

**SELECCIÓN DE CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA EVALUACIÓN
MULTICRITERIO DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA.**

JUAN MANUEL MONTALVO NAVARRETE

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2017**

**SELECCIÓN DE CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA EVALUACIÓN
MULTICRITERIO DE ALTERNATIVAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA.**

JUAN MANUEL MONTALVO NAVARRETE

**Proyecto de Grado para optar el título de
Ingeniero Ambiental**

**Directora
ANA PAOLA LASSO PALACIOS
Ingeniera Sanitaria, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
SANTIAGO DE CALI
2017**

Nota de aceptación

**Aprobado por el Comité de Grado
en cumplimiento de los requisitos
exigidos por la Universidad
Autónoma de Occidente para optar
al título de Ingeniero Ambiental**

PAUL ANDRÉS MANRIQUE

Jurado

ENRIQUE CIRO QUISPE

Jurado

Santiago de Cali, 21 de Marzo de 2017

El presente trabajo está dedicado principalmente, a mis padres, a mis familiares y amigos y profesores, que siempre me apoyaron para alcanzar mi meta de conseguir el título de ingeniero.

De igual manera este trabajo también está dedicado a todos los que buscan una manera de hacer lo correcto por el ambiente, recordando que tenemos una gran responsabilidad con este planeta y las generaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por dejarme llegar hasta donde estoy ahora. Por darme las oportunidades y las fortalezas necesarias para llevar a cabo mis metas. Por enseñarme que la vida tiene buenos y malos momentos, pero que son la suma de todos los que te forman como persona.

A mis padres

Por acompañarme, comprenderme y guiarme todos estos años, orientándome en la vida, con el amor y la sabiduría que solo ellos saben expresar. Siendo ellos la motivación más grande para ser quien soy ahora y ser mi ejemplo de vida.

A mi hermano

Por su interés en formarme para afrontar los retos de la vida. Por enseñarme el significado de perseverancia y tenacidad.

A mis familiares y amigos

Por ser esa compañía incondicional, que sin importar si es tú mejor o peor momento están ahí para recordarte que la vida es la suma de los momentos que compartes con quienes más importa.

A mi directora

Por todo su apoyo y colaboración durante mi formación y la elaboración de este documento

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2 JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES	20
3 OBJETIVOS	25
3.1 GENERAL	25
3.2 ESPECÍFICOS	25
4 MARCO DE REFERENCIA	26
4.1 MARCO TEÓRICO	26
4.1.1 Zonas No Interconectadas (ZNI).	26
4.1.2 Sistema Interconectado Nacional (SIN).	26
4.1.3 Energías Renovables	26
4.1.4 Análisis de decisión multicriterio	27
4.2 MARCO LEGAL	27

4.3 MARCO INSTITUCIONAL	28
4.3.1 Ministerio de Minas y Energías.	28
4.3.2 Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).	28
4.3.3 Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)	29
4.3.4 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE)	29
5 METODOLOGÍA	30
5.1 DOCUMENTACIÓN	30
5.2 DEFINICIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES	30
5.3 DEFINICIÓN DE CRITERIO AMBIENTAL	31
5.4 DEFINICIÓN DE SUBCRITERIOS AMBIENTALES	31
5.5 DEFINICIÓN DE SUBCRITERIOS PARA EL CONTEXTO COLOMBIANO	31
5.6 DEFINICIÓN INDICADORES Y SU APLICABILIDAD DENTRO DEL CONTEXTO COLOMBIANO	32
6 RESULTADOS	33
6.1 IMPACTOS AMBIENTALES	33
6.1.1 Generación de energía fotovoltaica.	33
6.1.2 Generación de energía eólica.	35

6.1.3 Generación por biomasa.	37
6.1.4 Generación hidráulica	38
6.1.5 Generación convencional..	39
6.2 CRITERIO AMBIENTAL	39
6.3 SUBCRITERIOS AMBIENTALES	40
6.3.1 Área intervenida.	41
6.3.2 Cambio climático.	42
6.3.3 Afectación de especies.	42
6.3.4 Generación de gases efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes.	42
6.3.5 Afectaciones paisajísticas.	42
6.3.6 Ruido.	43
6.4 APLICABILIDAD AL CONTEXTO COLOMBIANO	43
6.5 INDICADORES	46
7 CONCLUSIONES	53
8 RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Evaluación del trilema energético para Colombia.	17
Ilustración 2. Distribución de las zonas no interconectadas en Colombia	18
Ilustración 3. Vulnerabilidad ambiental del territorio colombiano para el periodo 2017-2100.	50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de energía en Colombia.	22
Tabla 2. Valores de referencia para la construcción de la matriz de consistencia.	44
Tabla 3. Convenciones de los subcriterios para la evaluación AHP.	44
Tabla 4. Asignación de valores para los subcriterios según los valores de la escala de evaluación.	45
Tabla 5. Matriz de consistencia y porcentajes de representatividad de los subcriterios.	45
Tabla 6. Indicadores definidos para los subcriterio ambientales.	52

LISTA DE ECUACIONES

	Pág
Ecuación 1. Índice de área intervenida.	46
Ecuación 2. Índice de abundancia relativa.	47
Ecuación 3. Índice de circularidad de radio.	48
Ecuación 4. Calculo de emisiones según la actividad.	51
Ecuación 5. Calculo de emisiones CO ₂ durante la implementación de la tecnología..	51

RESUMEN

El acceso a los recursos energéticos tiene una estrecha relación con el desarrollo de una comunidad. La disponibilidad de energía eléctrica permite desarrollar actividades relacionadas con aspectos sociales, económicos, de salud, educación, entre otros. Una limitante en el suministro eléctrico es el acceso a fuentes energéticas confiables. Por tanto, es necesaria la inversión en proyectos enfocados en emplear fuentes alternativas de energía.

El éxito de un proyecto de estas características requiere la inclusión criterios económicos, administrativos, sociales, culturales, técnicos y ambientales en la selección de la mejor alternativa. Por tanto, estos criterios se deben definir de una manera correcta para asegurar una solución de carácter sostenible, compatible con el contexto de implementación. Esta situación impulsa la iniciativa del programa de investigación “Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para zonas no interconectadas de Colombia”, de la Universidad Autónoma de Occidente, de proponer una metodología multicriterio para la selección de alternativas sostenibles de micro redes de suministro de energía eléctrica para zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia.

Este trabajo de grado se enfocó en el criterio ambiental de la metodología. Conforme a este propósito, y para el contexto colombiano, se definió el concepto de criterio ambiental y se identificaron los subcriterios ambientales que contribuyen al correcto desarrollo de un sistema de suministro de energía. Esta definición se construyó a partir de una revisión de los impactos ambientales conocidos para cinco tecnologías: solar fotovoltaico, eólico, biomasa, hidráulica y convencional (diésel). Estas tecnologías están reconocidas como viables en Colombia.

Los subcriterios se clasificaron en las categorías de área intervenida, entendida como el espacio ocupado por el proyecto y su impacto en otras actividades; el cambio climático, enfocándose en la susceptibilidad y los efectos; la afectación de biodiversidad y sus atributos respecto a especies específicas y la generación de gases de efecto invernadero (GEI) y de otros gases. A su vez se realizó el análisis metodológico para definir la representatividad de cada subcriterio frente al criterio ambiental, siendo el subcriterio área intervenida, como el más representativo dentro de las condiciones expuestas por nuestro contexto.

Con este trabajo se hace un acercamiento a las herramientas multicriterio para sistemas de suministro de energía en el contexto colombiano. De forma que las consideraciones adoptadas aquí podrían estar sujetas a cambios dependiendo de los criterios que se integren en la evaluación de un proyecto energético.

INTRODUCCIÓN

La seguridad y la equidad energética es uno de los principales aspectos a los que se enfrentan la mayoría de las naciones a nivel mundial. Esto se debe a que en función del suministro de energía se desarrollan la calidad de vida, la economía, entre otros. Simultáneamente existe un movimiento global orientado al desarrollo sostenible, el cual plantea que los países tomen conciencia respecto a la situación actual del planeta y busquen estrategias para mitigar los efectos negativos de sus actividades buscando preservar recursos para las próximas generaciones. No obstante, no existe una estrategia universal que se adapte a todas las regiones, pues esta estrategia se debe de ajustar a la situación específica de cada circunstancia, considerando sus particularidades y buscando integrar a todos los actores involucrados¹.

Con respecto a los objetivos de desarrollo sostenible, con las conductas actuales, el desarrollo económico, social, de los recursos y el ambiente no es armonioso, evidenciando un desbalance entre los pilares fundamentales para alcanzar dicho objetivo. Es por esto que, mientras una determinada zona se desarrolla, se debe de hacer más énfasis en la forma en la que se realiza la explotación de los recursos y la protección del ambiente para beneficiar la construcción de una sociedad equilibrada². Este desbalance da pie a la contemplación de los diferentes criterios que se podrían abordar con el fin de establecer una selección de proyecto óptima que pueda dar soluciones estables y durables para la problemática energética, incluyendo la representatividad de cada criterio en función de la necesidad a suplir.

