión de ubicación: criterios y alternativas. Se realizará la recopilación de información acerca de los criterios, para posteriormente seleccionar la información que sea de utilidad haciendo uso del software ArcGIS y luego aplicar el MDMC seleccionado.

En la Figura 9 se pueden observar uno a uno los pasos que se seguirán para alcanzar los objetivos planteados.

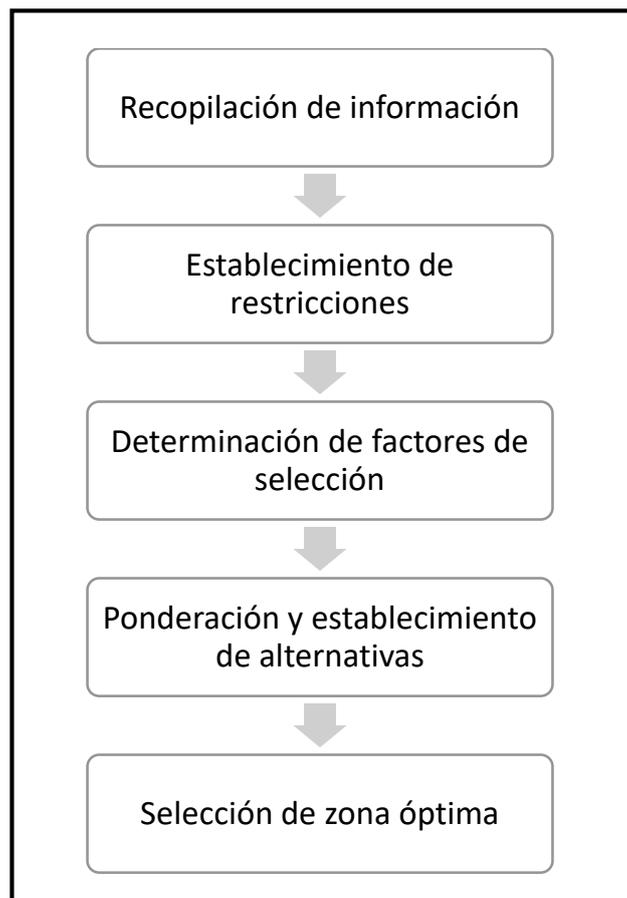


Figura 9. Procedimiento a seguir
Elaboración propia

6.1. Recopilación de información

La localización de un parque eólico se ve condicionada por distintos criterios, en este caso existirán criterios de restricción, es decir, que en áreas donde se encuentren estos criterios se descartará la posibilidad de implantación de un parque eólico; el segundo grupo serán los factores de selección, en este punto se aplicará la metodología AHP para poder seleccionar la mejor alternativa para la instalación de un parque eólico.

6.2. Establecimiento de restricciones

En la actualidad Ecuador no cuenta con ninguna legislación que establezca las pautas y procedimientos a seguir para la instalación de parques eólicos en su territorio por lo que la metodología empleada para determinar las distancias mínimas a cada criterio seleccionado se basa en la revisión bibliográfica realizada a artículos científicos relacionados al tema de estudio.

El establecimiento de restricciones consiste en la aplicación de clips, generación de buffers correspondientes a las zonas de amortiguamiento, rasterización de capas, esto con el fin de excluir a todas aquellas zonas que representan un limitante ya sea de carácter técnico, social o ambiental para la instalación de un proyecto eólico en la provincia de Loja.

6.3. Determinación de factores de selección

Después de establecer los criterios restrictivos basados en condiciones ambientales, estructurales o técnicas y sociales del área, y de haber determinado las zonas consideradas como restrictivas, se procede a la definición de los factores de selección los cuales son considerados como importantes a la hora de ejecución de un proyecto específico. Este proceso consiste en la clasificación de cada uno de los factores. Se harán rangos para cada uno y a esos rangos se les asignará un valor.

6.4. Ponderación y establecimiento de alternativas

Después de llevar a cabo el proceso de descartar las zonas restringidas se procede a evaluar los factores de selección, primero determinando los pesos de estos factores para, en este caso ingresar los resultados en ARCGIS en la opción superposición ponderada, el mapa que se obtendrá estará compuesto por las zonas que cumplan con los factores antes mencionados en un rango de idoneidad que va del 1 al 4.

Para la obtención de los pesos de los criterios se realizó una encuesta a tres expertos en energías renovables para que evaluarán el nivel de importancia de cada uno de ellos.

Después se podrán determinar las zonas que se encuentran en ubicación óptima, con estos resultados se hará una selección de aquellas zonas que cumplan con el requerimiento del área necesaria para construir un parque eólico que según (Nelson, 2013) es de 5 km².

6.5. Selección de zona óptima

Finalmente, con las alternativas que se hayan identificado se procederá a aplicar el Proceso Analítico Jerárquico, se aplicarán las encuestas pertinentes a expertos y se analizarán los resultados para establecer el ranking de todos los emplazamientos. En el epígrafe de Anexos se puede observar el modelo de encuestas aplicadas.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a la metodología planteada en el apartado anterior se realizará la recopilación de información, para ello en la Tabla 4 se presentan los criterios a tomar en cuenta para este proyecto tanto si son criterios restrictivos como si son criterios de selección y la fuente de donde se extrajo las coberturas correspondientes.

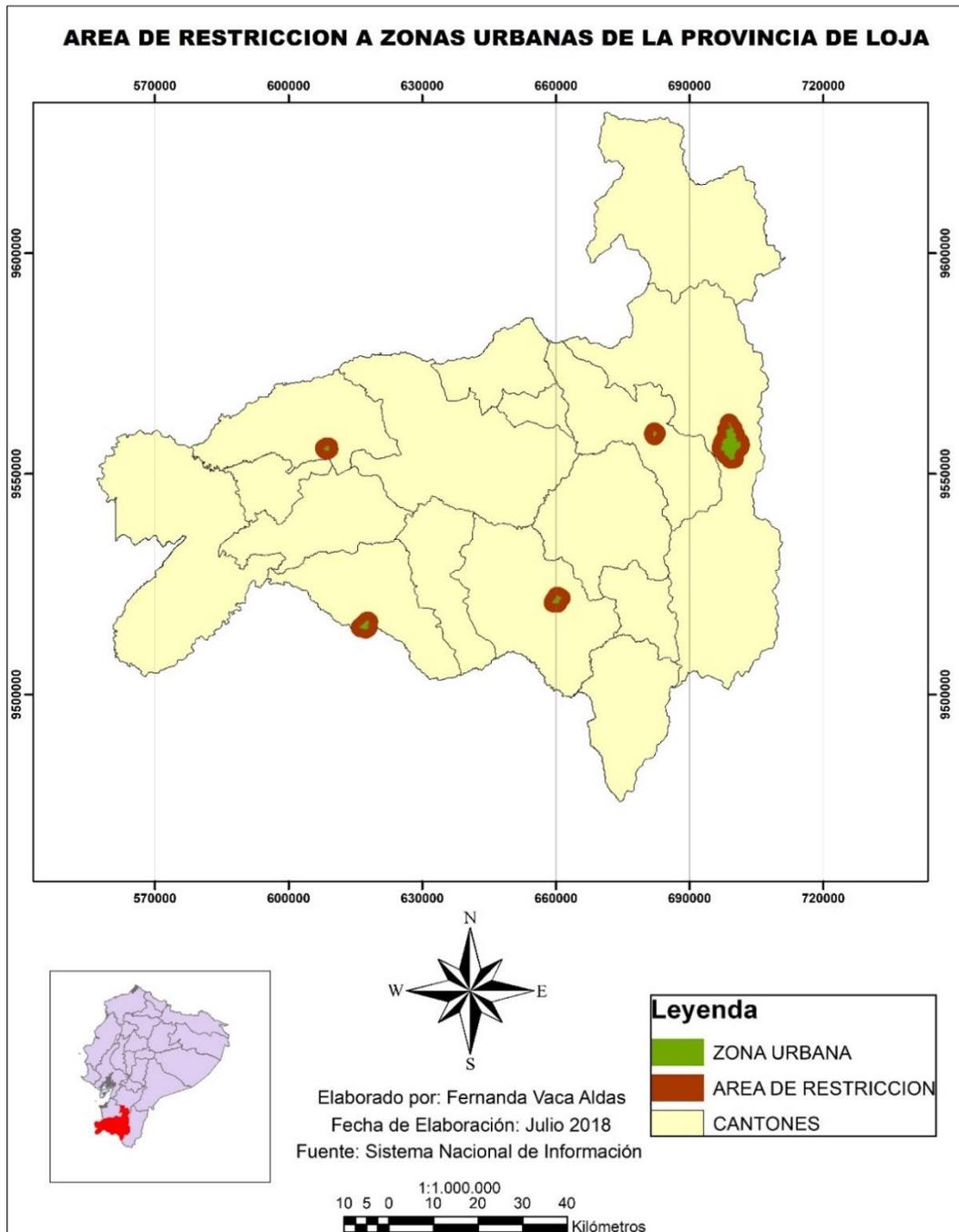
Tabla 4. Identificación de criterios de restricción y selección

Criterio	Fuente	Tipo de criterio/factor
Área urbana	Instituto Geográfico Militar	Restrictivo
Aeropuerto	Instituto Geográfico Militar	Restrictivo
Bosques Protectores	Ministerio de Ambiente	Restrictivo
Área de inundación	Instituto Geográfico Militar	Restrictivo
Cuerpos de agua	Instituto Geográfico Militar	Restrictivo
Velocidad del viento	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables	Selección
Pendiente	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables	Selección
Red de carreteras	Ministerios de Transporte y Obras Públicas	Selección
Líneas de Subtransmisión	Corporación Eléctrica del Ecuador	Selección
Subestaciones eléctricas	Corporación Eléctrica del Ecuador	Selección

Elaboración propia

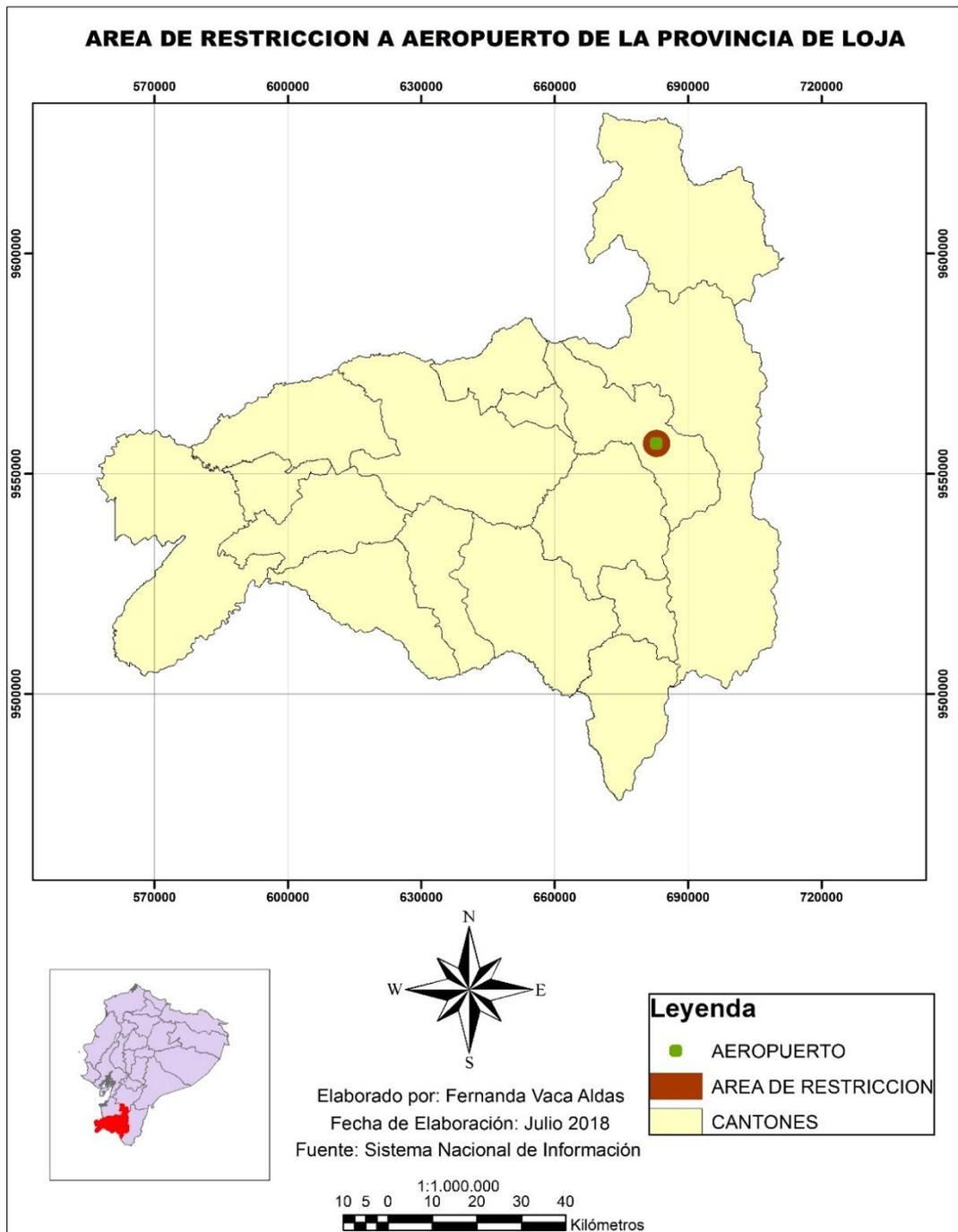
El siguiente paso de la metodología contempla el establecimiento de restricciones, para ello se elaborarán los mapas correspondientes a las zonas restringidas en las que se tomaron en cuenta 5 criterios, a continuación, se describirá cada uno de ellos:

C1. Área urbana: publicaciones científicas anteriores detallan varias distancias de amortiguamiento con respecto a las áreas urbanas, para el propósito de esta investigación se ha tomado como referencia el estudio realizado por (Baban & Parry, 2001) en el que se toma una distancia de 2000 metros, el área dentro de esta zona queda excluida para ser tomada en cuenta para instalación de parques eólicos.



