



Master Thesis | Tesis de Maestría

submitted within the UNIGIS M.Sc. programme

presentada para el Programa UNIGIS M.Sc

Interfaculty Department of Geoinformatics- Z_GIS

Departamento de Geomática – Z_GIS

University of Salzburg | Universidad de Salzburg

Geolocalización de sitios para el emplazamiento de granjas solares en la región Sierra del Ecuador

Geolocation of places to install solar farms in the Andean region of Ecuador

2014-B Geovanna Patricia Villacreses Rivadeneira

01423657

A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of
the degree of
Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – M.Sc. (GIS)

Advisor | Supervisor:

Leonardo Zurita Arthos PhD

Quito – Ecuador, Agosto 2019

Compromiso de Ciencia

Por medio del presente documento, incluyendo mi firma personal certifico y aseguro que mi tesis es completamente el resultado de mi propio trabajo. He citado todas las fuentes que he usado en mi tesis y en todos los casos he indicado su origen.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a horizontal line across the middle, positioned centrally on the page.

(Quito – Ecuador, Agosto 2019)

DEDICATORIA

Por su amor incondicional y por ser parte de la mejor etapa de mi vida,
les dedico mi esfuerzo diario y mi trabajo constante,
a mi esposo y mis amadas hijas.
Mi norte.

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables por la colaboración y confianza depositada para desarrollar esta investigación. Mi gratitud a los compañeros de trabajo que me brindaron sus conocimientos y estuvieron involucrados en el proceso.

A toda mi familia por ser un eje fundamental para mi desarrollo personal y profesional, gracias por su ayuda desinteresada.

RESUMEN

Las necesidades humanas y sus procesos productivos requieren de servicios energéticos para poder desarrollarse. En los últimos años se ha fijado gran interés por contrarrestar el uso de combustibles fósiles para satisfacer dichas necesidades. Como parte de las iniciativas planteadas a nivel mundial está el uso de los recursos renovables. Entre los más usados se encuentra el recurso solar. Aunque, una de las dificultades intrínsecas de esta energía, es la falta de control que se tiene sobre ella. Por otra parte, los emplazamientos solares generan solo cuando hay suficiente recurso y no se puede regular su eficiencia en función de las necesidades de consumo. Por estos motivos es importante la correcta localización de sitios así como los respectivos análisis de factibilidad técnica, económica e impacto ambiental de estos proyectos.

Actualmente, en el Ecuador, los proyectos fotovoltaicos se encuentran distribuidos aleatoriamente en el territorio, lo cual demuestra que no se consideraron criterios adecuados para su ubicación. La presente investigación tiene como objetivo localizar sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares fotovoltaicas en la región Sierra, mediante la combinación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los Métodos de Evaluación Multicriterio (EMC). En este sentido, se usaron nueve factores y cuatro restricciones para el análisis. Los factores fueron ponderados mediante el método AHP. Una vez ponderados, se aplicó siete métodos multicriterio (ARAS, OCRA, PSI, SMART, Superposición Ponderada, TOPSIS y VIKOR) para la selección de sitios con potencial solar. Posteriormente, se realizó un análisis de los siete resultados mediante el coeficiente de correlación de Pearson, seguido de un análisis de errores absolutos. Mediante Pearson, se demostró que existen métodos con una correlación alta entre ellos. Esto se debe a que tienen un gran número de píxeles con valores similares pero estos valores son independientes a la ubicación geográfica de cada píxel. De ahí parte el análisis de errores absolutos el cual determinó que la mejor solución es el promedio entre el método OCRA y VIKOR.

A partir del promedio de los dos métodos, se eliminó las zonas restringidas, obteniendo como resultado, que las zonas de mayor potencial se encuentran en la provincia de Loja al sur del Ecuador, seguido de Santo Domingo, Pichincha y Cotopaxi, ubicadas en el centro norte del país. Finalmente, como zonas menos aptas se identifican a las provincias de Tungurahua y Azuay.

Palabras claves: Evaluación multicriterio, AHP, sistemas de información geográfica, solar fotovoltaico.

ABSTRACT

Human needs and their production processes require energy services to be developed. In recent years there has been a great deal of interest in counteracting the use of fossil fuels to satisfy these needs. As part of the worldwide proposed initiatives there is the use of renewable resources. Among the most used is the solar resource. Although one of the intrinsic difficulties of this energy is the lack of control we have over it. On the other hand, the solar sites generate only when there are enough resources and cannot regulate its efficiency in function of the necessities of consumption. For these reasons the correct location of sites as well as the respective technical feasibility analysis, economic analysis and the environmental impact of these projects are very important.

Currently, in Ecuador, photovoltaic projects are distributed randomly in the territory, which shows that adequate criteria for their location were not considered. The present research aims to locate appropriate sites for the location of photovoltaic solar farms in the Sierra region, by combining the Geographic Information Systems and the Multiple Criterion Evaluation Methods. In this sense, nine factors and four restrictions were used for the analysis. Factors were weighted using the AHP method. Once weighted, seven multiple criterion methods (ARAS, OCRA, PSI, SMART, Weighted Overlay, TOPSIS and VIKOR) were applied for the selection of sites with solar potential. Subsequently, an analysis of the seven results was performed using the Pearson correlation coefficient, followed by an absolute error analysis. By Pearson, it was demonstrated that there are methods with a high correlation between them. This is because they have a large number of pixels with similar values but these values are independent of the geographical location of each pixel. Hence the analysis of absolute errors determined that the average between the OCRA and VIKOR Method is the best solution.

From the average, restricted areas were eliminated. As a result, the areas of greatest potential are located in the province of Loja in the south of Ecuador, followed by Santo Domingo, Pichincha and Cotopaxi, located in the north center of the country. Finally, as less suitable areas, the Tungurahua and Azuay provinces.

Keywords: Multicriteria evaluation, AHP, geographic information system, photovoltaic solar.

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
GLOSARIO DE TÉRMINOS	11
GLOSARIO DE ABREVIATURAS	12
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 ANTECEDENTES	13
1.2 PROBLEMA	15
1.3 OBJETIVO GENERAL	17
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5 HIPÓTESIS	17
1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
1.7 JUSTIFICACIÓN	18
1.8 ALCANCE	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES	20
2.2 LOS SIG Y LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO	21
2.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE SITIOS MEDIANTE EL USO DE LOS SIG	22
2.3.1 Levantamiento de información	22
2.3.2 Definición de factores y restricciones	22
2.3.3 Resolución espacial y escala de la información	23
2.3.4 Rasterización de la información	23
2.3.5 Estandarización de la información	24
2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC)	26
2.4.1 Proceso analítico jerárquico (AHP)	28
2.4.2 Evaluación de la relación aditiva (ARAS)	29
2.4.3 Calificación de competitividad operacional (OCRA)	29
2.4.4 Índice de selección de preferencias (PSI)	30
2.4.5 Técnica simple de clasificación de multiatributos (SMART)	31
2.4.6 Superposición Ponderada	32
2.4.7 Técnica para ordenar las preferencias por similitud para una solución ideal (TOPSIS)	32

2.4.8	Método de evaluación multicriterio VIKOR.....	33
2.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	34
2.5.1	Coefficiente de Pearson.....	34
2.5.2	Análisis de errores.....	35
3.	METODOLOGÍA.....	37
3.1	PRIMERA FASE: PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	38
3.1.1	Definición de la extensión geográfica para el análisis.....	38
3.1.2	Recopilación o levantamiento de información.....	40
3.2	SEGUNDA FASE: ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	53
3.2.1	Identificación de factores y restricciones.....	53
3.2.2	Definición de la resolución espacial y rasterización de factores.....	54
3.2.3	Estandarización de la información.....	64
3.3	TERCERA FASE: SELECCIÓN DE SITIOS.....	68
3.3.1	Jerarquización y ponderación de criterios.....	68
3.3.2	Evaluación multicriterio.....	70
3.3.3	Análisis de errores y selección del mejor resultado de EMC.....	71
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	72
4.1	RESULTADOS.....	72
4.2	DISCUSIÓN.....	84
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Determinación de la distancia euclidiana.....	24
Figura 2: Función logística de decrecimiento (arriba) y crecimiento (abajo)	25
Figura 3: Fases para desarrollar el método ARAS	29
Figura 4: Fases para desarrollar el método OCRA.....	30
Figura 5: Fases para desarrollar el método PSI	31
Figura 6: Fases para desarrollar el método SMART	32
Figura 7: Fases para desarrollar el método TOPSIS.....	33
Figura 8: Fases para desarrollar el método VIKOR	34
Figura 9: Diagrama de flujo de la metodología.....	38
Figura 10: Mapa de ubicación del estudio.....	39
Figura 11: Modelo digital de elevación del Ecuador.....	42
Figura 12: Velocidad del viento a 5m	43
Figura 13: Radiación global promedio anual	44
Figura 14: Subestaciones del Sistema Nacional Interconectado	45
Figura 15: Líneas de transmisión del Sistema Nacional Interconectado.....	46
Figura 16: Temperatura media anual.....	47
Figura 17: Red vial de primer orden.....	48
Figura 18: Cobertura vegetal y uso de la tierra	49
Figura 19: Zonas urbanas a nivel nacional	50
Figura 20: Cuerpos de agua	51
Figura 21: Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado.....	52
Figura 22: Regiones del Ecuador.....	53
Figura 23: Diagrama de flujo para obtener raster de velocidad del viento a la altura deseada.....	58
Figura 24: Diagrama de flujo para reescalar la resolución de un raster	59
Figura 25: Rasterización de factores	62
Figura 26: Rasterización de factores	63
Figura 27: Rasterización de restricciones.....	64
Figura 28: Estandarización de factores.....	67
Figura 29: Estandarización de factores.....	68
Figura 30: Jerarquización de factores.....	69
Figura 31: Métodos de Evaluación Multicriterio	73
Figura 32: Análisis de correlación entre los siete EMC	75
Figura 33: Coeficiente de Pearson con un umbral de 75 (zonas aptas).....	76
Figura 34: Promedio entre los métodos de EMC sin Superposición Ponderada	79
Figura 35: Geolocalización de sitios para el emplazamiento de granjas solares en la región Sierra del Ecuador	80
Figura 36: Rangos de valoración de la Geolocalización de sitios para el emplazamiento de granjas solares.....	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Producción de energía neta por generadora	40
Tabla 2: Información recopilada por institución	41
Tabla 3: Identificación de factores y restricciones	54
Tabla 4: Procesos de rasterización por cobertura	55
Tabla 5: Clasificación de la cobertura vegetal y uso de la tierra según el nivel 2.....	61
Tabla 6: Procesos de estandarización de los factores	65
Tabla 7: Estandarización de la cobertura vegetal y uso de la tierra	66
Tabla 8: Ponderación de factores.....	70
Tabla 9: Cálculo de errores entre los métodos EMC (aplicación de la ecuación 8).....	77
Tabla 10: Cálculo de errores entre los métodos EMC sin superposición ponderada	78
Tabla 11: Clasificación de la EMC con sus respectivas áreas.....	81

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Término	Definición
Energías renovables:	Es la energía que se obtienen a partir de recursos naturales que son inagotables por su cantidad o porque tienen capacidad de generarse por medios naturales. Para la generación de energía renovable se cuenta con el recurso eólico, solar, geotérmico, hídrico y la biomasa.
Granja fotovoltaica:	La producción de energía usando el recurso solar, está basada en el fenómeno físico denominado 'efecto fotovoltaico', que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. La unión de estos paneles se lo puede considerar como granja fotovoltaica (CONELEC, 2008).
Radiación solar global:	Cantidad de energía solar que llega a una superficie, medida en Watio/hora/metro cuadrado. La radiación que llega a la superficie terrestre puede ser directa o difusa. Mientras la radiación directa incide sobre cualquier superficie con un único y preciso ángulo de incidencia, la difusa cae en esa superficie con varios ángulos. Cuando la radiación directa no llega a una superficie a causa de la presencia de un obstáculo, el área en sombra no se encuentra completamente a oscuras gracias a la radiación difusa. Por ello, los dispositivos fotovoltaicos pueden funcionar incluso solamente con radiación difusa. Mientras que la radiación global es la suma de la radiación directa y difusa (CONELEC, 2008).
Raster:	Es la representación geográfica de objetos que ocupan un lugar en el espacio o terreno; se representan en imágenes las cuales están compuestas por celdas, que contienen un número de identificación del objeto o el valor de una variable.
Rasterización:	Es la transformación de coberturas de vectores a imágenes raster.
Vector:	Es la representación geográfica de objetos que ocupan un lugar en el espacio o terreno; se representan en coberturas que pueden ser puntos, líneas o polígonos.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Definición
AG ONU	Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas
AHP:	Proceso analítico jerárquico AHP (<i>Analytic hierarchy process</i>)
ARAS:	Evaluación de la relación aditiva ARAS (<i>Additive Ratio Assessment</i>)
ARCONEL:	Agencia de Regulación y Control de Electricidad
CONELEC:	Consejo Nacional de Electricidad
EMC:	Evaluación Multicriterio
IGM:	Instituto Geográfico Militar
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
INAMHI:	Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censo
INER:	Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables
IPCC:	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MAE:	Ministerio del Ambiente
MAGAP:	Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca
MCDM	Toma de decisión multicriterio (<i>Multi Criteria Decision Making</i>)
MEER:	Ministerio de Electricidad y Energías Renovables
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
OCRA:	Calificación de competitividad operacional OCRA (<i>Operational Competitiveness Rating Analysis</i>)
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PSI:	Índice de selección de preferencias PSI (<i>Preference Selection Index</i>)
SIG:	Sistema de Información Geográfica
SMART:	Técnica simple de clasificación de multiatributos SMART (<i>Simple Multi Attribute Rating Technique</i>)
SNAP:	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SNI:	Sistema Nacional Interconectado
TOPSIS:	Técnica para ordenar las preferencias por similitud para una solución ideal TOPSIS (<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)
WEC	<i>World Energy Council</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Las emisiones de gases de efecto invernadero han aumentado desde la era preindustrial y actualmente son mayores que nunca, este aumento se da por: el crecimiento económico y demográfico, el mayor uso de combustibles fósiles, la agricultura moderna a gran escala y la alteración del uso del suelo. Esta influencia humana en el sistema climático es clara y los cambios recientes han tenido impactos generalizados en los sistemas humanos y naturales. De tal manera que los cambios en los sistemas humanos se ven reflejado en las necesidades que tienen las poblaciones (necesidades básicas como: de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación), las cuales van en aumento y requieren de servicios energéticos para poder desarrollarse. Además, según los informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), se ratifica que la demanda de energía, con miras al desarrollo social, económico y a la mejora del bienestar y la salud de las personas, va en aumento (IPCC, 2014).

La generación de energía a partir de combustibles fósiles ha sido un proceso trascendental en el siglo XX. La *World Energy Council* (WEC, 2013b) indica que el consumo energético del mundo al 2030 provendrá al 80% de los fósiles. Aunque estos combustibles son abundantes y actualmente baratos, la amenaza del calentamiento global ha causado que muchos países exploren nuevas alternativas de fuentes de energías renovable (Janke, 2010). En el 2012, la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (AG ONU) declara que del 2014 al 2024 serán las décadas de la energía sostenible para todos (IICA, 2014, p. 10). Además, la *World Energy Council* (WEC, 2013b) expone que el futuro mix de energía primaria será más elevado para las fuentes de energía renovables, en el año 2050. En términos absolutos, los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas) seguirán siendo dominantes en un 70% y la participación de las fuentes de energía renovables aumentará al 30% a nivel mundial (WEC, 2013a). Con estos datos, se podría apostar por el uso de energías limpias para el beneficio de la sociedad y el medio ambiente.

Las energías renovables tienen gran potencial para mitigar el cambio climático y pueden aportar otros beneficios si son utilizadas de forma adecuada, como contribuir con el desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía y la seguridad del suministro de energía, además de reducir sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud evidentemente (IPCC, 2011). El rápido crecimiento de las energías renovables, particularmente en el sector eléctrico, es impulsado por diversos factores, incluyendo el aumento de la rentabilidad de las tecnologías, las iniciativas de políticas aplicadas, un mejor acceso al financiamiento, seguridad energética y cuidados del medio ambiente, entre otros. En el 2014, las energías renovables generaron un estimado del 19.2% en el consumo final mundial de energía; mientras que en el 2015 continuó su crecimiento en cuanto a la capacidad y generación (REN21, 2016). En consecuencia, en los países en desarrollo están surgiendo mercados nuevos, para la energía renovable. Los registros indican que la producción de energía mediante fuentes eólicas y solares tuvieron récords adicionales en los últimos años, representando el 77% de las nuevas instalaciones y dejando el restante para la energía hidroeléctrica (REN21, 2016).

Actualmente, el mundo entero suma más capacidades para generar electricidad mediante recursos renovables al año, que la capacidad (neta) de todos los combustibles fósiles combinados. La capacidad de las renovables es suficiente para abastecer aproximadamente el 24% de la electricidad mundial, en conjunto con la energía hidráulica, que proporciona alrededor del 17% (REN21, 2016). Entre las fuentes de energía con mayor crecimiento de implantación en el mundo, se tiene la energía solar fotovoltaica, la cual es competitiva en términos económicos, en comparación con las otras energías renovables y energías fósiles y su capacidad de generación. En el 2015 y a principios del 2016 se hicieron evidentes las expectativas de mejorar aún más los costos históricamente bajos, ofertando subastas eléctricas en diversos lugares, desde América Latina hasta la región del Medio Oriente, el Norte de África y la India (REN21, 2016).

En cuanto a la energía solar, es la fuente más abundante y está disponible para su uso en dos formas: directa (radiación solar) e indirecta (eólica, biomasa, hidráulica, océano, etc.). Incluso si sólo el 0.1% de esta energía llega a la Tierra podría ser convertida con una eficiencia del 10%, que sería cuatro veces más grande que la capacidad de generación de electricidad mundial total de alrededor de 5000 GW (WEC, 2013b).

Con estos antecedentes, en el 2006 entre la Unión Europea y 8 países Latinoamericanos, entre ellos Ecuador, nace el programa “Euro-solar”. El cual tiene como objetivo mejorar las condiciones de vida de 91 comunidades ecuatorianas, mediante el acceso a fuente de energía eléctrica renovable. Las 91 comunidades están localizadas en las provincias de Guayas, Morona Santiago, Pastaza, Orellana, Napo, Sucumbíos y Esmeraldas. Por medio de este programa, se impulsó el aprovechamiento solar para la generación de energía en zonas alejadas de las redes de distribución. Así mismo y gracias al interés que han generado las regulaciones de inversión privada, se encuentran en construcción proyectos solares fotovoltaicos con potencia cercana a 1MW y 150 MW (MEER, 2013b, 2013c). En la actualidad, el país cuenta con 7 plantas fotovoltaicas, que proveen energía a la red nacional, pero ninguna de ellas abastece directamente a las comunidades aledañas.

Con respecto a la medición del recurso solar, en el año 2008 el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), publicó el “Atlas Solar del Ecuador”, que incluye la cuantificación del potencial solar disponible y su posibilidad de generación eléctrica. Este producto será de sumo valor para el desarrollo del presente estudio, en el cual se seleccionará los sitios aptos para la instalación de granjas solares fotovoltaicas, con el propósito de contribuir con el uso de energías limpias.

1.2 PROBLEMA

El fenómeno del cambio climático que se vive a nivel mundial es causado por factores antropogénicos que han aumentado a partir de la era preindustrial, como el crecimiento económico, demográfico, el mayor uso de combustibles fósiles, la agricultura moderna a gran escala y la alteración del uso del suelo. Según los informes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, la demanda de energía y de servicios relacionados, con miras al desarrollo social, económico, la mejora del bienestar y la salud de las personas van en aumento. Esta influencia humana en el sistema climático es clara en los actuales sistemas naturales y es evidente que todas las necesidades humanas requieren de servicios energéticos para poder desarrollarse (IPCC, 2014).

Como parte de las iniciativas para contribuir con la disminución de las emisiones de efecto invernadero se plantea el uso de los recursos renovables, ya que al corto o largo plazo los combustibles fósiles se agotarán y se verá la necesidad de usar estas fuentes de energía. Entre

los recursos más usados según los últimos reportes del IPCC es la energía solar. El sol es una fuente con suficiente abundancia para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad. Una de las dificultades intrínsecas de esta energía, como en general de las energías renovables es la falta de control que se tiene sobre ella. Además, que estas pueden tener afectaciones por el cambio climático.

La instalación de una granja solar para la generación eléctrica depende de muchos factores, de los cuales el decisivo suele ser la cantidad del recurso. Estos emplazamientos generan solo cuando hay suficiente recurso y no se puede regular su eficiencia en función de las necesidades de consumo según Pathak, Wagner, Adhikari, y Nunzi (2015). Por estos motivos, es importante la correcta localización de sitios, así como los respectivos análisis de factibilidad técnica, económica y el impacto ambiental del proyecto.

Por otro lado, en la zona Sudamericana, no se ha realizado análisis en detalle de la evolución del recurso y de su cantidad. Esto se refleja también en el Ecuador, donde los avances en cuanto a producción limpia han sido muy bajos, teniendo una generación de electricidad: de energía hidráulica del 57,8%; 0,31% de energía eólica; 1,74% de aprovechamiento energético de biomasa y el 0,14% de energía solar que es la generación más baja (MEER, 2016). Los proyectos fotovoltaicos, se encuentran distribuidos aleatoriamente en el territorio, lo cual muestra que no se consideraron los suficientes criterios para su ubicación, haciendo que estos proyectos de gran magnitud solo se enfoquen en producción de energía para alimentar el Sistema Nacional Interconectado (SNI) y no necesariamente abastecer las necesidades de las pequeñas comunidades. Además, estos proyectos no han tenido un análisis exhaustivo sobre la ubicación geográfica que ocupan en el terreno.

Entonces, queda en evidencia que no hay trabajos que se enfoquen a la selección apropiada de sitios para este tipo de emplazamientos en el Ecuador, mucho menos se ha considerado un análisis multicriterio para la localización e instalación de un proyecto fotovoltaico. Por ende, no se tomaron en cuenta variables que pueden influenciar en la viabilidad del mismo como el propio recurso solar global, la temperatura, la velocidad del viento, las líneas de transmisiones eléctricas existentes, las estaciones y subestaciones, la red vial, las zonas urbanas y sus zonas de amortiguamiento, la pendiente, la cobertura del uso del suelo. Por lo tanto, para este tipo de estudios es importante contar con herramientas que permitan la interoperabilidad de los datos considerados; los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

y los sistemas de programación estadística que permiten dicha interoperabilidad, análisis y procesamiento para alcanzar los resultados requeridos.

1.3 OBJETIVO GENERAL

- Geolocalizar sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares en la región Sierra del Ecuador.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los criterios que se deben considerar en evaluación multicriterio para la selección de sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares.
- Espacializar cada método multicriterio y mostrar los sitios con potencial para el emplazamiento de granjas solares.
- Seleccionar el mejor resultado obtenido mediante los métodos multicriterios seleccionados.

1.5 HIPÓTESIS

Existen sitios con potencial solar en la Sierra ecuatoriana para la instalación de tecnologías limpias.

1.6 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuáles son los criterios que se considerarán en la evaluación multicriterio para la selección de sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares?
- ¿Las herramientas de geoprocésamiento de los sistemas de información geográfica permiten la espacialización de los métodos multicriterio y la selección de sitios con potencial para el emplazamiento de granjas solares?
- ¿Cuál es el conocimiento sobre los métodos multicriterio seleccionados para el caso de estudio?
- ¿Los conocimientos de estadística para comparar y validar resultados permiten seleccionar el mejor resultado obtenido mediante métodos multicriterio seleccionados?

1.7 JUSTIFICACIÓN

Durante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en el 2015, 195 países acordaron disminuir el calentamiento global por debajo de los 2 grados centígrados. Así mismo, algunos países se comprometieron a reformar sus subsidios a los combustibles fósiles. Estos compromisos, establecen un precedente en el desarrollo de las energías renovables (REN21, 2016). De la mano de estas iniciativas, está presente la inversión que los países hacen para desarrollar este tipo de energías, las cuales han crecido considerablemente con una tendencia sostenible, especialmente en países en desarrollo, según el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

Ecuador es parte de dicha iniciativa; en los últimos años ha trabajado en políticas que respalden el desarrollo de las energías limpias. Gracias a la posición geográfica del país, se percibe una pequeña variación en la duración de las horas de sol; el recurso solar podría proveer una parte importante de la energía que se requiere para desarrollar las actividades de la población. Además, alrededor de un tercio del territorio del país está localizado en las partes más altas debido a la presencia de la Cordillera de los Andes lo cual significa que todos estos lugares reciben una alta radiación solar comparada con las regiones más bajas del país.

El territorio continental se encuentra dividido en tres regiones (Costa, Sierra y Oriente). Cada una de las regiones tiene sus propias características físicas, ambientales y sociales. Para el desarrollo del presente estudio se seleccionó la región Sierra, que está conformada por la Cordillera de los Andes, posee un clima frío a causa de sus pisos altitudinales y en algunas zonas se observa la presencia de valles, donde se da lugar a microclimas. Muchas de las poblaciones de esta región se encuentran desprovistas de energía, sea porque están alejadas del SNI o por la falta de infraestructura eléctrica cercana. Lo que ha generado que se conviertan en poblaciones aisladas y sin acceso a algunos servicios básicos. Con el desarrollo de este estudio se podrá definir los sitios adecuados para la instalación de granjas solares fotovoltaicas que permitan brindar el servicio eléctrico a estas poblaciones o que a su vez puedan suministrar energía al SNI.

Dadas las condiciones que anteceden, es importante considerar que existe una serie de procesos para llegar al resultado esperado. En este mismo sentido, es importante recalcar que se debe hacer un levantamiento exhaustivo de información. Además, para el desarrollo del

presente, es importante que la información se encuentre en formatos compatibles con los Sistemas de Información Geográficos (como datos vectoriales o raster de cada criterio analizado). De la misma manera, es fundamental recabar evidencias o estudios relacionados sobre la evaluación de las zonas donde existen granjas solares ya que su funcionamiento será la evidencia de la existencia del recurso.

1.8 ALCANCE

Ecuador se ubica en Sudamérica y posee una superficie de 248 mil kilómetros cuadrados de territorio continental. El presente estudio se enfoca en la región Sierra ecuatoriana. El área de esta región abarca 70 mil kilómetros cuadrados que es aproximadamente el tercio del territorio del país, ver Figura 10. Como punto de partida se considera el levantamiento de información, la misma que debe derivarse de fuentes oficiales. Bajo este contexto, se define una resolución espacial con la finalidad de estandarizar la información almacenada. Para el caso, se considera que el recurso solar (radiación solar global) es la cobertura base para la estandarización. En el 2008 el CONELEC publica el “Atlas Solar del Ecuador” donde la modelización del recurso maneja una resolución espacial de 200m x 200m (tamaño del píxel). Este producto es el resultado de la integración de mapas digitales, utilizando recursos de geoprocésamiento, cálculo de desempeño y producción de energía eléctrica. Con este primer insumo de información se define que el formato de análisis es raster y que todos los criterios a considerar deben acogerse a ello usando la misma extensión de análisis y resolución espacial. Para el procesamiento de información y obtención de resultados se usó los sistemas de información geográfica en combinación con el lenguaje de programación R y los conocimientos estadísticos adquiridos.