Todas estas observaciones se relacionan también con el fenómeno del Cambio Climático. A nivel mundial este fenómeno es uno de los principales factores que impulsan esta iniciativa de búsqueda de estrategias, debido al posible impacto que este tenga sobre los diferentes sectores del desarrollo, siendo el sector energético uno de los principales actores involucrados. Con miras a solucionar este problema, se plantea entonces el uso de tecnologías de generación de energía cuya fuente sea de carácter renovable. Indiscutiblemente la tecnología actual nos permite aprovechar recursos como el sol, el viento, las corrientes de agua, entre otras, ampliando la posibilidad de enriquecer las diferentes matrices energéticas alrededor del mundo. No es coincidencia que para el año 2015, la inversión en tecnologías de generación renovable haya superado, en más del doble, la

¹ GECEVIČIUS, Giedrius; MARKEVIČIUS, Antanas y MARČIUKAITIS, Mantas. Local Sustainable Energy Strategies as Opportunity for European Union Regional Development. En: Environmental Research, Engineering and Management. 2015. vol. 71, no 3, p. 55.

² PENG, Yuan; GUOSHENG, Chen y YANCAI, Ruan. The Research on the Assessment of Sustainable Development of County Economy. En: Energy Procedia. 2011. vol. 5, p. 925.

inversión en tecnologías a base de carbón y gas natural, con un valor de USD \$ 265.8 Billones³. Esto demostrando la necesidad mundial de enriquecer los sistemas de suministro de energía para asegurar el recurso energético.

En Colombia, al igual que en gran parte del mundo, se utiliza como principal recurso energético el petróleo, siendo este la fuente del 37% del total de la energía generada en el país. A este recurso no renovable le siguen otros recursos como el gas natural con un 25% de la energía producida, el carbón con un 11%, y por último está la generación por medio de recursos renovables mediante el aprovechamiento de energía hidráulica con un 26% y la implementación de tecnologías no convencionales con un 0.4% del total de la energía generada en el país⁴.

Además es importante mencionar, que en Colombia existe la ley 1715 de 2014, con la cual se plantea encontrar un nuevo modo de aportar al desarrollo sostenible de Colombia incentivando a disminuir la generación de energía a través de las fuentes no renovables que han sido utilizadas a través de los años y que han traído consecuencias negativas desde el punto de vista ambiental⁵, de igual manera esta ley promueve el mejoramiento del desempeño ambiental del país, articulando las directrices de generación limpia con los interés en disminuir el impacto ambiental de las actividades relacionadas a la generación de energía eléctrica, promoviendo los estudios de impacto ambiental bajo la regulación de la autoridad ambiental pertinente. Al mismo tiempo, Colombia se encuentra bajo el marco internacional de las energías renovables según la ley 1665 del 16 de julio de 2013. Por medio de esta ley, Colombia se acoge al estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables, la cual promoverá el uso sostenible generalizado y reforzado de todas las formas de energía renovable⁶. Esto con el fin de lograr un desarrollo sostenible e integral del país en conjunto con las políticas internacionales respecto a las fuentes de generación renovables,

3 REN21, Renewables. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France, 2016. p. 99.

⁴CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS. Comentario Económico del día: Tendencias Energéticas mundiales y de Colombia, Bogotá D.C: ANIF, 2014. p.2.

⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715. (13, mayo, 2014). Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2014, p. 1.

⁶ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1665. (16, julio, 2013). Por la cual se aprueba el “ESTATUTO DE LA AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (IRENA)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2013, p. 4.

intentando cumplir así con los objetivos de desarrollo establecidos por las Naciones Unidas⁷.

A nivel mundial se reconoce la existencia de recursos energéticos y tecnologías disponibles para suplir las demandas, sin embargo existen ambientales asociados a estos. Según el reporte de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de uso recursos hídricos en el mundo del 2014⁸, existe una estrecha relación entre el recurso hídrico y el energético, pues estos constituyen el núcleo del desarrollo sostenible, y el suministro de estos dos recursos es interdependiente, lo que significa que las decisiones adoptadas en uno de estos factores influyen en el otro, ya sea para bien o para mal. Es entonces así que, al definir esta relación directa, nos damos cuenta que la demanda energética y el aumento indiscutible de esta va a tener un efecto directo sobre los cuerpos hídricos del planeta. A su vez la escasez de agua tendrá un gran impacto ambiental y social, esto limitará inevitablemente el desarrollo de las naciones afectando sustancialmente el estilo de vida que llevamos hoy en día.

Sumado a esto, el cambio climático y los impactos negativos sobre el ambiente que las hidroeléctricas generan como la disminución del caudal de los ríos, variación de la calidad del agua por sedimentación, entre otros, limitan el uso de este recurso. Esta situación plantea la necesidad de buscar nuevas alternativas para la generación de energía conociendo la variedad de recursos que tenemos a disposición dentro del país.

En el caso de los combustibles fósiles existe una problemática asociada a los gases de efecto invernadero, puesto que la quema de estos libera en el ambiente, principalmente los óxidos de carbono, azufre y nitrógeno. Dado que su emisión a la atmosfera desencadena cierto tipo de reacciones que generan cambios físicos y químicos que resultaran en la problemática conocida como el cambio climático y calentamiento global. Además de esto existen ciertos impactos asociados a la generación de energía entre los cuales se debe de considerar, la generación de ruidos al momento de la construcción de la planta generadora, la afectación directa de la fauna y la flora autóctona, más si esta pertenecen a especies amenazadas o están en una zona protegida, la afectación sobre la calidad de vida de las personas o de los aspectos culturales de una comunidad, incluyendo el deterioro de monumentos o zonas con valor arqueológico o antropológico que pertenezcan un patrimonio cultural, el deterioro del valor paisajístico o turístico de

⁷ NACIONES UNIDAS. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible 2017 [en línea]. Naciones Unidas, 2017 [Consultado el 11 de Enero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible>

⁸ NACIONES UNIDAS. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014, París: UNESCO, 2014, p. 6.

la zona de impacto, la alteración de las condiciones biológicas y fisicoquímicas de un cuerpo hídrico y, por último, la alteración de suelos por medio de erosión e incluso eutrofización⁹.

Según lo expuesto anteriormente es fácil darse cuenta que la necesidad de fuentes alternativas energéticas ya es una realidad para el país y el resto del mundo. Los recursos energéticos que poseemos, debido a su carácter finito, no serán suficientes para la gran demanda energética de los años venideros. A su vez los métodos de consecución de energía actuales no solo van a ser insuficientes sino que el uso de estos trae consigo una gran cantidad de impactos ambientales. Esto sumado a la creciente necesidad de llevar el fluido eléctrico a las poblaciones que aún no gozan de este recurso. Sin embargo, el entorno planteado, implementar una solución de suministro de energía eléctrica no es un asunto sencillo. En las condiciones actuales, existe la necesidad de hacer una selección metodológica de carácter sostenible, buscando evaluar de manera objetiva los criterios involucrados dentro de un ámbito definido.

Dentro de este marco, el programa de investigación Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para zonas no interconectadas de Colombia, financiado e impulsado por la Universidad Autónoma de Occidente, propone el desarrollo del proyecto “Metodología multicriterio para la selección de alternativas sostenibles de micro redes de suministro de energía eléctrica para zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia” que busca elaborar una herramienta de selección de alternativas, de carácter multicriterio, que evalúe el desempeño de diferentes tecnologías frente a 4 criterios establecidos. Estos criterios, definidos como técnico, socio-cultural, económico-administrativo y ambiental, permitirían determinar, para un escenario establecido, cual alternativa de generación de energía sería la mejor opción de implementación con miras al desarrollo sostenible de una zona no interconectada del país.

En este sentido, se espera que este proyecto contribuya a contemplar los posibles impactos de un sistema de suministro de energía únicamente en las fases de instalación, operación y mantenimiento, a través de la definición del criterio ambiental, y los subcriterios propios fundamentales dentro del panorama nacional, buscando alimentar la información para el desarrollo de la herramienta, previamente mencionada.

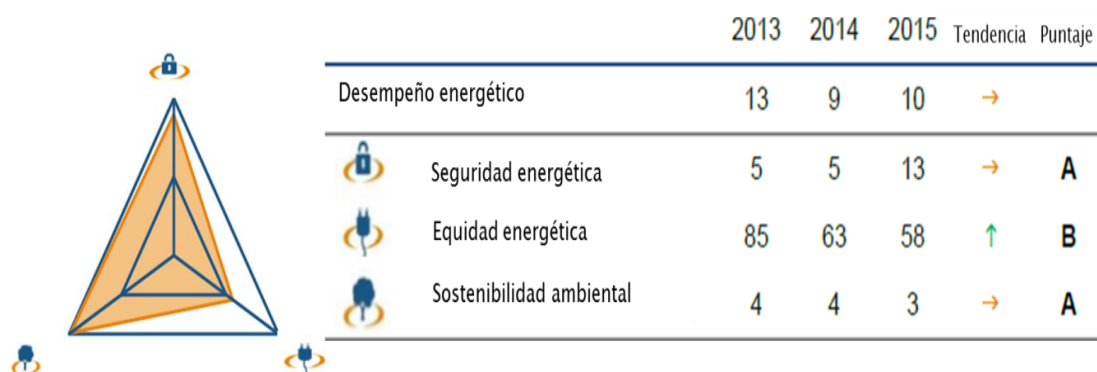
⁹PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Impactos ambientales asociados a la generación de energía eléctrica [en línea]. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017 [Consultado el 14 de Febrero de 2016]. Disponible en Internet: http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/impamb/EIA%20Electrico_archivos/Page1271.htm

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe una estrecha relación entre la generación de energía y el desarrollo de una comunidad, pues este es el sustento para llevar a cabo actividades relacionadas con el desarrollo de los sectores económico, salud, educación entre otros. En Colombia existe una deficiencia en la cobertura de la red eléctrica en muchas áreas, fenómeno que se debe a diferentes factores como el difícil acceso a estos lugares o la deficiencia en las estructuras que transportan este recurso, y a pesar de que el país cuenta con una amplia gama de recursos energéticos, existen poblaciones que están privadas del servicio energético, las cuales se denominan como zonas no interconectadas (ZNI).