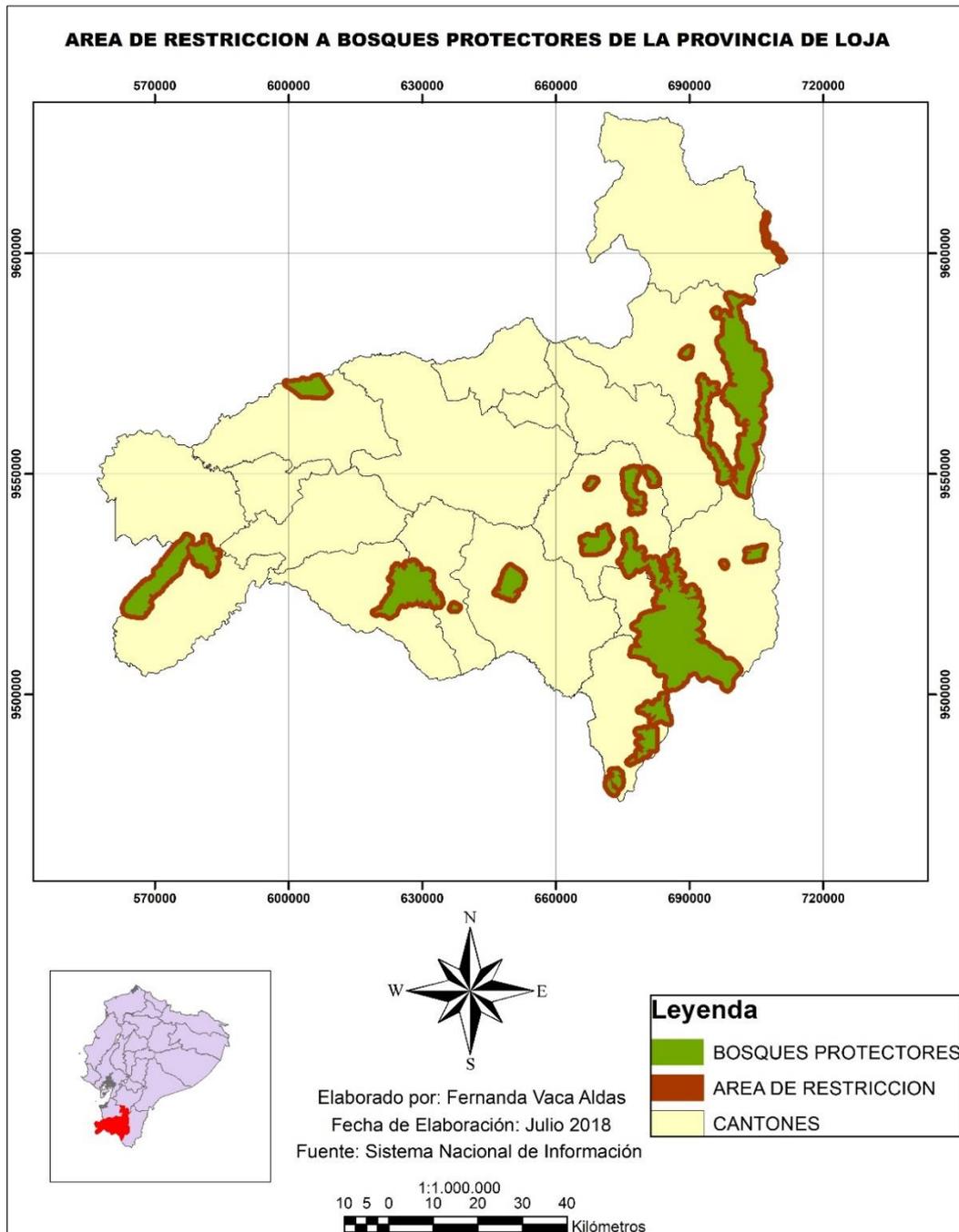
Mapa 1. Área de Restricción a zonas urbanas
Elaboración propia

C2. Aeropuerto: por razones de seguridad, los parques eólicos no deberían estar ubicados cerca de infraestructuras, como los aeropuertos. En este caso se ha tomado como referencia el estudio realizado por (Latinopoulos & Kechagia, 2015) en el que se establece que la distancia mínima para poder instalar un proyecto eólico es de 3000 metros.



Mapa 2. Área de Restricción a aeropuerto
 Elaboración propia

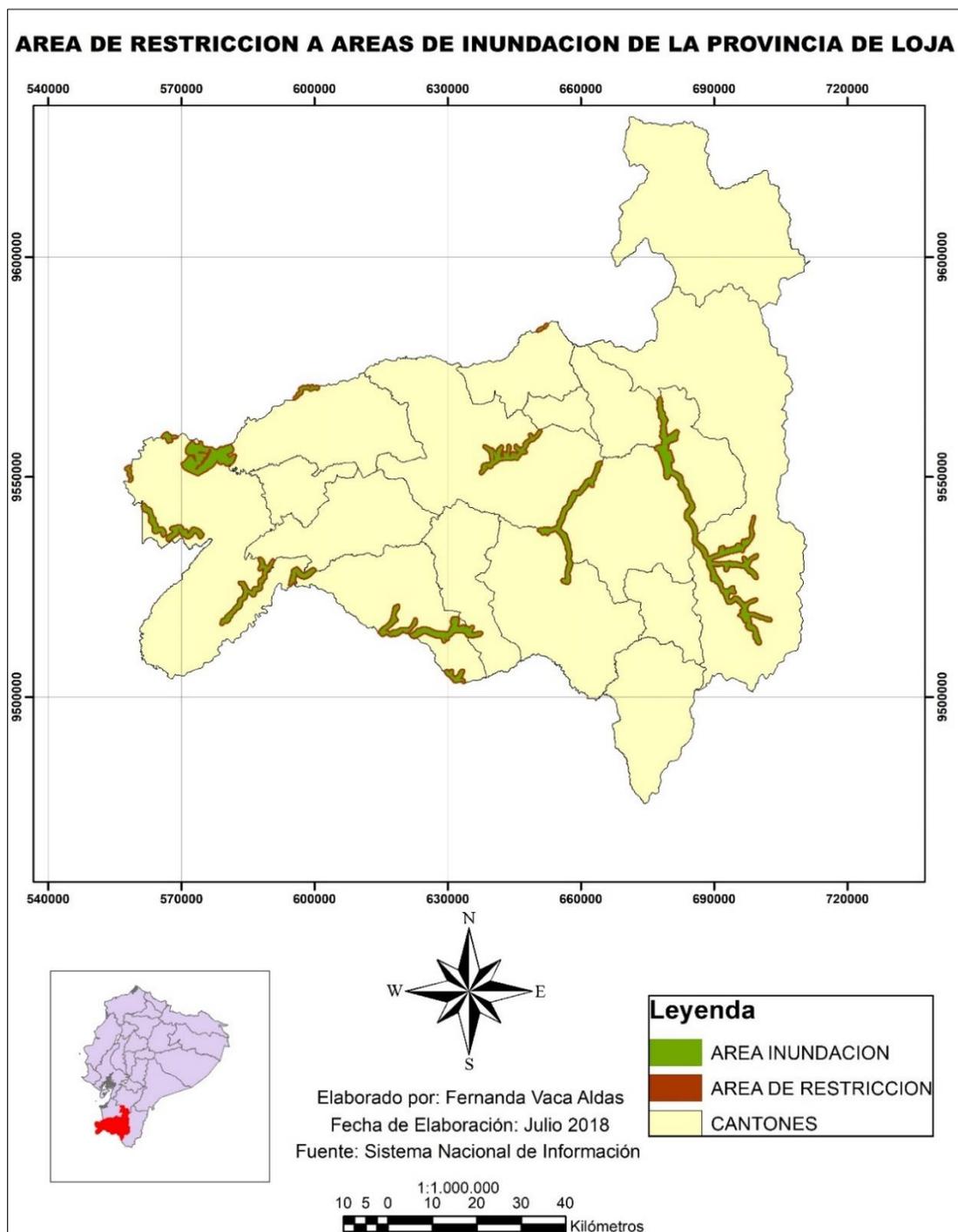
C3. Bosques Protectores: para proteger el ambiente natural, los parques eólicos no deberían estar ubicados en áreas protegidas como parques nacionales, reservas naturales, bosques protectores o áreas estatales de conservación. Según el estudio de (Baban & Parry, 2001) se identificó que se debe aplicar un buffer de 1000 m de áreas de valor ecológico, en este estudio se tomará la misma distancia como referencia.



Mapa 3. Área de Restricción a bosques protectores
Elaboración propia

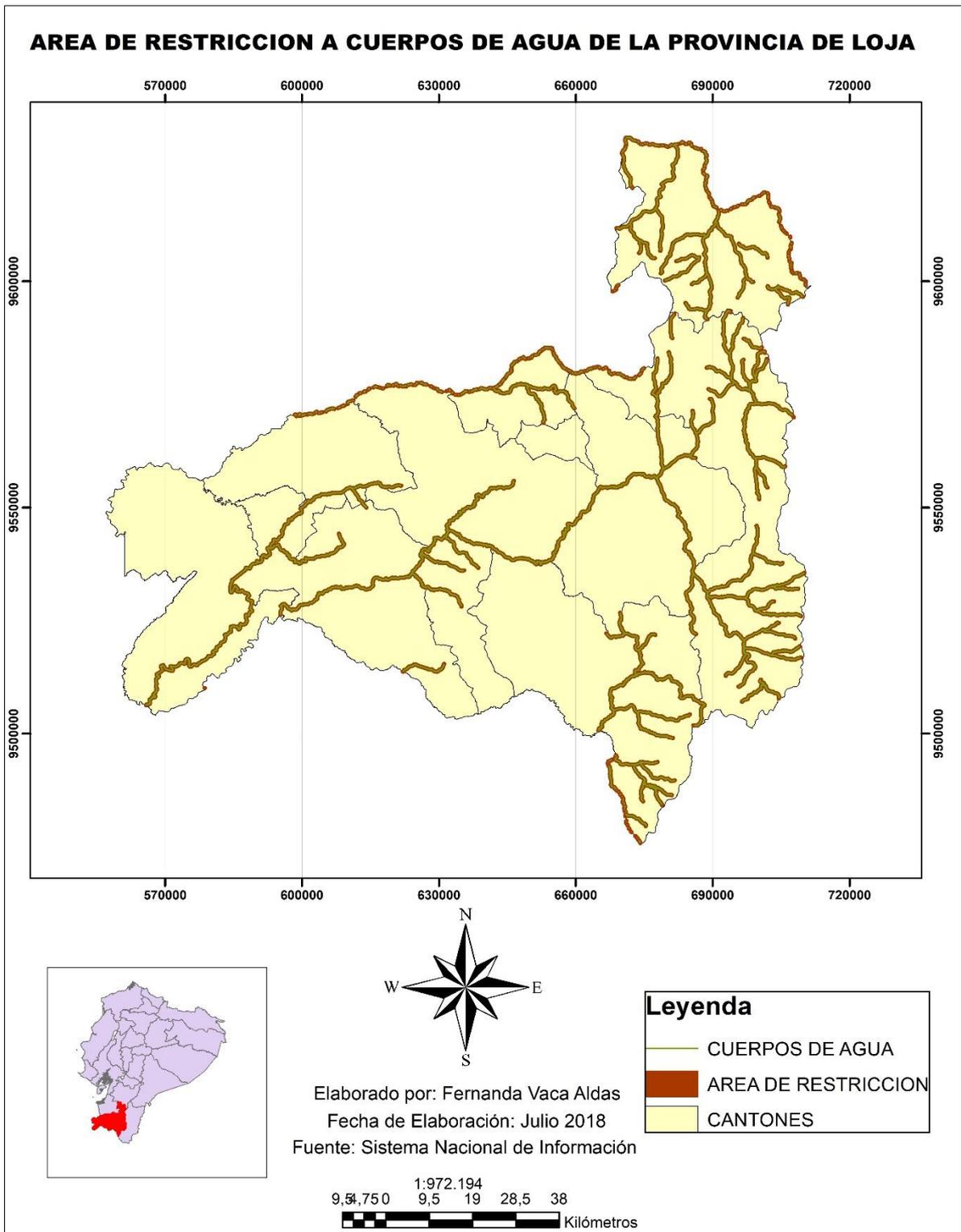
C4. Y C5. Área de inundación y cuerpos de agua: para estos dos criterios se tomó una distancia mínima de 400 m, esto de acuerdo al estudio de (Baban & Parry, 2001).

En el Mapa 4 se aprecian las zonas restringidas pertenecientes a zonas susceptibles de inundación y en el Mapa 5 se observan los cuerpos de agua.