Los resultados obtenidos serán una herramienta para la toma de decisiones en el sector energético del país con el fin de aportar a la producción de energética sustentable y contribuir con el cuidado del medio ambiente. Por otra parte, se espera que el Gobierno Ecuatoriano considere esta investigación para cumplir con el objetivo siete de desarrollo sostenible planteado por el PNUD el cual busca garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos. La energía generada a partir del aprovechamiento del recurso solar podrá abastecer de este servicio básico a las poblaciones cercanas o a su vez se podrá fortalecer el Sistema Nacional Interconectado.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables están conformadas por el recurso solar, eólico, geotérmico, hidráulico y biomasa. Estos recursos se presentan en el espacio con mayor disposición que los recursos convencionales (IPCC, 2011). Los organismos mundiales como la Organización de las Naciones Unidas y el Panel Intergubernamental de Cambio Climático promueven el uso de estos recursos por la dependencia energética de la población y por el cambio climático que se vive en la actualidad.

El uso de las energías renovables está atado al desarrollo local, la planificación territorial, la evaluación de impactos y los análisis sociales, físicos y ambientales. Por lo tanto, el interés de analizar la espacialización de los recursos renovables se torna importante. Según el Balance Energético Nacional, el Ecuador entre los años 2006 y 2015 tuvo un incremento energético del 12.2% procedente de las energías renovables y su desarrollo en el territorio ecuatoriano (MEER, 2016). Lo cual indica que estos recursos con el tiempo pueden ser parte de la complementariedad o sustitución de la producción energética del país (MEER, 2016).

Ecuador se encuentra ubicado en el paralelo y meridiano central, lo cual es beneficioso porque la radiación solar que recibe es perpendicular en la mayoría de su territorio y el recurso es constante a lo largo del año. En este sentido, el recurso es aprovechable para la generación de electricidad mediante la instalación de granjas solares fotovoltaicas.

Una granja fotovoltaica está compuesta por una serie de paneles solares, los cuales están conformados por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o de forma paralela, y a su vez cada módulo fotovoltaico está formado por unidades básicas llamadas células fotovoltaicas compuestas de un material semiconductor (en su mayoría de silicio). El funcionamiento de una granja fotovoltaica depende de la luz del sol que irradia sobre una célula generando una tensión eléctrica. La intensidad de la corriente aumenta con el tamaño de la superficie y la irradiación. Si el uso final de la electricidad producida por la granja solar es la electrificación autónoma (por ejemplo para viviendas) el sistema requiere de una batería de acumulación para generar energía en la noche o en horas sin luz (Abella, 2011, p. 3).

Por otra parte, requieren de un regulador de carga (que genera corriente continua) y un inversor (que genera corriente alterna). En el caso de que la electricidad producida por la granja se vaya a conectar a una red (SNI) no se precisa de baterías ya que la energía se acumula en la propia red eléctrica (Sánchez-Juárez, Santos-Magdaleno, Ruíz Sánchez, Martínez Escobar y Sánchez-Pérez, 2017).

Según la Regulación No. 001-14 del Consejo Nacional de Electricidad del 9 de enero de 2014, en el Ecuador, se define como plantas autogeradoras a las plantas que producen energía para su propio consumo. La cual puede abastecer a una población cercana a su ubicación o conectarse al suministro de electricidad a nivel nacional o SNI (CONELEC, 2014). Bajo este contexto, en el Ecuador continental se cuenta con 24 plantas fotovoltaicas de potencia nominal menor a 1 MW, las cuales están conectadas al SNI (ARCONEL, 2017).

2.2 LOS SIG Y LA EVALUACIÓN MULTICRITERIO

Los sistemas de información geográfica (SIG) están diseñados para almacenar, recuperar, manipular, analizar y trazar datos geográficos (Church, 2002), es decir todo objeto que ocupe un lugar en el espacio. Por medio de los SIG se puede hacer consultas interactivas que facilitan al usuario la lectura de su información, el análisis espacial y la edición de los mismos. Como resultado de todas estas operaciones se obtienen los mapas, que son representaciones gráficas de la realidad. Estos productos manejan una simbología según la temática tratada, asimismo considera las reglas cartográficas que permitan su fácil lectura. Generalmente los mapas son un instrumento de toma de decisiones dentro de los estudios de planificación territorial, gestión económica, monitoreo y cuidados ambientales y como herramienta de selección de sitios aptos para una actividad específica, como en el presente caso (Sánchez-Lozano, Teruel-Solano, Soto-Elvira, y García-Cascales, 2013; Lewis, Fitts, Kelly, y Dale, 2014).

Las técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) son métodos matemáticos que ayudan a buscar y medir de forma precisa un conjunto de soluciones con respecto a un problema planteado. Cada criterio de esta evaluación es valorado de forma independiente con el objetivo de encontrar la mejor solución bajo el mismo entorno del problema. Los problemas de decisión espacial suelen implicar un gran conjunto de alternativas factibles, conflictos e incertidumbres. Las Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) han tenido su origen en la

Economía y en la Ciencia política y de la Decisión (Romero, 1993), pero en los últimos años se ha empezado a introducir como una herramienta más en los SIG (Barredo Cano, 1996).

La evaluación multicriterio en el entorno de los SIG, se basa en que cada factor o criterio venga representado por una cobertura (raster o vector) de información georreferenciada, en la cual todos los puntos del territorio evaluado toman un valor con respecto a la actividad objeto de decisión (Melgarejo y Moreno, 2007). La variedad de problemas se puede clasificar en función de la geometría de cada criterio, los mismos que pueden ser valorados según el interés económico, social, físico y ambiental. Para analizar esta variedad de problemas con un SIG en combinación con los EMC se debe considerar varios procesos geográficos.

2.3 PROCESO DE SELECCIÓN DE SITIOS MEDIANTE EL USO DE LOS SIG

El campo de acción de los sistemas de información geográfica es muy amplio, por lo que puede ser aplicado a varias temáticas. Para el desarrollo de esta investigación se considera algunos procesos importantes los cuales son el eje fundamental para lograr los resultados deseados, a continuación, se detallan los procesos utilizados:

2.3.1 Levantamiento de información

En este proceso se debe identificar los actores principales que intervienen en la evaluación de los sitios con potencial, los mismos que deberán estar en la capacidad de proporcionar datos oficiales de las diferentes representaciones geográficas. De acuerdo a este proceso y la cantidad de información recolectada se podrá definir la extensión, la resolución y demás procesos para la evaluación multicriterio (Sánchez-Lozano et al., 2013).

Por lo tanto, se debe realizar un trabajo de identificación a nivel nacional para lograr encontrar dichas fuentes. En el caso de Ecuador, una de las fuentes principales de generación de información espacial es el Instituto Geográfico Militar, el cual tiene la competencia de normar la producción de información geográfica bajo los estándares mundiales.

2.3.2 Definición de factores y restricciones

Posterior al levantamiento de información, se clasifica a las variables involucradas en factores y restricciones. Los factores se basan en la ponderación y compensación de variables

que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser inventariados y clasificados previamente (Panagiotidou, Xydis, y Koroneos, 2016). Mientras que las restricciones en su mayoría vienen dadas según las leyes ambientales, que se administran en cada sitio, además de algunas normas que se deben respetar a nivel mundial (Sánchez-Lozano et al., 2013).

Para clasificar los criterios en factores y restricciones se debe analizar la información levantada y ver cuales influyen o no directamente en el emplazamiento o construcción del proyecto, por ejemplo: Si un proyecto de este tipo se encuentra cerca de la red vial principal o secundaria podría bajar los costos de construcción. Este tipo de análisis se deberá realizar con cada factor considerado, además es importante conocer el razonamiento de personas que trabajan en este campo, así como de la bibliografía existente sobre el tema.

2.3.3 Resolución espacial y escala de la información

La resolución espacial es la dimensión del pixel o tamaño de la celda de un raster que representa un área y objeto en el terreno. Mientras más pequeño sea el tamaño de la celda mayor será el detalle; es decir, que se puede representar más entidades pequeñas en la extensión de la imagen. El pixel debe ser lo suficientemente pequeño para tener el detalle necesario y lo suficientemente grande para realizar el análisis de manera eficiente (ESRI, 2014c).

Lo contrario ocurre en la escala, mientras más grande la escala más pequeños los detalles y mientras más pequeña la escala mayor serán los detalles. Por otro lado, la escala cartográfica es una fracción de la relación entre la distancia medida en el terreno y la representada en el mapa (Lencinas y Siebert, 2009). Por ejemplo, una ortofotografía que se visualiza a una escala de 1:2.000 muestra más detalles (los objetos se ven más cerca) que una que se visualiza a una escala de 1:24.000 (los objetos aparecen lejos o no son tan claros) (ESRI, 2014c).

2.3.4 Rasterización de la información

La rasterización es la conversión de las coberturas vectoriales a raster, estos procesos son parte de los SIG. Dentro de este proceso se debe considerar la resolución como parte del uso correcto de datos. De tal manera que los raster resultantes permitan la realización de operaciones viables en este tipo de formatos, especialmente los relativos a álgebra de mapas

(por ejemplo, operaciones entre múltiples capas, análisis de patrones espaciales, estadística espacial, etc.) (Varela, Pérez, Valiño, y López, 2011). Los procesos para obtener un raster a partir de un vector son varios y dependerán del tipo de análisis posterior para la aplicación de uno de ellos, algunos procesos pueden ser:

- **Raster binario:** Cuando un vector es convertido a raster y este solo almacena dos valores, 0 para zonas no aptas en el estudio y 1 para zonas aptas. A este raster se lo conoce también como máscaras. En la EMC se utiliza este tipo de raster para definir las áreas restringidas.
- **Raster de distancia euclidiana:** Cuando a partir de un vector (punto, línea o polígono) se calcula un modelo de distancia euclidiana con el objetivo de indicar que sitios son más o menos favorables en el análisis. La distancia euclidiana se calcula desde el centro de la celda de origen hasta el centro de cada una de las celdas vecinas. Conceptualmente, el algoritmo euclidiano funciona del siguiente modo: para cada celda, la distancia a cada celda de origen se determina al calcular la hipotenusa con x_{max} y y_{max} como los otros dos lados del triángulo, ver Figura 1. De este cálculo se deriva la verdadera distancia euclidiana, en vez de la distancia de la celda (ESRI, 2014a).

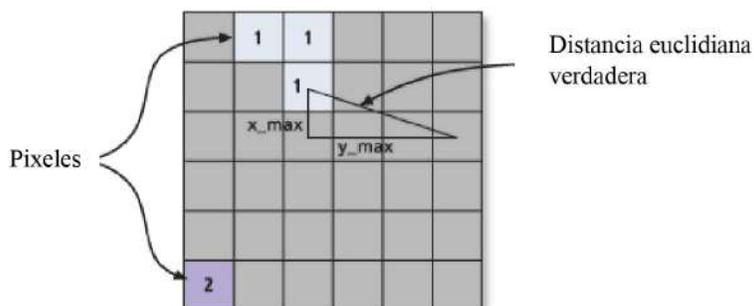


Figura 1: Determinación de la distancia euclidiana
Fuente: (ESRI, 2014a)

2.3.5 Estandarización de la información

La estandarización en la evaluación multicriterio es una técnica que permite la homogenización de las escalas de medida para la comparabilidad de los criterios considerados y su valoración (Pacheco y Contreras, 2008). Es decir, que los criterios al ser medidas heterogéneas deben pasar por este proceso con el objetivo de intercambiar información valorada, la cual permita la selección del mejor resultado. Como parte de este proceso dentro de los SIG se han considerado algunas herramientas que permiten la estandarización de la información bajo una misma escala, como:

- **La función logística de decrecimiento:** En un modelo de aptitud, la función logística de decrecimiento o decaimiento es ideal cuando los valores de entrada menores son los preferidos en el análisis, mientras estos van aumentando las preferencias decrecen. Es decir, que si los valores de entrada son mayores se convierten en menos preferidos (ESRI, 2014b).
- **La función logística de crecimiento:** La función logística de crecimiento se usa cuando los valores de entrada mayores son los preferidos en el análisis, mientras estos van disminuyendo las preferencias decrecen (ESRI, 2014b).

Este proceso se aplica a las coberturas rasterizadas, por ejemplo, el raster de distancia euclidiana a partir de la red vial, indicará que las zonas de menor distancia son las preferidas para en análisis, por lo tanto, se aplicará la función logística de decrecimiento y tendrán una mayor valoración dentro de la EMC. El comportamiento de estas dos funciones se observa en la siguiente Figura 2:

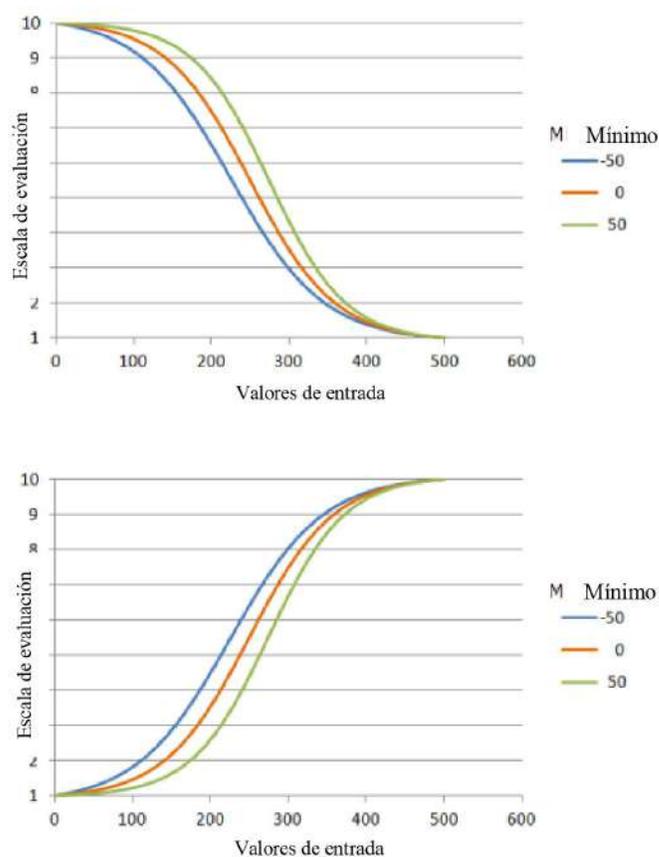


Figura 2: Función logística de decrecimiento (arriba) y crecimiento (abajo)
Fuente: (ESRI, 2014b)

2.4 MÉTODOS DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO (EMC)

Los métodos de evaluación multicriterio son instrumentos analíticos que se utilizan para encontrar la mejor solución en un conjunto de posibilidades, estos permiten integrar variables determinantes o de aptitud. Permiten resolver problemas ambientales, socioeconómicos, técnicos e institucionales. Los problemas evaluados con estos métodos generalmente se componen de cinco componentes: objetivos, las preferencias del decisor, alternativas, criterios y resultados (Kumar, Sah, Singh, Deng, He, Kumar, y Bansal, 2017). Mediante la EMC, se asigna un peso a cada criterio con la finalidad de darle una importancia al desempeño de la solución. Por lo tanto, el proceso de asignación de pesos se debe hacer con cuidado para evitar el sesgo o conseguir la respuesta inadecuada (Pacheco y Contreras, 2008).

Actualmente, se han desarrollado herramientas computacionales que apoyan a los procesos de planificación territorial y, en combinación con los métodos de EMC, se ha demostrado que se puede generar modelos óptimos que consideren la aptitud del espacio para desarrollar alguna actividad como: asignación del uso del suelo, localización de instalaciones, explotación de recursos naturales, desarrollo de actividades humanas, etc. (Rocha y Delgado, 2010).

En cuanto a la aplicación de estos métodos sobre las energías renovables, existen evidencias de algunos trabajos que los usan. Entre los trabajos identificados se destacan: Sánchez Lozano et al. (2013) que realizaron una evaluación multicriterio para la ubicación de granjas solares en el sureste de España. En el desarrollo de este trabajo, se puede observar que el procedimiento inicia con la recolección de factores y restricciones. Entre los factores consideraron uso de suelo, equipamiento y servicios, patrimonio cultural, sitios de interés comunitario, radiación solar, temperatura y pendiente. Las restricciones fueron las áreas de protección ambiental. Seguido a esta identificación, realizaron la ponderación mediante AHP y finalmente usaron el método multicriterio TOPSIS.

Asimismo, Watson y Hudson en 2015 evaluaron la aptitud de los parques eólicos y granjas solares (a escala regional) mediante la evaluación de criterios múltiples asistidos utilizando la combinación de los SIG y la EMC. En este caso usaron como factores la clasificación de tierras agrícolas, áreas históricas importantes, designación de paisajes, zonas residenciales, designación de vida silvestre, pendiente y radiación solar. Como restricción consideraron

áreas protegidas según la normativa legal que rige en la zona de estudio. Los factores y restricciones fueron ponderados mediante AHP y seguido usaron el método de superposición ponderada del Software ArcGis.

Por otro lado, Janke en 2010 geolocalizó sitios aptos para parques eólicos y solares en Colorado mediante las herramientas señaladas. Usando como factores: velocidad del viento a 50m de altura, radiación solar, zonas urbanas, usos del suelo, líneas de transmisión, población y red vial. Como restricciones consideró parques nacionales, monumentos nacionales y reservas de nativos americanos. Definidos los factores y restricciones, ponderó mediante AHP y seguido usó el método de superposición ponderada.

De igual manera, Tahri, Hakdaoui y Maanan en 2015 evaluaron la localización de granjas solares en Marruecos, usando como factores: uso del suelo, pendientes, áreas urbanas, radiación solar y temperatura ambiental. Mientras que las restricciones fueron tierras agrícolas, áreas urbanas, áreas protegidas, lagos y zonas destinadas a la construcción de infraestructura. Seguido usaron el método AHP para la ponderación de factores y aplicó el método de superposición ponderada.

Finalmente, Uyan en 2013 seleccionó sitios para el emplazamiento de granjas solares mediante los SIG utilizando el proceso de jerarquía analítica (AHP) para la ponderación de criterios en la región de Karapinar, Konya / Turquía, seguido del método de superposición ponderada. Como factores consideró las zonas urbanas, uso del suelo, vías, pendientes, líneas de transmisión y radiación solar. Las restricciones fueron sitios ambientales de protección, área de amortiguamiento de 500m a zonas urbanas y rurales, ríos, lagos, humedales y represas.

La diferencia que se nota en cada investigación radica en las características propias de los sitios de estudio por lo cual interfiere en el número de factores y restricciones utilizados. En sí, todos los trabajos mencionados se han desarrollado bajo el mismo procedimiento planteado en esta investigación.

Previo al uso de los métodos hay que considerar la ponderación de los criterios utilizados. Existen métodos cualitativos que permiten esta acción, los cuales estudian la relación entre variables y permiten una evaluación integral y holística. Tienen la propiedad de enriquecer y matizar la información cuantitativa. Aunque no poseen la objetividad propia de este.

Pueden adquirir la capacidad de cuantificación si se les asigna un valor para indicar mayor o menor grado del atributo en el objeto (Pacheco y Contreras, 2008). , Uno de los métodos que permite la valoración y ponderación de los criterios es el Proceso de Jerarquía Analítica (con sus siglas en inglés AHP).

2.4.1 Proceso analítico jerárquico (AHP)

A fines de los 70, Thomas L. Saaty desarrolló el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que es una metodología de análisis multicriterio que descompone en estructuras complejas a los criterios considerados en el análisis, ordenándolos según una estructura jerárquica. Cada criterio adopta un valor numérico para los juicios de preferencia y, finalmente los sintetiza para determinar qué variable tiene la más alta prioridad (Pacheco y Contreras, 2008). Esta metodología se destaca por sus tres principios: Construcción de las jerarquías, establecimiento de prioridades y consistencia lógica. Para esta investigación se consideró el criterio técnico de investigadores en el tema y la bibliografía científica disponible.

Considerando el análisis de varios criterios o factores n e independientes (A_1, A_2, \dots, A_n) que tienen sus propios pesos (w_1, w_2, \dots, w_n). El tomador de decisiones no conoce los valores de sus pesos $i= 1, 2, \dots, n$ pero es capaz de hacer una comparación de pares entre las diferentes alternativas. Además, se asume que los juicios cuantificados son proporcionados por el tomador de decisiones sobre pares de alternativas (A_i, A_j) que están representados en una matriz $n \times n$ como se indica:

$$A = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Los valores asignados a a_{ij} , se deben presentar según intervalos (Sánchez-Lozano et al., 2013). A pesar de que la metodología AHP permite la ponderación y análisis de alternativas, esta investigación se enfocará en los pasos mencionados para establecer los pesos de los criterios y la evaluación de las alternativas se las hará con los métodos multicriterios seleccionados.

2.4.2 Evaluación de la relación aditiva (ARAS)

En el método ARAS, el valor de la eficiencia relativa de los criterios factibles es directamente proporcional al efecto relativo de los valores y pesos de los principales criterios considerados en un análisis. Las calificaciones de preferencia de los criterios en este método reflejan las preferencias del decisor. Las fases de la Figura 3 son las que se consideran en el método ARAS (Zavadskas y Turskis, 2010):

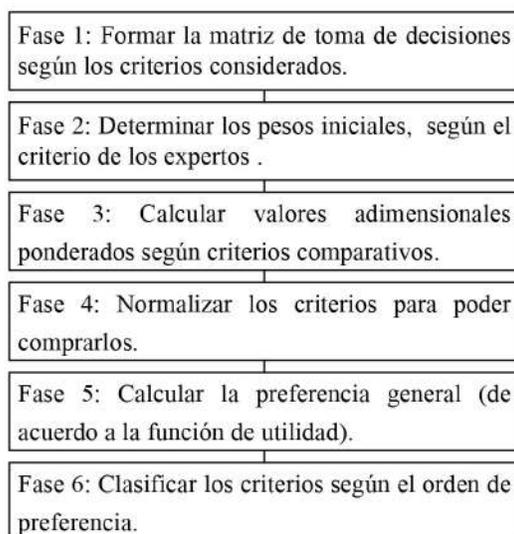


Figura 3: Fases para desarrollar el método ARAS

2.4.3 Calificación de competitividad operacional (OCRA)

El método OCRA es un método simple e intuitivo que permite incorporar las preferencias del decisor sobre la importancia relativa de los criterios considerados en el análisis. Las calificaciones de preferencia de las alternativas en este método reflejan las preferencias del decisor para los criterios. Las fases de la Figura 4 son las que se consideran en este método (Parkan, Lam, y Hang, 1997).

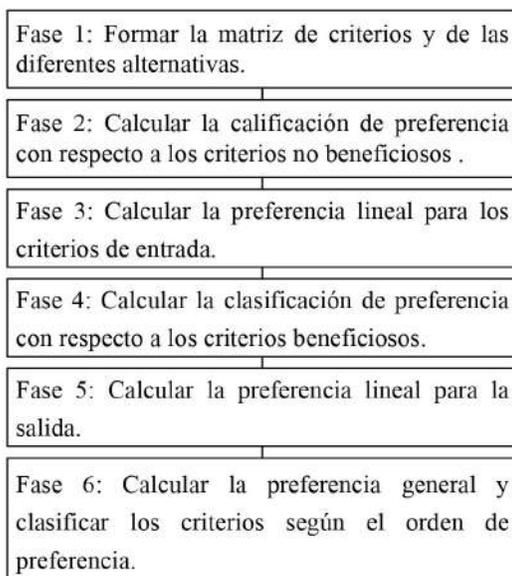


Figura 4: Fases para desarrollar el método OCRA

2.4.4 Índice de selección de preferencias (PSI)

El método PSI permite resolver problemas de decisión complejas bajo incertidumbre. A diferencia de la mayoría de los métodos multicriterio, el método PSI no requiere la determinación de la importancia relativa de los criterios, por lo que no es necesario determinar los pesos previamente de los criterios. Este método determina los pesos de los criterios sólo utilizando la información proporcionada en la matriz de decisión, es decir, utiliza el enfoque objetivo para determinar los pesos de los criterios como la desviación estándar o el método de entropía (Madić, Antuheviciene, Radovanović, y Petković, 2017). Las fases que se ejecutan en este método se muestran en la Figura 5:

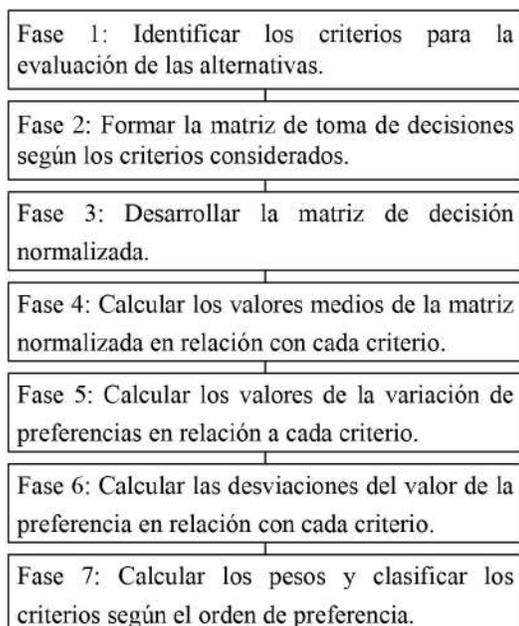


Figura 5: Fases para desarrollar el método PSI

2.4.5 Técnica simple de clasificación de multiatributos (SMART)

El método SMART se basa en un modelo aditivo lineal. Esto significa que un valor global de una alternativa dada se calcula como la suma total de la puntuación de rendimiento (valor) de cada criterio multiplicado por el peso de ese criterio. En SMART, esto es realizado matemáticamente por el tomador de decisiones por medio de una función de valor. La forma más simple y ampliamente utilizada de un método de función de valor es el modelo aditivo, que en los casos más simples puede aplicarse usando una escala lineal (por ejemplo, que va de 0 a 100). Las principales etapas del análisis son adaptado por Olson en 1996, Figura 6 (Barfod y Leleur, 2014):

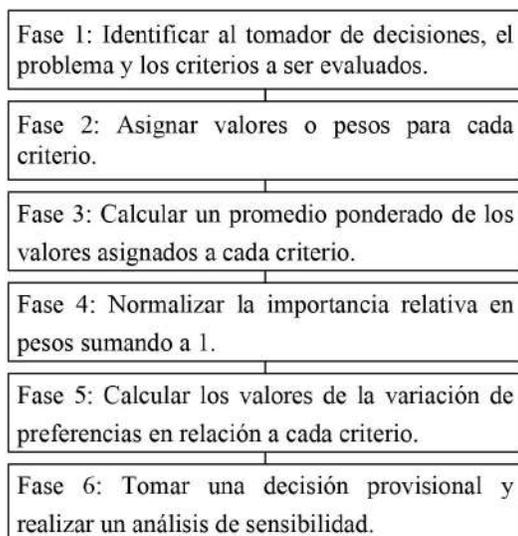


Figura 6: Fases para desarrollar el método SMART

2.4.6 Superposición Ponderada

El análisis de superposición ponderada incluye un grupo de metodologías aplicadas en la selección de sitios óptimos o en el modelado de adecuación. Este método implementado en el SIG permite la aplicación de una escala común de valores enteros en las diversas coberturas de entrada. Las coberturas de entrada son los criterios considerados para el análisis anteriormente descrito. El uso de este modelado dentro de las herramientas SIG permite generar un análisis integrado, el mismo que considera una buena distribución del peso para cada criterio que permite superponer cada cobertura para el análisis multicriterio (Argel, 2012)

2.4.7 Técnica para ordenar las preferencias por similitud para una solución ideal (TOPSIS)

TOPSIS es un método de criterios múltiples para identificar soluciones a partir de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta de la solución ideal positiva y la distancia más alejada de la solución ideal negativa (Jahanshahloo, Lotfi, y Izadikhah, 2006). Una solución ideal se define como una colección de puntuaciones o valores en todos los atributos considerados (Villacreses, Gaona, Martínez-Gómez, y Jijón, 2017). Las principales etapas del análisis TOPSIS se presentan en la Figura 7:

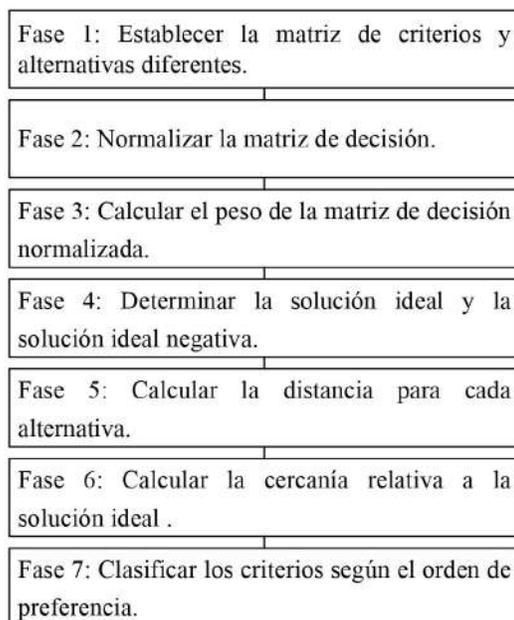


Figura 7: Fases para desarrollar el método TOPSIS

2.4.8 Método de evaluación multicriterio VIKOR

El método VIKOR fue desarrollado por Opricovic en 1998 para la optimización multicriterios de sistemas complejos. VIKOR se enfoca en ordenar y clasificar un conjunto de alternativas contra diversos criterios de decisión, posiblemente conflictivos y no conmensurables, suponiendo que el compromiso es aceptable para resolver conflictos. Similar a otros métodos de EMC como TOPSIS, VIKOR se basa en una función de agregación que representa la cercanía a la solución ideal, pero a diferencia de TOPSIS, introduce el índice de clasificación basado en la medida particular de cercanía a la solución ideal y este método utiliza la normalización lineal para eliminar Unidades de funciones de criterio (Shemshadi, Shirazi, Toreihi, y Tarokh, 2011). Las principales fases del análisis VIKOR son las siguientes, Figura 8:

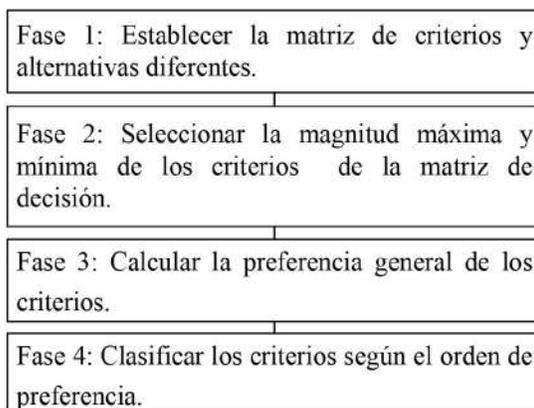


Figura 8: Fases para desarrollar el método VIKOR

2.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Estadísticamente existen varias técnicas que permiten comparar resultados. Para este caso de investigación se comparan coberturas raster, que son el resultado de la EMC. Con la comparación se las similitudes visuales y numéricas en los conjuntos de datos o píxeles analizados en el momento actual (Villacreses et al., 2017).