Una manera de evaluar el desempeño energético de los países según el Concejo Mundial de Energía es utilizar el índice del trilema energético. Este índice busca evaluar el desempeño de los países respecto a los tres pilares de este, los cuales son seguridad energética, equidad energética y sostenibilidad ambiental. En el año 2015 Colombia ocupó el puesto número 18 dentro de este índice, donde el único factor en el cual tiene falencias es la equidad energética¹⁰ como se puede ver en la gráfica 1.

Ilustración 1. Evaluación del trilema energético para Colombia.



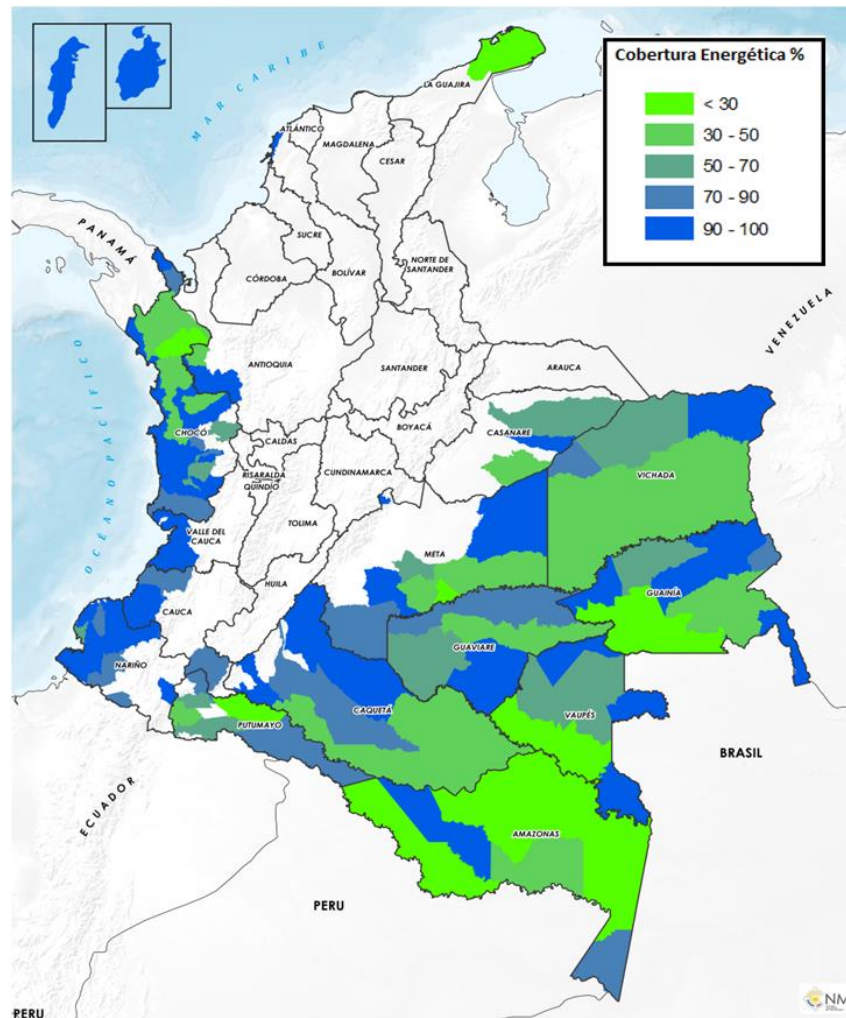
Fuente: WYMAN, Oliver. World Energy Trilemma 2015 Energy Sustainability Index. London: UK: World Energy Council, 2015

Este factor busca representar el porcentaje de la población con acceso al recurso energético en el país. Se puede atribuir el valor de ese puntaje a que en Colombia 65% del país corresponde una zona no interconectada, en donde el recurso

¹⁰ WYMAN, Oliver. World Energy Trilemma 2015 Energy Sustainability Index. London: UK: World Energy Council, 2015, p. 59.

energético puede que sea intermitente o que no esté presente en absoluto¹¹, la distribución de estas zonas se puede apreciar en la ilustración 2.

Ilustración 2. Distribución de las zonas no interconectadas en Colombia



Fuente: INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS (IPSE). Oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia [diapositivas]. Bogotá D.C., Octubre 2015. 26 diapositivas, color.

¹¹ INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS (IPSE). Oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia [diapositivas]. Bogotá D.C., Octubre 2015, Diapositiva 6.

Sin embargo se han intentado implementar soluciones para este problema. Soluciones a partir de la implementación de sistemas de generación aislados, pero en muchas ocasiones los proyectos no han funcionado de manera eficiente o sostenible, teniendo repercusiones notables sobre el ambiente, que en la mayoría de los casos son de difícil mitigación e incluso pueden ser de carácter irreversible.

Factores como la falta de conocimiento respecto a los criterios ambientales de selección, la mala administración del presupuesto y la inevitable y apresurada necesidad de brindar el fluido eléctrico a una comunidad, traen como consecuencia una selección equivocada de la tecnología a implementar. Dicho de otra manera, este tipo de proyectos, orientados a ser soluciones sostenibles, no serán exitosos a menos de que sean considerados los componentes de sostenibilidad implicados sobre sus propias circunstancias.

Hecha esta salvedad, la necesidad de una buena metodología para la selección de alternativas, se vuelve sustancial al momento de dar solución a estas problemáticas nacionales, buscando llevar alternativas sostenibles y funcionales a estas zonas que no gozan del recurso energético. Conforme a esta premisa, los criterios de selección involucrados también deben de ser estudiados y definidos con el fin de mejorar la efectividad de la herramienta, haciendo alusión a los subcriterios que estos puedan contener y a las formas en la que estos podrían ser cuantificados y tengan representatividad dentro del contexto de aplicación. En el caso particular de Colombia, este proyecto resalta la importancia del criterio ambiental y define los subcriterios aplicables, con sus respectivos indicadores y la relevancia que estos tiene dentro de la evaluación metodológica para la selección de una tecnología de generación de energía en concordancia con los demás criterios involucrados dentro del carácter sostenible del proyecto, haciendo énfasis en las fases de implementación, operación y mantenimiento de las tecnologías de interés para este.

2 JUSTIFICACIÓN Y ANTECEDENTES

La generación de energía es un condicionante para el desarrollo de una comunidad. Pero al momento de seleccionar una tecnología que supla esta necesidad se deben de considerar las dimensiones relacionadas al medio en las que se va a desenvolver el proyecto.

Una de estas dimensiones es la dimensión ambiental, la cual tiene una gran importancia, pues los impactos de las actividades humanas y la constante explotación de recursos están acabando con el bienestar ecológico existente y están estrechando los límites de desarrollo de la sociedad. Es de gran importancia para las comunidades encontrar recursos de fácil acceso y de rápida renovación con el fin de asegurar la perdurabilidad de estos elementos para las generaciones futuras. Dentro del sector energético los principales recursos utilizados actualmente son de carácter finito y tienen grandes repercusiones sobre el medio ambiente, siendo la alteración del ciclo del carbono y el aporte de gases efecto invernadero los más grandes impactos asociados a ellos. Para el 2012 la región de América latina y el Caribe representaba el 9% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a sus actividades, y las emisiones de CO₂ bien podrían disminuir en un 30%, o aumentar más de un 75% para el 2050, según sean las acciones tomadas respecto a la problemática.¹²

El desarrollo en tecnologías energéticas ha permitido el aprovechamiento de otros recursos, con características renovables, para la generación y distribución de energía, mitigando así el impacto de recursos como los combustibles fósiles. Pero aun así existen otro tipo de barreras asociados a la implementación de estas tecnologías, las cuales tiene repercusiones a nivel ambiental, social y económico. Fenómenos como las sequias o las lluvias torrenciales pueden representar un riesgo para el sector energético en el país de igual manera que lo puede ser la destinación del recurso hídrico para el consumo, la generación de energía o la producción agrícola¹³.