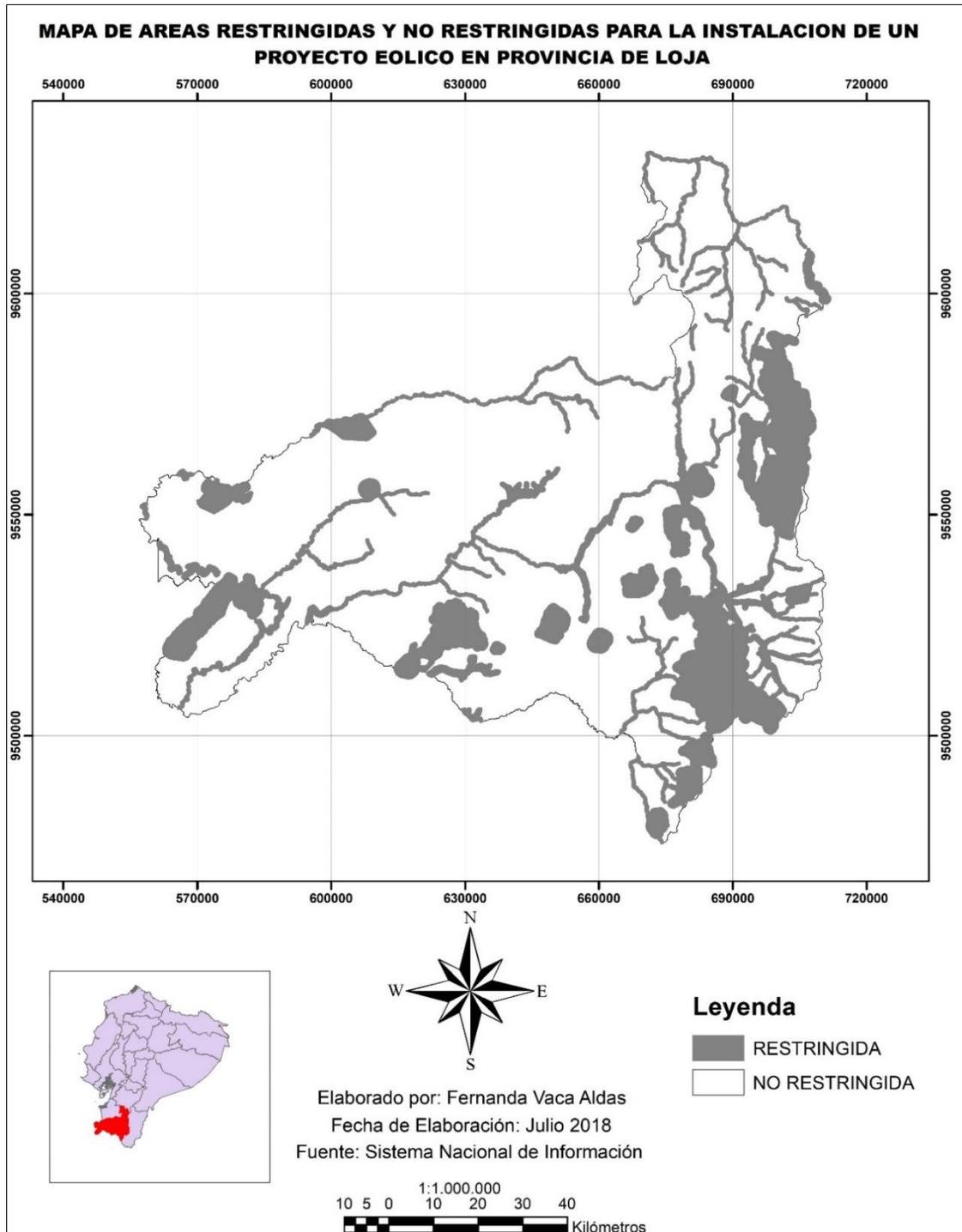
Mapa 4. Área de Restricción a áreas de inundación

Elaboración propia



Mapa 5. Área de Restricción a cuerpos de agua
 Elaboración propia

Finalmente, en el Mapa 6 se puede observar la provincia de Loja con las áreas restringidas que quedan totalmente descartadas para la implantación de un proyecto eólico basado en los criterios anteriormente descritos.



Mapa 6. Áreas restringidas y no restringidas

Elaboración propia

El siguiente paso de acuerdo a la metodología planteada es la determinación de factores o criterios de selección, en el presente estudio, se identificaron cinco factores o criterios de selección, que se describen a continuación:

F1. Velocidad del viento: este factor de selección denota la idoneidad del sitio con respecto a la velocidad del viento, de acuerdo al estudio realizado por (Villacreses, Gaona, Martínez-Gómez, & Jijón, 2017) el modelo de velocidad del viento seleccionado en este caso fue de 80 m de altura, la velocidad media anual del viento era igual o superior a 5 m/s, para la presente investigación se utilizó como referencia la misma información.

F2. Pendiente: de acuerdo al (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2013) se establece en el Atlas Eólico el porcentaje de pendiente de terreno promedio como no superior al 15%, por esta razón, la mayoría de las áreas adecuadas serán aquellas que tengan pendientes cero, y los sitios menos adecuados serán aquellos con pendientes promedio de máximo 15%.

F3. Red de carreteras: en la mayoría de los casos la construcción de parques eólicos implica la apertura de varios kilómetros de camino causando deforestación, la interrupción de los hábitats y el cruce de la vida silvestre, la expansión urbana y el aumento de los costos por el transporte de materiales de construcción a largas distancias, lo que aumenta la contaminación emitida. Por lo tanto, la construcción de parques eólicos cerca de la red vial existente es más preferible. En este caso se tomará como referencia la investigación realizada por (Panagiotidou, Xydis, & Koroneos, 2016) en la que se establece que la distancia considera como óptima para el establecimiento de un proyecto eólico es de 1000 metros.

F4. Y F5. Líneas de Subtransmisión y Subestaciones: para reducir los costos asociados con el cableado y las pérdidas eléctricas en largas distancias de transmisión, los parques eólicos deberían estar ubicados próximos a las líneas de transmisión y subestaciones, la zona de amortiguamiento correspondiente se basa en la investigación realizada por (Hofer, Sunak, Siddique, & Madlener, 2016) que establece que una distancia óptima corresponde a 100 metros.

Después de haber establecido los factores o criterios de selección se procederá a realizar la ponderación de cada uno de ellos, para ello se aplicará la herramienta de ArcGis Distancia Euclidiana que permite establecer el rango de ponderación tomando en cuenta las zonas de amortiguamiento, el siguiente paso es emplear la herramienta Reclasificación, en la que se fijarán 4 valoraciones que nos servirán para establecer el tipo de emplazamiento: óptimo, adecuado, aceptable e inaceptable. En las Tablas 5, 6, 7, 8, 9 que se presentan a continuación se pueden observar los rangos para ponderar cada uno de los criterios.

Tabla 5. Rango de ponderación para velocidad del viento

Velocidad del viento	
m/s	Tipo de emplazamiento
0-5	Inaceptable
5-6	Aceptable
6-7	Adecuado
> 7	Óptimo

Elaboración propia

Tabla 6. Rango de ponderación para pendiente

Pendiente	
%	Tipo de emplazamiento
0-5	Óptimo
5-10	Adecuado
10-15	Aceptable
> 15	Inaceptable

Elaboración propia

Tabla 7. Rango de ponderación para red de carreteras

Red de Carreteras	
Distancia	Tipo de emplazamiento
1000 m	Óptimo
2500 m	Adecuado
5000 m	Aceptable
> 5000 m	Inaceptable

Elaboración propia

Tabla 8. Rango de ponderación para líneas de subtransmisión

Líneas de Subtransmisión	
Distancia	Tipo de emplazamiento
100 m	Óptimo
500 m	Adecuado
1000 m	Aceptable
> 1000 m	Inaceptable

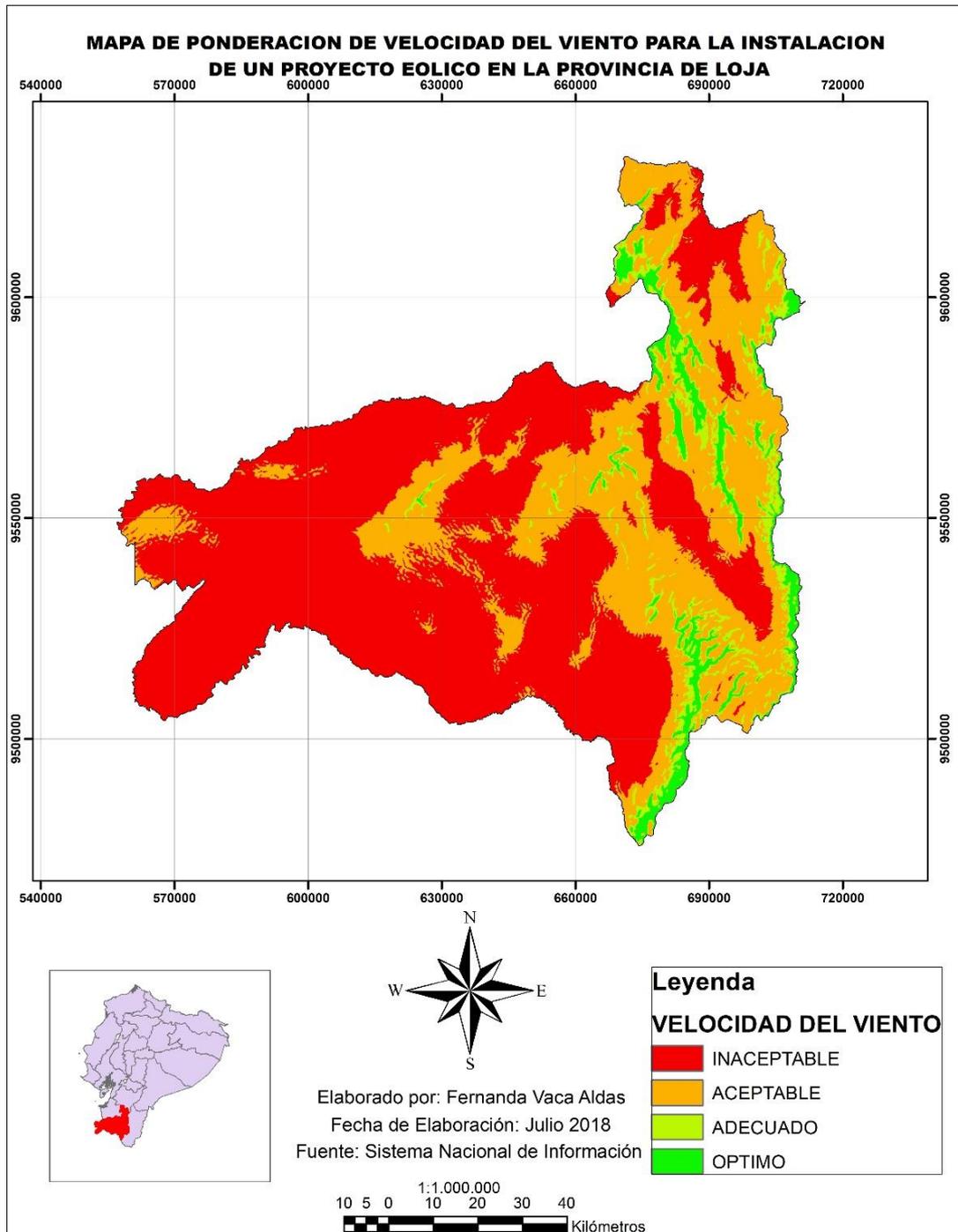
Elaboración propia

Tabla 9. Rango de ponderación para subestaciones

Subestaciones	
Distancia	Tipo de emplazamiento
100 m	Óptimo
500 m	Adecuado
1000 m	Aceptable
> 1000 m	Inaceptable

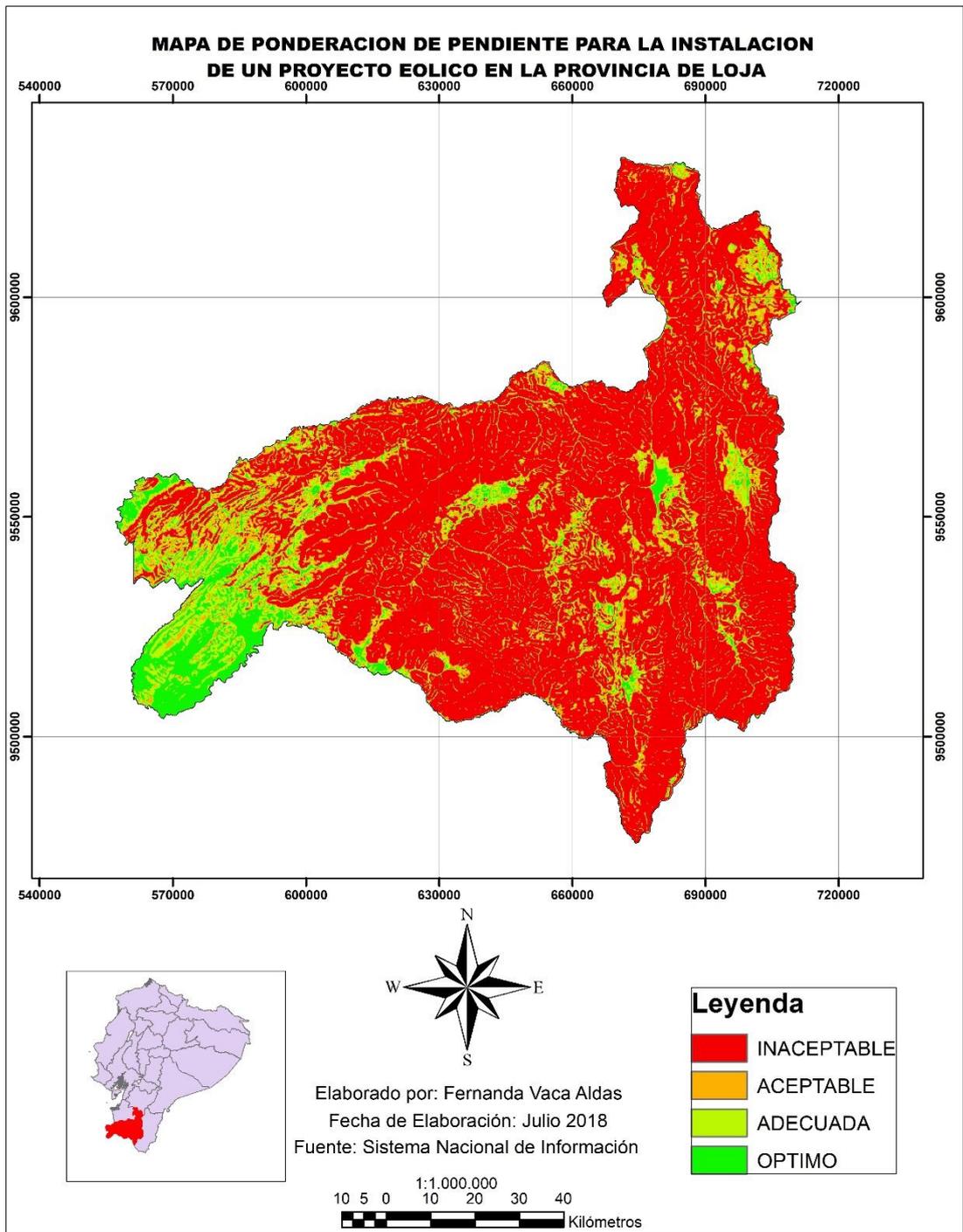
Elaboración propia

A continuación, se presentan los mapas 7, 8, 9, 10 de los criterios: velocidad del viento, pendiente, red de carreteras, líneas de subtransmisión y subestaciones respectivamente, después de haber realizado la reclasificación para cada uno de los criterios con la correspondiente ponderación:

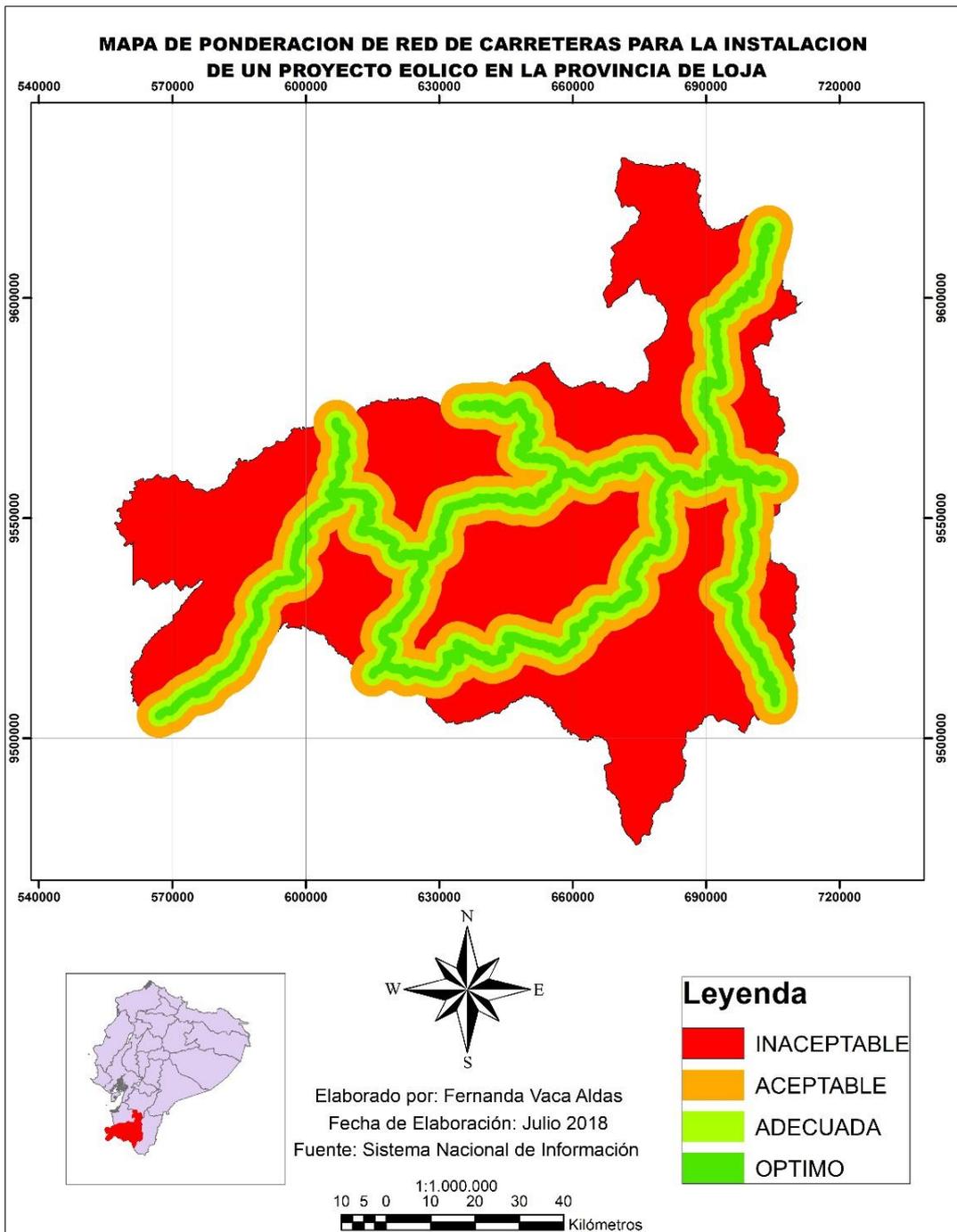


Mapa 7. Ponderación de velocidad de viento

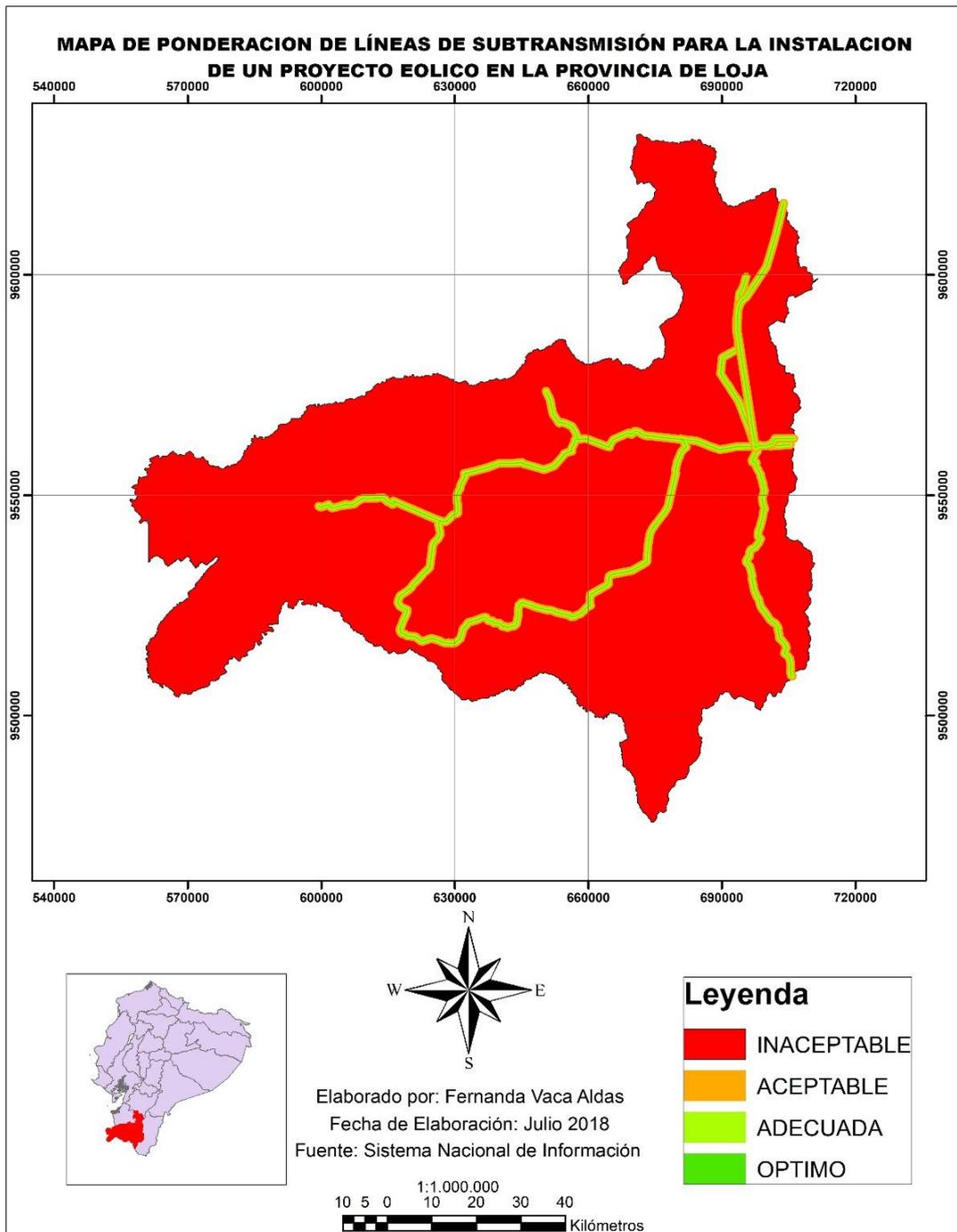
Elaboración propia



Mapa 8. Ponderación de pendiente
Elaboración propia



Mapa 9. Ponderación de red de carreteras
 Elaboración propia



Mapa 10. Ponderación de líneas de subtransmisión
Elaboración propia

Para la obtención de los pesos de los criterios se realizó una encuesta a tres expertos en Energías Renovables, a continuación, en la Tabla 10 se presenta el perfil de cada uno de los expertos.

Tabla 10. Perfil de cada experto

Experto	Grado	Especialidad
1	Ing. Ambiental	Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética
2	Ing. Ambiental	Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética
3	Ing. en Petróleos	Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética

Elaboración propia

Para el cálculo del ratio de consistencia emplearemos la siguiente fórmula:

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Donde:

RC = ratio de consistencia

IC = índice de consistencia

IR = índice de consistencia aleatorio

Si este cociente vale 0,10 ó menos, entonces se acepta la consistencia de la matriz y por tanto el autovector de pesos se admite como válido.

A continuación, se muestran los resultados de la comparación binaria entre criterios de cada uno de los expertos con su respectivo ratio de consistencia.

Experto 1

Tabla 11. Cálculo de peso de los criterios Experto 1

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
C1	1	6	7	4	4	3,68	0,54
C2	1/6	1	2	2	5	1,27	0,19
C3	1/7	1/2	1	2	3	0,84	0,12
C4	1/4	1/2	1/2	1	2	0,66	0,10
C5	1/4	1/5	1/3	1/2	1	0,38	0,06

λ_{max}	5,46
CI	0,11
CR	0,10

Elaboración propia

Experto 2

Tabla 12. Cálculo de peso de los criterios Experto 2

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
C1	1	7	2	5	3	2,9137	0,4257
C2	1/7	1	1/3	1/5	1/5	0,2857	0,0417
C3	1/2	3	1	7	3	1,9937	0,2913
C4	1/5	5	1/7	1	1/3	0,5439	0,0795
C5	1/3	5	1/3	3	1	1,1076	0,1618

λ_{max}	5,5890
IC	0,15
RC	0,13

Elaboración propia

Experto 3

Tabla 13. Cálculo de peso de los criterios Experto 3

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
C1	1	7	7	4	3	3,5799	0,5257
C2	1/7	1	2	1/3	1/2	0,5439	0,0799
C3	1/7	1/2	1	1/5	2	0,4911	0,0721
C4	1/4	3	5	1	2	1,4963	0,2197
C5	1/3	2	1/2	1/2	1	0,6988	0,1026

λ_{max}	5,52
IC	0,13
RC	0,12

Elaboración propia

Después de evaluar los valores obtenidos para los pesos de los criterios en las tablas anteriores analizamos el porcentaje de importancia para cada uno de los criterios y el resultado final de importancia se presenta a continuación en la Figura 10.

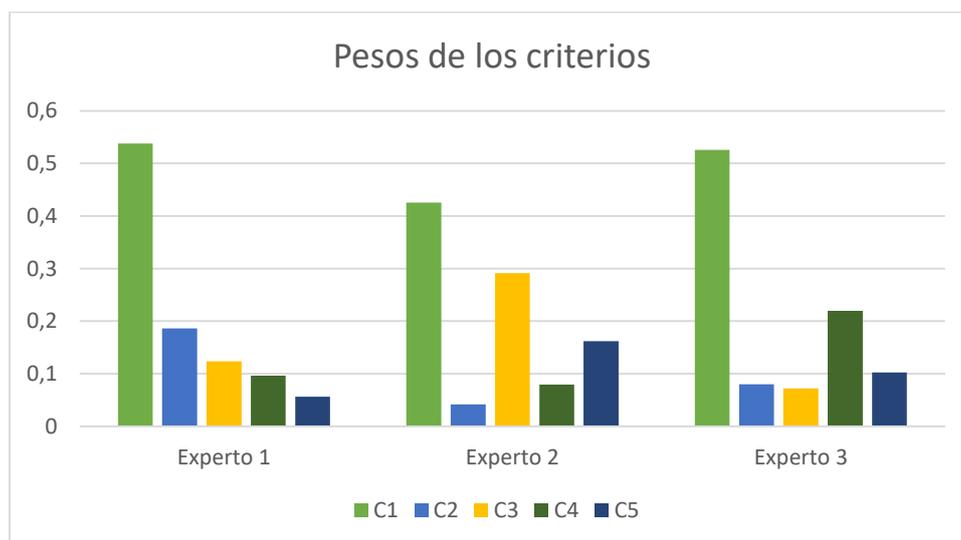


Figura 10. Pesos de los criterios

Elaboración propia

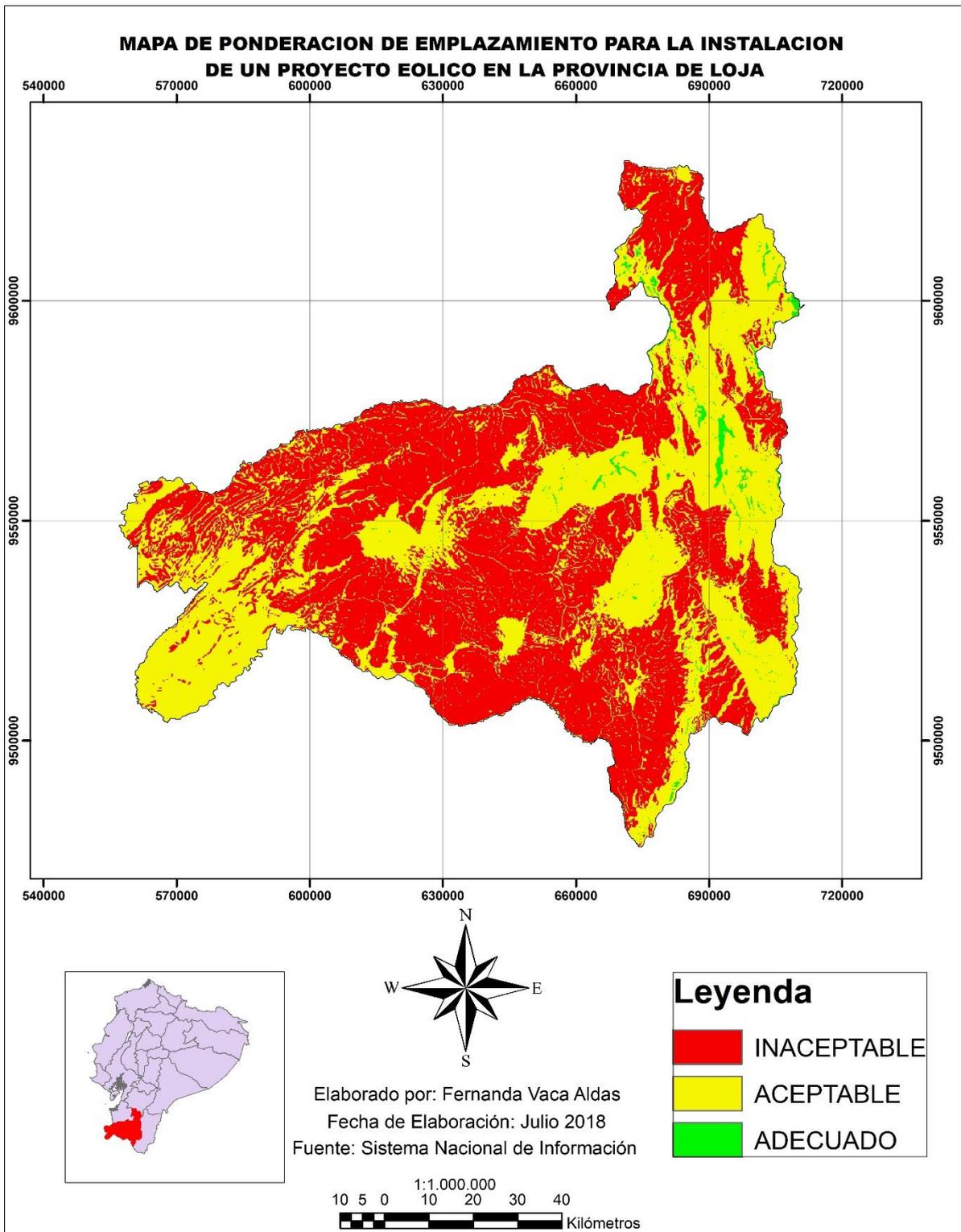
En la Tabla 14 se presentan los porcentajes de inconsistencia que presentaron cada uno de los expertos.