Las comparaciones numéricas usan procedimientos basados en modelos estadísticos y matemáticos para encontrar relaciones entre grandes conjuntos de datos. En este caso se considera el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson y un análisis de errores. La correlación es el método de análisis adecuado cuando se precisa conocer la posible relación entre dos variables de este tipo (Pértegas-Díaz y Pita-Fernández, 2002).

2.5.1 Coeficiente de Pearson

Los raster son considerados también como matrices. Por lo tanto, la comparación numérica implica conocer si los valores de uno de los resultados de la evaluación multicriterio tienden a ser mayores o menores a medida que aumentan o disminuyen los valores del otro resultado, o si tienen que ver entre sí. Así, el grado de asociación entre dos variables numéricas puede cuantificarse mediante el cálculo de un coeficiente de correlación. No obstante, el coeficiente de correlación no proporciona necesariamente una medida de la causalidad entre ambas variables sino tan sólo del grado de relación entre las mismas. La medida más habitualmente utilizada para el estudio de la correlación es el coeficiente de correlación lineal de Pearson (Pértegas-Díaz y Pita-Fernández, 2002).

El coeficiente de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables, y puede calcularse dividiendo la covarianza de ambas entre el producto de las desviaciones típicas de las dos variables. Viene dado por la siguiente expresión:

$$P_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2)$$

Donde:

x_i, y_i : Son los valores de los mapas o raster a ser evaluados,

P_{xy} : Es el Coeficiente de Correlación de Pearson y

n : Es el número de valores analizados.

Para medir la correlación entre variables se considera el valor de “r”, este coeficiente puede variar entre -1 y +1. De ser el valor positivo y mientras más se acerque a +1 se indica que existe una relación directa entre ambas variables, es decir, las dos aumentan al mismo tiempo. Si el valor es de +1 se indica una relación lineal perfecta entre las variables. De ser el valor negativo la relación es inversa, es decir, cuando una variable disminuye a medida que la otra aumenta. Finalmente, si el valor de “r” es de 0 se indica que no existe relación lineal entre las variables. Hay que considerar que un valor de cero no indica necesariamente que no exista correlación, ya que las variables pueden presentar una relación no lineal (Pértegas-Díaz y Pita-Fernández, 2002).

2.5.2 Análisis de errores

Los errores son inevitables en cualquier análisis. Entonces tan importante es el valor medido como dar una estimación del error cometido en su obtención. Existen algunas formas para calcular el error de un conjunto de datos, en este caso se plantea el cálculo del error absoluto sobre los raster obtenidos mediante las técnicas de evaluación multicriterio, los mismos que se los puede leer como matrices. Así, se parte de los raster obtenidos mediante la EMC. Un raster es un conjunto de celdas o píxeles y se los puede leer como una matriz de la siguiente manera,

$$Raster = A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{i1} & \dots & a_{ij} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde:

$\{i, j\} \in [\text{l\u00edmites en } x, y \text{ del raster}]$

A_{ij} : Es el tensor que contiene todos los valores resultantes del an\u00e1lisis multicriterio.

A partir del conjunto de raster se calcula el promedio (P_{ij}) de los mismos:

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^N \frac{A_{ij}^k}{N} \quad \forall i, j \in \mathbb{Z} \quad (4)$$

Donde, k es el m\u00e9todo multicriterio utilizado, el cual es operado pixel por pixel para obtener el tensor medio. Posteriormente se calcula el error absoluto en la Ecuaci\u00f3n (5), utilizando el tensor medio definido en la Ecuaci\u00f3n (4).

$$E_{ij}^{(k)} = |P_{ij} - A_{ij}^{(k)}| \quad (5)$$

Para poder realizar una comparaci\u00f3n por m\u00e9todo, se define un valor medio para todos los errores absolutos estimados por la Ecuaci\u00f3n (5), el mismo que es calculado en la ecuaci\u00f3n (6).

$$E^{(k)} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \frac{E_{ij}^{(k)}}{N_i N_j} \quad (6)$$

As\u00ed se calcula el error para cada m\u00e9todo:

$$E^{(k)} = \frac{1}{N_i N_j} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} E_{ij}^{(k)} \quad \Rightarrow E_{ij} < 200 \quad (7)$$

Donde:

N_i : Filas del raster

N_j : Columnas del raster

La escala de valoraci\u00f3n de cada mapa resultante se encuentra entre 0 y 100. El valor de 200 es una cota definida para operar solo con valores posibles en la cobertura, dado que el valor m\u00e1s alto en el an\u00e1lisis es 100 con lo que el error absoluto m\u00e1ximo que se puede obtener es el mismo. Los valores que se encuentran fuera de la m\u00e1scara fueron definidos como n\u00fameros negativos, los mismos que no entran en el an\u00e1lisis de errores.

3. METODOLOGÍA

Ecuador, en los últimos años ha trabajado en políticas que respaldan el desarrollo de las energías limpias. Gracias a la posición geográfica del país, se percibe una pequeña variación en la duración de las horas de sol; por lo tanto, el recurso solar podría proveer una parte importante de la energía que se requiere para desarrollar las actividades de la población.

La metodología para obtener la geolocalización de sitios adecuados para el emplazamiento de granjas solares en la región andina del Ecuador se basa en la evaluación multicriterio (EMC), la misma que se fundamenta en procesos decisorios que requieren de la aplicación de métodos de comparación y ponderación de factores o criterios, permitiendo que las decisiones sean plenamente consistentes a la realidad del área de estudio.

El procedimiento inicia con el levantamiento de información espacial, esta debe ser clasificada según el caso como factores o restricciones. Para definir los factores y restricciones necesarios se toma en cuenta los documentos científicos y las experiencias identificadas en los trabajos de los siguientes autores: Sánchez Lozano et al. (2013), Janke (2010), Tahri et al. (2015) y Uyan (2013), que realizaron trabajos sobre la selección de sitios con potencial renovable en diferentes lugares del mundo. Por lo tanto, se clasifica esta información y se define sus características como escalas, resoluciones, etc. Seguido, se prepara la información para su análisis, lo cual conlleva transformar la información a formato raster y a la vez su estandarización, como parte de estos dos procesos se utiliza las herramientas de geoprocésamiento de los SIG seleccionados. Finalmente se procede con la EMC, que inicia con la ponderación de los criterios mediante el método AHP, el cual permite la evaluación de diferentes factores y su jerarquización. Además, el método AHP permite evaluar factores cuantitativos y cualitativos, convirtiéndose en una herramienta flexible para la toma de decisiones. Además, AHP es una de las técnicas de ponderación más populares que, debido al uso de una comparación de variables por pares, se convierte en un método robusto para calcular la importancia relativa de cada variable o factor con respecto al resultado final, por lo cual ha sido considerado como uno de los métodos para desarrollar esta investigación.

Definidos los pesos, se procede a aplicar los métodos multicriterio señalados en el marco teórico. Con estos resultados se realiza una comparación visual y estadística mediante el análisis de coeficiente de Pearson y un análisis de errores absolutos. Mediante este análisis se determina el mejor resultado para la selección de sitios. La metodología planteada se presenta en el siguiente diagrama de flujo donde se divide la metodología en tres fases, ver Figura 9:

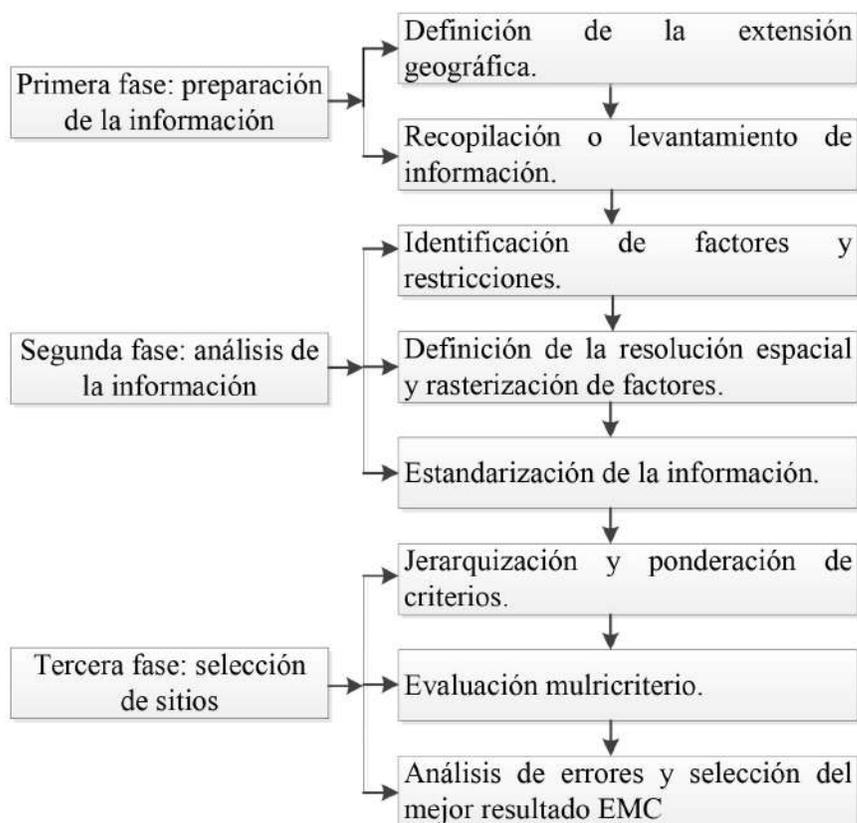


Figura 9: Diagrama de flujo de la metodología

3.1 PRIMERA FASE: PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

3.1.1 Definición de la extensión geográfica para el análisis.

El territorio continental del Ecuador se encuentra dividido en tres regiones (Costa, Sierra y Oriente). Cada una de las regiones tiene sus propias características físicas, ambientales y sociales. Para el desarrollo de la presente investigación se seleccionó la región Sierra, que está conformada por la Cordillera de los Andes, posee un clima frío a causa de sus pisos altitudinales y en algunas zonas se observa la presencia de valles, donde se da lugar a

microclimas (Gallardo, Palme, Beltrán, Lobato, y Villacreses, 2016). Muchas de las poblaciones de esta región se encuentran desprovistas de energía, sea porque están alejadas del SNI o por la falta de infraestructura eléctrica cercana. Lo que ha generado que se conviertan en poblaciones aisladas y sin acceso a algunos servicios básicos (CONELEC, 2013). Con el desarrollo de esta investigación se podrá definir los sitios adecuados para la instalación de granjas solares fotovoltaicas que permitan brindar el servicio eléctrico a estas poblaciones o que a su vez puedan suministrar energía al SNI.

La región Sierra del Ecuador que abarca una superficie de 70 mil kilómetros cuadrados, que es aproximadamente un tercio del territorio continental del país, ver Figura 10. La región Sierra o tierras altas andinas tienen dos estaciones, una estación fría lluviosa y una estación seca templada (Gallardo et al., 2016). Además, en esta región debido a la presencia de la Cordillera de los Andes se recibe alta radiación solar global comparada con las regiones más bajas del país.

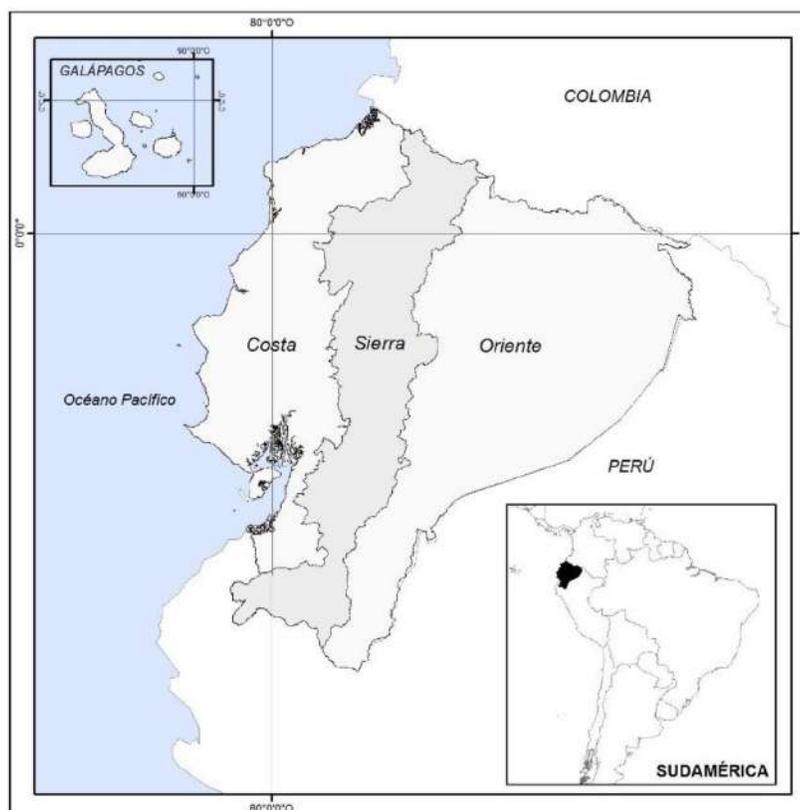


Figura 10: Mapa de ubicación del estudio

En cuanto a la producción de energía fotovoltaica neta (energía final que queda útil o disponible para la sociedad o para su consumo) en el 2016, la Agencia de Regulación y

Control de Electricidad (ARCONEL), reportó que a nivel nacional se genera 35.591 GW/h anuales, conectados al Sistema Nacional Interconectado. Para la región Sierra se registra que la producción es de 21.172 GW/h al año, estas centrales se ubican en las provincias de Imbabura, Pichincha, Cotopaxi y Loja. Las empresas generadoras son privadas y su producción anual se detalla en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Producción de energía neta por generadora (ARCONEL, 2017)

Provincia	Cantón	Parroquia	Empresa	Central	(GW/h año)
Imbabura	Pimampiro	Pimampiro	Valsolar	Paragachi	1.494
Imbabura	Ibarra	Salinas	Gransolar	Tren Salinas	1.976
Imbabura	Ibarra	Salinas	Gransolar	Salinas	3.953
Pichincha	Pedro Moncayo	La Esperanza	Electrisol	Paneles Electrisol	1.564
Cotopaxi	Latacunga	S.J. Pastocalle	Ep fotovoltaica	Pastocalle	1.52
Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	Ep fotovoltaica	Mulalo	1.518
Loja	Gonzanamá	Purunuma	Gonzanergy	Gonzanergy	1.707
Loja	Catamayo	S.P. La Bendita	Lojaenergy	Lojaenergy	1.566
Loja	Catamayo	El Tambo	Surenergy	Surenergy	1.465
Loja	Catamayo	El Tambo	Renova Loja	Renovaloja	1.38
Loja	Macará	Sabiango	Sabiangosolar	Sabiango Solar	1.319
Loja	Gonzanamá	Purunuma	San Pedro	San Pedro	1.71
TOTAL =					21.172

3.1.2 Recopilación o levantamiento de información

Definida la extensión del análisis se procede con la recopilación de la información. Para ello se identifica las instituciones involucradas en el sector energético dentro del país, así como las entidades generadoras de información cartográfica base. Entre las instituciones productoras de información dentro del sector energético están: Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) y el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER). Como instituciones generadoras de información cartográfica base se identificaron: Instituto Geográfico Militar (IGM), Ministerio de Transporte y Obra Pública (MTO), Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), Ministerio del Ambiente (MAE), Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) y el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI).

Como siguiente paso se define que los formatos de la información receptada sean vector o raster. Además, la información debe ser actual y de una escala que cubra el territorio analizado, si la mayoría de coberturas tienen una escala de menor detalle (escalas grandes) toda la información deberá mantenerse o asemejarse; con la finalidad de poder estandarizar

los datos más adelante. La siguiente Tabla 2 detalla la información recolectada por institución, año de generación, escala y tipo.

Tabla 2: Información recopilada por institución

Cobertura de información	Institución	Año	Escala	Tipo
Modelo digital de elevación	MEER	2013	200 x 200 m	Raster
Velocidad del viento	MEER	2013	200 x 200 m	Raster
Radiación global promedio anual	ARCONEL	2008	1000 x 1000 m	Raster
Subestaciones	ARCONEL	2015	50,000	Vector
Líneas de transmisión	ARCONEL	2015	50,000	Vector
Temperatura media anual	INER/INAMHI	2015	200 x 200 m	Raster
Red Vial	MTOP	2015	50,000	Vector
Cobertura vegetal y uso de la tierra	MAGAP	2013	100,000	Vector
Zonas urbanas	IGM	2013	50,000	Vector
Cuerpos de agua	IGM	2013	50,000	Vector
Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP)	MAE	2015	250,000	Vector
Límites de las regiones Costa y Oriente	INEC	2013	250,000	Vector

Mientras más criterios se consideren en la EMC más se restringe el resultado, por ende, las áreas seleccionadas serán más pequeñas. De este modo, se recopilaron doce coberturas, entre ellas cuatro raster y ocho vectores. Los años de generación varían entre el 2008 y 2015. En su mayoría las coberturas se encuentran en una escala 1:50,000 y los metadatos de la información indican lo siguiente:

- **Modelo digital de elevación:** En el 2013, el MEER publica el Atlas Eólico del Ecuador, como parte de sus entregables se registra el raster del modelo digital de elevación para todo el país con una resolución de 200 x 200m, este producto fue necesario para el cálculo de rugosidad del terreno y el análisis de potencial eólico, ver Figura 11 (MEER, 2013a).

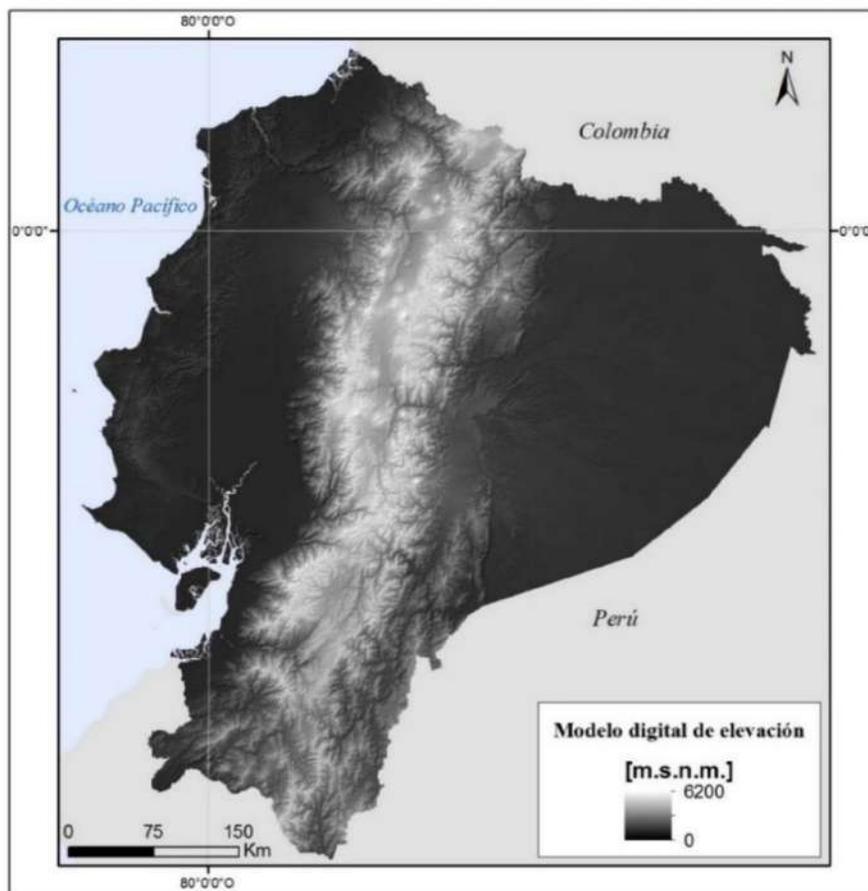


Figura 11: Modelo digital de elevación del Ecuador

- **Velocidad del viento:** En el 2013, el MEER publica el Atlas Eólico del Ecuador con fines de generación eléctrica, los mapas generados se obtuvieron mediante la simulación de las condiciones atmosféricas de 366 días seleccionados de un periodo de 15 años, estos mapas permiten obtener directamente la velocidad del viento en cualquier punto del territorio. Los días se eligen a través de un esquema aleatorio estratificado para que cada uno de los meses y estaciones del año estén igualmente representados en la muestra. Sólo el año es elegido de manera completamente aleatoria. Cada simulación genera la variable de velocidad del viento y otras variables meteorológicas (como pueden ser la temperatura, la presión, la humedad, la energía cinética turbulenta o el flujo de calor). Como parte de los entregables de este Atlas, es el raster de velocidad del viento a 30m, 50m y a 80m de altura, con una resolución de 200 x 200 m, ver Figura 12 (MEER, 2013a).

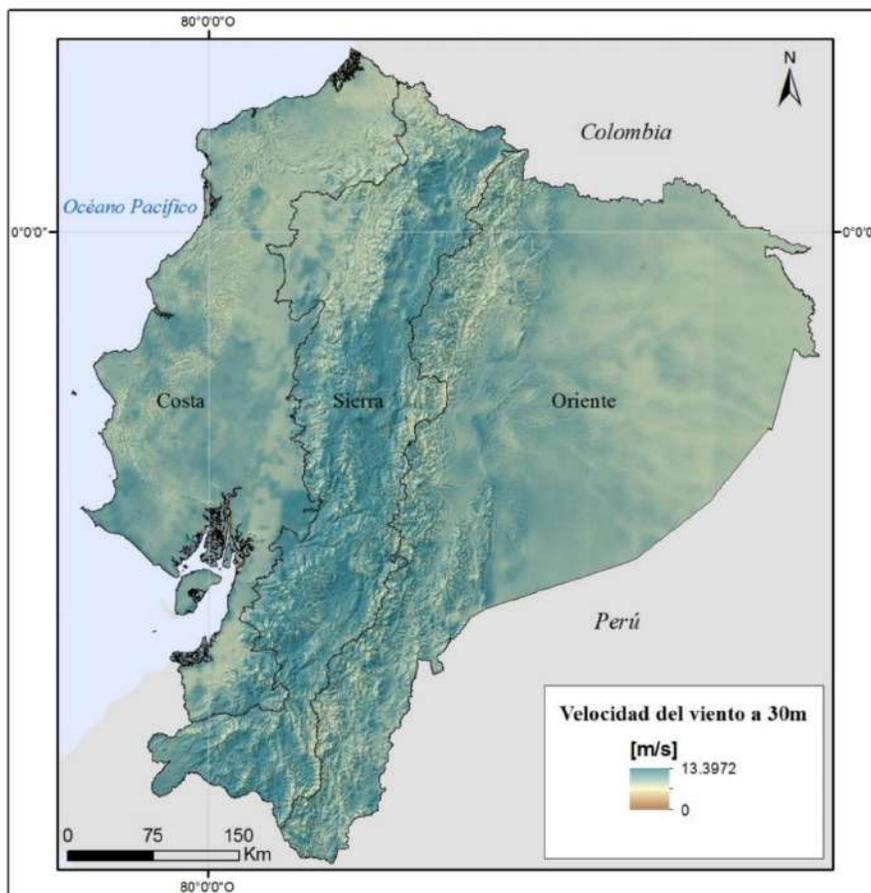


Figura 12: Velocidad del viento a 5m

- **Radiación global promedio anual:** En el 2008, ARCONEL publica el Atlas Solar del Ecuador donde se modeliza el recurso y su distribución en el territorio, el raster maneja una resolución espacial de 1000 x 1000m. Este producto es el resultado de la integración de mapas digitales, utilizando recursos de geoprocamiento, cálculo de desempeño y producción de energía eléctrica, ver Figura 13 (CONELEC, 2008).