De manera análoga, limitantes como las políticas nacionales, la aceptación social, el impacto ambiental, las limitaciones económicas y financieras, entre otros, hacen cada vez más difícil la selección de alternativas para suministrar el recurso energético a una población que carece de este. Con el fin de hacer una correcta selección de alternativas es entonces fundamental entender todas y cada una de las barreras anteriormente mencionadas y evaluarlas como criterios, con carácter

¹² WYMAN, Oliver. World Energy Trilemma 2015 Energy Sustainability Index. London: UK: World Energy Council, 2015, p. 24.

¹³ *Ibíd.*, p.24.

definitivo, al momento de hacer la toma de decisiones para la implementación de un proyecto.

Pero ¿hasta qué punto el criterio ambiental tiene una mayor importancia frente a los otros criterios involucrados al momento de selección de alternativas? Para resolver este interrogante entonces se deben de definir los subcriterios ambientales que tengan la mayor representatividad dentro de las alternativas de selección. Una mala articulación de este criterio con los demás, puede llevar un proyecto de estas características al fracaso, al no considerar la sostenibilidad desde la dimensión ambiental. Un correcto uso de estos criterios en armonía con la metodología de selección serán entonces los principales impulsores de alternativas renovables para suplir la necesidad energética del país.

En Colombia, la implementación de tecnologías de generación de energía por medio de recursos renovables ha sido una opción para suplir de energía las zonas que no están contempladas dentro del sistema interconectado nacional. Pero como se ha mencionado antes, muchos no han funcionado correctamente pues no se han considerado al momento de tomar decisiones, los contextos, como determinantes para la selección objetiva de una tecnología para generación de energía.

Con la finalidad de cumplir con la agenda establecida por las Naciones Unidas en Colombia se elaboró la ley 1715 de 2014, cuyo objetivo principal es promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda¹⁴. Por consiguiente se puede ver que el país tiene una iniciativa para promover soluciones, no obstante, este incentivo puede verse mal implementado si no se considera el alcance de los proyectos dentro de las condiciones del país. Se debe agregar además, que para lograr una buena implementación del proyecto también deben de estar definidas las posibles alternativas aplicables en el marco nacional.

¹⁴ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1715. (13, mayo, 2014). Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2014, p. 1.

Conforme se dijo anteriormente, las formas de generación de energía en el país son catalogadas como convencionales y no convencionales, según la forma de emplearse, y a su vez estas se dividen entre renovables y no renovables, según sea la fuente del recurso energético establecido, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Tipos de energía en Colombia.

Hídrica						Combustibles-fósiles	Fuente convencional
Solar	Eólica	PCH's	Biomasa	Geotérmica	Mareo motriz	Nuclear	Fuente no convencional
Renovables						No renovables	

Fuente: CORPOEMA, Consorcio Energético. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Bogotá D.C., Diciembre, 2010, vol. 2, p. 83.

Para los propósitos de este proyecto se consideraron únicamente las fuentes solar, eólica, PCH's y biomasa como renovables y como fuente convencional se hará referencia a las plantas que funcionan con diésel.

Desde el punto de vista ambiental, existen diferentes limitantes para la aplicación de las tecnologías que llevan al fracaso de los proyectos. Un estudio realizado en Colombia, muestra que dentro del marco sociopolítico, la ausencia de políticas que apoyen o restrinjan los proyectos de generación por medios no convencionales con fuentes renovables, además de la conformidad que la población tenga con estos, se ha vuelto un limitante para el uso de este tipo de recursos como fuentes generadoras de energía. Otro factor involucrado es el sector financiero, pues a pesar de que la falencia no se encuentra en la viabilidad financiera, se ve que el principal problema está en la falta de conocimiento dentro del mercado de las energías renovables, lo que lleva a malas decisiones e incluso al hecho de no invertir por miedo de no tener retribuciones. Es también un hecho que la poca aceptación para el uso de estas tecnologías es la falta de conocimiento sobre estos métodos de generación de energía, haciendo énfasis en la poca documentación que tienen las comunidades con este tipo de recursos energéticos¹⁵.

¹⁵ ROSSO CERÓN, Ana Maria y KAFAROV, Viatcheslav. Barriers to social acceptance of renewable energy systems in Colombia. En :Current Opinion in Chemical Engineering. Noviembre, 2015, vol. 10, p. 103-110 [Consultado 12 de febrero de 2016]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339815000519>

Por otra parte, a pesar de la poca familiaridad que se tiene con el tema dentro del ámbito nacional, se puede evidenciar que el país no es ajeno a esta temática, múltiples estudios se han realizado con el fin de determinar el potencial de generación de energía por medio de recursos alternativos en los que destacan la generación por medio del recurso eólico, hídrico y solar.

Estudios realizados en el territorio nacional demostraron el alto potencial energético por medio de generación eólica en zonas no interconectadas, siendo San Andrés islas la más representativa de estas, con una de las mejores viabilidades económicas para la implementación de un proyecto de generación eólica para el suministro de energía¹⁶.

A su vez en Colombia el aprovechamiento del recurso solar data desde mediados del siglo pasado, con la implementación de calentadores solares a las afueras de las casas de los empleados de las bananeras en Santa Marta. Sin embargo no fue hasta 1980 que se implementaron las primeras tecnologías fotovoltaicas en el país con el Programa de Telecomunicaciones Rurales de Telecom, el cual trajo como resultado la implementación de 2950 sistemas fotovoltaicos para el año 1983. Estos proyectos trajeron consigo investigaciones que de la mano del Instituto Hidrológico, Meteorológico y de Estudios Ambientales (IDEAM), dieron como resultado documentos como el Atlas de Radiación Solar de Colombia, documento que evidencio el alto potencial energético que tiene el país¹⁷, especialmente en la zona de la Guajira, la cual particularmente tiene un alto déficit en la cobertura del servicio energético.

De manera semejante Colombia tiene un gran potencial hídrico. El país ha sido catalogado como el cuarto país con mayor capacidad hidráulica, siendo poseedor de un caudal, en sus principales ríos, de 52075 m³/s, un área total de 1.141.748 km² y en términos de potencial eléctrico de 93.085 MW del cual se encuentra instalado solo 7.700 MW y se estima que para pequeñas centrales hidroeléctricas existe un potencial global de 25.000 MW del cual se han instalado aproximadamente 250 MW¹⁸.

Respecto al uso de la generación convencional para el año 2009, las ZNI contaban con una capacidad instalada de 109.000 kW. Las tecnologías con diésel

¹⁶ REALPE JIMENEZ, Alvaro; DIAZGRANADOS, Jorge A. y ACEVEDO MORANTES, Maria Teresa. Electricity generation and wind potential assessment in regions of Colombia. *En*: Dyna. 2012. vol. 79, no 171, p. 121.

¹⁷ RODRÍGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. *En*: Revista de ingeniería. 2008. vol. 28, p. 86.

¹⁸ CORPOEMA, Consorcio Energético. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Bogotá D.C., Diciembre, 2010, vol. 2, p. 185.

representaban el 96,3% del total de la capacidad de generación y el 3,7% restante correspondía a pequeñas centrales hidroeléctricas, lo que demuestra la poca diversificación tecnológica que se tenía en estas zonas¹⁹.

La mala articulación entre los diferentes criterios involucrados, la falta de conocimientos en el área y la mala gestión de los recursos son unos de los principales limitantes para la implementación de tecnologías generadoras de energía por medios alternativos renovables. El desarrollo de una metodología que contemple estos diversos criterios y genere un medio objetivo de selección de alternativas será entonces una de las herramientas que permitan solucionar estos limitantes y ayude a alcanzar los objetivos de desarrollo que plantean los diferentes órganos gubernamentales del país.

¹⁹ FLÓREZ ACOSTA, Jorge Hernán; TOBÓN OROZCO, David Fernando y CASTILLO QUINTERO, Gustavo Adolfo. ¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia? un análisis de la estructura institucional. Bogotá D.C., Enero-Junio 2009. vol. 22, no. 38, p.228.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Seleccionar los criterios ambientales para la evaluación metodológica de alternativas de suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas de Colombia.

3.2 ESPECÍFICOS

- Identificar las particularidades que tengan los proyectos relacionados a la implementación de un sistema de generación de energía por medio de recursos renovables en conjuntos sociales aislados.
- Definir la prioridad de los subcriterios ambientales dentro de una metodología multicriterio de selección de alternativas.
- Establecer las variables del criterio ambiental aplicables al contexto colombiano.

4 MARCO DE REFERENCIA

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Zonas No Interconectadas (ZNI). Según el artículo 1 de la ley 855 de 2003, para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio de energía eléctrica se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN).²⁰

4.1.2 Sistema Interconectado Nacional (SIN). Según el artículo 11 de la ley 143 de 1994, es el sistema compuesto por los siguientes elementos conectados entre sí: las plantas y equipos de generación, la red de interconexión, las redes regionales e interregionales de transmisión en, las redes de distribución, y las cargas eléctricas de los usuarios.²¹

4.1.3 Energías Renovables. Según el Instituto Tecnológico de Canarias, las energías renovables son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua, como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de la Luna. Son fundamentalmente la energía hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica y las marinas.²²

²⁰ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 855. (18, diciembre, 2003). Por la cual se definen las zonas no interconectadas. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. p. 1.