Tabla 14. Porcentaje de inconsistencia

Experto	% de Inconsistencia
Experto 1	10
Experto 2	13
Experto 3	12

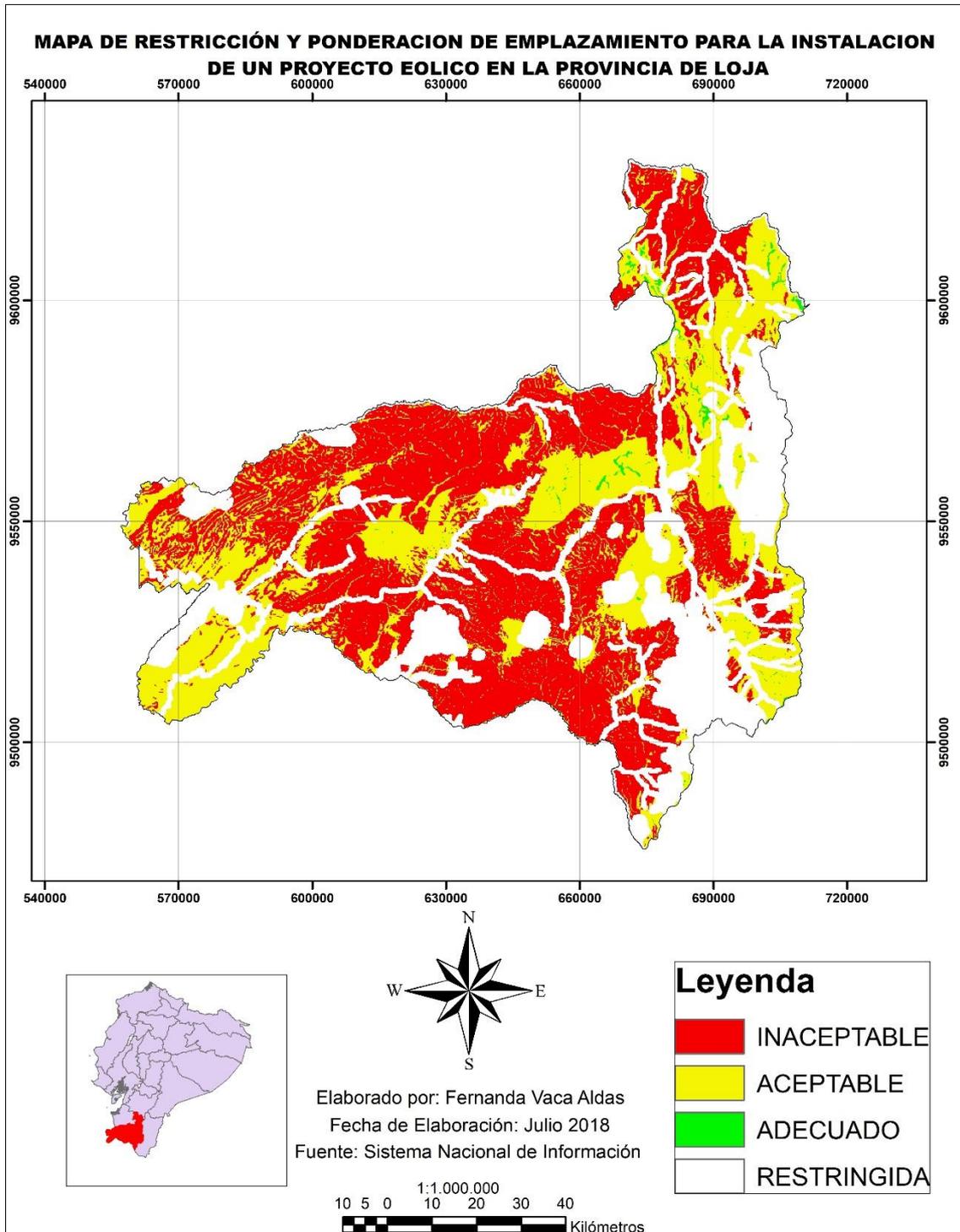
Elaboración propia

La media de los valores obtenidos en la Figura 10 son los que se ingresarán en la herramienta superposición ponderada. Al emplear esta herramienta ArcGis no encontró coincidencia con el emplazamiento óptimo por ello redujo de 4 a 3 los valores de ponderación, el Mapa 11 que se presenta a continuación está compuesto por las zonas que cumplen con los factores o criterios antes mencionados en este caso tendrá un rango de idoneidad que va del 1 al 3, siendo rojo Inaceptable, amarillo Aceptable y verde Adecuado.



Mapa 11. Ponderación de emplazamiento
 Elaboración propia

En el Mapa 12 podemos observar tanto las zonas restringidas como las no restringidas con su correspondiente ponderación de acuerdo al emplazamiento en el que se encuentre.



Mapa 12. Restricción y ponderación de emplazamiento

Elaboración propia

En base al anterior mapa podemos extraer las opciones ubicadas en emplazamientos con rango “Adecuado”, en la Figura 11 podemos observar todas las opciones que podrían ser factibles para la instalación de un proyecto eólico en la provincia de Loja.

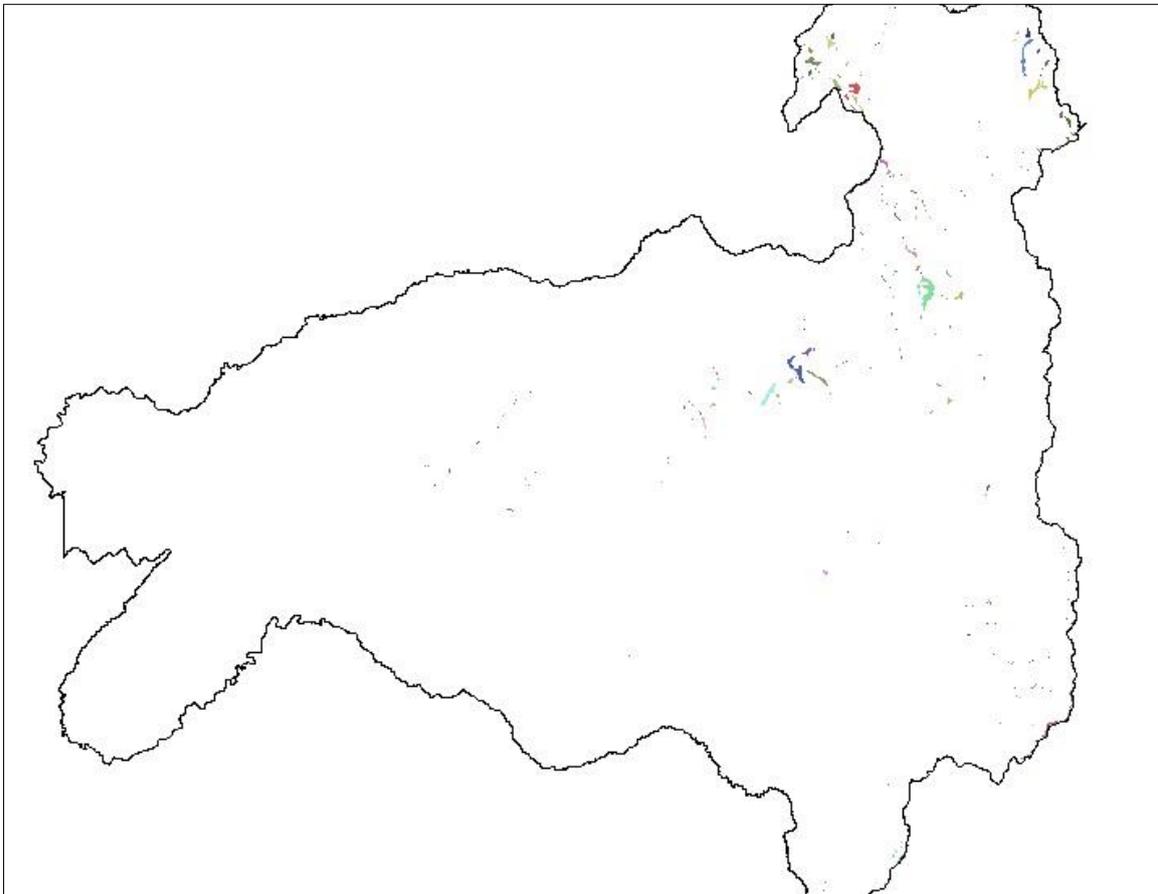


Figura 11. Posibles zonas para instalación de proyecto eólico
Elaboración propia

La referencia que se tomará para hacer una criba de las zonas identificadas en el mapa anterior será el área mínima requerida para construir un parque eólico de acuerdo a (Nelson, 2013) es de 5 km². Después de realizar el cálculo del área de cada una de las opciones se procederá a seleccionar aquellas que cumplan con el requisito de 5 km².

En la Figura 12 se observan las 5 alternativas que cumplen con el requisito anteriormente nombrado, cada alternativa ha sido identificada y posee un color propio para su diferenciación.

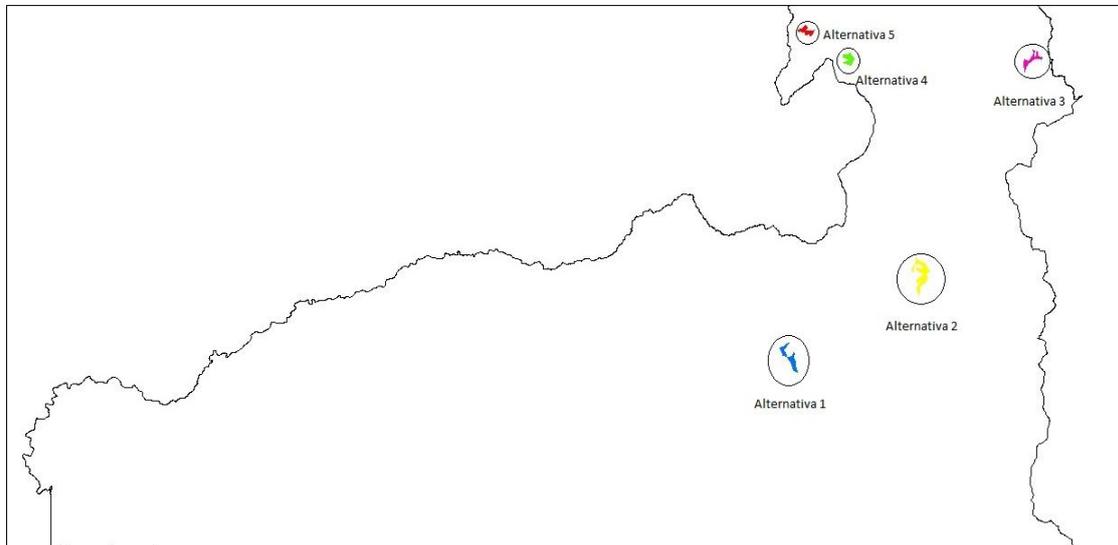


Figura 12. Alternativas seleccionadas
Elaboración propia

Después de determinar las 5 alternativas con las que se trabajarán se procederá a realizar una segunda encuesta a los expertos utilizando de nuevo la metodología AHP en la que como resultado se establecerá el ranking de las 5 alternativas presentadas. En el epígrafe de Anexos se puede observar el modelo de encuesta aplicada.