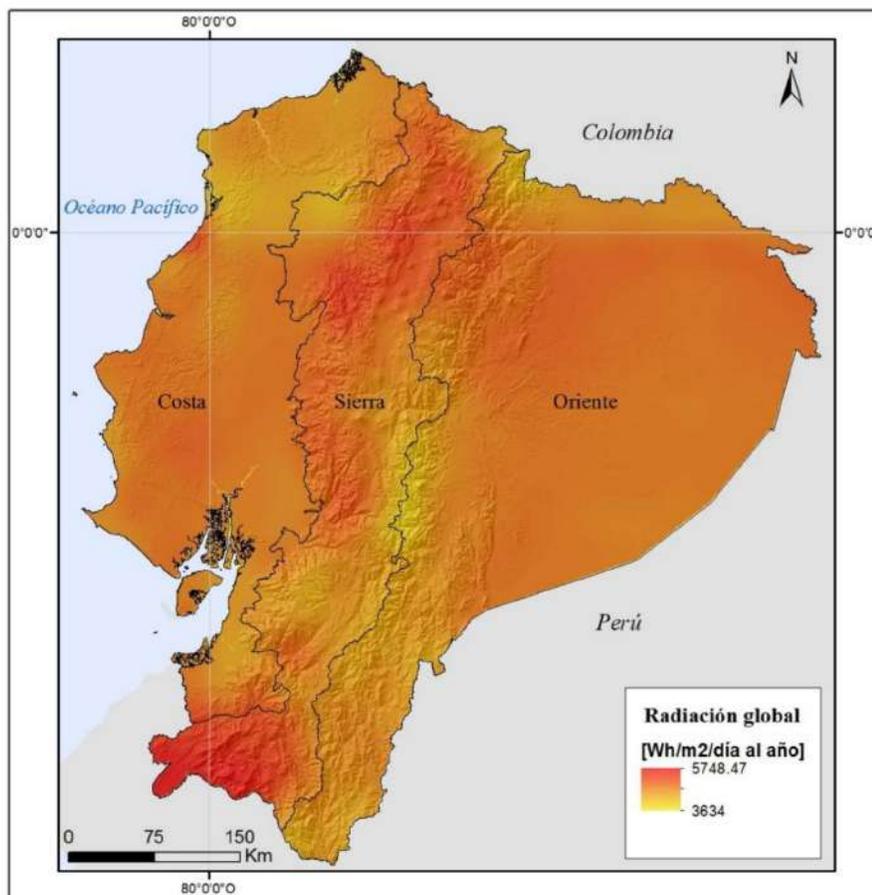


Figura 13: Radiación global promedio anual

- **Subestaciones:** Es un conjunto de equipos que tienen como función transmitir, distribuir, transformar y reducir el voltaje de energía para utilizarla en la distribución primaria o la interconexión entre subestaciones que tengan un nivel más bajo de voltaje. Las subestaciones se clasifican en distribuidoras y de seccionamiento, las primeras son las que hacen el cambio de voltaje a niveles inferiores para la subtransmisión y distribución de energía. Mientras, que las segundas son elementos del sistema eléctrico que permiten la maniobra o interconexión con otras partes del sistema. Esta información fue emitida en el 2015 en formato vector a una escala de 1:50,000 por ARCONEL, ver Figura 14 (MICSE, MEER y ARCONEL, 2016).

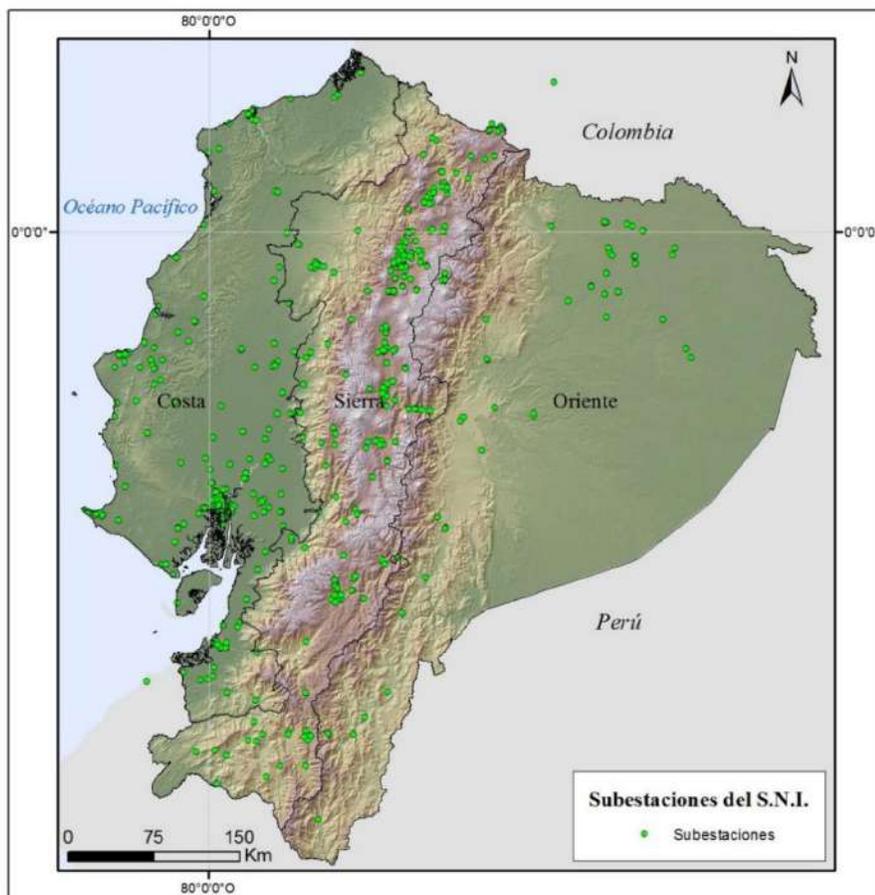


Figura 14: Subestaciones del Sistema Nacional Interconectado

- **Líneas de transmisión:** Son las líneas que forman parte del Sistema Nacional Interconectado, consiste en un conjunto de circuitos formados por estructuras, conductores y accesorios que se extiende entre dos subestaciones adyacentes. Esta información fue receptada en el 2015 en formato vector a una escala de 1:50,000, ver Figura 15 (MICSE et al., 2016).

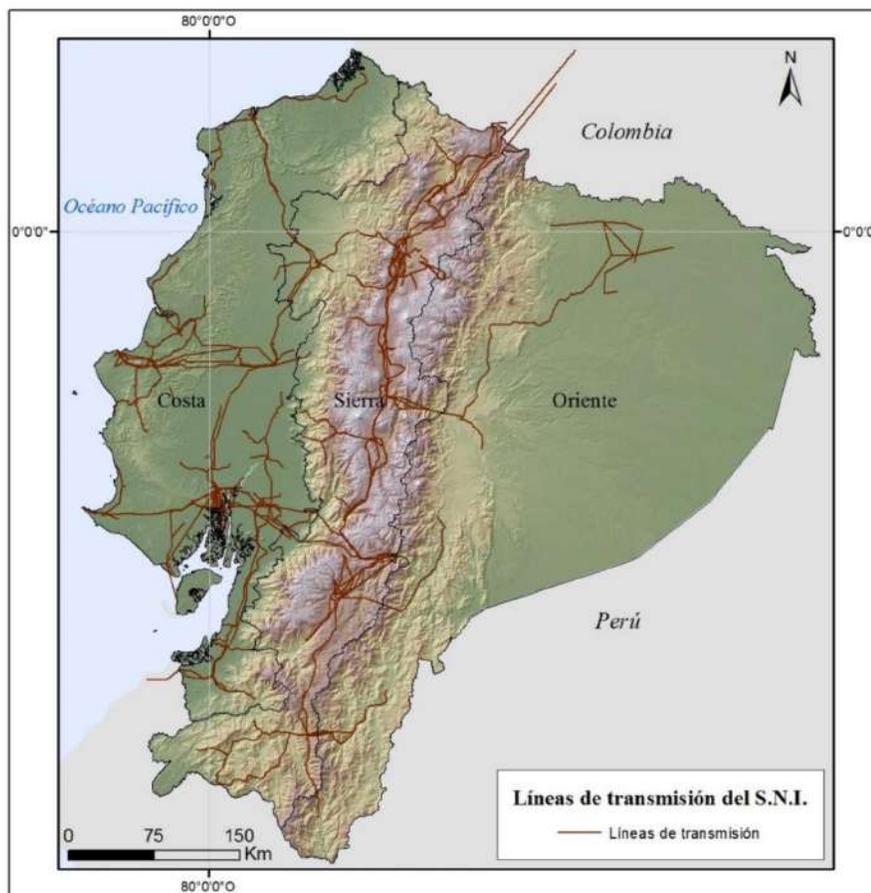


Figura 15: Líneas de transmisión del Sistema Nacional Interconectado

- **Temperatura media anual:** Para la obtención de este producto se recolectó la información meteorológica de 114 estaciones del INAMHI a nivel nacional, con la finalidad de calcular los gradientes térmicos y transformarlos a datos de altura según la referencia, seguido se interpoló y restableció la distribución altitudinal en el territorio. Esta información fue emitida en el 2015 en formato vector a una escala de 1:50,000 por el INER, ver Figura 16 (Guevara, 2015).

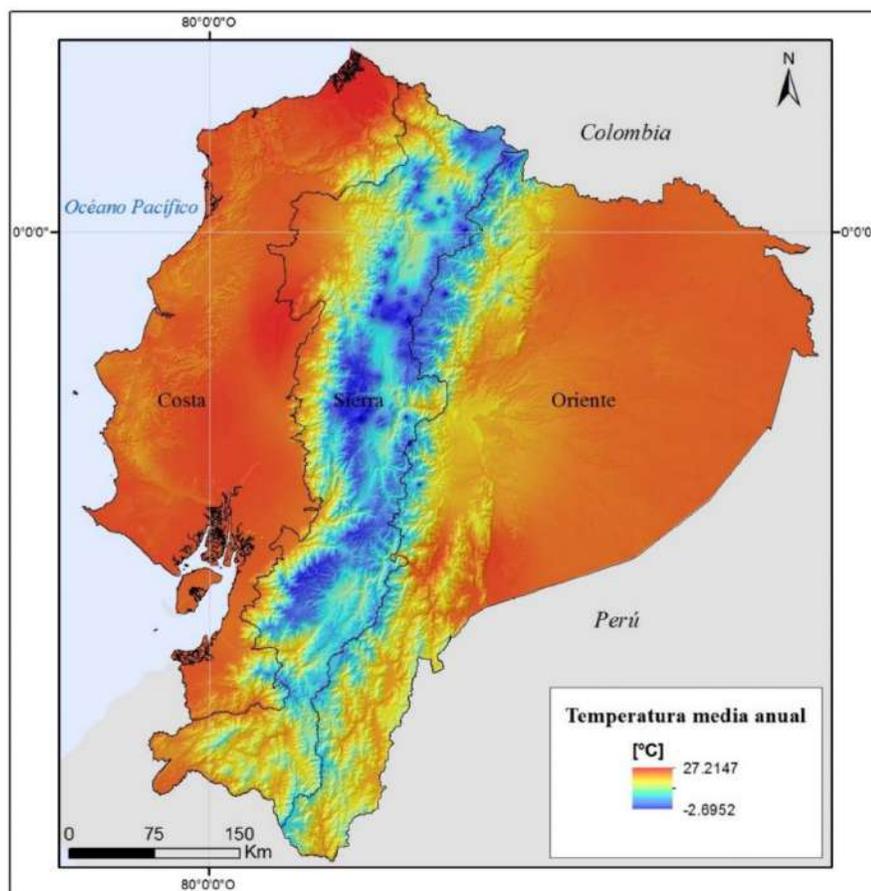


Figura 16: Temperatura media anual

- **Red vial:** Es el sistema de transporte a nivel nacional que permite la comunicación del territorio; esta cobertura representa las vías principales o de primer orden que están cerca de las zonas urbanas o zonas consolidadas (IGM, 2014). Esta cobertura fue solicitada al Ministerio de Transporte y Obras Públicas, su última actualización se realizó en el año 2015, bajo el formato vector a una escala de 1:50,000, ver Figura 17.

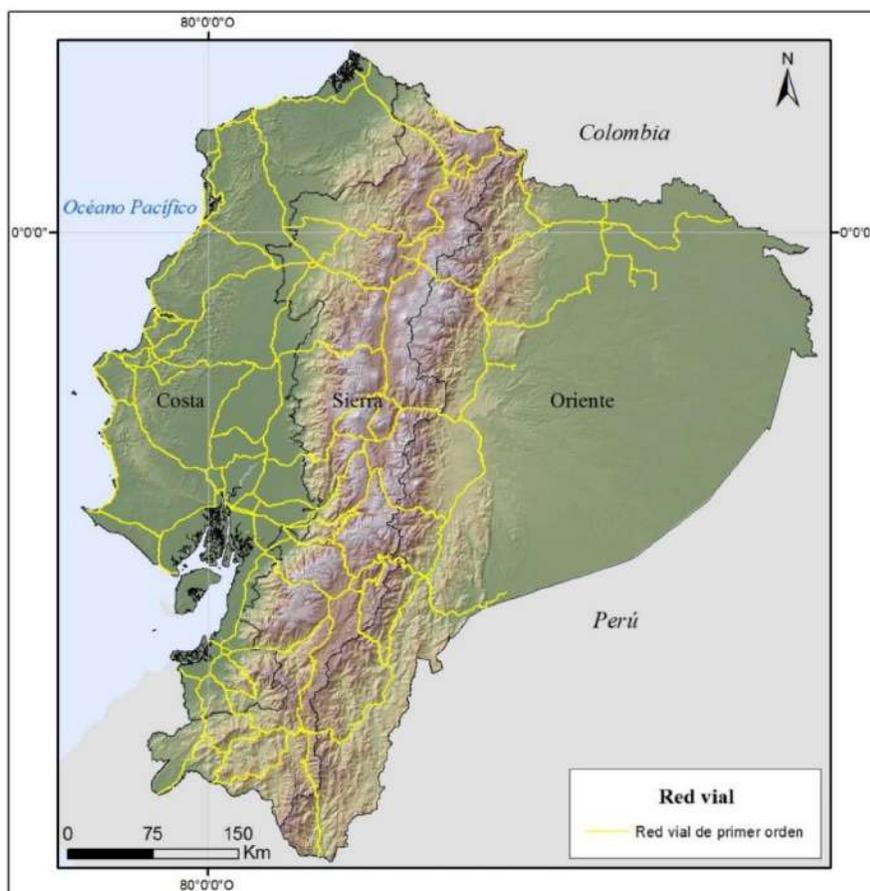


Figura 17: Red vial de primer orden

- **Cobertura vegetal y uso de la tierra:** En el 2014, mediante el proyecto “Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental”, se publicó la cobertura en mención a escala 1:100,000 con el objetivo de dar a conocer la distribución de la cobertura vegetal y el uso de la tierra en el territorio ecuatoriano, además de brindar una herramienta para establecer procesos de monitoreo ambiental y contribuir con el mejoramiento de la productividad en el sector agropecuario. Esta cobertura se clasifica en tres niveles de detalle: el primer nivel es una clasificación de la cobertura vegetal y uso según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático a nivel mundial; el segundo nivel es la caracterización del primer nivel a detalle y finalmente el tercer nivel contiene las especies vegetales que corresponden a los anteriores niveles (MAE y MAGAP, 2014). Para el presente estudio se consideró los registros del segundo nivel y se los clasificó según la importancia para el proceso de evaluación, ver Figura 18.

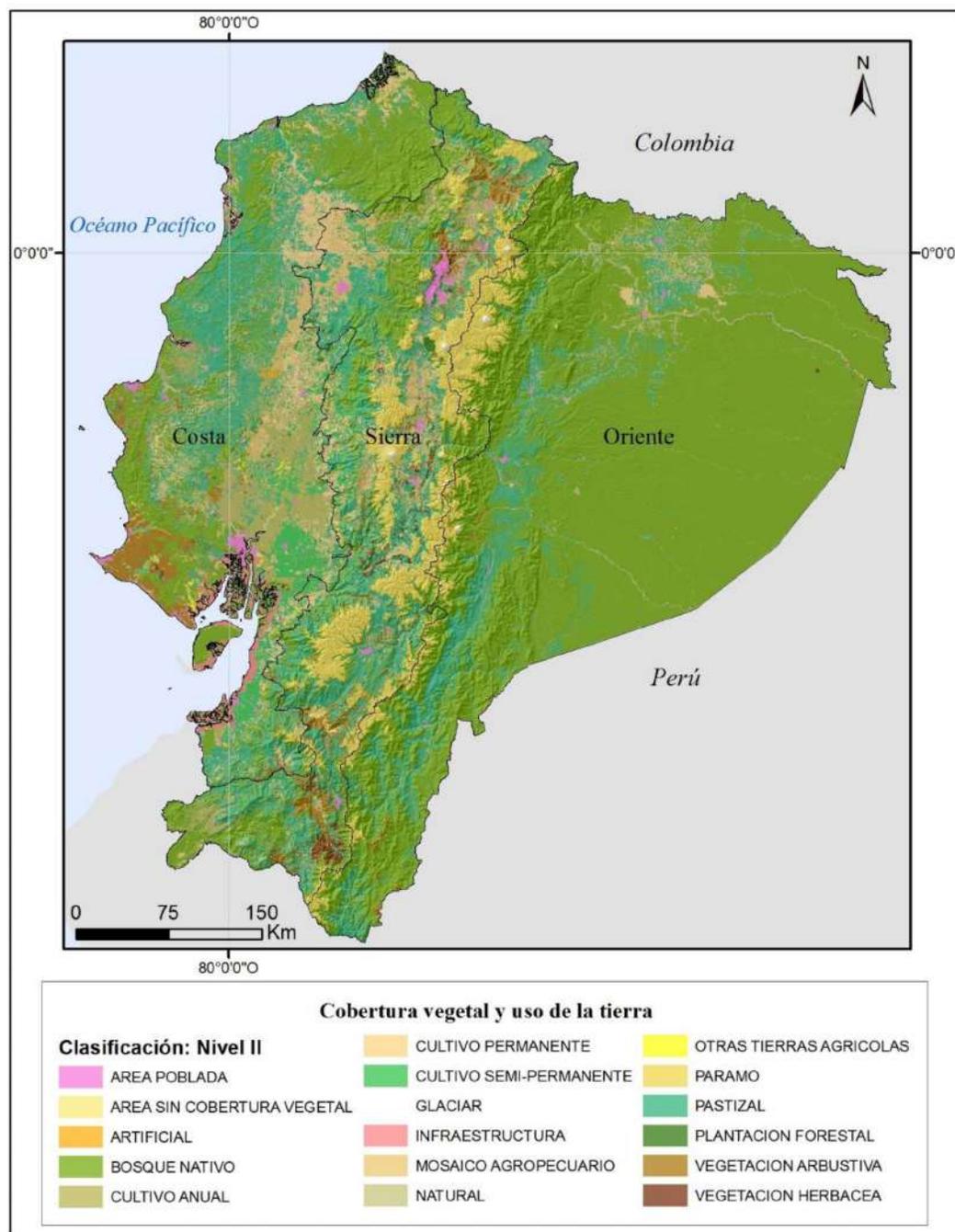


Figura 18: Cobertura vegetal y uso de la tierra

- **Zonas urbanas:** En el 2013, el Instituto Geográfico Militar libera la información cartográfica base a nivel nacional. Entre esta información se encuentra la delimitación de zonas urbanas que es el área que contiene una concentración de casas y otras estructuras, según el Catálogo de Objetos Cartográficos. Esta cobertura está disponible

en la web en formato vector a una escala 1:50,000, mediante en el siguiente link de descarga: <http://www.geoportalmgm.gob.ec>, ver Figura 19 (IGM, 2014).

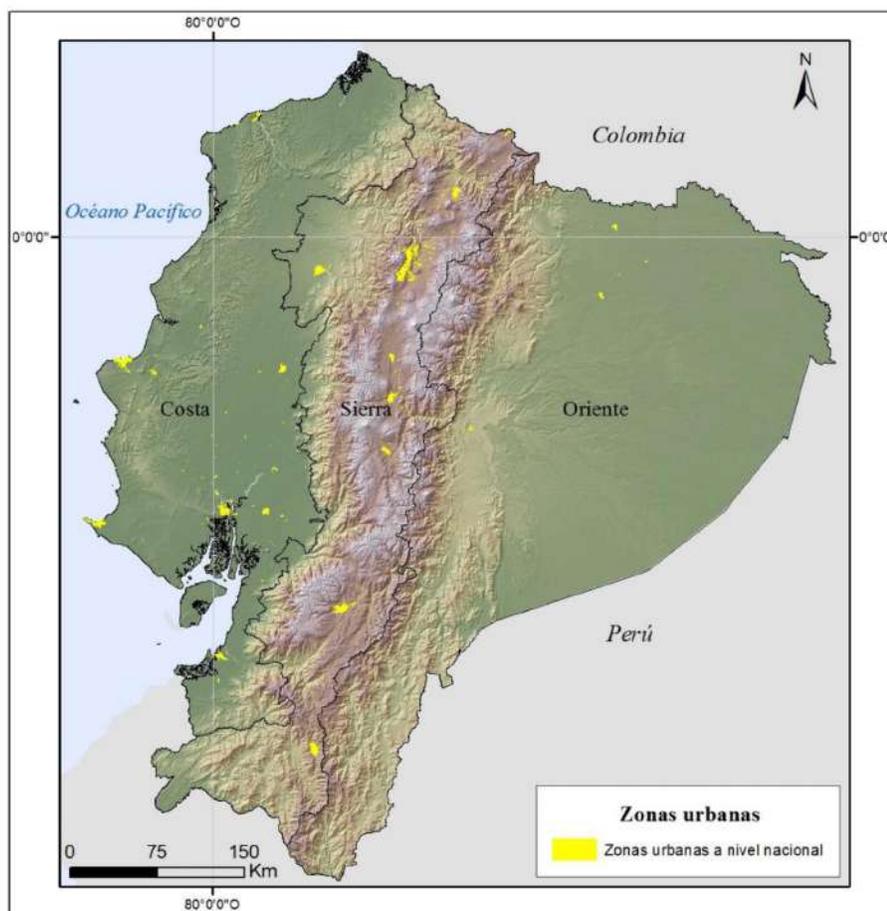


Figura 19: Zonas urbanas a nivel nacional

- **Cuerpos de agua:** Son corrientes naturales de agua, más o menos continúa, que desemboca en el mar, en un lago/ laguna (cuerpo de agua rodeado por tierra) o en otro río, según el Catálogo de Objetos Cartográficos. De igual forma que las zonas urbanas, estas coberturas se encuentran liberadas desde el 2013 en el geoportal del IGM, en el siguiente link: <http://www.geoportalmgm.gob.ec>, en formato vector y a una escala 1:50,000, ver Figura 20 (IGM, 2014).

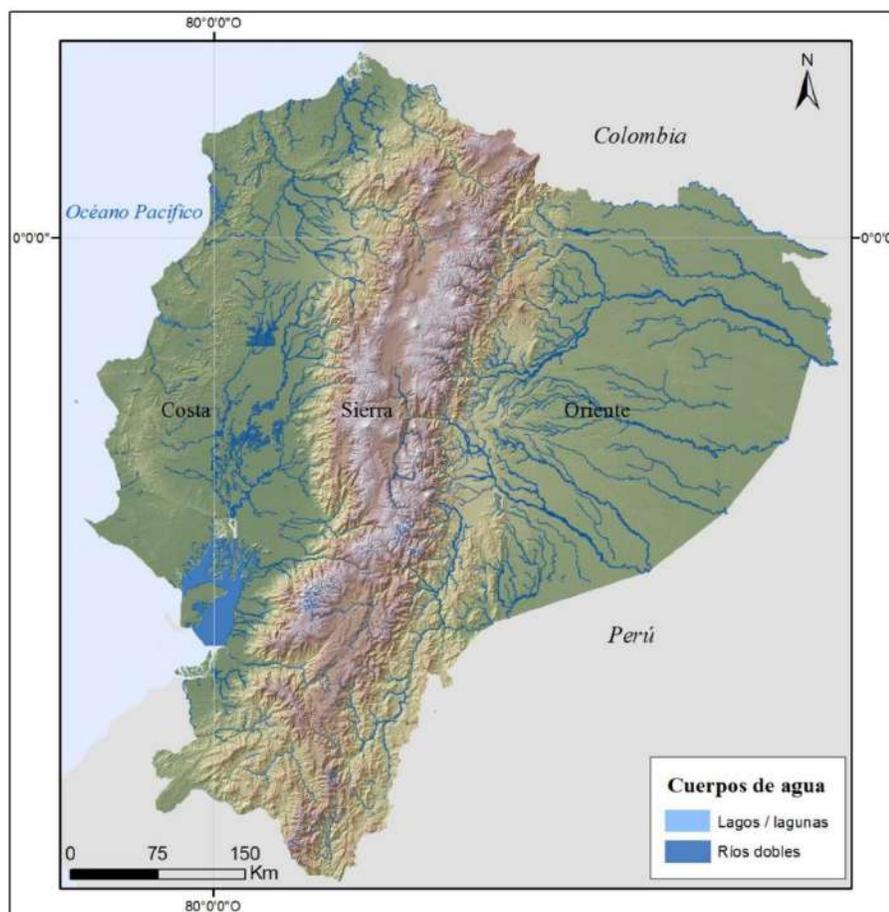


Figura 20: Cuerpos de agua

- **Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador:** “Es el conjunto de áreas naturales protegidas que garantizan la cobertura y conectividad de ecosistemas importantes en los niveles terrestre, marino y costero marino, de sus recursos culturales y de las principales fuentes hídricas” (MAE, 2006, p. 3). Esta cobertura fue solicitada al Ministerio del Ambiente y su última actualización fue en el 2015, el formato de la información es vector a una escala de 1:250,000, ver Figura 21.

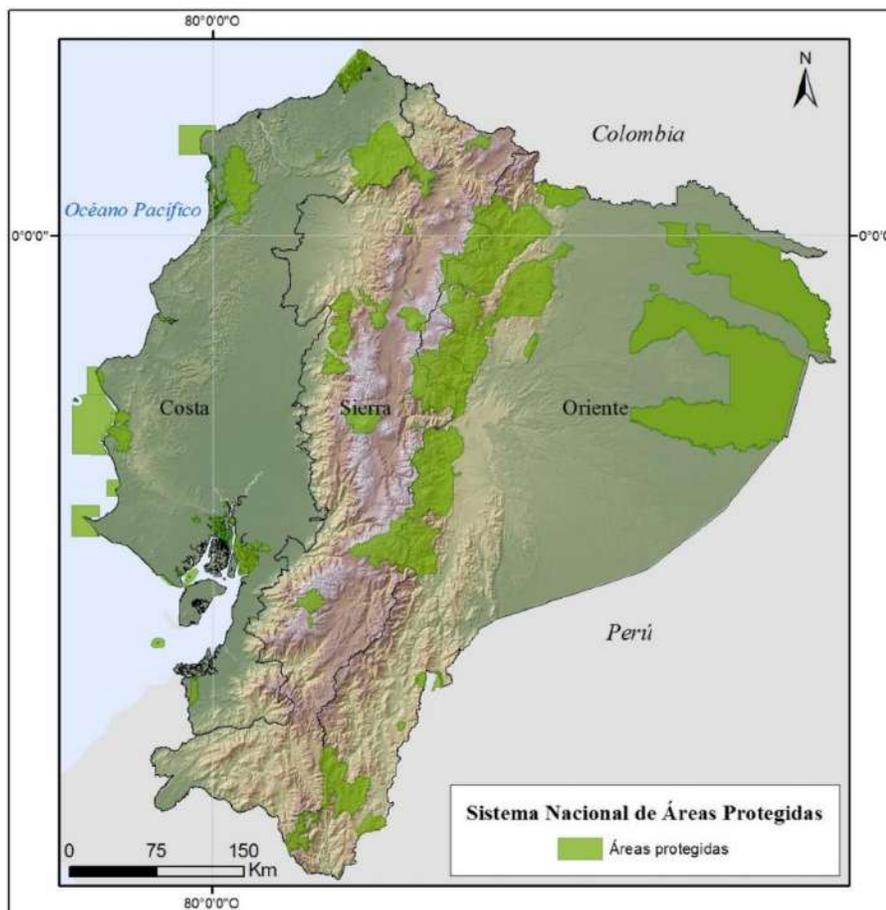


Figura 21: Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado

- **Límites de las regiones Costa y Oriente:** Las regiones del Ecuador se las conoce también como macro-zonas, por sus características orográficas y climáticas. Las cuales están influenciadas por la Cordillera de los Andes así como por las corrientes provenientes del Océano Pacífico (Gallardo et al., 2016). Esta cobertura fue facilitada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censo, quien para el levantamiento de información censal usa la división política del país y la división regional. Esta información está a una escala 1:25,0000, en formato vector y actualizado en el año 2013, ver Figura 22.