²¹ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 143. (11, julio, 1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. 2 p.

²² INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS, S.A. Energías renovables y eficiencia energética. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008. 148 p.

4.1.4 Análisis de decisión multicriterio. Es una herramienta que se utiliza en situaciones en las que un decisor se encuentra en disposición de escoger entre varias posibilidades, o alternativas, las cuales en conjunto adoptan el nombre de Conjunto de elección. Con el fin de escoger una de las posibilidades de este conjunto el decisor tendrá que evaluar diferentes puntos de vista, denominados criterios, los cuales deberán ser parcialmente contradictorios, en el sentido de que si el decisor adopta uno de estos criterios no se escogerá la misma opción que se escogería basado en otro de los criterios.²³

4.2 MARCO LEGAL

En Colombia la normatividad del sector de servicios públicos energéticos se rige bajo la ley 143 de 1994, la cual establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, concede autorizaciones y dicta otras disposiciones en materia energética. Esta ley establece los parámetros que se debe seguir a nivel nacional para hacer interconexiones al SIN.

Pero los ZNI que no se encuentran contemplados bajo esa normativa están amparados bajo la ley 855 de 2003, la cual define el concepto de zona no interconectada y cuáles van a ser los recursos destinados a este sector de la población.

A su vez con el fin de impulsar la implementación de tecnologías de generación alternativa de energía, en el país, se creó la ley 1715 de 2014, bajo la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Haciendo énfasis en su participación en las ZNI y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo sostenible.

Así que bajo la jurisdicción de estas y otras normativas nacionales se debe de tener en cuenta una articulación con la investigación a realizar para no establecer criterios que vayan en contra de lo que estipula la normativa nacional respecto a la implementación de tecnologías para la generación de energía.

²³ BARBERIS, Gabriela Fernández y RÓDENAS, M^a del Carmen Escribano. La Ayuda a la Decisión Multicriterio: orígenes, evolución y situación actual. En: VI Congreso Internacional de Historia de la Estadística y de la Probabilidad. Valencia. 2011.

4.3 MARCO INSTITUCIONAL

4.3.1 Ministerio de Minas y Energías. El Ministerio de Minas y Energía se crea a raíz de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), una época de conflicto internacional durante la cual surgieron problemas de orden económico que repercutieron directamente en el progreso de Colombia. Ante esta situación, el Gobierno Nacional diseñó un plan para la defensa y el fomento de las industrias existentes, buscando el aprovechamiento de los recursos naturales y el desarrollo de otras fuentes de producción.

Sus principales objetivos son:

- Garantizar el abastecimiento de hidrocarburos y energía eléctrica.
- Crear una institucionalidad y mecanismos que garanticen una minería responsable y competitiva.
- Ampliar el acceso de la población más vulnerable al servicio de energía eléctrica y gas
- Impulsar la integración energética regional

4.3.2 Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). La Unidad de Planeación Minero Energética UPME es una Unidad Administrativa Especial del orden Nacional, de carácter técnico, adscrita al Ministerio de Minas y Energía, regida por la Ley 143 de 1994 y por el Decreto número 1258 de Junio 17 de 2013.

La UPME, tendrá por objeto planear en forma integral, indicativa, permanente y coordinada con los agentes del sector minero energético, el desarrollo y aprovechamiento de los recursos mineros y energéticos; producir y divulgar la información requerida para la formulación de política y toma de decisiones; y apoyar al Ministerio de Minas y Energía en el logro de sus objetivos y metas.

4.3.3 Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) nace en 1994, cuando el congreso de la República, mediante las leyes 142 y 143, creó las comisiones de regulación, con el fin de regular las actividades de los servicios públicos domiciliarios.

En ese mismo año el Presidente de la República, mediante el Decreto 1524, estableció que la Comisión de Regulación de Energía y Gas ejercerá las funciones que señala el artículo 23 de la Ley 143 de 1994 y, luego mediante el Decreto 2253 delegó en la Comisión de Regulación de Energía y Gas las funciones presidenciales a las que se refiere el artículo 68, y las disposiciones SC concordantes de la Ley 142 de 1994.

La CREG es una entidad eminentemente técnica y su objetivo es lograr que los servicios de energía eléctrica, gas natural, gas licuado de petróleo (GLP) y combustibles líquidos se presten al mayor número posible de personas, al menor costo posible para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas que permita garantizar calidad, cobertura y expansión.

4.3.4 Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE). Es el instituto encargado de mejorar las condiciones de vida de las comunidades, a través de la identificación, elaboración, promoción y viabilización de proyectos para llevar energía a las localidades que no la poseen o donde la prestación del servicio es deficiente.

5 METODOLOGÍA

Este trabajo de grado se encuentra articulado al programa de investigación “Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para zonas no interconectadas de Colombia”. En la etapa inicial del programa, se desarrolla un proyecto que busca proponer una metodología, de carácter multicriterio, para la selección de alternativas de generación de energía para zonas no interconectadas de Colombia. Para la selección de las alternativas, se establecieron 4 criterios, que buscan otorgar el carácter de sostenibilidad del proyecto y que serán evaluados durante las fases de implementación, operación y mantenimiento de las tecnologías. Estos criterios fueron establecidos en las siguientes categorías: criterio técnico, criterio económico-administrativo, criterio socio-cultural y el criterio ambiental. Estos criterios fueron definidos con el propósito de evaluar objetivamente el desempeño de cada una de las alternativas dentro del entorno establecido, para lograr asignar la mejor opción de selección acorde con los objetivos de sostenibilidad enmarcados por el proyecto. En función de los propósitos del proyecto, este trabajo abarca el criterio ambiental. A continuación se detallan las actividades desarrolladas.

5.1 DOCUMENTACIÓN

Esta actividad hace referencia a la revisión de literatura, en donde se hace la recopilación de la información pertinente acerca de los conceptos básicos, las experiencias locales, nacionales e internacionales, además de la definición y articulación de criterios previamente definidos entorno a los aspectos intrínsecos de la metodología multicriterio.

5.2 DEFINICIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES

Durante esta etapa, y con el propósito de definir los aspectos propios del componente ambiental y la implementación de las diferentes alternativas, se realizó una identificación de impactos ambientales conocidos para estas tecnologías. Dentro de esta identificación se consideraron aquellos impactos, directos o indirectos, derivados de las fases de instalación, operación y mantenimiento, que tuvieran una repercusión en el medio biótico y/o abiótico, para cada uno de los escenarios de generación eléctrica. Siendo la finalidad de esto, lograr identificar los factores que se comparten dentro de cada escenario y establecer las condiciones estándar que permitieron concretar los criterios ambientales, que tienen mayor relevancia dentro del contexto Colombiano. Estos impactos fueron tomados en cuenta de una manera general para todas las

tecnologías que entraron en consideración y dieron paso para establecer los subcriterios de mayor relevancia que puedan afectar el marco ambiental.

5.3 DEFINICIÓN DE CRITERIO AMBIENTAL

Consiste en la definición del criterio ambiental aplicable al contexto colombiano con el fin de hacer el correcto desarrollo de la metodología multicriterio. Se especificaron las limitaciones que se encuentran dentro del escenario nacional, en el caso de que estas se presenten. Con la definición de este criterio se establecieron cuáles eran los factores considerados dentro de este y se definió la probabilidad de interrelacionar estos factores con los otros criterios involucrados.

5.4 DEFINICIÓN DE SUBCRITERIOS AMBIENTALES

Con el fin de determinar la ponderación ambiental global, relacionada a la metodología de selección, se relacionaron los subcriterios, derivados de la revisión de impactos ambientales, con cada una de las tecnologías. Resaltando así cuál de las tecnologías contempladas tiene un mejor desempeño ambiental antes de hacer la selección de la tecnología. Con el fin de establecer una forma de evaluar el rendimiento de cada tecnología frente a los subcriterios se propuso la selección de indicadores representativos que ayudarían a esta labor.

5.5 DEFINICIÓN DE SUBCRITERIOS PARA EL CONTEXTO COLOMBIANO

En vista que la aplicación de subcriterios no es en su totalidad acorde a las características propias del país, ni de la configuración del proyecto, se escogerán los subcriterios que tengan mayor representatividad dentro del criterio ambiental. En esta parte se buscó articular los subcriterios en función de los demás criterios establecidos dentro del marco del proyecto para tener una evaluación global de las alternativas de generación de energía aplicables.

Por medio de una evaluación objetiva, con la metodología de proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés)²⁴, se estableció el peso de cada subcriterio ambiental, teniendo en cuenta cuál de estos es más representativo o comprende mayores afectaciones dentro del marco ambiental colombiano.

²⁴ SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. En: International journal of services sciences. 2008. vol. 1, no 1, p. 85.

5.6 DEFINICIÓN INDICADORES Y SU APLICABILIDAD DENTRO DEL CONTEXTO COLOMBIANO

Una vez definidos los subcriterios ambientales, se establecieron los indicadores aplicables dentro del medio. Estos indicadores deben de ser fáciles de evaluar con el fin de que la información disponible sea suficiente para hacer la valoración ambiental de la zona en la que se implementarán las tecnologías. A su vez deberán de ser representativos del subcriterio al que están relacionados.