El resultado de la encuesta de cada uno de los expertos se presenta a continuación:

Experto 1

Tabla 15. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 1

Criterio 1	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	3	7	5	5	3,4997	0,4692
A2	1/3	1	7	5	5	2,2552	0,3023
A3	1/7	1/7	1	1/5	1/5	0,2412	0,0323
A4	1/5	1/5	5	1	2	0,8326	0,1116
A5	1/5	1/5	5	1/2	1	0,6310	0,0846

λ_{max}	5,476
IC	0,119
RC	0,106

Criterio 2	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	2	5	7	2,6867	0,3852
A2	1/2	1	2	5	7	2,0362	0,2920
A3	1/2	1/2	1	5	7	1,5431	0,2213
A4	1/5	1/5	1/5	1	2	0,4373	0,0627
A5	1/7	1/7	1/7	1/2	1	0,2709	0,0388

λ_{max}	5,151
IC	0,038
RC	0,034

Criterio 3	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	2	5	7	2,6867	0,3852
A2	1/2	1	2	5	7	2,0362	0,2920
A3	1/2	1/2	1	5	7	1,5431	0,2213
A4	1/5	1/5	1/5	1	2	0,4373	0,0627
A5	1/7	1/7	1/7	1/2	1	0,2709	0,0388

λ_{max}	5,151
IC	0,038
RC	0,034

Criterio 4	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	7	2	2	2,2369	0,3494
A2	1/2	1	7	2	2	1,6952	0,2648
A3	1/7	1/7	1	1/7	1/7	0,2108	0,0329
A4	1/2	1/2	7	1	2	1,2847	0,2007
A5	1/2	1/2	7	1/2	1	0,9736	0,1521

λ_{max}	5,195
IC	0,049
RC	0,043

Criterio 5	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	1/7	1/9	1/3	1/3	0,2814	0,0426
A2	7	1	1/3	2	2	1,5632	0,2368
A3	9	3	1	3	3	3,0000	0,4544
A4	3	1/2	1/3	1	2	1,0000	0,1515
A5	3	1/2	1/3	1/2	1	0,7579	0,1148

λ_{max}	5,128
IC	0,032
RC	0,029

Elaboración propia

Tabla 16. Síntesis de prioridades globales Experto 1

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,5378	0,1861	0,1235	0,0965	0,0561
A1	0,4692	0,3852	0,3852	0,3494	0,0426
A2	0,3023	0,2920	0,2920	0,2648	0,2368
A3	0,0323	0,2213	0,2213	0,0329	0,4544
A4	0,1116	0,0627	0,0627	0,2007	0,1515
A5	0,0846	0,0388	0,0388	0,1521	0,1148

Elaboración propia

Tabla 17. Matriz normalizada ponderada Experto 1

A1	0,2523	0,0717	0,0476	0,0337	0,0024	0,4077
A2	0,1626	0,0543	0,0360	0,0256	0,0133	0,2918
A3	0,0174	0,0412	0,0273	0,0032	0,0255	0,1146
A4	0,0600	0,0117	0,0077	0,0194	0,0085	0,1073
A5	0,0455	0,0072	0,0048	0,0147	0,0064	0,0786

Elaboración propia

Tabla 18. Ranking de alternativas Experto 1

Alternativas en orden
A1 = 0,4077
A2 = 0,2918
A3 = 0,1146
A4 = 0,1073
A5 = 0,0786

Elaboración propia

Experto 2

Tabla 19. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 2

Criterio 1	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	3	5	7	9	3,9363	0,5157
A2	1/3	1	3	5	7	2,0362	0,2667
A3	1/5	1/3	1	3	3	0,9029	0,1183
A4	1/7	1/5	1/3	1	2	0,4529	0,0593
A5	1/9	1/7	1/3	1/2	1	0,3051	0,0400

λ_{max}	5,1496
IC	0,0374
RC	0,0334

Criterio 2	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	2	4	5	2,4022	0,3831
A2	1/2	1	2	3	3	1,5518	0,2475
A3	1/2	1/2	1	5	5	1,4427	0,2301
A4	1/4	1/3	1/5	1	2	0,5065	0,0808
A5	1/5	1/3	1/5	1/2	1	0,3671	0,0585

λ_{max}	5,248
IC	0,062
RC	0,055

Criterio 3	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	2	7	7	2,8738	0,4142
A2	1/2	1	2	5	5	1,9037	0,2743
A3	1/2	1/2	1	5	5	1,4427	0,2079
A4	1/7	1/5	1/5	1	2	0,4089	0,0589
A5	1/7	1/5	1/5	1/2	1	0,3099	0,0447

λ_{max}	5,137
IC	0,034
RC	0,031

Criterio 4	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	5	2	2	2,0913	0,3449
A2	1/2	1	5	2	2	1,5849	0,2614
A3	1/5	1/5	1	1/5	1/5	0,2759	0,0455
A4	1/2	1/2	5	1	2	1,2011	0,1981
A5	1/2	1/2	5	1/2	1	0,9103	0,1501

λ_{max}	5,195
IC	0,049
RC	0,043

Criterio 5	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	1/7	1/9	1/7	1/7	0,2005	0,0265
A2	7	1	1/5	2	2	1,4114	0,1865
A3	9	5	1	5	5	4,0760	0,5386
A4	7	1/2	1/5	1	2	1,0696	0,1413
A5	7	1/2	1/5	1/2	1	0,8106	0,1071

λ_{max}	5,368
IC	0,092
RC	0,082

Elaboración propia

Tabla 20. Síntesis de prioridades globales Experto 2

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,4257	0,0417	0,2913	0,0795	0,1618
A1	0,5157	0,3831	0,4142	0,3449	0,0265
A2	0,2667	0,2475	0,2743	0,2614	0,1865
A3	0,1183	0,2301	0,2079	0,0455	0,5386
A4	0,0593	0,0808	0,0589	0,1981	0,1413
A5	0,0400	0,0585	0,0447	0,1501	0,1071

Elaboración propia

Tabla 21. Matriz normalizada ponderada Experto 2

A1	0,2195	0,0160	0,1206	0,0274	0,0043	0,3878
A2	0,1136	0,0103	0,0799	0,0208	0,0302	0,2547
A3	0,0504	0,0096	0,0606	0,0036	0,0871	0,2113
A4	0,0253	0,0034	0,0172	0,0157	0,0229	0,0844
A5	0,0170	0,0024	0,0130	0,0119	0,0173	0,0617

Elaboración propia

Tabla 22. Ranking de alternativas Experto 2

ALTERNATIVAS EN ORDEN
A1 = 0,3878
A2 = 0,2547
A3 = 0,2113
A4 = 0,0844
A5 = 0,0617

Elaboración propia

Experto 3

Tabla 23. Comparaciones binarias de las alternativas para cada uno de los criterios Experto 3

Criterio 1	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	3	7	7	7	4,0039	0,5087
A2	1/3	1	5	7	7	2,4122	0,3065
A3	1/7	1/5	1	2	2	0,6480	0,0823
A4	1/7	1/7	1/2	1	2	0,4592	0,0583
A5	1/7	1/7	1/2	1/2	1	0,3480	0,0442

λ_{max}	5,2302
IC	0,0575
RC	0,0514

Criterio 2	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	2	3	7	7	3,1165	0,4150
A2	1/2	1	3	7	7	2,3619	0,3145
A3	1/3	1/3	1	7	7	1,4034	0,1869
A4	1/7	1/7	1/7	1	2	0,3574	0,0476
A5	1/7	1/7	1/7	1/2	1	0,2709	0,0361

λ_{max}	5,315
IC	0,079
RC	0,070

Criterio 3	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	3	3	7	7	3,3798	0,4491
A2	1/3	1	3	7	7	2,1779	0,2894
A3	1/3	1/3	1	6	6	1,3195	0,1753
A4	1/7	1/7	1/6	1	2	0,3686	0,0490
A5	1/7	1/7	1/6	1/2	1	0,2793	0,0371

λ_{max}	5,354
IC	0,088
RC	0,079

Criterio 4	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	5	7	9	9	4,9036	0,5739
A2	1/5	1	3	7	7	1,9664	0,2301
A3	1/7	1/3	1	5	5	1,0355	0,1212
A4	1/9	1/7	1/5	1	2	0,3635	0,0425
A5	1/9	1/7	1/5	1/2	1	0,2755	0,0322

λ_{max}	5,434
IC	0,109
RC	0,097

Criterio 5	A1	A2	A3	A4	A5	MEDIA GEOMETRICA NORMALIZADA	VECTOR DE PESOS
A1	1	1/6	1/8	1/7	1/7	0,2117	0,0293
A2	6	1	1/3	1/3	1/3	0,7402	0,1023
A3	8	3	1	5	5	3,5944	0,4967
A4	7	3	1/5	1	2	1,5306	0,2115
A5	7	3	1/5	1/2	1	1,1600	0,1603

λ_{max}	5,555
IC	0,139
RC	0,124

Elaboración propia

Tabla 24. Síntesis de prioridades globales Experto 3

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,5257	0,0799	0,0721	0,2197	0,1026
A1	0,5087	0,4150	0,4491	0,5739	0,0293
A2	0,3065	0,3145	0,2894	0,2301	0,1023
A3	0,0823	0,1869	0,1753	0,1212	0,4967
A4	0,0583	0,0476	0,0490	0,0425	0,2115
A5	0,0442	0,0361	0,0371	0,0322	0,1603

Elaboración propia

Tabla 25. Matriz normalizada ponderada Experto 3

A1	0,2674	0,0331	0,0324	0,1261	0,0030	0,4620
A2	0,1611	0,0251	0,0209	0,0506	0,0105	0,2681
A3	0,0433	0,0149	0,0126	0,0266	0,0510	0,1484
A4	0,0307	0,0038	0,0035	0,0093	0,0217	0,0690
A5	0,0232	0,0029	0,0027	0,0071	0,0164	0,0523

Elaboración propia

Tabla 26. Ranking de alternativas Experto 3

ALTERNATIVAS EN ORDEN
A1 = 0,4620
A2 = 0,2681
A3 = 0,1484
A4 = 0,0690
A5 = 0,0523

Elaboración propia

Para una mejor comprensión e identificación geográfica de la ubicación de cada alternativa en la Figura 13 que se presenta a continuación se identifica el respectivo cantón de la provincia de Loja en el que están ubicadas cada una de las alternativas de selección.

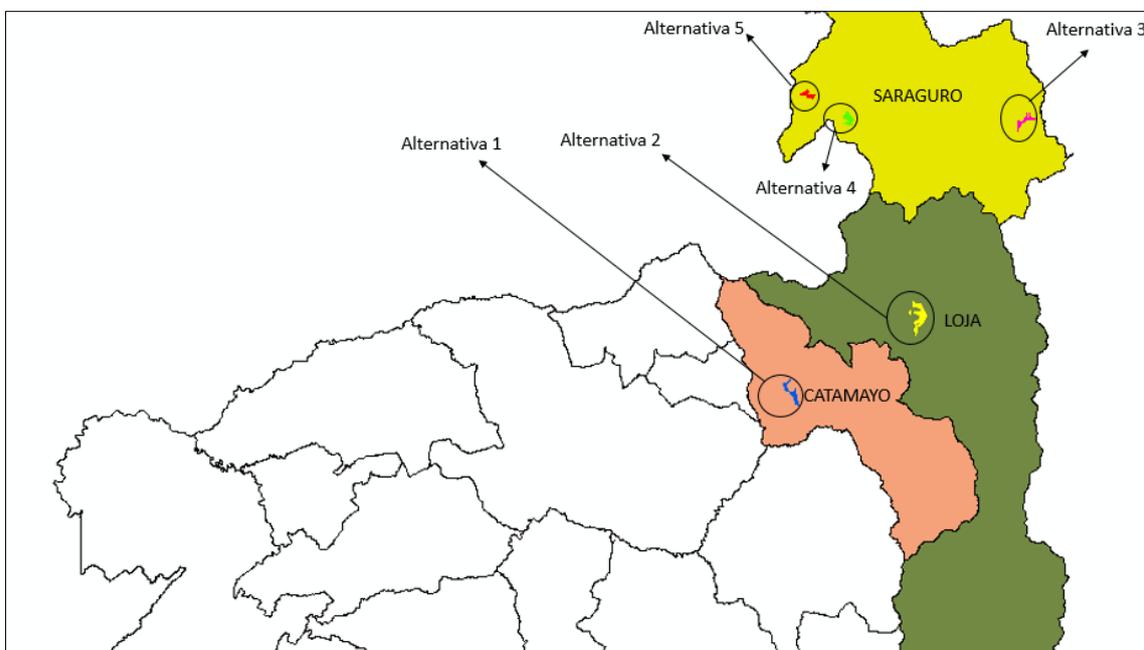


Figura 13. Ubicación geográfica de cada alternativa

Elaboración propia

➤ **Discusión**

Después de la aplicación del método AHP para el presente problema de toma de decisión y de acuerdo a los datos presentados en la Figura 14 podemos observar que existe unanimidad por parte de los expertos en sus respuestas ya que los tres establecen el mismo ranking de selección para las 5 alternativas propuestas, por ello podemos deducir que la mejor zona para la implantación de un proyecto eólico en la provincia de Loja es la alternativa 1 que se encuentra ubicada en el cantón Catamayo.

Con respecto al ratio de consistencia, en la Figura 15 podemos observar que el experto 1 es el más consistente ya que es el que más pesos tiene admitidos como válidos (con un Ratio de Consistencia menor del 10 %).

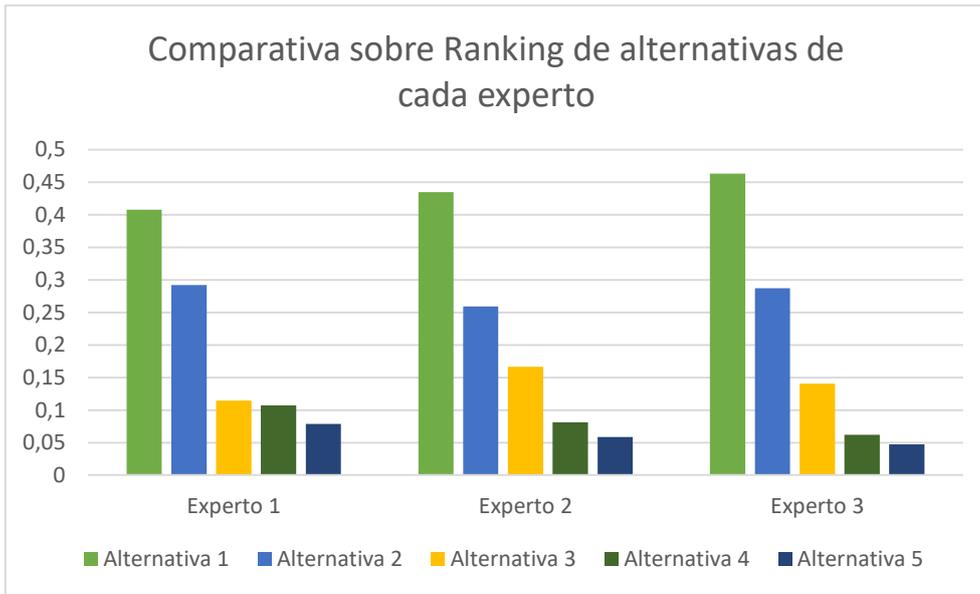


Figura 14. Comparativa sobre respuestas de expertos

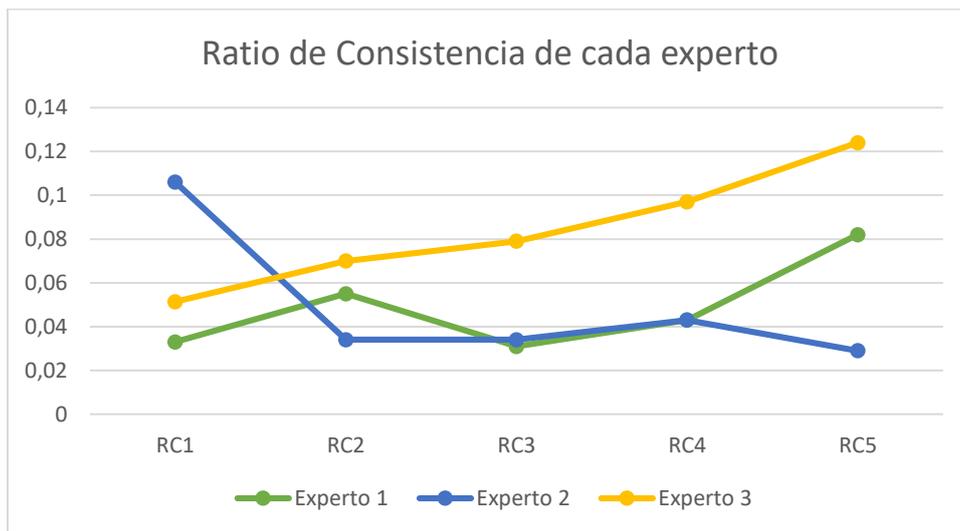


Figura 15. Comparativa de ratio de consistencia

7.1. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite visualizar y analizar la sensibilidad del resultado (ranking de las alternativas) respecto de posibles cambios en la importancia de los criterios, este determina cómo cambia la selección de alternativas cuando varía la importancia relativa de los criterios o requerimientos de proyecto considerados como determinantes en el proceso de selección. Para el presente problema de decisión se realizará un análisis de sensibilidad que consistirá en hacer modificaciones a los pesos de los criterios de cada experto de manera individual.