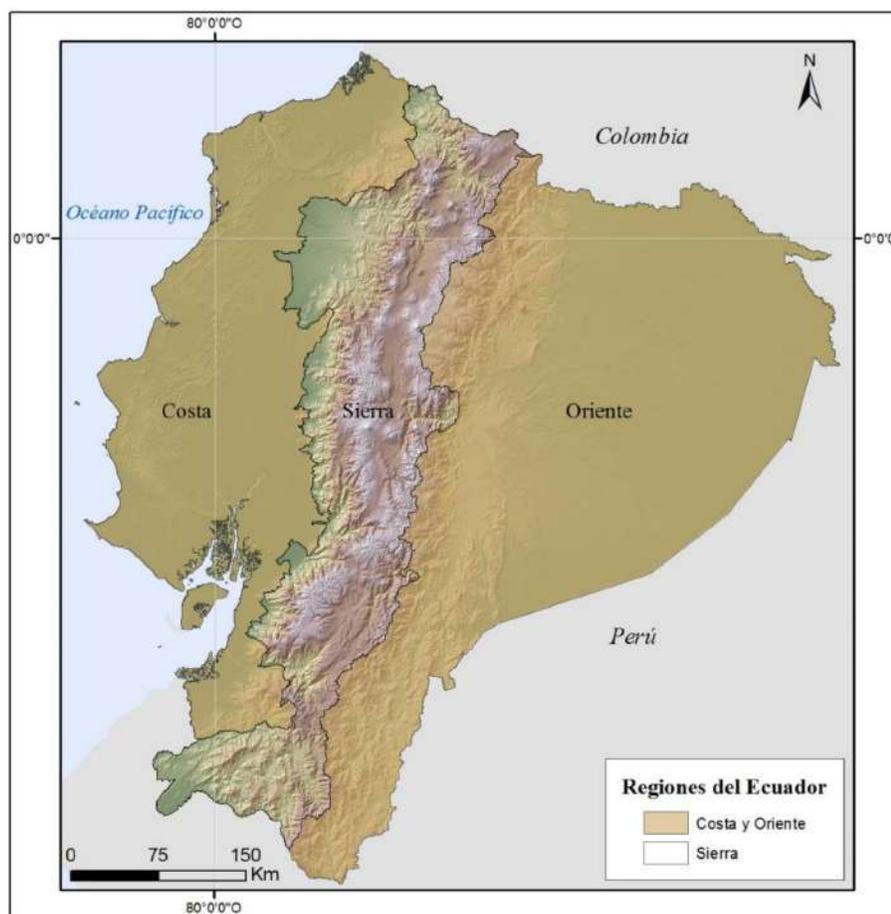


Figura 22: Regiones del Ecuador

3.2 SEGUNDA FASE: ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

3.2.1 Identificación de factores y restricciones

Una vez preparada la información se determinó que coberturas serán consideradas como factores y restricciones. Los factores se basan en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto o no apto) sobre la actividad u objeto de decisión, los cuales deben ser inventariados y clasificados previamente (Panagiotidou et al., 2016). Por otro lado, las restricciones son aquellas coberturas que, de manera irrevocable, indican en donde no se puede intervenir o hacer uso del territorio para este tipo de emplazamientos, en muchos casos las restricciones se dan por la normativa legal existente en cada país o por consideraciones de protección ambiental (Sánchez-Lozano et al., 2013). Tanto los factores como restricciones se manejan con diferentes tratamientos de datos, estos procesos se dan a conocer en la segunda fase de la metodología. La Tabla 3

muestra en resumen la información seleccionada y el tipo de criterio considerado para la evaluación:

Tabla 3: Identificación de factores y restricciones

Cobertura de información	Tipo de criterio
Modelo digital de elevación	Factor
Velocidad del viento	Factor
Radiación global promedio anual	Factor
Subestaciones	Factor
Líneas de transmisión	Factor
Temperatura media anual	Factor
Red Vial	Factor
Cobertura vegetal y uso de la tierra	Factor
Zonas urbanas	Factor / Restricción
Cuerpos de agua	Restricción
Sistema Nacional de Áreas Protegidas	Restricción
Límites de las regiones Costa y Oriente	Restricción

3.2.2 Definición de la resolución espacial y rasterización de factores

Todo objeto que ocupe un lugar en el espacio puede ser representado en un mapa como punto, línea y polígono, así también como raster el cual se conforma por píxeles. Estos elementos permiten comprender el comportamiento del territorio y su interacción en el tiempo.

Para definir el tipo de formato, se analizaron varias ventajas y desventajas entre las coberturas de vectores y las coberturas raster. Como, por ejemplo: los vectores no permiten un análisis del espacio de forma continua ya que estos delimitan el territorio, por lo tanto, se puede perder características en el transcurso de los procesos. Por otro lado, el raster permite este análisis de forma continua porque designa valores en cada pixel y no delimita el espacio. Además, para los geoprocесamientos como superposición se obtienen mejores resultados con los raster ya que su cálculo se realiza celda a celda, mientras que los vectores permiten la acción, pero pueden omitir información por los límites marcados que los caracteriza.

De este modo, al hacer una inspección visual de la cartografía levantada y de sus metadatos, se considera que para la evaluación multicriterio es ideal trabajar con la información en formato raster. Por tal motivo, para convertir una cobertura vectorial a raster se requiere establecer una grilla de extensión conocida, cuya precisión es definida por el tamaño de sus celdas. Para esta investigación, la resolución del pixel de los raster recolectados (velocidad del viento, modelo digital de elevación y temperatura) fue de 200m x 200m, los mismos que

coinciden con la extensión del cálculo. Por consiguiente, se determina que se debe rasterizar cada cobertura según dicha resolución o a su vez aplicar procesos que la estandaricen.

Definido el formato, la resolución y clasificadas las coberturas (en factores y restricciones); es importante hacer una evaluación de la bibliografía relacionada con el fin de determinar los procesos de rasterización y criterios de evaluación. La bibliografía científica que se tomó en cuenta fue la siguiente: “*Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado*” por Janke (2010); “*PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation*” por Charabi y Gastli (2011); “*Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain*” por Sánchez-Lozano et al. (2013); “*GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey*” por Uyan (2013); “*The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco*” por Tahri et al. (2015); “*Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador*” por Villacreses et al. (2017). En base a dichos documentos, se definieron los procesos de rasterización descritos en la Tabla 4:

Tabla 4: Procesos de rasterización por cobertura

Cobertura de información	Proceso de rasterización
Modelo digital de elevación	Mapa de pendientes en %
Velocidad del viento	Reescalado del raster a 5 metros de altura
Radiación global promedio anual	Reescalado de la resolución a 200 x 200m
Subestaciones	Distancia euclidiana
Líneas de transmisión	Distancia euclidiana
Temperatura media anual	Sin procesamiento de rasterización
Red Vial	Distancia euclidiana
Cobertura vegetal y uso de la tierra	Clasificación y rasterización del nivel II
Zonas urbanas	Distancia euclidiana / Raster binario
Cuerpos de agua	Raster binario
Sistema Nacional de Áreas Protegidas	Raster binario
Límites de las regiones Costa y Oriente	Raster binario

- **Modelo digital de elevación (MDE):** Mediante este raster se puede obtener una cobertura de pendientes clasificada en grados o en porcentajes. Para el caso de investigación, se convirtió el MDE en un raster de pendientes clasificado en grados (°). Según Uyan (2013), la pendiente deberá tener menos de 15°, lo que corresponde aproximadamente al 3% del territorio continental ecuatoriano, para que el sitio sea

óptimo para la instalación de una granja fotovoltaica. La morfología de la tierra puede limitar la capacidad de acogida, por lo que se debe evitar las zonas con pendientes altas (no sería factible construir sobre ellas o aumentaría el costo de la instalación para realizar obras de incursión). Por lo tanto, mientras más baja sea la pendiente mayor es la aptitud del terreno para la construcción del emplazamiento (Sánchez-Lozano et al., 2013).

- **Velocidad del viento:** Se considera este factor porque las corrientes convexas de aire natural permiten que los paneles fotovoltaicos puedan ser refrigerados y ganar una eficiencia del 2% en su rendimiento y producción de energía. “La refrigeración por convección natural consiste en la transferencia de calor desde el panel fotovoltaico al aire que circula por la cara posterior del panel, creando un canal de paso de aire entre el panel fotovoltaico y una superficie inferior que puede ser el suelo o la cubierta” (Mazón, 2014). No siempre se va a conseguir la refrigeración del sistema fotovoltaico mediante esta técnica porque son varios los factores que influyen en el funcionamiento como: condiciones ambientales, inclinación del panel, características del panel, la distancia entre el panel y la superficie inferior o canal y el tipo de superficie inferior. Gan (2014) estudió el espacio que debe haber entre los paneles y las superficies inferiores (o canal) con el objetivo de conseguir el descenso de temperatura (Gan, 2014).

Para el caso de Ecuador por encontrarse en el meridiano y paralelo central la inclinación del panel no debería sobrepasar los 15°; por lo tanto, el paso de aire entre el sistema fotovoltaico y la superficie inferior debe ser mínimo de 20 cm, si se desea refrigerar el sistema (INER, 2015). Además, se debe considerar que los paneles fotovoltaicos que no están sobre techos o cubiertas no alcanzan temperaturas extremas como los que sí lo están (Mazón, 2014). Por tal, este criterio fue considerado como factor, ya que a mayor velocidad de viento el sistema puede ser mejor refrigerado. Entonces, se necesita un raster con datos a menor altitud, para lo cual se realizó un cálculo del perfil vertical del viento a partir de las velocidades de 30, 50 y 80 m de altura, el proceso realizado se observa en la Figura 23.

- **Radiación global promedio anual:** En esta investigación, el potencial solar es considerado como el factor más importante. Este insumo se recolectó en formato raster; como valores mínimos y máximos de radiación solar global. En el Ecuador, se registra 3,634 y 5,748.47 Wh/m²/día al año respectivamente (CONELEC, 2008). Este factor de

selección es cambiante de una región a otra en función de las condiciones y circunstancias locales (Uyan, 2013). El proceso de rasterización para esta cobertura fue el reescalado de la información a una resolución de 200x200m. Mediante un reescalado de mejores vecinos se obtuvo el raster deseado. Donde de un pixel de 1000x1000m se obtuvo 25 pixeles de 200x200m. El proceso fue el que se muestra en la Figura 24.

- **Subestaciones:** La ubicación correcta para este tipo de proyectos se da por una buena accesibilidad a ellos, la cual debe ser evaluada por la distancia a varias infraestructuras existentes. En este caso, la proximidad a las subestaciones es importante para asegurar la evacuación de la electricidad generada y evitar pérdidas en la zona de transmisión de electricidad, con el objetivo de establecer un sistema de generación distribuida (Sánchez-Lozano et al., 2013). Así, se determina que mientras más cerca de las subestaciones este el proyecto este será más viable. Por lo tanto, el proceso definido para la rasterización es la distancia euclidiana. Este geoproceto proporciona la distancia desde cada celda del raster hasta el origen más cercano, utilizando como límite del análisis una cobertura de máscara con la finalidad de que el raster de salida (el de distancias) se genere solo hasta dicha demarcación.

- **Líneas de transmisión:** Al igual que las subestaciones es importante que el proyecto se encuentre lo más cerca de las líneas de transmisión para asegurar la evacuación de la electricidad generada y evitar pérdidas en la zona de transmisión de electricidad, con el objetivo de establecer un sistema de generación distribuida (Sánchez-Lozano et al., 2013). Además, es importante que el proyecto se encuentre cercano a las líneas de transmisión porque se podría reducirse costos en el momento de su instalación (Uyan, 2013). De este modo, el geoproceto de rasterización que se utilizó fue la distancia euclidiana, indicando como parámetro que mientras más cerca este la infraestructura de las líneas de transmisión más apto será el sitio analizado.

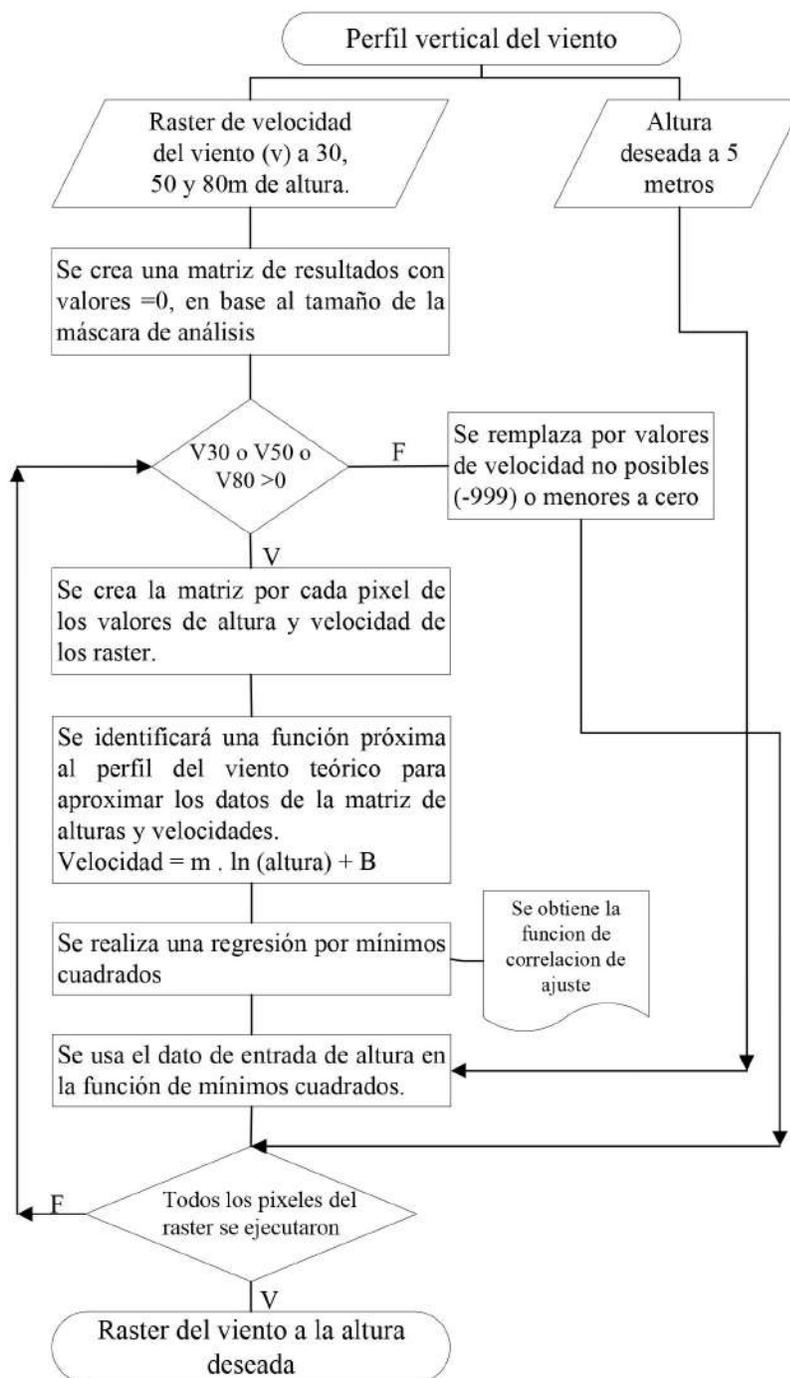


Figura 23: Diagrama de flujo para obtener el raster de velocidad del viento a la altura deseada

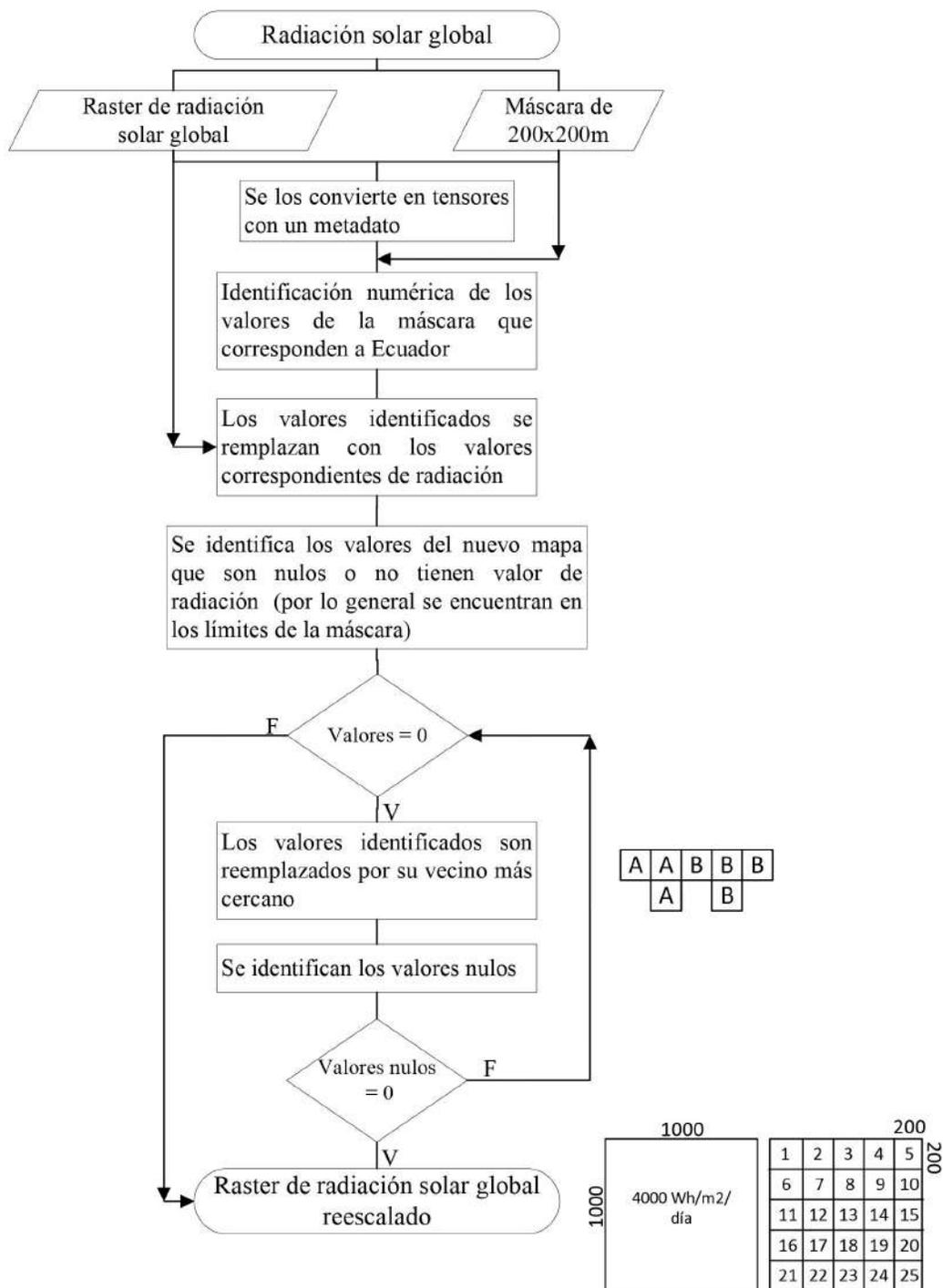


Figura 24: Diagrama de flujo para reescalar la resolución de un raster

- **Temperatura media anual:** La temperatura media anual es uno de los factores claves que aumentan la idoneidad de un área y asegura el buen funcionamiento de la granja solar (Tahri et al., 2015). El parámetro más afectado por el aumento de temperatura es el

voltaje, consecuentemente su potencia y la producción de energía. La eficiencia eléctrica de los paneles fotovoltaicos depende de la temperatura ambiente, esta se reduce cuando aumenta la temperatura. También es cierto que la eficiencia eléctrica varía de un tipo de tecnología solar a otro. En su estudio, Dash, Gupta, Centre, Complex y Delhi (2015, p.148) titulado “Efecto de la temperatura en la potencia de salida de diferentes módulos fotovoltaicos disponibles comercialmente”, concluyeron que el alto rendimiento de los paneles se ha conseguido debido a la condición de funcionamiento en una temperatura ambiente extremadamente baja y la tasa de degradación de la celda fotovoltaica es sólo -1,5% al año. En otro estudio como “Efectos fotovoltaicos dependientes de la temperatura en la heterounión basada en manganita” de Sun, Shen, Shen y Sun (2004) y el “Efecto de la temperatura en la conversión de energía solar fotovoltaica” por Wysocki y Rappaport en 1960, comparan varios materiales, que son expuestos a diferentes temperaturas y observaron su comportamiento, con estos se confirmó que el funcionamiento de las celdas depende de la temperatura en un 2% y que a mayor temperatura la eficiencia se reduce (Sun et al., 2004). Con las anteriores aclaraciones, se justifica que este factor no debe pasar por ningún proceso de rasterización.

- **Red vial:** Al igual que las subestaciones y las líneas de transmisión es importante que el proyecto se encuentre lo más cerca de la infraestructura existente. La ubicación correcta de este tipo de proyectos se da por una buena accesibilidad, evaluada por la distancia a las vial principales (Sánchez-Lozano et al., 2013). Además, la proximidad a la red vial principal puede dar una idea de los costos de construcción (Uyan, 2013). Es decir que la proximidad a las vías evita el costo adicional de la construcción de la granja y el daño resultante al ambiente (Charabi y Gastli, 2011). De este modo el geoproceso de rasterización que se utilizó fue la distancia euclidiana, indicando como parámetro que mientras más cerca este la infraestructura de la red vial más apto será el sitio analizado.
- **Cobertura vegetal y uso de la tierra:** Se clasifica la idoneidad del suelo, según el tipo de uso y cobertura vegetal. La ubicación ideal se presenta en áreas estériles, de uso agrícola y vegetación corta como: arbustos, praderas, pastos, matorrales, estepas, áreas explotadas, que no impedirían el viento ni reducirían la insolación solar. Mientras que las áreas no adecuadas presentan vegetación con importancia ecológica y sus especies son de mayor altitud, como los bosques protectores. Además, dentro de las áreas no aptas, también están las zonas rocosas, los glaciares y aquellas que presentan un uso del suelo

desarrollado por el hombre como las zonas urbanas (Janke, 2010; Uyan, 2013). Como se mencionó en el metadato, para el análisis de esta cobertura se utilizó la categoría o nivel de detalle dos. Por lo tanto, el proceso de rasterización también se hizo en base a dicho nivel; es decir, convirtiendo los polígonos a raster y utilizando como campo de rasterización el código del nivel como se muestra en la siguiente Tabla 5:

Tabla 5: Clasificación de la cobertura vegetal y uso de la tierra según el nivel 2

Nivel I	Cod. I	Nivel II	Cod. II
Bosque	1	Bosque nativo	11
		Plantación forestal	12
Tierra agropecuaria	2	Cultivo anual	21
		Cultivo Semi-Permanente	22
		Cultivo permanente	23
		Otras tierras agrícolas	24
		Pastizal	25
		Mosaico Agropecuario	26
Vegetación arbustiva y herbácea	3	Vegetación arbustiva	31
		Páramo	32
		Vegetación herbácea	33
Cuerpo de agua	4	Natural	41
		Artificial	42
Zona antrópica	5	Área poblada	51
		Infraestructura	52
Otras áreas	6	Área sin cobertura vegetal	61
		Glaciar	62

- **Zonas urbanas:** La colocación de una granja solar cerca de áreas residenciales rurales y urbanas puede causar impactos negativos sobre el medio ambiente y su población. Por lo tanto, no se debe construir a una distancia menor a 500 metros de las zonas urbanas (Uyan, 2013). En este sentido, se consideró una zona de amortiguamiento de 2km alrededor del área urbana, tomando en cuenta la protección ambiental y el futuro crecimiento de los asentamientos humanos. Este proceso fue realizado mediante la herramienta “área de influencia” que está disponible en los SIG. Seguido a este procedimiento, para el proceso de rasterización, se utilizó la herramienta de distancia euclidiana, indicando como parámetro que: mientras más cerca este la infraestructura de las zonas de amortiguamiento más apto será el sitio analizado; esto con el objetivo de que la granja solar logre conectarse al SNI o abastecer directamente a una población aledaña.

Las siguientes Figura 25 y Figura 26 muestran los factores rasterizados que han sido tomados en cuenta para el análisis.