6 RESULTADOS

6.1 IMPACTOS AMBIENTALES

Acorde con los fuentes de generación avaladas en el país, se consideraron las tecnologías solar fotovoltaica, eólica, pequeña central hidroeléctrica (PCH's) y biomasa como renovables y como tecnología de generación convencional se hizo referencia a las plantas de generación con diésel. Los impactos ambientales de cada una de las tecnologías se detallan a continuación.

6.1.1 Generación de energía fotovoltaica. Debido a su madurez tecnológica, la generación fotovoltaica con cristales de silicio es una solución llamativa para la generación de energía eléctrica en países con gran cantidad de recurso solar, a pesar de su baja eficiencia de conversión de energía. Es por esto que la energía solar tiene el índice de mayor inversión en el año 2016 con un valor de USD \$ 81 billones, consiguiendo una tendencia de implementación exponencial a nivel mundial, en la que Colombia aumento su capacidad instalada para ese año en 0.6 Gigavatios²⁵. Sin embargo las implicaciones ambientales de este son poco conocidas.

Se encontró que el principal impacto ambiental de esta tecnología es derivado de la intensidad en el uso del suelo. Debido a sus bajas eficiencias de conversión de energía, la implementación de estos instrumentos demanda un extenso uso de área para generar una cantidad considerable de energía. A partir de este uso de área se pueden establecer dos conceptos, la transformación métrica y la ocupación métrica, el primero haciendo referencia a la acción inicial de cambiar la naturaleza física del suelo y el segundo a la medición del área utilizada dentro un marco de tiempo especificado²⁶. Derivado de esta ocupación de área se puede encontrar un cambio en la vegetación bajo el arreglo solar, en donde un estudio demostró que la vegetación directamente bajo los paneles fotovoltaicos era cuatro veces menor que en las brechas entre estos y en una zona de control que se definió para el estudio²⁷.

²⁵ REN21. Op Cit. p.103.

²⁶ TURNEY, Damon y FTHENAKIS, Vasilis. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. vol. 15, no 6, p. 3264.

²⁷ ARMSTRONG, Alona; OSTLE, Nicholas y Whitaker, Jeanette. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. En: Environmental Research Letters. Julio, 2016. vol. 11, no. 7, p. 074016.

De igual manera, y como consecuencia del uso del área, se pueden encontrar afectaciones de la vida salvaje y el hábitat. Uno de estos impactos está relacionado a una especie de efecto barrera que se crea por las estructuras de soporte y protección del arreglo solar, el cual limita el movimiento de las especies animales dentro del hábitat, alterando factores como puntos de refugio, ciclo predador presa, disponibilidad de alimento, entre otros²⁸. Un estudio logro cuantificar la mortalidad de aves e insectos a casusa de esta tecnología, encontró que murieron 6 aves por año y cientos de insectos eran incinerados a causa de la intensa luz reflejada cada hora. Se concluyó que el impacto era bajo comparado con otras actividades humanas²⁹.

Hay que mencionar además, que dentro de un componente geo-hidrológico también se pueden esperar impactos a causa de la manera en la que se incorpora la estructura de esta tecnología. La interrupción de la infiltración de las aguas lluvias puede alterar la taza de infiltración del agua en el suelo, aumentando las escorrentías, y como consecuencia, haciendo que las cargas de turbiedad y sedimentos aumenten en los cuerpos hídricos cercanos. A su vez, se está reduciendo el área de suelo con la capacidad de asimilar contaminantes atmosféricos o que traen consigo las diferentes precipitaciones, alterando los procesos de reciclaje de nutrientes y afectando los ciclos biogeoquímicos, particularmente los procesos de secuestro de carbono. La presencia de los arreglos solares también favorece la erosión de los suelos, lo que puede iniciar o magnificar procesos de desertización³⁰.

Por otra parte, y como consecuencia de la implementación de esta tecnología, se evidencia una correlación con la calidad ambiental, representado en la salud y bienestar de las personas. Las emisiones de NO_x, SO₂, material particulado y otros contaminantes atmosféricos se ven notoriamente reducidos en comparación con la generación tradicional, teniendo un gran impacto en la salud de las personas. Simultáneamente, también se identifica una considerable reducción en la emisión de otros gases como CO y CO₂, convirtiéndose en una alternativa para luchar contra el cambio climático³¹.

²⁸ TURNEY, Damon y FTHENAKIS, Vasilis. Op. cit., p. 3265.

²⁹ MCCRARY, M. D., *et al.* Wildlife interactions at Solar One. Final report. Los Angeles: County Natural History Museum Foundation, CA (USA). Section of Ornithology, 1984.

³⁰ TURNEY, Damon y FTHENAKIS, Vasilis. Op. cit., p. 3266.

³¹ TURNEY, Damon y FTHENAKIS, Vasilis. Op. cit., p. 3267.

6.1.2 Generación de energía eólica. Algo similar ocurre con la energía eólica, que debido a su alto nivel de madurez tecnológica, para el año 2015 representaba uno de los principales roles en el abastecimiento de energía en muchos países de la Unión Europea, con una capacidad instalada capaz de suplir la demanda energética en un 11.4% en un año con comportamientos normales en el viento³². Es por esto que muchos países están considerando la viabilidad de enriquecer su matriz energética con el recurso eólico, no obstante se encuentra que el principal limitante es la preocupación que se tiene respecto a las consecuencias ambientales relacionadas a estas turbinas eólicas.

Se interpreta que el desempeño ambiental de esta tecnología se ve afectado en diversas áreas, como lo son los efectos sobre los animales, deforestación y erosión del suelo, Ruido, Impacto visual, y el cambio climático. Se pudo evidenciar, respecto a los efectos sobre los animales, que dependiendo de la configuración del sistema eólico, costa adentro o costa afuera, se tiene un notorio impacto sobre aves migratorias, murciélagos y especies marinas, induciendo sobre estos factores de riesgo e incluso mortalidad³³.

Así, por ejemplo, un estudio realizado en los Estados Unidos demostró que las tasas de mortalidad por colisiones con las turbinas eólicas no eran sucesos triviales y que para las 1000 instalaciones costa adentro que se estudiaron se obtenía una media de 234.012 aves muertas por año³⁴, exaltando la causalidad que existe entre la presencia de las turbinas y la mortalidad de las aves. Por otro lado también se tiene una correlación entre la implementación de turbinas eólicas y la mortalidad de especies de murciélagos, en donde se encontró un estimado donde se expresa que al año morían alrededor de 11.6 murciélagos por cada Megavatio de potencia instalada³⁵.

Por otra parte se encontró evidencia de que las instalaciones costa afuera tiene un impacto sobre la fauna marina aumentando la presencia de especies bentónicas, y debido a este fenómeno también la presencia de especies de peces³⁶. De igual modo también se evidencio que el ruido generado por la construcción y operación

³² REN21. Op. cit., p. 78.

³³ DAI, Kaoshan, *et al.* Environmental issues associated with wind energy—A review. En: Renewable Energy. 2015, vol. 75, p. 912.

³⁴ LOSS, Scott R.; WILL, Tom y MARRA, Peter P. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. En: Biological Conservation. 2013. vol. 168, p. 208.

³⁵ HEIN, CRIS D. y SCHIRMACHER, MICHAEL R. Impact of wind energy on bats: a summary of our current knowledge. En: Human–Wildlife Interactions. 2016. vol. 10, p. 20.

³⁶ NATURSTYRELSEN, Skov-og, *et al.* Danish offshore wind-Key environmental issues. DONG energy. Dinamarca, Noviembre, 2006.

de estas instalaciones puede tener repercusiones sobre algunas especies animales³⁷.

Hay que mencionar además que se encontró otro impacto relevante, para nuestro contexto, producto de esta tecnología, el ruido. El ruido tiene dos principales campos de afectación, uno corresponde a la inconformidad de las personas derivada del molesto ruido de operación de la tecnología, y el otro como se mencionó antes a la afectación de las especies de peces. Este ruido puede presentarse en dos formas, el ruido tonal y el ruido de banda ancha³⁸. Estudios recientes demostraron que la presión acústica a una distancia de 40 metros desde el aerogenerador lograba obtener unos valores en un rango de 50 a 60dBA, y que el valor de estos puede aumentar dependiendo de la extensión del parque eólico³⁹.

A causa de este ruido se pueden crear barreras sociales para la aceptación de esta alternativa de generación de energía, en lo que se manifiesta como el síndrome SPAN (Si, pero aquí no), adaptado del inglés NIMBY (Not in my backyard)⁴⁰. Todas esas consideraciones se relacionan también con el impacto visual de la tecnología. Este impacto está asociado al movimiento y a la magnitud de la extensión del parque eólico. Un estudio demostró que las personas con mayor afinidad a los temas ambientales lograban pasar de lado este impacto, mientras que los que no oponían mayor resistencia a la implementación de estos proyectos⁴¹.