En este caso vamos a suponer que se producen modificaciones en la ponderación de los criterios porque cada uno de los expertos decide cambiar el nivel de importancia de los criterios.

En la Tabla 27 se pueden observar los pesos de los criterios que fueron asignados en un principio por el Experto 1 y los valores variados para la realización del análisis de sensibilidad.

Tabla 27. Pesos de los criterios para Análisis de sensibilidad Experto 1

Criterios de selección	Pesos iniciales de los criterios	Nuevos pesos de los criterios
Velocidad del viento	0,5378	0,3378
Pendiente	0,1861	0,1861
Red de carreteras	0,1235	0,1235
Líneas de subtransmisión	0,0965	0,1965
Subestaciones	0,0561	0,1561

Elaboración propia

Con los nuevos pesos de los criterios procederemos a recalculamos el ranking de las alternativas.

Tabla 28. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 1

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,3378	0,1861	0,1235	0,1965	0,1561
A1	0,5157	0,3831	0,4142	0,3449	0,0265
A2	0,2667	0,2475	0,2743	0,2614	0,1865
A3	0,1183	0,2301	0,2079	0,0455	0,5386
A4	0,0593	0,0808	0,0589	0,1981	0,1413
A5	0,0400	0,0585	0,0447	0,1501	0,1071

Elaboración propia

Tabla 29. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 1

A1	0,0960	0,1294	0,0511	0,0678	0,0041	0,3484
A2	0,0496	0,0836	0,0339	0,0514	0,0291	0,2476
A3	0,0220	0,0777	0,0257	0,0089	0,0841	0,2184
A4	0,0110	0,0273	0,0073	0,0389	0,0221	0,1066
A5	0,0074	0,0198	0,0055	0,0295	0,0167	0,0790

Elaboración propia

Después de los cálculos presentados en las tablas 28 y 29 podremos establecer el nuevo ranking de alternativas que se presenta a continuación, en la Tabla 30.

Tabla 30. Nuevo ranking de alternativas Experto 1

ALTERNATIVAS EN ORDEN
A1 = 0,3484
A2 = 0,2476
A3 = 0,2184
A4 = 0,1066
A5 = 0,0790

Elaboración propia



Figura 16. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 1

Elaboración propia

En la Tabla 31 se pueden observar los pesos de los criterios que fueron asignados en un principio por el Experto 2 y los valores variados para la realización del análisis de sensibilidad.

Tabla 31. Pesos de los criterios Análisis de Sensibilidad Experto 2

Criterios de Selección	Pesos iniciales de los criterios	Nuevos pesos de los criterios
Velocidad del viento	0,4257	0,2257
Pendiente	0,0417	0,2417
Red de carreteras	0,2913	0,1913
Líneas de subtransmisión	0,0795	0,1795
Subestaciones	0,1618	0,1618

Elaboración propia

Tabla 32. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 2

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,2257	0,2417	0,1913	0,1795	0,1618
A1	0,5157	0,3831	0,4142	0,3449	0,0265
A2	0,2667	0,2475	0,2743	0,2614	0,1865
A3	0,1183	0,2301	0,2079	0,0455	0,5386
A4	0,0593	0,0808	0,0589	0,1981	0,1413
A5	0,0400	0,0585	0,0447	0,1501	0,1071

Elaboración propia

Tabla 33. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 2

A1	0,1164	0,0926	0,0792	0,0619	0,0043	0,3544
A2	0,0602	0,0598	0,0525	0,0469	0,0302	0,2496
A3	0,0267	0,0556	0,0398	0,0082	0,0871	0,2174
A4	0,0134	0,0195	0,0113	0,0356	0,0229	0,1026
A5	0,0090	0,0142	0,0085	0,0269	0,0173	0,0760

Elaboración propia

Después de los cálculos presentados en las tablas 32 y 33 podremos establecer el nuevo ranking de alternativas que se presenta a continuación, en la Tabla 34.

Tabla 34. Nuevo ranking de alternativas Experto 2

ALTERNATIVAS EN ORDEN
A1 = 0,3544
A2 = 0,2496
A3 = 0,2174
A4 = 0,1026
A5 = 0,0760

Elaboración propia



Figura 17. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 2

Elaboración propia

En la Tabla 35 se pueden observar los pesos de los criterios que fueron asignados en un principio por el Experto 3 y los valores variados para la realización del análisis de sensibilidad.

Tabla 35. Pesos de los criterios Análisis de Sensibilidad Experto 3

Criterios de Selección	Pesos iniciales de los criterios	Nuevos pesos de los criterios
Velocidad del viento	0,5257	0,2257
Pendiente	0,0799	0,1799
Red de carreteras	0,0721	0,2721
Líneas de subtransmisión	0,2197	0,2197
Subestaciones	0,1026	0,1026

Elaboración propia

Tabla 36. Síntesis de prioridades globales Análisis de Sensibilidad Experto 3

Criterios	C1	C2	C3	C4	C5
Pesos de los criterios	0,2257	0,1799	0,2721	0,2197	0,1026
A1	0,5087	0,4150	0,4491	0,5739	0,0293
A2	0,3065	0,3145	0,2894	0,2301	0,1023
A3	0,0823	0,1869	0,1753	0,1212	0,4967
A4	0,0583	0,0476	0,0490	0,0425	0,2115
A5	0,0442	0,0361	0,0371	0,0322	0,1603

Elaboración propia

Tabla 37. Matriz normalizada ponderada Análisis de Sensibilidad Experto 3

A1	0,1148	0,0747	0,1222	0,1261	0,0030	0,4408
A2	0,0692	0,0566	0,0788	0,0506	0,0105	0,2656
A3	0,0186	0,0336	0,0477	0,0266	0,0510	0,1775
A4	0,0132	0,0086	0,0133	0,0093	0,0217	0,0661
A5	0,0100	0,0065	0,0101	0,0071	0,0164	0,0501

Elaboración propia

Después de los cálculos presentados en las tablas 36 y 37 podremos establecer el nuevo ranking de alternativas que se presenta a continuación, en la Tabla 38.

Tabla 38. Nuevo ranking de alternativas Experto 3

ALTERNATIVAS EN ORDEN
A5 = 0,4408
A2 = 0,2656
A1 = 0,1775
A3 = 0,0661
A4 = 0,0501

Elaboración propia



Figura 18. Comparación de resultados aplicado el Análisis de sensibilidad Experto 3

Para la comparación de los resultados obtenidos en este análisis de sensibilidad, en las Figuras 16, 17 y 18 se presentan los resultados del ranking de alternativas tanto del inicio como después de cambiar la prioridad de los criterios para cada uno de los expertos, el resultado es notorio, aún después de realizar el análisis de sensibilidad y variar la importancia de cada criterio el orden de las alternativas se mantiene en los tres casos, lo cual significa que los resultados obtenidos después de realizar el análisis de sensibilidad individual son lo suficientemente consistentes y la decisión tomada es robusta.

8. CONCLUSIONES

- La integración de la metodología de toma de decisiones AHP con los Sistemas de Información Geográfica representan una forma mucho más clara e inclusiva para tomar en cuenta factores importantes que pueden influir al momento de poner en marcha un proyecto eólico.
- El Proceso Analítico Jerárquico es una técnica útil de MDMC que contiene variables tanto tangibles como intangibles y puede usarse fácilmente para determinar posibles ubicaciones de construcción de instalaciones de producción de energía.
- Los criterios establecidos como restrictivos son factores que limitan el diseño e implantación de un proyecto eólico, todos los criterios determinados en la presente investigación tienen un impacto negativo sobre el diseño del mismo. A través de la información recopilada se obtuvo que estos criterios son las áreas que tanto por aspectos técnicos, ambientales o sociales no son factibles para desarrollar un proyecto eólico.
- Para el diseño de un proyecto eólico es necesario considerar factores o criterios de selección y su respectiva influencia e importancia que servirán de ayuda a la hora de tomar la decisión sobre las mejores zonas para instalar un proyecto eólico, en la presente investigación se tomaron en cuenta los siguientes criterios de selección: velocidad del viento, pendiente, red de carretas, líneas de subtransmisión y subestaciones; todas las coberturas fueron obtenidas de la plataforma online del Estado Ecuatoriano. En este caso la velocidad del viento es, con mucha diferencia el criterio más importante a la hora de seleccionar un emplazamiento para la instalación de un proyecto eólico ya que representa más del 50%.
- Después de la elaboración de mapas digitales a través del software ArcGis y de aplicar la metodología AHP tanto para el cálculo de los pesos de los criterios como para la selección y ranking de la mejor alternativa podemos concluir que la mejor zona para implantar un proyecto eólico en

la provincia de Loja se concentra en los tres cantones del norte de la provincia: Saraguro, Loja y Catamayo, la mejor alternativa se ubica específicamente en el cantón Catamayo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Baban, S., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-assisted approach to locating wind farms in the UK. *Renewable Energy*, 59-71.
- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P., & Chetpattananondh, K. (2007). Site selection for large wind turbine using GIS. *PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-2007*.
- Campos Guzmán, V. (2016). *Integración de MDMC en el ACV para evaluar alternativas de electrificación rural en Cerro Hermoso, Oaxaca, México*. Cartagena.
- Del Bosque, I., Fernandez, C., Forero, L., & Pérez, E. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica y la investigación de en Ciencias Humanas y Sociales*. Madrid.
- Domínguez Bravo , J., Pinedo Pascua, I., & Augusto González, J. (2008). *Herramientas SIG para la integración de recursos de energías renovables en electrificación rural. Inti-Gis*. Madrid.
- Domínguez Bravo, J. (2002). *La integración económica y territorial de las energías renovables y los Sistemas de Información Geográfica*. Madrid.
- Erazo Mogrovejo, G. A. (2017). *Análisis de la producción de energía de la Central Eólica Villonaco*. Loja.
- García Cascales, M. (2009). *Tesis doctoral: Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y "soft Computing"*. Cartagena.
- Georgiou, A., Polatidis, H., & Haralambopoulos, D. (2012). Wind energy resource assessment and development: Decision analysis for site evaluation and application. *Energy Sources*.
- Guerrero, G., & Faxas-Guzmán, J. (2015). Análisis de toma de decisión con AHP/ANP de energías renovables en República Dominicana. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, 27-29.
- Hofer, T., Sunak, Y., Siddique, H., & Madlener, R. (2016). Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städtereion Aachen. *Applied Energy*, 222-243.

- Juan Escrivá, L. (2016). *Aplicación del proceso Analítico Jerárquico (AHP) al dimensionamiento de sistemas renovables*. Valencia.
- Kaya, T., & Kahraman, C. (2011). Fuzzy multiple criteria forestry decision making based on an integrated VIKOR and AHP approach. *Expert Syst*, 7326-7333.
- Latinopoulos, D., & Kechagia, K. (2015). A Gis-based multi-criteria evaluation for wind farms site selection. A regional application in Greece. *Renewable Energy*.
- Martín Ávila, A., & Domínguez Bravo, J. (2015). *Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos*. Madrid.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2013). *Atlas Eólico del Ecuador*. Quito.
- Nelson, V. (2013). *Wind Energy, Renewable Energy and the Environment*. CRC Press.
- Obando, M. F. (2017). *Identificación del lugar óptimo de instalación de un parque eólico en el departamento del Atlántico*. Manizales.
- Ortega Salas, I. P. (2013). *Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica Web con OpenGIS para administrar los centros de educación en Ecuador*. Quito.
- Osorio Gómez, J. C., & Orejuela Cabrera, J. P. (2008). El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación. *Scientia et Technica*, 247-248.
- Ospina Blandón, M. J. (2012). *Aplicación del Modelo Multicriterio Metodologías AHP Y GP para la Valoración Económica de los Activos Ambientales*. Manizales.
- Panagiotidou, M., Xydis, G., & Koroneos, C. (2016). Environmental Siting Framework for Wind Farms: A Case Study in the Dodecanese Islands. *Resources*, 1-25.
- Pinedo Pascua, I. (2010). *IntiGIS: Propuesta metodológica para la evaluación de alternativas de electrificación rural basada en SIG*. Madrid.
- Pozzobon, E., & Gutiérrez, J. (2003). Utilización de un Sistema de Información Geográfica para la selección y priorización de áreas a reforestar en los alrededores de la ciudad de Mérida, Venezuela. *Forest*, 63.