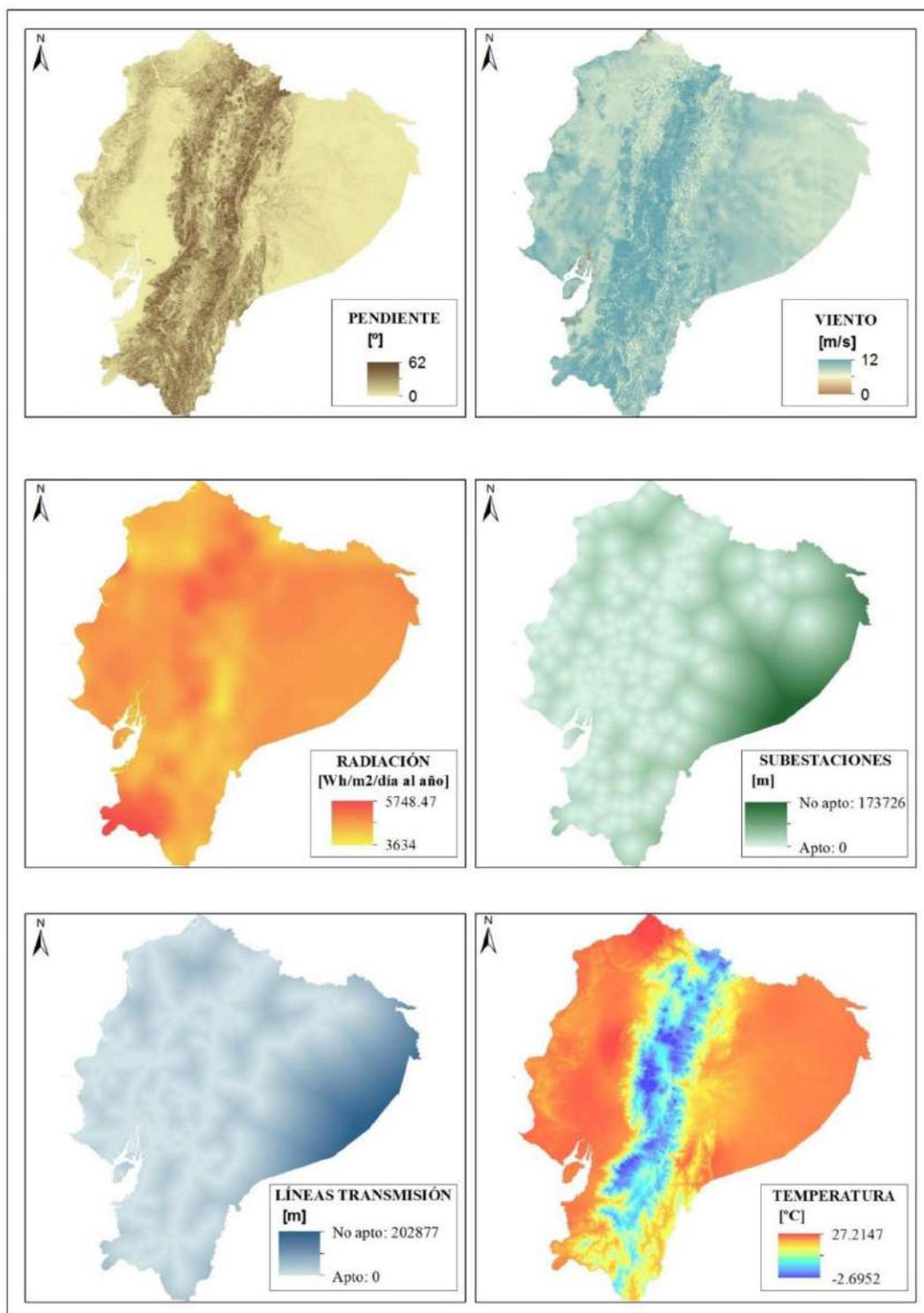


Figura 25: Rasterización de factores

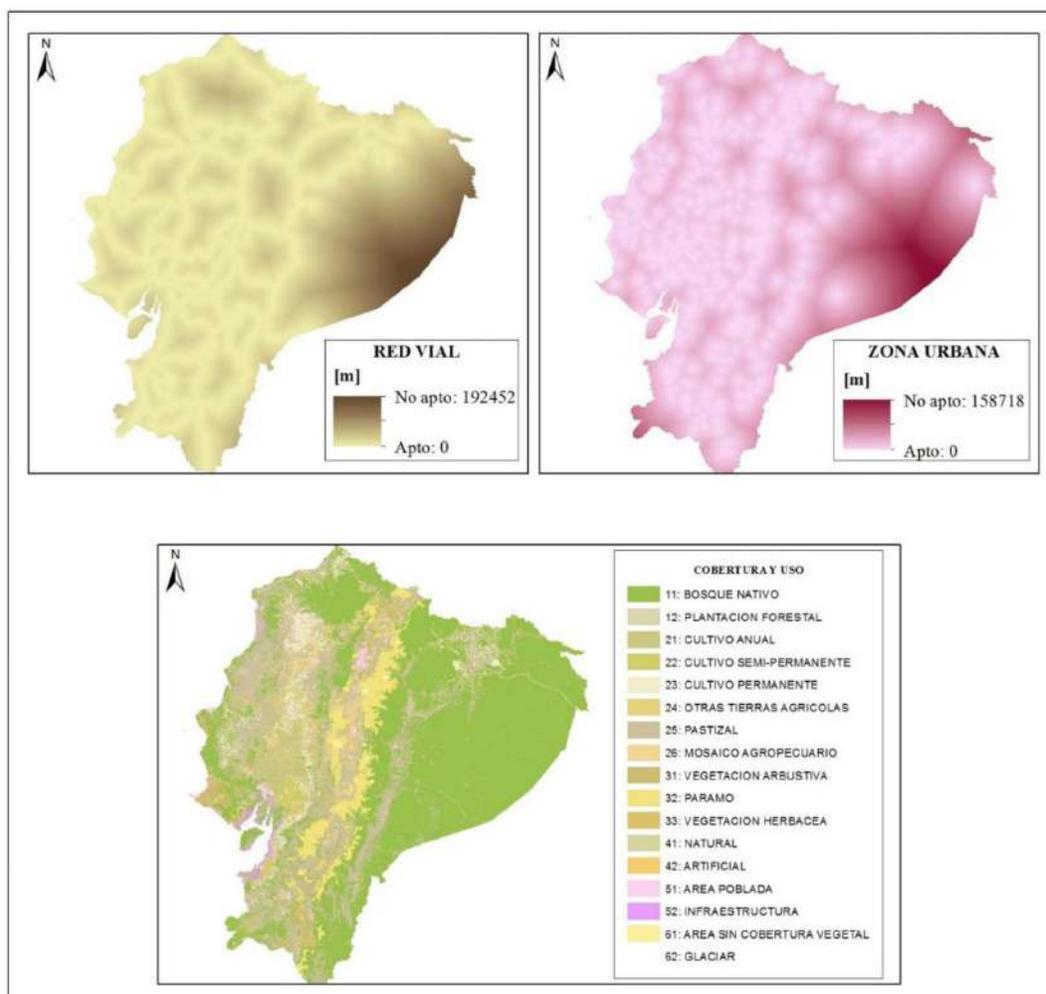


Figura 26: Rasterización de factores

3.2.2.1 Rasterización de restricciones

Por otra parte, la zona de amortiguamiento de 2km alrededor del área urbana fue considerada como restricción dentro de este análisis, por lo cual se rasterizó este insumo convirtiendo la zona de amortiguamiento en un raster binario. Es decir, un raster conformado por valores de 0 y 1, donde la zona apta para la granja tiene valores de 1 y la zona no apta tiene valores de 0 para cada pixel que lo conforman.

De igual manera sucede con las otras tres coberturas consideradas como restricciones. El proceso de rasterización para ellas consistió en convertirlas en un raster binario donde los cuerpos de agua y el SNAP adoptan un valor de cero como zonas no aptas. Según la legislación ambiental del Ecuador, estos elementos son considerados zonas preservadas que no deben ser intervenidas por actividades humanas (MAE, 2013). Por otro lado, los límites

de las regiones Costa y Oriente se consideran fuera del análisis de esta investigación y adoptan un valor de 0 en el análisis. Mientras que el resto del territorio adopta el valor de 1 como zona apta para el emplazamiento.

A los cuatro raster binarios se los multiplicó entre ellos, mediante una calculadora de raster, para obtener una sola cobertura de restricción. La misma que fue restada de las zonas aptas en la selección de sitios definitiva. La siguiente Figura 27 muestra las restricciones consideradas.

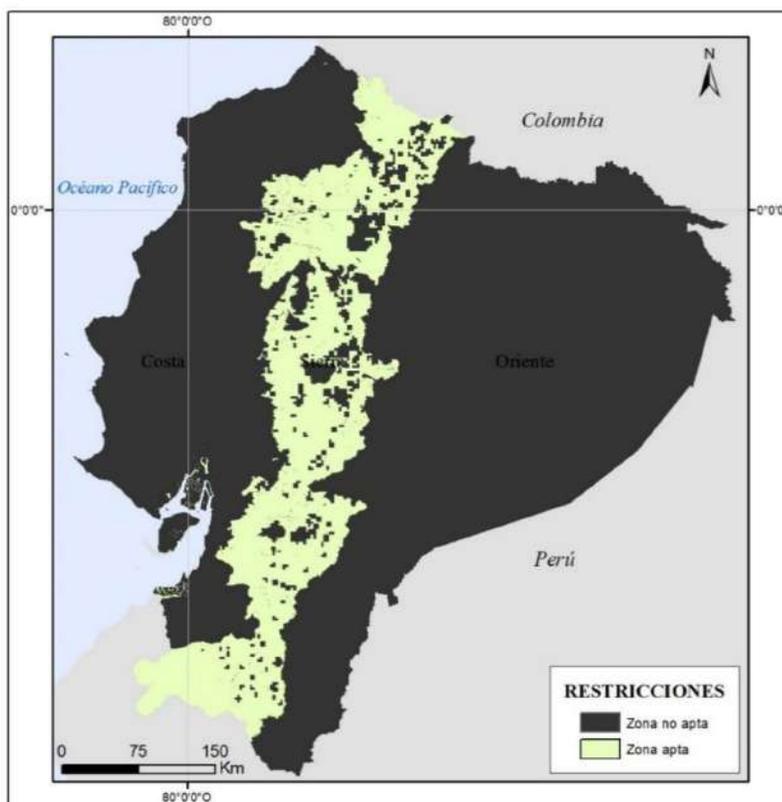


Figura 27: Rasterización de restricciones

3.2.3 Estandarización de la información

El proceso de estandarización consiste en un reescalado de valores desde un raster de entrada mediante una función matemática especificada según criterios de estandarización predefinidos. La escala resultante es un rango de valores continuos enteros entre 0 y 100, donde el valor más bajo o menos representativo es el menos importante o menos apto y el valor más alto es el más representativo o más apto.

En esta investigación, la mayoría de coberturas fueron estandarizadas empleando la función de decrecimiento logístico (cuando los valores menores son los preferidos) y de crecimiento logístico (cuando los valores mayores son los preferidos), se utilizó estas funciones puesto que corresponden a un modelo común de adecuación según las preferencias de crecimiento. Estas funciones de estandarización son parte de las herramientas de geoprocésamiento del software ArcGis, en ellas se carga la cobertura y se especifica la escala de valoración (de 0 a 100). Los procesos definidos para cada cobertura fueron los que se detallan en la siguiente Tabla 6:

Tabla 6: Procesos de estandarización de los factores

Cobertura de información	Proceso de estandarización
Pendientes	Función logística de decaimiento
Velocidad del viento	Función logística de crecimiento
Radiación global promedio anual	Función logística de crecimiento
Subestaciones	Función logística de decaimiento
Líneas de transmisión	Función logística de decaimiento
Temperatura media anual	Función logística de decaimiento
Red Vial	Función logística de decaimiento
Cobertura vegetal y uso de la tierra	Reclasificación según su importancia
Zonas urbanas incluyendo área de amortiguamiento	Función logística de decaimiento

La calificación del factor cobertura vegetal y uso de la tierra se realizó según el nivel dos. Para la valoración se usó la escala de valoración multicriterio que va de 0 a 100 y según la bibliografía las zonas desprovistas de vegetación o con vegetación corta son las que deben tener la mejor valoración para este tipo de emplazamientos (Sánchez-Lozano et al., 2013). En la siguiente Tabla 7 se muestra la ponderación de este factor, ver Figura 29.

Tabla 7: Estandarización de la cobertura vegetal y uso de la tierra

Nivel I	Cod. I	Nivel II	Cod. II	Estandarización
Bosque	1	Bosque nativo	11	15
		Plantación forestal	12	15
Tierra agropecuaria	2	Cultivo anual	21	50
		Cultivo Semi-Permanente	22	50
		Cultivo permanente	23	50
		Otras tierras agrícolas	24	80
		Pastizal	25	80
		Mosaico Agropecuario	26	60
Vegetación arbustiva y herbácea	3	Vegetación arbustiva	31	100
		Páramo	32	90
		Vegetación herbácea	33	70
Cuerpo de agua	4	Natural	41	0
		Artificia	42	0
Zona antrópica	5	Área poblada	51	0
		Infraestructura	52	0
Otras áreas	6	Área sin cobertura vegetal	61	10
		Glaciar	62	0

En esta etapa de estandarización no se consideran las coberturas definidas como restricciones, ya que estas intervienen en los resultados finales. Las restricciones son un corte definitivo de las zonas seleccionadas con mayor o menor aptitud para el emplazamiento. Las restricciones adoptan el valor de 0. Como resultado de la estandarización total de los factores se obtiene los raster que se muestran en las siguientes Figura 28 y Figura 29.

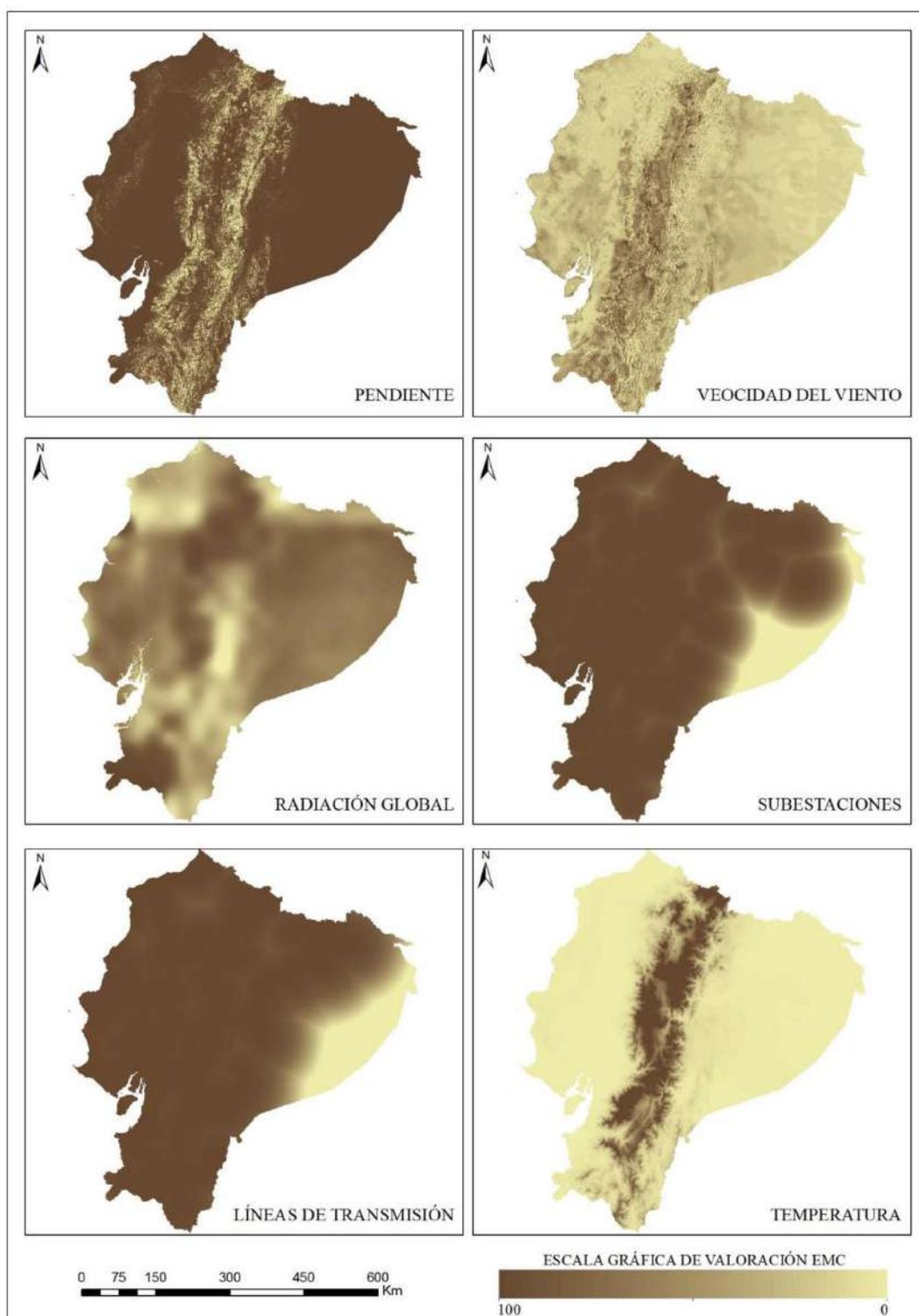


Figura 28: Estandarización de factores

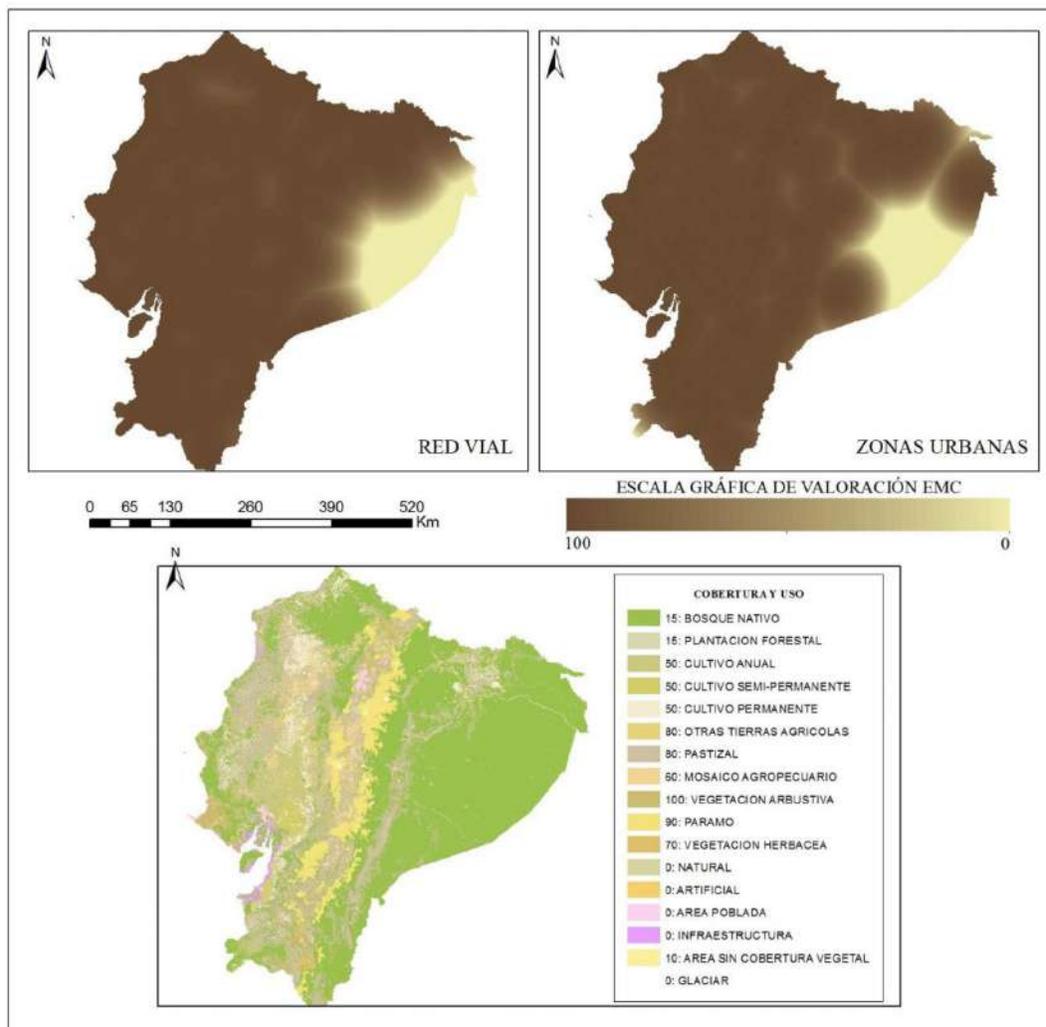


Figura 29: Estandarización de factores

3.3 TERCERA FASE: SELECCIÓN DE SITIOS

3.3.1 Jerarquización y ponderación de criterios

Los pasos que se deben considerar para la asignación de pesos de los factores son los siguientes: Definir el problema y sus actores, estructurar el problema, según los criterios considerados realizar el modelo jerárquico, ingresar las ponderaciones o juicios y finalmente se evalúa la consistencia de los resultados (Turskis y Zavadskas, 2010).

Los pesos de ponderación se determinaron mediante el proceso analítico jerárquico AHP. Como parte inicial de este proceso se estructuran los factores, mediante la asignación de grupos de pertenencia y se los ordena según su jerarquía. Seguido, se definen los valores

numéricos o pesos para cada factor. Con este proceso se puede observar que variable tiene la más alta prioridad dentro del análisis.

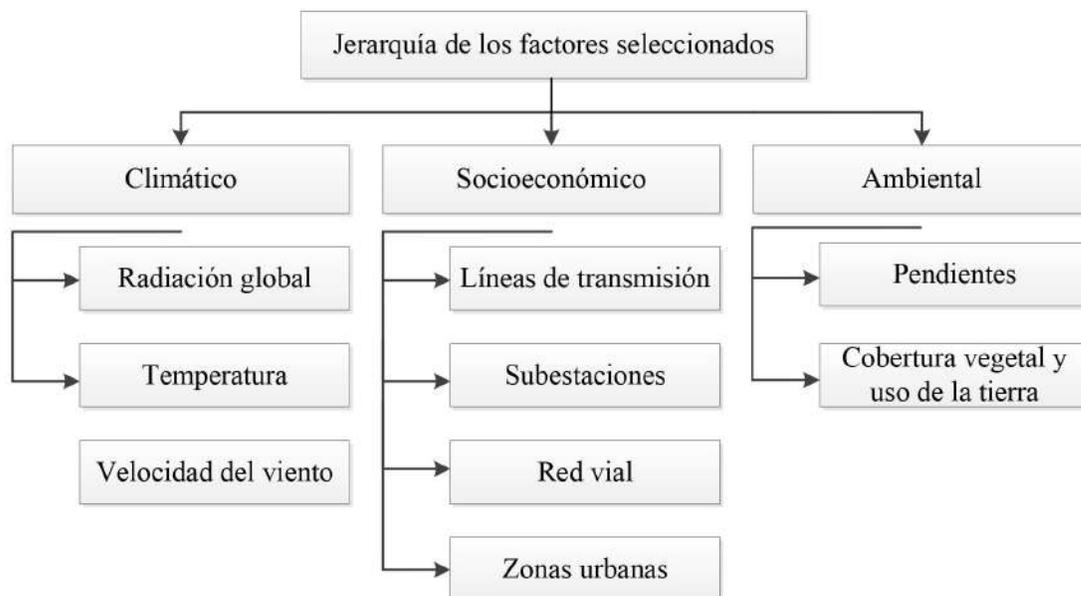


Figura 30: Jerarquización de factores

Al determinar la importancia relativa de los factores según la jerarquización, se procedió a la ponderación. La definición de valores numéricos o pesos (ponderación) para cada factor se basó en la bibliografía: “*Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado*” por Janke en 2010; “*PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation*” por Charabi y Gastli (2011); “*Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain*” por Sánchez-Lozano et al. (2013); “*GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey*” por Uyan (2013); “*The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco*” por Tahri et al. (2015); “*Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador*” por Villacreses et al. (2017).

Se debe considerar que la ponderación debe sumar el 100%, para cualquier grupo jerárquico o caso de análisis, la ponderación planteada se presenta en la siguiente Tabla 8:

Tabla 8: Ponderación de factores

Grupo jerárquico	Importancia por grupo	Peso por grupo	Factores	Importancia por factor	Peso del factor dentro del grupo	Pesos para la EMC
Climático	1	40%	Radiación global	1	90%	36%
			Temperatura	2	5%	2%
			Velocidad del viento	3	5%	2%
					100%	
Socioeconómico	2	35%	Líneas de transmisión	1	40%	14%
			Subestaciones	2	20%	7%
			Red vial	3	20%	7%
			Zonas urbanas	3	20%	7%
					100%	
Ambiental	3	25%	Pendientes	1	60%	15%
			Cobertura vegetal y uso de la tierra	2	40%	10%
		100%			100%	100%

3.3.2 Evaluación multicriterio

Los problemas prácticos se caracterizan a menudo por tener varios factores contradictorios, y no puede haber una solución que satisfice todos los criterios simultáneamente del tomador de decisiones. Por lo tanto, la solución perfecta es aquella que cumple con las expectativas y preferencias del decisor, en este sentido los métodos aplicados en esta investigación buscan dar la mejor solución a través de la comparación y selección del mejor resultado mediante la utilización de técnicas estadísticas como la correlación de Pearson y el análisis de errores o espurios en los resultados obtenidos.

Una vez normalizados y ponderados los factores que están inmersos en el análisis, se puede observar que se agrupan en tres componentes importantes. Según la jerarquización utilizada el grupo climático es aquel que posee una mayor valoración con un 40% sobre el socioeconómico con el 35% y el ambiental con el 25%. Estos pesos influyen en el problema y la selección del mejor resultado. Seguido a la ponderación se procedió a aplicar los métodos de EMC, en este caso son siete métodos seleccionados: ARAS, OCRA, PSI, SMART, TOPSIS, VIKOR y Superposición Ponderada. Todos los métodos usan los factores y pesos definidos, la diferencia radica en que cada uno tiene un principio matemático diferente como se mencionó anteriormente en el capítulo de revisión de literatura. Seguido a este análisis, para seleccionar el lugar apto para los emplazamientos se debe considerar a

todo pixel que tenga una valoración sobre el 75% de cumplimiento. En el siguiente capítulo se muestra el resultado obtenido a partir de cada uno de los métodos multicriterio.

3.3.3 Análisis de errores y selección del mejor resultado de EMC

Ahora bien, para tomar una decisión e identificar el mejor método aplicado, es necesario analizar la correlación entre ellos. Con el análisis de correlación se puede ver cuáles de los siete EMC tienen mayor similitud entre los valores de cada pixel. Seguido se procedió con el análisis de errores para confirmar que las correlaciones de Pearson son acertadas y poder seleccionar el mejor resultado. Este análisis radica en obtener un raster promedio entre los siete métodos y posteriormente aplicar la ecuación número ocho para ir descartando el método que mayor ruido cause en cada promedio, de este modo se selecciona aquellos métodos que posean un margen de error menor al 5% (nivel de confianza del 95%) y se los promedia con el fin de obtener un resultado único. En el siguiente capítulo se muestra los resultados de esta metodología. Finalmente, para la selección de sitios aptos para el emplazamiento de granjas solares, se multiplica el raster de promedio final de los dos métodos con el raster binario de restricciones antes generado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RESULTADOS

Para geolocalizar sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares en la región Sierra del Ecuador se usaron nueve factores entre ellos: radiación global, temperatura, viento, subestaciones, líneas de transmisión, zonas urbanas, red vial, pendientes y cobertura vegetal y uso de la tierra. Por otra parte, se usaron cuatro restricciones: zonas urbanas, cuerpos de agua, sistema nacional de áreas protegidas y límites de la región Costa y Oriente. Tanto la definición de factores y restricciones se basó en investigaciones similares como: *“Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado”* por Janke en 2010; *“PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation”* por Charabi y Gastli en 2011; *“Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain”* por Sánchez-Lozano et al. en 2013; *“GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey”* por Uyan en 2013; *“The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco”* por Tahri et al. en 2015; y *“Wind farms suitability location using geographical information system (GIS), based on multi-criteria decision making (MCDM) methods: The case of continental Ecuador”* por Villacreses et al. en 2017.

Cada factor fue procesado, estandarizado y ponderado según el componente (climático, ambiental y socioeconómico) al que pertenece de acuerdo al método de jerarquización AHP, como se indicó en la Tabla 8. Los factores ponderados fueron el insumo para aplicar los siete métodos de evaluación multicriterio: ARAS, OCRA, PSI, SMART, Superposición Ponderada, TOPSIS y VIKOR, cada uno de ellos con sus respectivos principios matemáticos, como resultado se obtuvo un raster por cada método que se presentan en la Figura 31, y se puede observar que existen similitudes entre algunos de ellos. Por lo cual, para seleccionar el mejor resultado se aplicó el análisis de correlación de Pearson entre los métodos de EMC y un análisis de errores. Los cálculos de EMC, correlación de Pearson y análisis de errores se los realizó mediante el software de programación R, el mismo que permitió codificar cada método mediante sus librerías de uso libre.