Habrá que decir también que dependiendo de la zona donde se implemente, el tamaño y la capacidad de la planta también se pueden encontrar afectaciones directas sobre el microclima efecto de la operación de las turbinas⁴². Sin embargo existen posibles configuraciones en las que estos cambios pueden ser beneficiosos o en alguna medida mitigables, sin embargo el conocimiento de esta

³⁷ KIKUCHI, Ryunosuke. Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. En: Marine pollution bulletin. 2010. vol. 60, no 2, p. 176.

³⁸ DAI, Kaoshan, *et al.* Op. cit., p. 914.

³⁹ SUN, C. S., *et al.* Environmental impact of wind power generation projects. En: J. Electr. Power Sci. Technol. 2008. vol. 23, p. 21.

⁴⁰ KROHN, Søren y DAMBORG, Steffen. On public attitudes towards wind power. En: Renewable energy. 1999. vol. 16, no 1, p. 959.

⁴¹ EK, Kristina. Public and private attitudes towards "green" electricity: the case of Swedish wind power. En: Energy Policy. 2005, vol. 33, no 13, p. 1687.

⁴² ZHOU, Liming, *et al.* Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over western Texas. En: Climate dynamics. 2013. vol. 41, no 2, p. 321.

información puede prestarse para hacer el correcto uso de la tecnología y plantear los posibles controles para asegurar una sostenibilidad a largo plazo⁴³.

Cabe resaltar que también se hallaron otros impactos asociados a la fase de construcción del parque eólico, significativamente ligados a la deforestación y la erosión de suelos. Al momento de la construcción se debe hacer el levantamiento de la capa vegetal con el fin de adecuar el suelo para la implantación de los mástiles, esto puede favorecer la erosión de los suelos. Además durante las actividades de mantenimiento, específicamente el uso de aceites para la maquinaria, se podría presentar el caso del derrame de esta sustancia, que al alcanzar el suelo, o la las aguas marinas sí son tecnologías costa afuera, pueden desencadenar consecuencias ambientales desastrosas, de las cuales los ecosistemas podrían tardar mucho tiempo en recuperarse⁴⁴.

6.1.3 Generación por biomasa. La investigación realizada reporto que el aprovechamiento de la biomasa como recurso energético tiene diversos orígenes y métodos de aprovechamiento, entre estos los procesos de combustión, digestión anaerobia para producir metano y la producción de biodiesel. En Colombia las principales fuentes de biomasa son los residuos forestales y agrícolas, residuos biodegradables de las actividades humanas y los cultivos energéticos, aprovechados tradicionalmente por métodos de combustión⁴⁵.

A su vez la biomasa residual se compone de tres sectores, el sector agrícola, que comprende los residuos de cosechas y los agroindustriales; el sector pecuario, con aprovechamiento de estiércol bovino, porcino y avícola; y el sector de residuos sólidos orgánicos urbanos provenientes de plazas de mercados, centros de abastos y residuos de podas⁴⁶.

El aprovechamiento de este recurso, a pesar de su carácter renovable, trae consigo muchos impactos sobre el ambiente, los cuales pueden variar según sea la metodología de aprovechamiento del recurso y la procedencia de este. En el caso del aprovechamiento de biomasa a partir de residuos forestales, la extracción de esta biomasa del medio produce una alteración en el reciclaje de nutrientes del suelo, la formación de humus y los procesos de infiltración y escorrentía del agua,

⁴³ ROY, Somnath Baidya y TRAITÉUR, Justin J. Impacts of wind farms on surface air temperatures. En: Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010. vol. 107, no 42, p. 17902.

⁴⁴ DAI, Kaoshan, *et al.* Op. cit., p. 913.

⁴⁵ CORPOEMA. Op. cit., p. 91.

⁴⁶ ESCALANTE, H., *et al.* Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga, Colombia. Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2011.

lo que tiene como resultado un cambio en la micro flora y fauna del sistema ecológico y en la regulación hídrica de la zona⁴⁷.

Respecto a las políticas de sostenibilidad ambiental, la mayoría de impactos dependen de la procedencia de la biomasa, donde si la biomasa es de origen forestal, el uso no mesurado del recurso puede repercutir en mayor emisión de gases de efecto invernadero, y menor secuestro de carbono por parte de la biota vegetal⁴⁸. De igual manera puede haber conflictos con la producción de alimentos por lo que la procedencia del recurso es un limitante para la generación de energía con biomasa.

6.1.4 Generación hidráulica. Según la información analizada la generación hidráulica, con micro-centrales o pequeñas centrales, es una solución llamativa para el país debido a su gran riqueza hídrica. Esta tecnología supone un impacto ambiental mínimo, pero se han encontrado escenarios en los que la implementación de esta tecnología tiene repercusiones sobre el medio principalmente sobre la cobertura vegetal de la zona de operación. Un estudio de impacto ambiental realizado en Alejandría, Antioquia, demostró que la remoción de la capa superficial del suelo para obras constructivas tenía repercusiones sobre la flora y fauna autóctona de la zona, pues las afectaciones del terreno en donde se hacen estas actividades son irreversibles, acumulativo y persistentes en el tiempo⁴⁹.

En relación con el ecosistema fluvial, la configuración de la central hidroeléctrica influye en el tipo de impactos que se puedan tener sobre las características del cuerpo hídrico, donde los impactos pueden variar entre afectaciones de la movilidad de especies acuáticas, cambios en el régimen hidrológico, detracción del flujo sobre la biocenosis acuática, cambio en la capacidad de disolución y asimilación de nutrientes, materia orgánica y sustancias tóxicas. Otro rasgo de estas intervenciones inciden en la reducción de diversidad de especies, la disminución de los niveles de oxígeno disuelto disponible para invertebrados y peces afectando la biomasa en el cuerpo hídrico, que a su vez, favorece la

⁴⁷ ARCEO, Ángel Almarales, *et al.* Impacto ambiental de las tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa. En: Tecnología Química. 2001. vol. 21, no. 2, p. 99.

⁴⁸ WELDU, Yemane W. y ASSEFA, Getachew. Evaluating the environmental sustainability of biomass-based energy strategy: Using an impact matrix framework. En: Environmental Impact Assessment Review. 2016. vol. 60, p. 81.

⁴⁹ MOSCOSO MARÍN, Luz Bibiana y MONTEALEGRE TORRES, Jorge Luis. Impactos en la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia. En: Producción+ Limpia. 2013. vol. 8, no 2, p. 92.

supervivencia de especies más tolerantes a estas condiciones las cuales suelen tener menor valor ecológico⁵⁰.

6.1.5 Generación convencional. Los documentos evaluados mostraron que los motores diésel son ampliamente utilizados alrededor del mundo, a pesar de que su uso afecta adversamente diferentes componentes del ambiente. En múltiples ocasiones se ha atribuido de manera significativa el uso de esta tecnología con la formación de nieblas urbanas, y a su vez con el incremento del balance de radiación del planeta. Se debe agregar que en términos de afectaciones de la salud, también se encontró una correlación entre las emisiones de material particulado con casos de cáncer de pulmón y afectaciones temporales como asma en estudios ocupacionales y epidemiológicos⁵¹. A su vez las emisiones más comunes son en su mayoría dióxido de carbono, seguido por carbono orgánico, hollín, precursores de aerosoles como SO₂ y NO₂, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno, teniendo repercusiones en el ambiente como la absorción de radiación solar, el cambio del albedo en la superficie, entre otros⁵². Es probable que estas consecuencias afecten las condiciones climáticas por el almacenamiento de calor o afectar otras tecnologías, como la solar fotovoltaica, debido al cambio del albedo.

6.2 CRITERIO AMBIENTAL

Por lo que se refiere al criterio, y basado en las evidencias recopiladas en el punto anterior, se procede a construir la definición aplicable al contexto Colombiano de criterio ambiental. Este criterio será el que considere el sistema complejo y dinámico de las relaciones e interacciones que se establecen entre las percepciones sociales y la naturaleza. Es en donde se pueden evidenciar las afectaciones, directas o indirectas en un lapso de tiempo determinado sobre los seres vivos y las actividades humanas.

El criterio debe abarcar los componentes del proyecto en los que la calidad ambiental se vea implicada, considerando los posibles impactos ambientales sobre las diferentes matrices (agua, suelo, aire y biodiversidad). A su vez, incluye la distribución física de estas matrices, y los diferentes escenarios en los que los

⁵⁰ HERNÁNDEZ, Juan Manuel Diez y SANZ, Sergio Olmeda. DISEÑO ECOHIDROLÓGICO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS: EVALUACIÓN DE CAUDALES ECOLÓGICOS. En: Energética. Julio, 2008. no 39, p. 74.

⁵¹ LLOYD, Alan C. y CACKETTE, Thomas A. Diesel engines: environmental impact and control. En: Journal of the Air & Waste Management Association. 2001. vol. 51, no 6, p. 839.

⁵² MINJARES, Ray, *et al.* Reducing black carbon emissions from diesel vehicles: impacts, control strategies, and cost-benefit analysis. Washington D.C., Abril, 2014. p.13.

parámetros ambientales se vean alterados de manera significativa, ya sea positiva o negativamente.