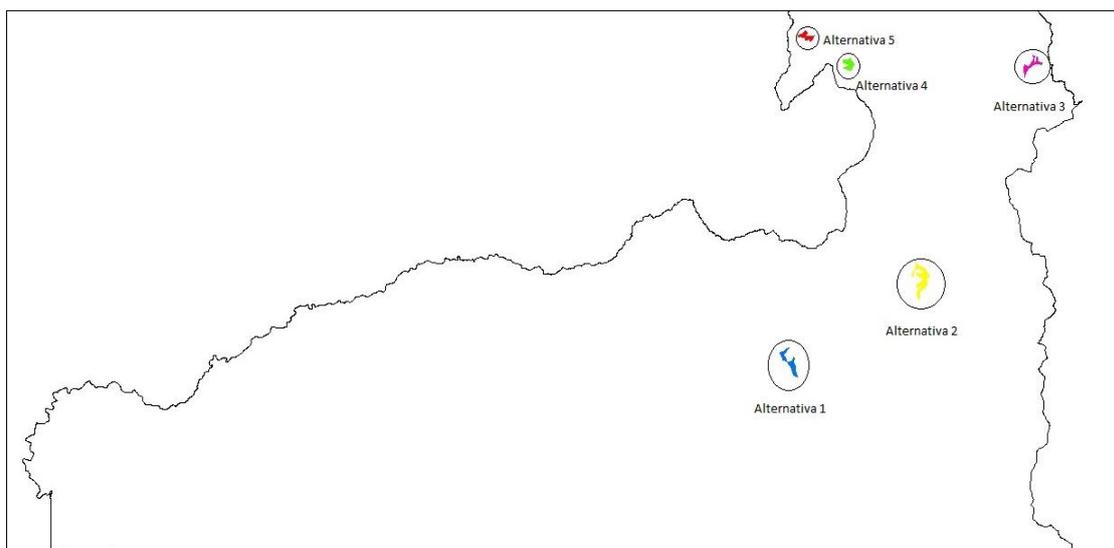
- Prefectura de Loja. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Loja 2015-2025*. Loja.
- Ramírez-Rosado, I., García-Garrido, E., Fernández-Jiménez, A., Zorzano-Santamaría, P., Monteiro, C., & Miranda, V. (2008). Promotion of new wind farms based on a decision support system. *Renewable Energy*, 558-566.
- Rincón, L., Dominguez, J., Amador, J., Arribas, L., & Pinedo, I. (2011). *Aplicación de Sistemas de Información Geográfica para la Electrificación Rural con Energías Renovables: Modelo IntiGIS. Caso de Estudio: Isla Zapara, Estado Zulia. Venezuela*. Madrid.
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill,.
- Sastre, P. (2010). *Sistemas de Información Geográfica (SIG): Técnicas básicas para estudios de biodiversidad*.
- Soto, C. (2017). *Central Eólica Villonaco Energías Renovables, Sustentables, y Sostenibles*. Loja.
- Tubet, C. (2016). *Diseño de una Metodología de Evaluación de la Sostenibilidad del Mix Eléctrico Nacional, basada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP)*. Cantabria.
- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J., & Jijón, D. (2017). Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador. *Renewable Energy*, 275-286.
- Watson, J., & Hudson, M. (2015). Regional scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation. *Landscape Urban Plan*, 20-31.
- Yajure Ramírez, C. A., & Arlenis Guzmán, Y. (2017). Estudio comparativo de técnicas de toma de decisiones multicriterio para la jerarquización de tecnologías de energías renovables a utilizar en la producción de electricidad. *Scientia et Technica*, 273-280.

10. ANEXOS

Anexo 1. Formato de encuesta de selección

Encuesta para selección de la mejor alternativa

Para la realización de la presente encuesta en primer lugar se procederá a identificar las alternativas que serán evaluadas, éstas son resultado de un modelado digital a través del programa ArcGis, a continuación, se presentan las cinco alternativas identificadas



Una vez se han identificado las alternativas estamos en condición para realizar la siguiente encuesta:

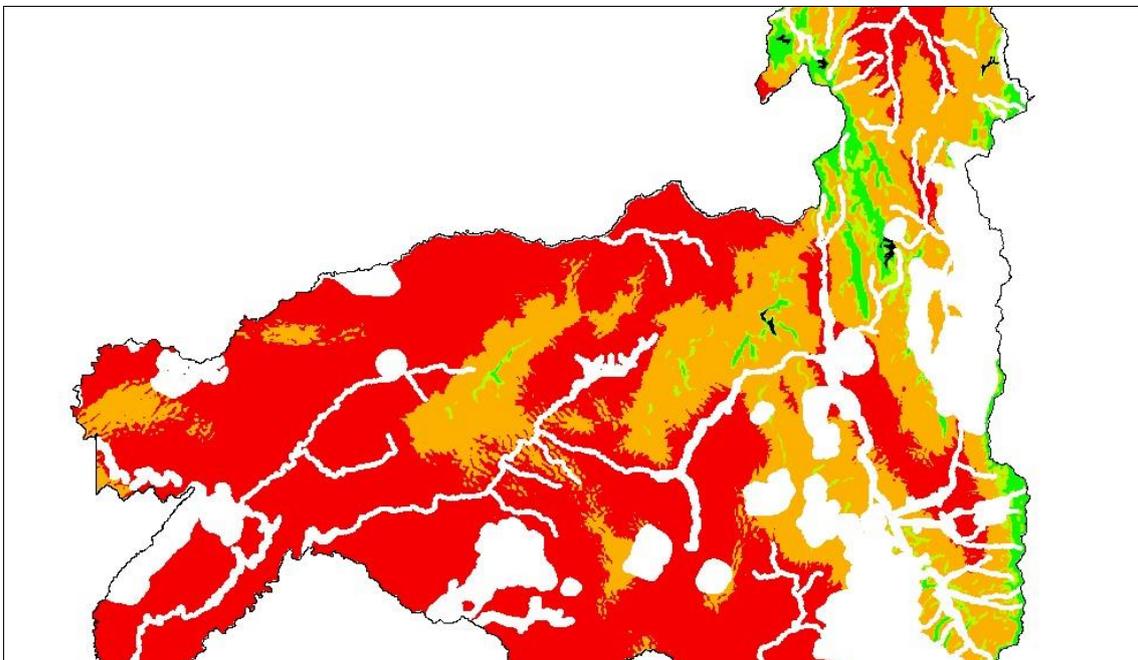
Tomando como referencia la escala de preferencia de Saaty es necesario que se evalúe uno a uno cada criterio con respecto a las cinco alternativas planteadas anteriormente.

DEFINICIÓN	ESCALA
Ai y Aj son igualmente importantes (I)	1
Ai es moderadamente más importante que Aj (m+I)	3
Ai es más importante que Aj (+I)	5
Ai es mucho más importante que Aj (M+I)	7
Ai es extremadamente más importante que Aj (E+I)	9
Los valores de escala 2,4,6 y 8 también son usados y representan compromisos entre los valores anteriores	2,4,6,8

En base a la tabla presentada anteriormente es necesario que se asignen los valores correspondientes para cada una de las tablas que se presentan a continuación, para ello será de ayuda observar los mapas que representan cada uno de los criterios enfrentados a todas las alternativas, esta es una manera de identificar fácilmente lo propuesto. Es importante tomar en cuenta que Ai representa la columna de la matriz mientras que Aj representa la fila.

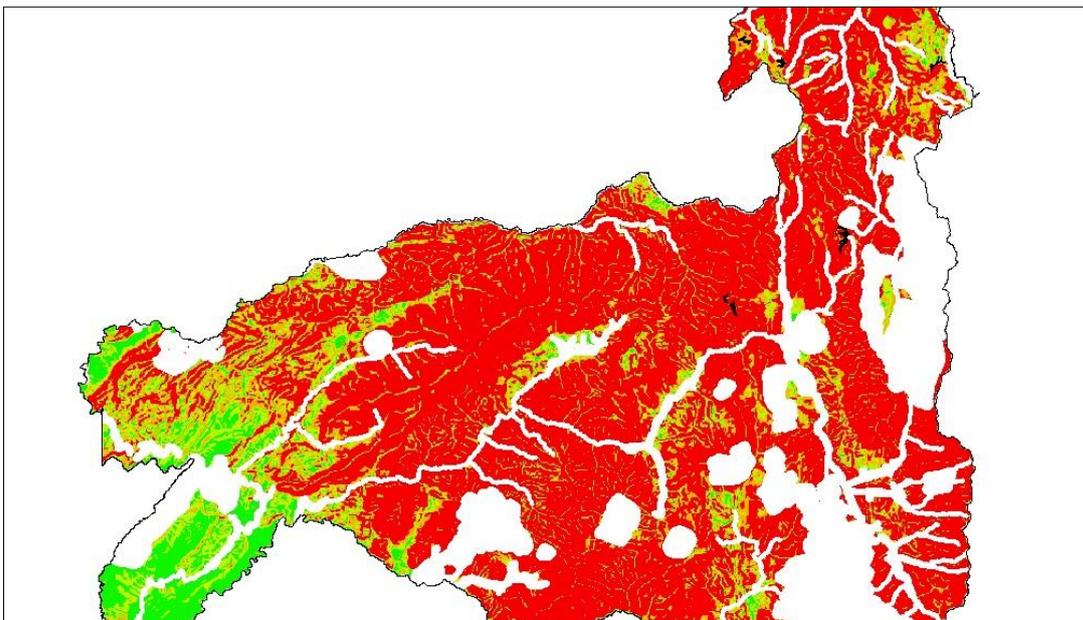
Criterio 1: Velocidad del viento

En este caso todas las alternativas estarán pintadas de color negro, cada una de las cinco alternativas se encuentra en un área catalogada como óptima excepto la alternativa 3 que se encuentra en una zona adecuada con respecto a la velocidad del viento.



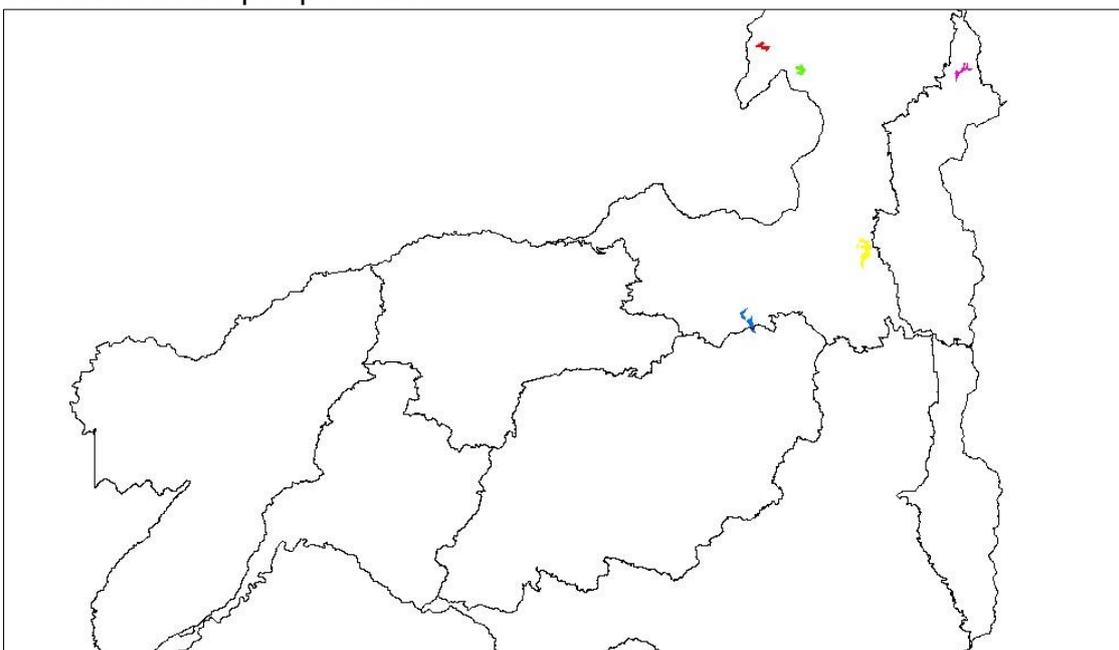
Criterio 2: Pendiente

Para el caso de la pendiente las alternativas también estarán pintadas de negro, a continuación, se mencionará la categoría en que se encuentra cada una de ellas: alternativa 1 se encuentra en una zona inaceptable, la alternativa 2 está en una zona adecuada, la alternativa 3 está en una zona óptima y las alternativas 4 y 5 están en zonas adecuadas.



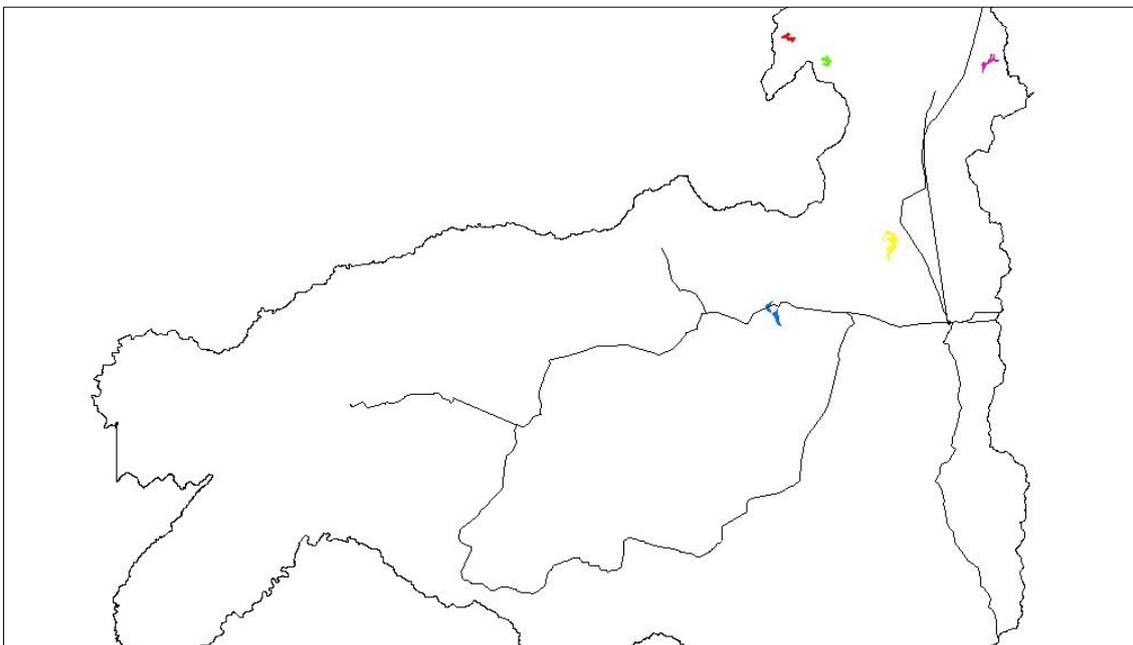
Criterio 3: Red de carreteras

Para el caso de la red de carreteras mientras más cerca se encuentren las alternativas a las carreteras será mejor ya que se evitará la construcción de nuevas vías para el transporte de materiales e insumos necesarios para la construcción del parque eólico.



Criterio 4: Líneas de transmisión

Al igual que los dos criterios anteriores para el caso de las líneas de transmisión las mejores alternativas serán las que se ubiquen más próximas a las mismas.



Criterio 5: Subestaciones

En este caso las alternativas que se encuentren más próximas a las subestaciones serán las mejores ubicadas para la instalación de un proyecto eólico.