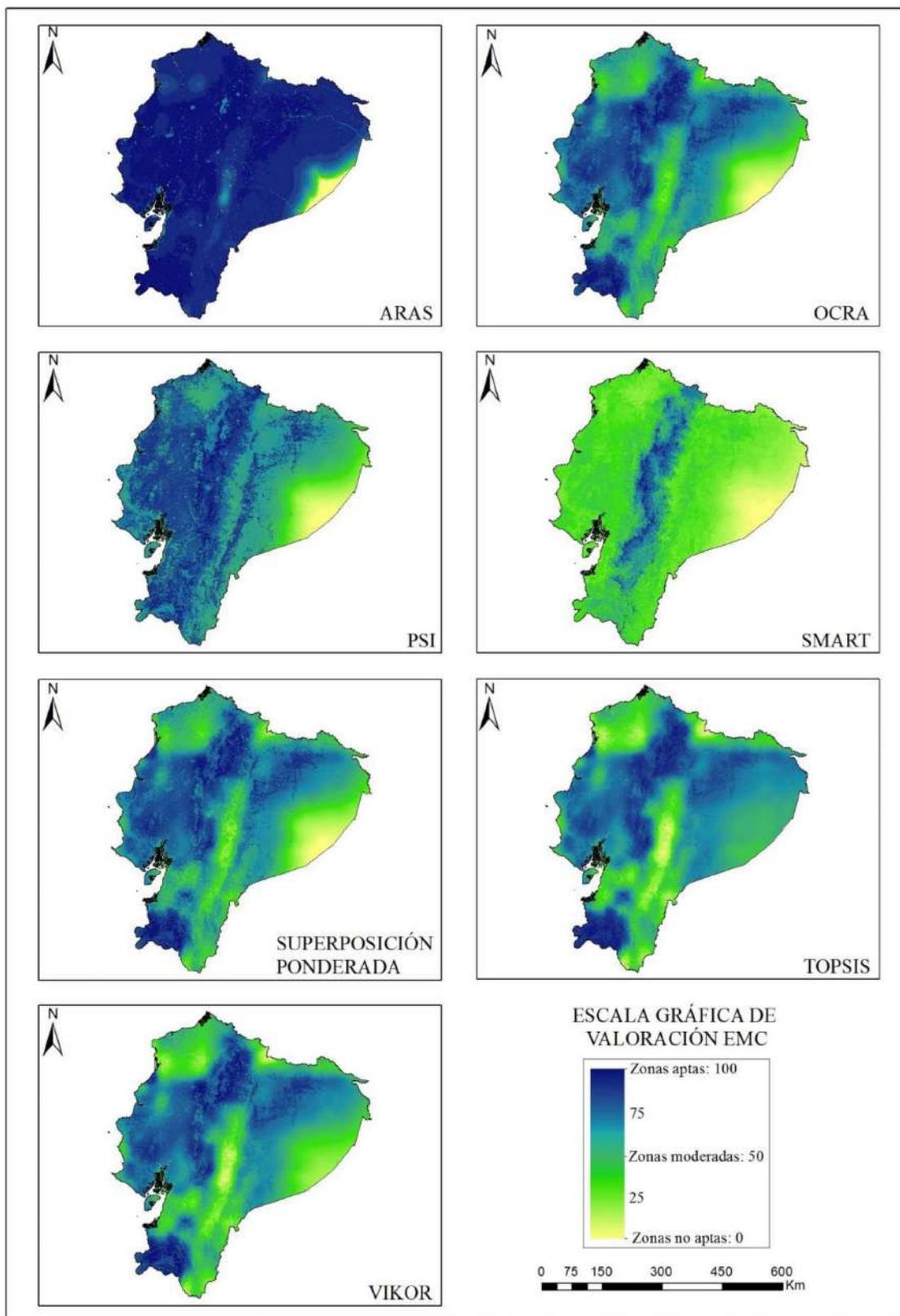


Figura 31: Métodos de Evaluación Multicriterio

Tanto para la estandarización de la información como para mostrar el resultado de cada método de EMC, se definió una escala de valoración que va de 0 a 100, donde los valores más bajos pertenecen a las zonas no aptas y los valores más altos pertenecen a las zonas aptas para la construcción del emplazamiento.

Estos resultados se pueden analizar descomponiendo la escala de valoración de forma proporcional, con la finalidad de indicar un cierto grado de adecuación y aptitud del suelo para este tipo de proyectos, lo cual disminuye el riesgo; que es un punto fundamental en los estudios de prefactibilidad y factibilidad. En este sentido, también se analizó los resultados según la agrupación de los valores de cada pixel, donde la valoración menor a 25 representa zonas no aptas, la valoración de 25 a 50 representa una aptitud marginal, de 50 a 75 aptitud moderada y mayores a 75 representan los sitios aptos para la construcción del emplazamiento, ver escala gráfica de valoración de la Figura 31.

Con la agrupación de pixeles, al hacer un análisis visual de la Figura 31, se identifica la necesidad de aplicar un método que pueda describir las semejanzas entre valores y permita evaluar la idoneidad de la tierra según la escala aplicada. En este sentido, el coeficiente de Pearson permitió la evaluación de dichas similitudes entre todos los valores de los pixeles de cada raster resultante. Como resultado se observa correlaciones altas entre algunos métodos, que sobrepasan el 0.9 de r^2 , ver Figura 32. Entre las correlaciones altas se obtuvo que: OCRA y la superposición ponderada tienen un valor de r^2 igual a 1; OCRA y VIKOR un valor de 0.94; superposición ponderada y VIKOR un valor de 0.94 y finalmente entre TOPSIS Y VIKOR un valor de 0.93.

Al ver correlaciones tan altas, se resuelve que es necesario realizar nuevamente el análisis del coeficiente de correlación de Pearson, únicamente para los pixeles con valores superiores al umbral de 75 de aptitud que corresponden a los sitios aptos para la construcción de estos emplazamientos, ver Figura 33.

De este nuevo análisis se obtuvo, que: OCRA y la superposición ponderada mantiene una correlación elevada con un valor de r^2 igual a 0.98; OCRA y VIKOR un valor de 0.95; SMART y TOPSIS un valor de 0.95, ARAS y SMART un valor de 0.91 y finalmente la superposición ponderada y VIKOR un valor de 0.95. Estos nuevos valores indican una disminución o aumento de correlación entre algunos métodos, por ejemplo, entre TOPSIS y VIKOR que tenía una correlación de 0.93 bajo al 0.20, mientras que la correlación entre

SMART y TOPSIS pasó de 0.24 a 0.95, ver Figura 33. Por tal, este resultado indica que la correlación entre métodos permite identificar la similitud que tiene cada raster según su número de píxeles valorados, pero no quiere decir que estas valoraciones coincidan con la misma ubicación geográfica del píxel. En este resultado la única similitud de valores según la ubicación del píxel se aprecia entre el método de OCRA y la superposición ponderada. Para sustentar lo antes mencionado, se precisó de un análisis de errores con el cual se eliminaron los métodos que generan mayor ruido en el resultado final.

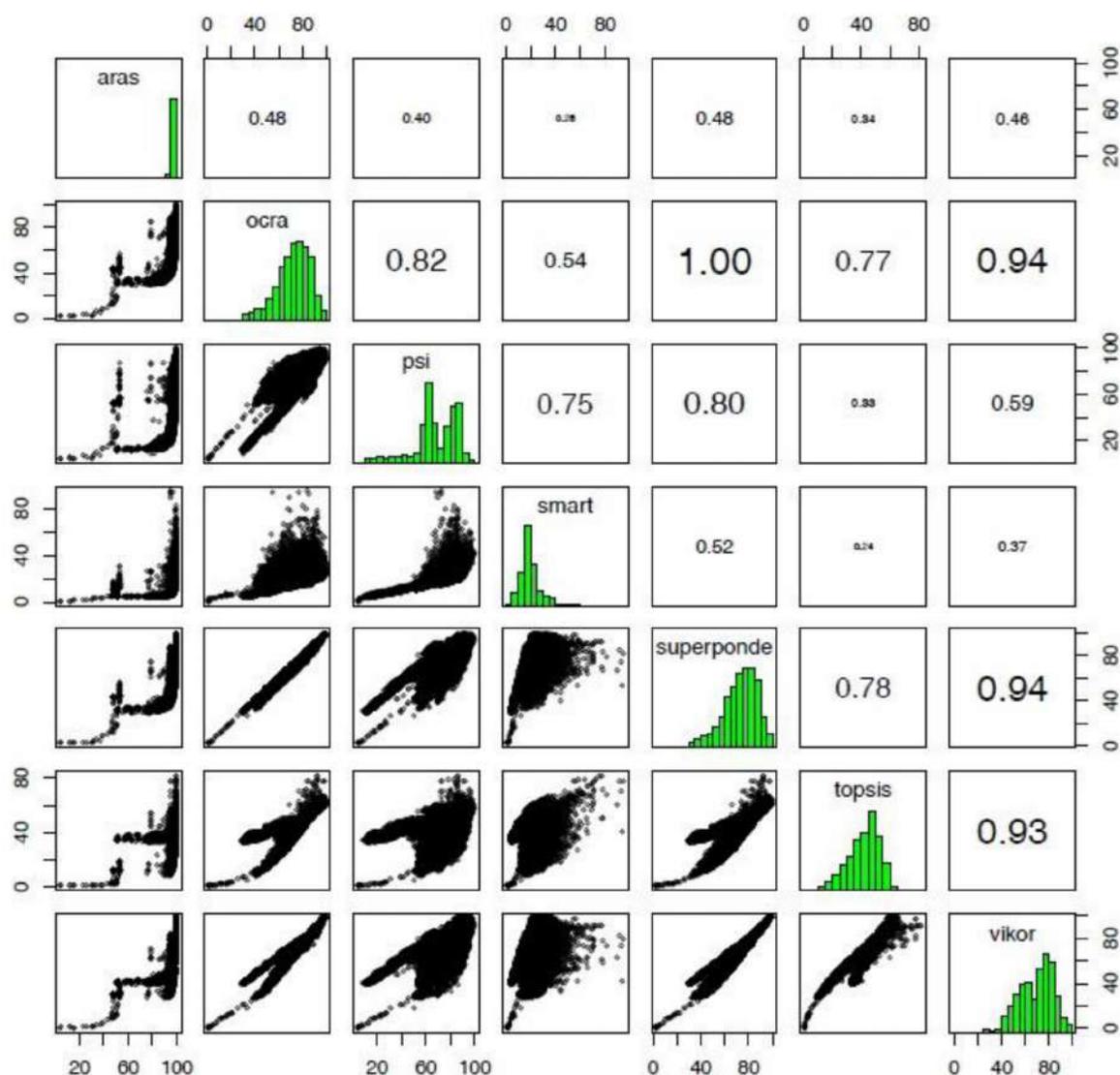


Figura 32: Análisis de correlación entre los siete EMC

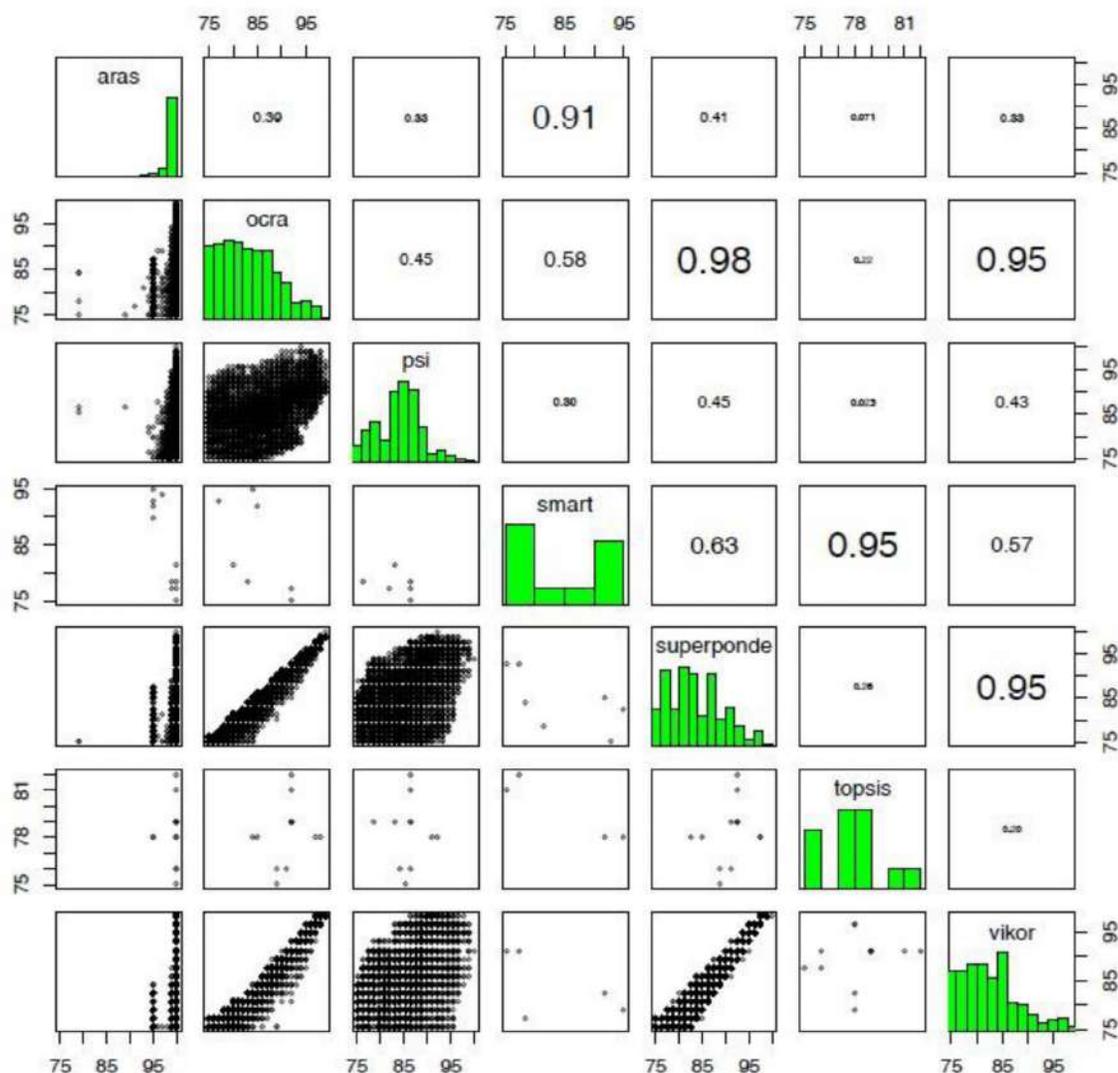


Figura 33: Coeficiente de Pearson con un umbral de 75 (zonas aptas)

Con el análisis de errores (aplicando la ecuación 7), en primera instancia se obtuvo un raster promedio entre los siete métodos de EMC, seguido se fue descartando aquel EMC que genere más ruido en el raster promedio final, de este modo se seleccionó aquellos métodos que posean un error menor al 5%. Con el primer análisis de errores se observó que tres métodos (VIKOR, superposición ponderada y OCRA) generan menos del 5% de error al ser promediado entre sí, como se indicó en la Tabla 9.

Tabla 9: Cálculo de errores entre los métodos EMC (aplicación de la ecuación 8)

<p>1. Error promedio entre los 7 métodos EMC. El método SMART es aquel que genera los errores más altos.</p> <table border="1" data-bbox="276 380 694 688"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>35.160</td> <td>ARAS</td> </tr> <tr> <td>9.392</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>9.674</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>43.750</td> <td>SMART</td> </tr> <tr> <td>9.174</td> <td>SUPERPOSICION</td> </tr> <tr> <td>20.785</td> <td>TOPSIS</td> </tr> <tr> <td>7.791</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	35.160	ARAS	9.392	OCRA	9.674	PSI	43.750	SMART	9.174	SUPERPOSICION	20.785	TOPSIS	7.791	VIKOR	<p>2. Se descarta SMART y se corre nuevamente el método, se observa que TOPSIS es el siguiente método con el error más alto.</p> <table border="1" data-bbox="817 415 1248 688"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>27.869</td> <td>ARAS</td> </tr> <tr> <td>3.141</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>8.833</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>3.185</td> <td>SUPERPOSICION</td> </tr> <tr> <td>28.041</td> <td>TOPSIS</td> </tr> <tr> <td>4.122</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	27.869	ARAS	3.141	OCRA	8.833	PSI	3.185	SUPERPOSICION	28.041	TOPSIS	4.122	VIKOR
Error	Método																														
35.160	ARAS																														
9.392	OCRA																														
9.674	PSI																														
43.750	SMART																														
9.174	SUPERPOSICION																														
20.785	TOPSIS																														
7.791	VIKOR																														
Error	Método																														
27.869	ARAS																														
3.141	OCRA																														
8.833	PSI																														
3.185	SUPERPOSICION																														
28.041	TOPSIS																														
4.122	VIKOR																														
<p>3. Se descarta TOPSIS y se observa que ARAS es el siguiente método con el error más alto.</p> <table border="1" data-bbox="276 911 694 1150"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>22.263</td> <td>ARAS</td> </tr> <tr> <td>3.804</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>10.077</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>4.005</td> <td>SUPERPOSICION</td> </tr> <tr> <td>6.735</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	22.263	ARAS	3.804	OCRA	10.077	PSI	4.005	SUPERPOSICION	6.735	VIKOR	<p>4. Se descarta ARAS y se corre nuevamente el método, se observa que PSI es el siguiente método con el error más alto sobre el 5%.</p> <table border="1" data-bbox="817 911 1240 1108"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.113</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>7.637</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>2.159</td> <td>SUPERPOSICION</td> </tr> <tr> <td>4.888</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	2.113	OCRA	7.637	PSI	2.159	SUPERPOSICION	4.888	VIKOR								
Error	Método																														
22.263	ARAS																														
3.804	OCRA																														
10.077	PSI																														
4.005	SUPERPOSICION																														
6.735	VIKOR																														
Error	Método																														
2.113	OCRA																														
7.637	PSI																														
2.159	SUPERPOSICION																														
4.888	VIKOR																														
<p>5. Se descarta PSI y se corre nuevamente el método.</p> <table border="1" data-bbox="553 1268 961 1465"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.690</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>1.455</td> <td>SUPERPOSICION</td> </tr> <tr> <td>2.984</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>		Error	Método	1.690	OCRA	1.455	SUPERPOSICION	2.984	VIKOR																						
Error	Método																														
1.690	OCRA																														
1.455	SUPERPOSICION																														
2.984	VIKOR																														

Con el análisis de errores se observa que los métodos de OCRA, superposición ponderada y VIKOR serían el mejor resultado porque presentan un error absoluto menor al 5%. Con este análisis de errores absolutos y gracias al coeficiente de Pearson, se confirma que el método de superposición ponderada y OCRA tienen una correlación de 1, lo que indica que estos métodos tienen valores (de sus pixeles) similares. Identificando que estos dos métodos están siendo valorados dos veces; por lo tanto, se realizó nuevamente el análisis de errores sin considerar el método de superposición ponderada, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Cálculo de errores entre los métodos EMC sin superposición ponderada

<p>1. Error promedio entre los 6 métodos EMC. El método SMART es aquel que genera los errores más altos.</p> <table border="1" data-bbox="268 380 701 653"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>36.664</td> <td>ARAS</td> </tr> <tr> <td>10.913</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>10.363</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>42.246</td> <td>SMART</td> </tr> <tr> <td>19.280</td> <td>TOPSIS</td> </tr> <tr> <td>9.031</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	36.664	ARAS	10.913	OCRA	10.363	PSI	42.246	SMART	19.280	TOPSIS	9.031	VIKOR	<p>2. Se descarta SMART y se corre nuevamente el método, se observa que ARAS es el siguiente método con el error más alto.</p> <table border="1" data-bbox="810 411 1258 646"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>28.215</td> <td>ARAS</td> </tr> <tr> <td>3.743</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>8.859</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>27.693</td> <td>TOPSIS</td> </tr> <tr> <td>4.377</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	28.215	ARAS	3.743	OCRA	8.859	PSI	27.693	TOPSIS	4.377	VIKOR
Error	Método																										
36.664	ARAS																										
10.913	OCRA																										
10.363	PSI																										
42.246	SMART																										
19.280	TOPSIS																										
9.031	VIKOR																										
Error	Método																										
28.215	ARAS																										
3.743	OCRA																										
8.859	PSI																										
27.693	TOPSIS																										
4.377	VIKOR																										
<p>3. Se descarta ARAS y se observa que TOPSIS es el siguiente método con el error más alto.</p> <table border="1" data-bbox="261 873 709 1073"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9.369</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>9.435</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>20.838</td> <td>TOPSIS</td> </tr> <tr> <td>6.989</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	9.369	OCRA	9.435	PSI	20.838	TOPSIS	6.989	VIKOR	<p>4. Se descarta TOPSIS y se corre nuevamente el método, se observa que PSI es el siguiente método con el error más alto sobre el 5%.</p> <table border="1" data-bbox="810 873 1258 1031"> <thead> <tr> <th>Error</th> <th>Método</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.761</td> <td>OCRA</td> </tr> <tr> <td>7.070</td> <td>PSI</td> </tr> <tr> <td>5.289</td> <td>VIKOR</td> </tr> </tbody> </table>	Error	Método	2.761	OCRA	7.070	PSI	5.289	VIKOR								
Error	Método																										
9.369	OCRA																										
9.435	PSI																										
20.838	TOPSIS																										
6.989	VIKOR																										
Error	Método																										
2.761	OCRA																										
7.070	PSI																										
5.289	VIKOR																										

Con el análisis final de errores, descartando al método de superposición ponderada, se obtiene que los mejores métodos de EMC son VIKOR y OCRA, con un error menor al 5%, como se muestra en la Tabla 10 y una correlación de 0.95%, sobre el umbral 75 de aptitud. La Figura 34 indica los raster promediados sin considerar la superposición ponderada, observando que los valores de las escalas gráficas varían de acuerdo a cada resultado y únicamente la escala de valoración del promedio entre OCRA y VIKOR va de 1 a 100 para todo el territorio, siendo la mejor escala para definir la aptitud del suelo. Este resultado, demuestra que los píxeles de cada imagen al ser correlacionados no coinciden en su posición geográfica y valoración. Por consiguiente, su promedio dará el mejor resultado.

Una vez definido el mejor resultado de EMC (promedio entre OCRA y VIKOR), se procedió con el corte de áreas restringidas. Con este proceso se delimita la región Sierra y se elimina las zonas donde se encuentran las áreas urbanas, los cuerpos de agua, el Sistema Nacional de Áreas Protegidas y los límites de la región Costa y Oriente. El Resultado es la selección de sitios con potencial para el emplazamiento de granjas solares como se muestra en el mapa,

Figura 35, la escala gráfica de valoración indica que las zonas no aptas adoptan un valor de 0 y las zonas aptas adoptan un valor de 100.

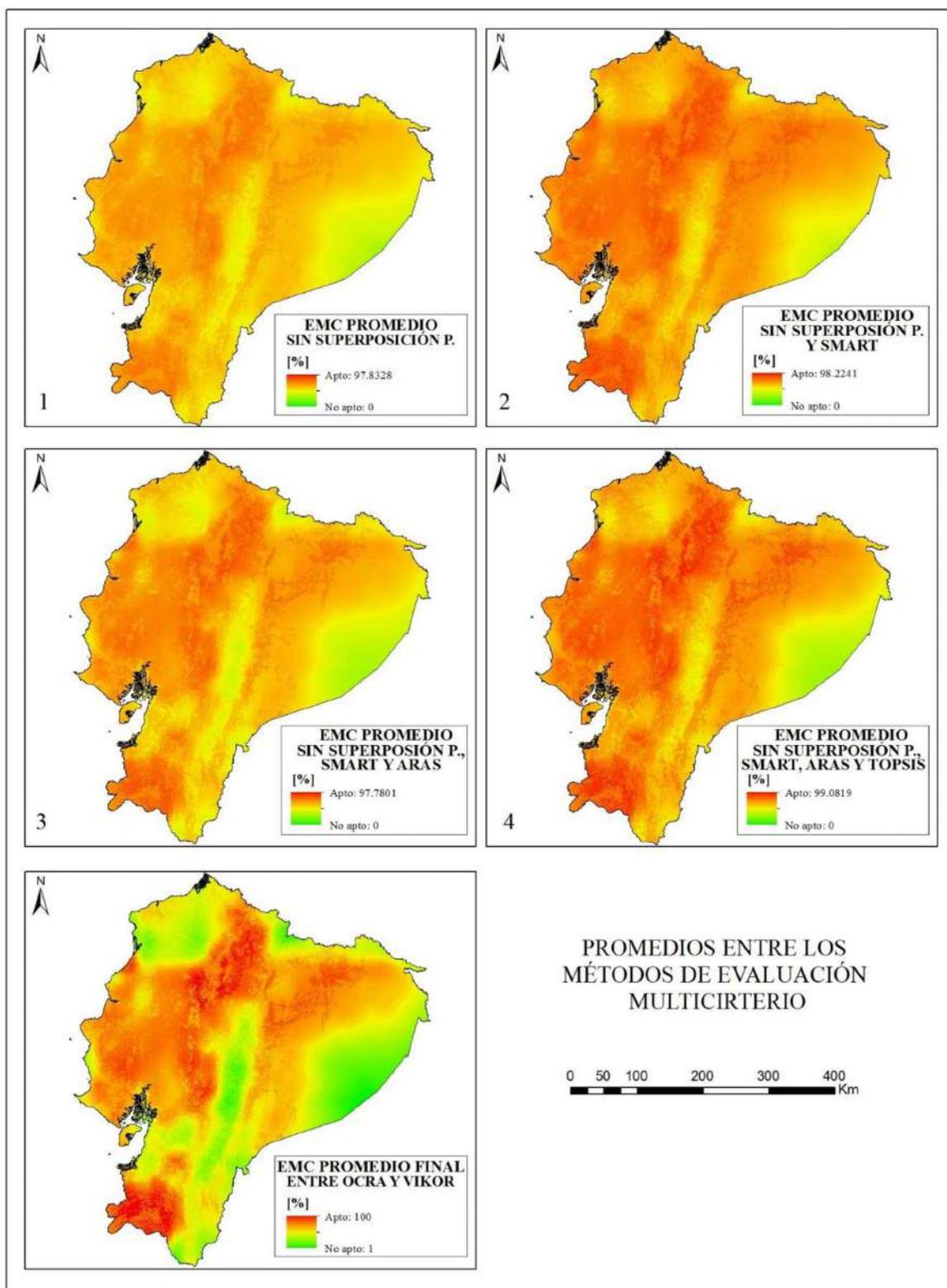


Figura 34: Promedio entre los métodos de EMC sin Superposición Ponderada

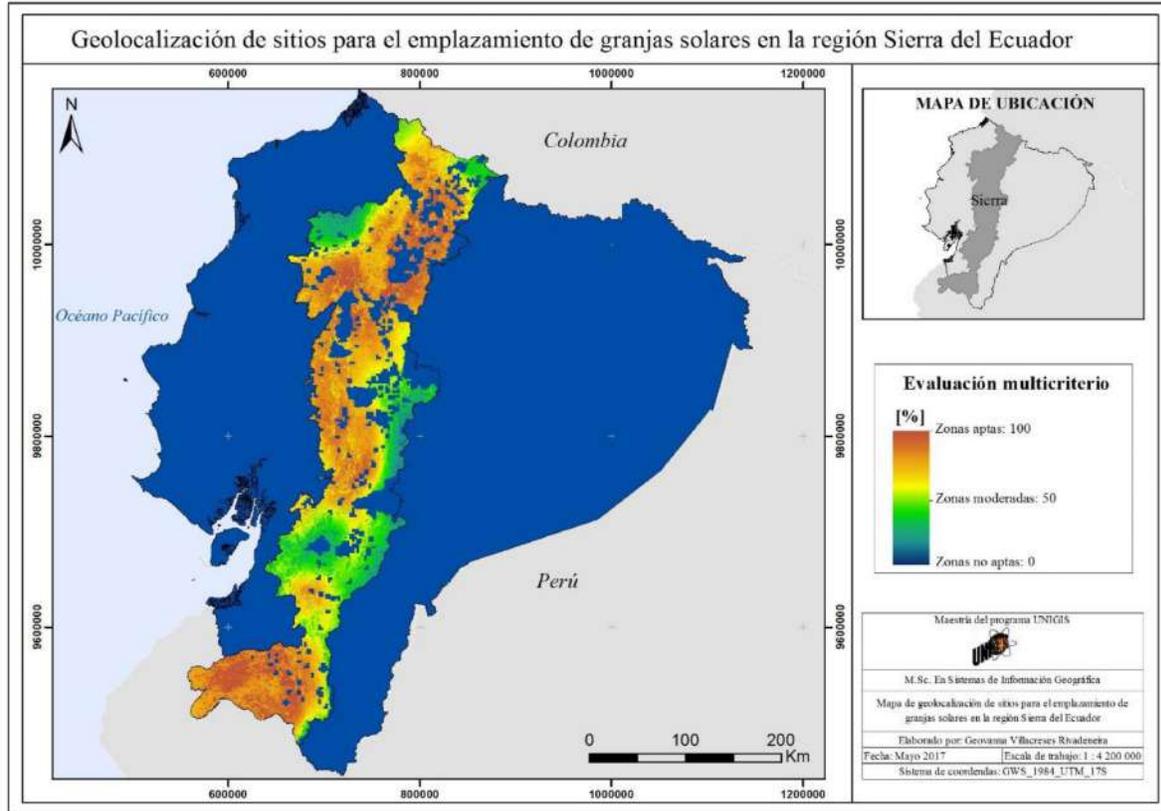


Figura 35: Geolocalización de sitios para el emplazamiento de granjas solares en la región Sierra del Ecuador

Posteriormente, al raster promedio final entre OCRA y VIKOR se lo clasificó en rangos de valores que van de 0 a 25, de 26 a 50, de 51 a 75 y de 75% en adelante (que es el umbral de análisis) los rangos se definieron cada 5% hasta llegar al 100% de aptitud, ver Tabla 11. La finalidad de esta clasificación fue conocer la superficie en Km² apta para la construcción del emplazamiento. Al construirlo en una zona con aptitud baja la inversión económica puede ser elevada a comparación de construirlo en una zona con aptitud alta; esta consideración queda en manos del tomador de decisiones.

Con respecto a la superficie total del Ecuador continental (Tabla 11), se calculó el porcentaje que cada agrupación de valores (áreas) ocupan según la superficie total. Las áreas con valoración menor al umbral del 75% de aptitud representan el 86.73% del terreno, con un área de 215,934.96 Km², donde las áreas de 0 a 25 representan el 79.34% y corresponden a las zonas restringidas, ubicadas en todas las regiones y denominadas en el análisis como no aptas. Las áreas de 26 a 50 denominadas como marginales corresponden al 0.52% y las áreas de 51 a 75 consideradas como moderadas corresponden al 6.87%.

Las áreas sobre el umbral de 75 corresponden al 13.27% con respecto a la superficie total del Ecuador y se encuentran ubicadas en la región Sierra. Ocupando una superficie de 33,047.24 Km². Estas áreas son consideradas como aptas para el emplazamiento de granjas solares.

Tabla 11: Clasificación de la EMC con sus respectivas áreas.

Id.	Clasificación EMC	Definición	Región	Áreas EMC [Km ²]	%	%
0	0	No apto	Costa y Oriente	197,533.96	79.34	86.73
1	1 a 25	No apto	Sierra	0.52	0.00	
2	26 a 50	Marginal	Sierra	1,298.6	0.52	
3	51 a 75	Moderado	Sierra	17,101.88	6.87	13.27
4	76 a 80	Apto	Sierra	5,831	2.33	
5	81 a 85	Apto	Sierra	8,006.84	3.22	
6	86 a 90	Apto	Sierra	10,521.28	4.23	
7	91 a 95	Apto	Sierra	5,375.52	2.16	
8	96 a 100	Apto	Sierra	3,312.6	1.33	
Área total del Ecuador				248,982.2	100%	100%

Según la Tabla 11, las zonas que sobrepasan el 95% de aptitud corresponden al 1.33% de todo el territorio con un área de 3,312 Km², las mismas que se concentran en las provincias de: Loja al sur del Ecuador, y las provincias ubicadas en el centro norte del país como:

Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y el norte de Cotopaxi. Estas zonas (que sobrepasan el 95%), son las que representarían el menor riesgo posible en la construcción del emplazamiento, puesto que al cumplir con la mayoría de factores considerados en la investigación, los costos de ingeniería pueden ser reducidos y a su vez la producción de energía está asegurada por poseer el recurso necesario. Esto representa un beneficio social, físico y ambiental de las zonas cercanas. Las áreas con la valoración mencionada se identificaron con color rojo en el mapa de la Figura 36.

Finalmente, como zonas menos aptas con una valoración menor al 50% (representadas con color amarillo), se identificó a las provincias de Tungurahua, Cañar y Azuay. Mientras que las zonas con valoración sobre el 50% hasta el 95% se encuentran concentradas en el centro y norte del país, ver Figura 36. La valoración según la escala utilizada para representar los resultados indica que las zonas cumplen o no con los factores y restricciones considerados y se deja a criterio del tomador de decisiones ampliar los análisis de factibilidad y prefactibilidad.

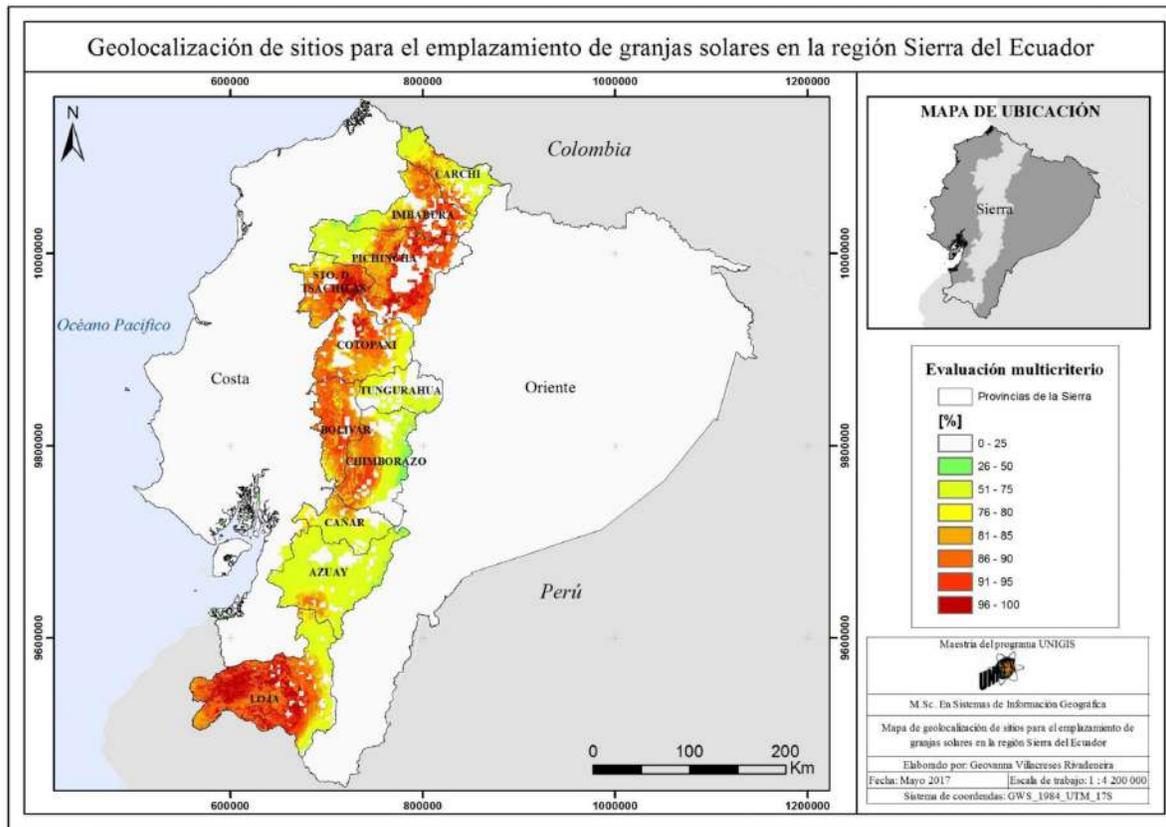


Figura 36: Rangos de valoración de la Geolocalización de sitios para el emplazamiento de granjas solares

4.2 DISCUSIÓN

En esta investigación se planteó la selección de sitios con mayor potencial solar para la implementación de granjas solares mediante la combinación de los SIG y los EMC. Las bases de datos utilizadas fueron obtenidas de fuentes oficiales, si la presente investigación va a ser utilizada como herramienta para ejecutar futuros proyectos fotovoltaicos se debe realizar las respectivas actualizaciones.

Como una de las preguntas que se plantearon previamente al desarrollo de la investigación fue si ¿Las herramientas de geoprocésamiento de los sistemas de información geográfica permiten la espacialización de los métodos multicriterio y la selección de sitios con potencial para el emplazamiento de granjas solares? Esta investigación demuestra que las combinaciones planteadas (SIG - EMC) son una herramienta útil para la toma de decisiones, puesto que permite la espacialización de las necesidades planteadas y su análisis.

Por otra parte, se planteó acerca de ¿Cuál es el conocimiento sobre los métodos multicriterio seleccionados para el caso de estudio? En la sección de literatura se indica los trabajos relacionados y gracias a estas investigaciones se pudo adaptar los métodos al problema planteado. En general todas las investigaciones relacionadas al uso de EMC definen que son métodos subjetivos y su uso está ligado al conocimiento del usuario que los vaya a aplicar. Razón por la cual, en esta investigación se propuso la aplicación de siete métodos usando los mismos parámetros de análisis, pero con diferente principio matemático y estadístico. La finalidad de aplicar los siete métodos fue la evaluación de cada uno de ellos y la selección de uno solo como mejor resultado.

Como se observó en los resultados los métodos tienen similitudes, por ello nació la necesidad de compararlos y validarlos estadísticamente. Cuando se habla sobre si ¿Los conocimientos de estadística para comparar y validar resultados permiten seleccionar el mejor resultado obtenido mediante métodos multicriterio seleccionados? Con esta investigación se confirma que gracias al análisis y descarte mediante el método de cálculo de errores y el análisis de correlación entre ellos se pudo seleccionar la mejor solución. Para esta investigación, se determinó que el promedio entre dos EMC da el mejor resultado, con el transcurso de la investigación se determinó que existían dos métodos similares (superposición ponderada y OCRA), así se eliminó uno de ellos (superposición ponderada) y se determinó que el promedio entre OCRA y VIKOR es la mejor solución para la selección de sitios con

potencial solar. Con este resultado se demuestra que los métodos estadísticos utilizados para comparar y validar resultados permitieron la mejor selección.

En el Ecuador esta es la primera investigación que demuestra la factibilidad de esta combinación y evalúa cada método multicriterio utilizado, con el objetivo de localizar sitios con potencial, autores como Garni y Awasthi (2017) avalan este tipo de trabajo como análisis previo a la construcción de emplazamientos que usan tecnologías limpias (Garni y Awasthi, 2017).

El método AHP es una excelente forma de determinar los pesos de los factores considerados. En base a otras investigaciones este método ha sido utilizado para seleccionar la mejor ubicación para el emplazamiento de proyectos de generación de energía solar fotovoltaica como por ejemplo los autores Tahri et al. en 2015 que evalúa el potencial solar para emplazamientos en Morocco (Tahri et al., 2015).

Una de las preguntas de investigación planteada fue ¿Cuáles son los criterios que se considerarán en la evaluación multicriterio para la selección de sitios apropiados para el emplazamiento de granjas solares? Para definir los criterios se usó como base publicaciones relacionadas con la temática y se resolvió que para el desarrollo de esta investigación era necesario usar nueve factores para llevar a cabo el análisis, entre ellos están: radiación global, temperatura, viento, subestaciones, líneas de transmisión, zonas urbanas, red vial, pendientes y cobertura vegetal y uso de la tierra. Todos los factores mencionados fueron tomados de fuentes oficiales en formato vector o raster para el análisis mediante la combinación de los SIG y EMC.

Los factores fueron agrupados y ponderados, se definió que el grupo jerárquico climático tiene un peso de 40% en comparación con el socioeconómico que tiene el 35% y el ambiental el 25%. El clima resultó ser el grupo más importante ya que define la producción potencial de electricidad de un determinado campo fotovoltaico. Luego vino el grupo socioeconómico y ambiental que demuestran que la factibilidad de este tipo de proyectos está muy ligada al tipo de orografía del sitio y al tipo de infraestructura cercana a las zonas seleccionadas. Aunque, es importante mencionar que mediante técnicas ingenieriles podría ser factible la construcción de cualquier infraestructura, esto podría incrementar los costos de los proyectos. El parque eólico Villonaco (sur de Ecuador) es una muestra de ello, fue construido

a grandes altitudes y sobrepasa la producción de energía dimensionada pero su costo de construcción fue elevado por su ubicación.

Por otra parte, las coberturas de restricción se consideraron como raster binarios, que al ser multiplicados con el resultado final de la EMC mediante el álgebra de mapas proporcionaron las zonas aptas y no aptas para la construcción del proyecto. De este modo, se obtiene que las zonas restringidas adoptaron un valor de cero y fueron catalogadas como no aptas dentro de la investigación, estas representan el 79% del territorio continental ecuatoriano. Mientras, que las zonas seleccionadas como aptas que sobrepasan el 95% de aptitud se ubican en la región Sierra con 3312 km² que corresponde al 1.3% de todo el territorio ecuatoriano. Las provincias que tienen parte de zonas aptas fueron: Loja al sur del Ecuador, las provincias ubicadas en el centro norte del país como: Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y el norte de Cotopaxi. Estas zonas son las que representarían el menor riesgo posible en la construcción del emplazamiento por cumplir con la mayoría de criterios planteados.

En general se observa que los EMC son muy útiles para la resolución de problemas. Por ser metodologías subjetivas, se necesita respaldarlas con investigaciones relacionadas que permitan definir criterios aptos y ponderaciones acorde a las necesidades planteadas. En el caso de usar esta investigación para geolocalizar sitios con potencial de instalación en las regiones de la Costa y Oriente, se deberá replantear la cobertura de restricciones. La nueva máscara de corte deberá considerar únicamente el Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado, las zonas urbanas y los cuerpos de agua. Si el nuevo análisis se concentrara en la región Costa se recomienda tomar en cuenta las coberturas de manglares y zonas de inundación como factores. Mientras que para la región Insular se deberá considerar factores y restricciones diferentes a las planteadas por ser una zona de protección ambiental.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante esta investigación se cumplió el objetivo general y se confirmó la hipótesis planteada; los resultados muestran que la región Sierra del Ecuador posee potencial para la instalación de plantas fotovoltaicas con fines de generación eléctrica, para ser conectadas al Sistema Nacional Interconectado o a su vez ser plantas autogeneradoras que puedan abastecer a poblaciones cercanas.

El MEER en 2013c plantea la ejecución del proyecto EURO-SOLAR, el cual promueve el desarrollo de la energía renovable con el objetivo de mejorar la calidad de vida de algunas poblaciones. Con dicho proyecto, se han beneficiado provincias de la Costa Ecuatoriana (Guayas, Esmeraldas) y del Oriente (Sucumbios, Orellana, Napo, Pastaza y Morona Santiago) dejando de un lado la región Sierra. Por lo tanto, se espera que esta investigación se convierta en una herramienta de toma de decisiones; con el objetivo de incentivar el uso de las energías renovables y abastecer de servicios básicos a las poblaciones necesitadas.

La combinación de los métodos de evaluación multicriterio y los sistemas de información geográfica han sido el apoyo fundamental para el desarrollo de esta investigación. Para obtener la geolocalización de sitios con potencial solar en la región Sierra se contó con tres componentes: el climático, el ambiental y el socioeconómico. Cada uno conformado por sus propios factores. Además de estos componentes se consideró los criterios restrictivos o limitaciones para lograr el objetivo planteado, esperando que los resultados tengan una alta tasa de aceptación para la implementación de granjas solares.

Para la ponderación de los factores se utilizó la metodología AHP que permite la jerarquización y agrupación de cada criterio. Esta metodología permite al decisor valorar los criterios según su experiencia o según la bibliografía recolectada. En esta investigación se realizó una combinación de las dos opciones, se trabajó directamente con personal del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables que son los expertos en el tema a nivel nacional y también se consideró el desarrollo científico de otros autores.

Como parte del desarrollo, se aplicaron siete métodos multicriterio ARAS, OCRA, PSI, SMART, superposición ponderada, TOPSIS y VIKOR. Los resultados muestran que las zonas más apropiadas se encuentran al sur de la región Sierra, específicamente, en la provincia de Loja y una parte en las provincias centro norte del país, Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi. Las zonas de mayor interés poseen una valoración sobre el 95% de aptitud, que representa el 1.3% del territorio ecuatoriano.

Las provincias de la Sierra con menor potencial de instalación son Tungurahua, Cañar y Azuay, estas tienen valores de aptitud bajo el 50%. Con respecto a la superficie total del Ecuador continental, las áreas con valoración menor al 75% de aptitud representan el 86.7% del terreno, considerando que gran parte de esta área se encuentra catalogada como restrictiva. La valoración según la escala utilizada para representar los resultados indica que las zonas cumplen o no con los factores y restricciones considerados y se deja a criterio del tomador de decisiones ampliar los análisis de factibilidad y prefactibilidad en los sitios de interés.

En cuanto a los métodos multicriterio y la evaluación de Pearson se concluye que este método permite conocer cuántos píxeles de cada raster tienen la misma valoración, pero esto no necesariamente coincide con la ubicación geográfica que posee cada píxel. Para contrarrestar esta conclusión se procedió a realizar el cálculo de Pearson para una sección más pequeña de valores, sobre un umbral de 75% de aptitud de cada resultado de los métodos de EMC. Con esto se demostró que los valores de correlación cambian, en algunos casos disminuye y en otros aumenta según la relación entre métodos. Un claro ejemplo es la correlación entre TOPSIS y VIKOR, que comparando todos sus píxeles da una correlación sobre el 0.9% y al analizar sobre el umbral de 75% da como resultado una correlación del 0.2%. Razón por la cual se aplica el método de análisis de errores, el cual permite el descarte de métodos que generen mayor ruido y permite definir que el mejor resultado es el promedio de los métodos de EMC VIKOR y OCRA.

BIBLIOGRAFÍA

- Abella, M. (2011). *Sistemas Fotovoltaicos*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Departamento de Energías Renovables, 1-59
- ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad (2017). *Estadísticas del Sector Eléctrico 2017 - Históricos Centrales*. Accedido el 16 de noviembre 2017 en <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/>
- Argel, J. (2012). *Respuesta Espacial de la Productividad al Nivel Freático de la Finca El Paso en el Cultivo de Banano (musa acuminata), Basado en el Uso de Sistemas de Información Geográfica*. Universidad San Francisco de Quito. Accedido el 20 de noviembre de 2017 en <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/1696/1/106542.pdf>
- Barfod, M. B., y Leleur, S. (2014). *Multi-criteria decision analysis for use in transport decision making*. Febrero, 1–75.
- Barredo Cano, J. I. (1996). *Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio*. Madrid, Editorial RA-MA.
- Charabi, Y., y Gastli, A. (2011). *PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation*. *Renewable Energy*. Accedido el 10 de noviembre de 2017 en <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.10.037>
- Church, R. L. (2002). *Geographical information systems and location science*, 29, 541–562.
- CONELEC, Consejo Nacional de Electricidad (2008). *Atlas Solar del Ecuador*. Quito, Ecuador.
- CONELEC, Consejo Nacional de Electricidad (2013). *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022*. Quito, Ecuador. Accedido el 13 de mayo de 2017 en <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00128.pdf>
- CONELEC, Consejo Nacional de Electricidad (2014). *Regulación-CONELEC-02-14*, Quito, Ecuador.
- Dash, P. K., Gupta, N. C., Centre, S. E., Complex, C. G. O., y Delhi, N. (2015). *Effect of*

Temperature on Power Output from Different Commercially available Photovoltaic Modules. Journal of Engineering Research and Applications, 5(1), 148–151.

ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2014a). *Comprender el análisis de la distancia euclidiana.* Accedido el 1 de enero de 2017 en <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-euclidean-distance-analysis.htm>

ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2014b). *Las funciones de transformación disponibles para Re-escalar por función.* Accedido el 1 de enero de 2017 en <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/the-transformation-functions-available-for-rescale-by-function.htm>

ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2014c). *Tamaño de celda de datos ráster.* Accedido el 1 de enero de 2017 en <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/cell-size-of-raster-data.htm>

Gallardo, A., Palme, M., Beltrán, D., Lobato, A., y Villacreses, G. (2016). *Analysis and Optimization of the thermal performance of social housing construction materials in Ecuador.* Congreso Passive and Low Energy Architecture PLEA. Los Ángeles. (p. 7).

Gan, G. (2014). *Dynamic interactions between the ground heat exchanger and environments in earth – air tunnel ventilation of buildings.* Energy and Buildings, 85.

Garni, H. Z., Al, y Awasthi, A. (2017). *Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia.* Applied Energy.

Guevara, A. (2015). *Informe técnico sobre regionalización de la temperatura en el Ecuador.* Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Quito, Ecuador.

IGM, Instituto Geográfico Militar (2014). *Catálogo de objetos de cartografía base.* Quito, Ecuador. Accedido el 12 de mayo de 2017 en <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/aplicaciones/catalogo-de-objetos/>

INER, Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (2015). *Análisis de variables meteorológicas y comportamiento eléctrico de la embarcación solar “Génesis”.* Quito, Ecuador.

IICA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2014). *Uso y acceso a*

las energías renovables en territorios rurales. Accedido el 01 de julio de 2019 en https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewjQ96DnuJXjAhXQqlkKHXC_BY8QFjAAegQICBAC&url=http%3A%2F%2Frevista.iica.int%2F3661e%2F3661e.pdf&usq=AOvVaw1CcLkh0jderT8MnoT_Cdws

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Accedido el 1 de septiembre de 2017 en [https://doi.org/ISBN 978-92-9169-331-3](https://doi.org/ISBN%20978-92-9169-331-3)

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza. Accedido el 10 de septiembre de 2017 en http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

Jahanshahloo, G. R., Lotfi, F. H., y Izadikhah, M. (2006). *An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval data*. Applied Mathematics and Computation, 175(2), 1375–1384.

Janke, J. R. (2010). *Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado*. Renewable Energy, 35(10), 2228–2234.

Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., y Bansal, R. C. (2017). *A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 596–609.

Lencinas, J., y Siebert, A. (2009). *Relevamiento de bosques con información satelital: Resolución espacial y escala*. Quebracho, 17, 101–105.

Lewis, S. M., Fitts, G., Kelly, M., y Dale, L. (2014). *A fuzzy logic-based spatial suitability model for drought-tolerant switchgrass in the United States*. Computers and Electronics in Agriculture, 103, 39–47.

Madić, M., Antucheviciene, J., Radovanović, M., y Petković, D. (2017). *Determination of laser cutting process conditions using the preference selection index method*. Optics and Laser Technology, 214–220.

MAE, Ministerio del Ambiente (2006). *Las áreas protegidas apoyan el cambio hacia un Ecuador verde*. Accedido el 12 de mayo de 2016 en <https://view.joomag.com/sistema->

de-Áreas-protegidas-del-ecuador-biodiversidad-snap/0616787001495839335?page=3

MAE, Ministerio del Ambiente (2013). *Manual para la Gestión Operativa de las Áreas Protegidas de Ecuador*. Quito, Ecuador.

MAE y MAGAP, Ministerio del Ambiente y Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca (2014). *Mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental*. Quito, Ecuador.

Mazón. (2014). *Estudio de la influencia de la refrigeración con aire de forma natural e inducida en el comportamiento de instalaciones fotovoltaicas*. Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.

Melgarejo, M., y Moreno, G. (2007). *Escenarios de aptitud y modelización cartográfica del crecimiento urbano mediante técnicas de evaluación multicriterios*. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica. 120–147.

MEER, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (2013a). *Atlas Eólico del Ecuador*. Quito, Ecuador. Accedido el 15 de mayo de 2016 en <http://190.152.98.92/PORTAL/mapa.rar>

MEER, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (2013b). *Evaluación Rápida y Análisis de Brechas Ecuador*. Ecuador. Accedido el 13 de noviembre de 2016 en http://www.se4all.org/sites/default/files/Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf

MEER, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (2013c). *Programa EURO-SOLAR*. Ecuador.

MEER, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (2016). *Balance Energético Nacional 2016*. Quito, Ecuador.

MICSE, MEER y ARCONEL, Ministerios de Coordinación de Sectores Estratégicos, Ministerio de Electricidad y Energías Renovables y Agencia de Regulación y Control de Electricidad (2016). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2015*. 300. Quito, Ecuador.

Pacheco, J. F., y Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social. CEPAL. Santiago de Chile.

- Panagiotidou, M., Xydis, G., y Koroneos, C. (2016). *Environmental Siting Framework for Wind Farms: A Case Study in the Dodecanese Islands*. Resources, 5(3), 24.
- Parkan, C., Lam, K., y Hang, G. (1997). *Operational competitiveness analysis on software development*. Journal of the Operational Research Society, 48(9), 892–905.
- Pathak, D., Wagner, T., Adhikari, T., y Nunzi, J. M. (2015). *Photovoltaic performance of AgInSe₂-conjugated polymer hybrid system bulk heterojunction solar cells*. Synthetic Metals, 199, 87–92.
- Pértegas-Díaz, S. y Pita-Fernández, S. (2002). *Determinación del tamaño muestral para calcular*. A Coruña. Cad Aten Primaria, 9, 209–211.
- REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2016). *Energías Renovables 2016 - Reporte de la Situación Mundial*. Accedido el 18 de marzo de 2017 en http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_KeyFindings_SPANISH.pdf
- Rocha, W. y Delgado, M. (2010). *Desarrollo de Modelo de crecimiento urbano óptimo para la comunidad de Madrid aplicando métodos de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica*. Geofocus.Rediris. Es, 103–134.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Madrid, Alianza Editorial.
- Sánchez-Juárez A., Santos-Magdaleno R., Ruíz Sánchez T., Martínez Escobar D., Sánchez-Pérez P. A., (2017). *MÓDULOS FOTOVOLTAICOS: NORMAS Y EVALUACIÓN - La importancia de la certificación de módulos fotovoltaicos: Normas y evaluación de la conformidad*. México.
- Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., y García-Cascales, M. S. (2013). *Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 24, 544–556.
- Shemshadi, A., Shirazi, H., Toreihi, M., y Tarokh, M. J. (2011). *A fuzzy VIKOR method for supplier selection based on entropy measure for objective weighting*. Expert Systems with Applications, 38(10), 12160–12167.

- Sun, J. R., Shen, B. G., Sheng, Z. G., y Sun, Y. P. (2004). *Temperature-dependent photovoltaic effects in the manganite-based heterojunction*. Applied Physics Letters, 85(16), 3375–3377.
- Tahri, M., Hakdaoui, M. y Maanan, M. (2015). *The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods: Case study in southern Morocco*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1354–1362.
- Turskis, Z. y Zavadskas, E. K. (2010). *a New Fuzzy Additive Ratio Assessment Method (Aras-F). Case Study: the Analysis of Fuzzy Multiple Criteria in Order To Select the Logistic Centers Location*. Transport, 25(4), 423–432.
- Uyan, M. (2013). *GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, 11–17.
- Varela, E. R. D., Pérez, M. F. M., Valiño, J. A. R. y López, C. J. Á. (2011). *Análisis de la preservación de información en procesos de rasterización mediante uso de datos categóricos e índices de paisaje*. XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos. (pp. 6–8).
- Villacreses, G., Gaona, G., Martínez-Gómez, J. y Jijón, D. J. (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, 109, 275–286.
- WEC, World Energy Council (2013a). *Panorámica Energética Mundial*. Accedido el 20 de abril de 2017 en <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3823/fichero/1.2+Panor%C3%A1mica+Energ%C3%A9tica+Mundial.pdf>
- WEC, World Energy Council (2013b). *Recursos energéticos globales, Encuesta 2013: Resumen*. Accedido el 10 de enero de 2017 en <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/04/Traduccion-Estudio-Recursos-Energeticos1.pdf>
- Watson, J., Hudson, M. (2015) *Regional Scale wind farm and solar farm suitability assessment using GIS-assisted multi-criteria evaluation*. Landscape and Urban Planning, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>

Wysocki, J. J. y Rappaport, P. (1960). *Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion*. *Journal of Applied Physics*, 31(3), 571–578.

Zavadskas, E. K. y Turskis, Z. (2010). *A new additive ratio assessment (ARAS) method in multicriteria decision-making*. *Technological and Economic Development of Economy*, 16(2), 159–172.