Los posibles impactos ambientales derivados de las actividades relacionadas a la generación de energía eléctrica serán evaluados según la configuración y distribución abiótica y geográfica, la alteración de la dinámica de los gases de efecto invernadero, la participación dentro del cambio climático y la incidencia sobre la calidad atmosférica y sus efectos sobre la salud.

Debido a la riqueza ecológica y ambiental de la que goza Colombia, el criterio ambiental estará sujeto a las especies de particular interés que se puedan identificar en la zona de aplicación de la metodología, todas las especies que se encuentran en alguna zona de particular interés ambiental o con una figura de protección establecida, deberán de ser consideradas dentro de los subcriterios para lograr una evaluación completa de la dimensión ambiental que cubra el proyecto.

6.3 SUBCRITERIOS AMBIENTALES

En cuanto a los aspectos propios del criterio ambiental se logró establecer que, para las cinco tecnologías consideradas en esta investigación, existían subcriterios en común. Estos subcriterios fueron establecidos con la condición de tener un carácter universal, esto refiriéndose a que independientemente de la zona, donde se vaya a implementar la tecnología, se logre hacer una correcta evaluación del desempeño de esta respecto al subcriterio ambiental.

De igual manera los subcriterios corresponden al condicionante de la situación nacional. Por ende se priorizaron los impactos que logren repercutir con mayor fuerza en la configuración del ambiente colombiano. En este orden de ideas se establecieron seis subcriterios relevantes para la correcta selección de una alternativa de suministro de energía.

6.3.1 Área intervenida. Usualmente la demanda de área para la implementación de un proyecto, suele traer repercusiones directas sobre el ambiente, involucrando actividades como la disminución de la capa vegetal, modificación de la estructura del suelo, entre otros. Sin embargo como se menciona antes en este documento, el alcance de los impactos de estas tecnologías no se limita exclusivamente al área física ocupada por la tecnología, sino también al alcance que este pueda tener respecto a biodiversidad, uso de recursos y contaminación de agua, suelo y aire.

Este subcriterio tendrá la función de analizar la manera en la que el proyecto incidirá sobre la geografía y la distribución espacial de las especies vegetales y animales. Es importante entender que este subcriterio evaluará indirectamente el cambio del uso del suelo, las alteraciones de los ciclos biogeoquímicos, el reciclaje de nutrientes, la erosión de los suelos, entre los aspectos más relevantes.

6.3.2 Cambio climático. La implementación de estos medios de generación tiene una influencia sobre los parámetros ambientales de la zona de operación como la temperatura, la humedad relativa, precipitación, entre otros. Esta influencia puede ser de carácter positivo o negativo según sea la tecnología utilizada. El propósito de este subcriterio es evaluar el desempeño de la tecnología escogida respecto a la intensidad con la que estos parámetros se ven afectados. Por otra parte este subcriterio también evaluará la susceptibilidad de la tecnología frente a los constantes efectos del clima cambiante. Baste como muestra de esta susceptibilidad la problemática que se vivió en el país durante el último año debido a la disminución de los caudales de los ríos que tuvo un efecto directo sobre la generación hidráulica del país.

6.3.3 Afectación de especies. La afectación de las especies es un subcriterio que tendrá como objetivo evaluar directamente el daño a la biodiversidad específica del área a intervenir. Hay evidencia de que para algunos tipos de tecnologías de generación de energías con fuentes renovables, existe una fauna sobre la cual hay impactos específicos que pueden amenazar el desarrollo de la biodiversidad dependiendo del ecosistema en el que se vaya a desarrollar el proyecto. A su vez considerando que Colombia cuenta con una diversidad rica de especies y que dos de sus zonas más biodiversas se encuentran en zonas no interconectadas, se establece que este criterio deberá de tener acceso a la información de especies en peligro de la zona de implementación y se evaluará la cantidad de especies que posiblemente se podrían afectar debido a la operación de las tecnologías.

6.3.4 Generación de gases efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes. Una de las motivaciones para implementar este tipo de proyectos es disminuir los impactos generados por la quema de combustibles fósiles. Sin embargo algunas tecnologías generan de igual manera gases de efecto invernadero durante sus procesos de operación. Este criterio tendrá la función de evaluar el impacto, positivo o negativo respecto a la generación de gases. Estos gases serán divididos entre gases de efecto invernadero y otros gases, estos últimos serán los gases que tengan consecuencias directas sobre la salud pública o ambiental de la zona.

6.3.5 Afectaciones paisajísticas. Uno de los limitantes para el uso de las tecnologías es la percepción respecto al cambio de paisaje que se derive de la instalación y operación de las tecnologías, a tal punto que muchas veces esta es la principal razón de oposición respecto a este tipo de proyectos. El criterio busca evaluar la aceptabilidad de la distribución paisajística de la tecnología, evaluando la manera en la que la tecnología logre ser percibida dentro de la matriz geográfica de la zona.

6.3.6 Ruido. El ruido también será un factor limitante, la evidencia muestra que uno de los mayores impedimentos para la aceptación de la tecnología es la generación de ruidos, principalmente por las molestias que genera en la comunidad y en menor medida por los disturbios que genera en los ecosistemas cercanos a la fuente emisora de ruido.

6.4 APLICABILIDAD AL CONTEXTO COLOMBIANO

Una vez definidos los subcriterios, se evaluó la representatividad frente a las circunstancias nacionales y al criterio ambiental. Se determinó que dentro del marco general del proyecto “Metodología multicriterio para la selección de alternativas sostenibles de micro redes de suministro de energía eléctrica para zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia”, los subcriterios de afectaciones paisajísticas y ruido tenían mayor representatividad en el criterio socio-cultural, debido a que el principal impacto ha mostrado repercusiones sobre las percepciones de la comunidad más que sobre la dinámica del componente ecológico intrínseco de la zona. Dicho lo anterior, también se estableció que los componentes de esos subcriterios que si tenían una repercusión directa sobre el componente biocéntrico del ambiente, podrían ser evaluados indirectamente dentro de subcriterios como el de afectación de especies y área intervenida.

Algo semejante ocurre con subcriterios como generación de gases y cambio climático, los cuales tiene mayor representatividad dentro del criterio ambiental, sin embargo pueden compartir atributos con otros criterios como el económico-administrativo. Estas interrelaciones no solo destacan el componente multidisciplinario de la evaluación sino que dan pie a asignar el valor de ponderación de cada subcriterio dentro del criterio ambiental, argumentando que algunos subcriterios pierden representatividad dentro del criterio ambiental al ser evaluados también dentro de otros criterios, logrando así resaltar la importancia de cada subcriterio dentro de cada categoría sin dejar de evaluar el aspecto dentro del desempeño general de la tecnología frente al contexto específico. Como conclusión se obtuvo que los subcriterios de carácter neto ambiental son área intervenida, cambio climático, afectación de especies y generación de gases.

Considerando la información anterior, se estableció el valor de ponderación para cada subcriterio utilizando una matriz de consistencia, la cual se construyó comparando subjetivamente la importancia de cada subcriterio.

Tabla 2. Valores de referencia para la construcción de la matriz de consistencia.

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicación
1.0	Igual importancia de ambos elementos.	Los dos elementos contribuyen de igual forma al objetivo.
3.0	Moderada importancia de un elemento sobre otro.	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un elemento sobre el otro.
5.0	Fuerte importancia de un elemento sobre el otro.	Uno de los elementos es fuertemente favorecido.
7.0	Muy fuerte importancia de un elemento sobre el otro.	Uno de los elementos es fuertemente dominante.
9.0	Extrema importancia de un elemento sobre otro.	La evidencia que favorece a uno de los elementos es del mayor orden de afirmación.
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	Usados como valores de consenso entre dos juicios.
Incrementos de 0.1	Valores intermedios en la graduación más fina.	Usados para graduaciones más finas de los juicios.

Fuente: Modificado de: SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. En: International journal of services sciences. 2008. vol. 1, no 1, p. 86.

Utilizando los valores de la tabla 2, se hizo la evaluación de los subcriterios. Esta evaluación arrojó los valores que se muestran en las tablas 3 y 4 y se consignó dentro de la matriz de consistencia, tabla 5, permitiendo establecer que para las consideraciones de este trabajo el criterio con mayor relevancia sería el criterio de área intervenida.

Tabla 3. Convenciones de los subcriterios para la evaluación AHP.

	Subcriterio	Sigla
SC1	Área intervenida	AI
SC2	Afectación de especies	AE
SC3	Generación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes	GEI
SC4	Cambio climático	CC

Tabla 4. Asignación de valores para los subcriterios según los valores de la escala de evaluación.

AI/AE	AI/GEI	AI/CC	AE/GEI	AE/CC	GEI/CC
2,00	3,00	5,00	2,00	3,00	2,00

Tabla 5. Matriz de consistencia y porcentajes de representatividad de los subcriterios.

	AI	AE	GEI	CC	Porcentaje
AI	1,00	2,00	3,00	5,00	48,3%
AE	2,00	1,00	2,00	3,00	27,2%
GEI	0,33	0,50	1,00	2,00	15,7%
CC	0,20	0,33	0,50	1,00	8,8%

Se puede apreciar que el subcriterio de área intervenida tiene mayor relevancia frente a los otros criterios, tomando un valor de 48,3% dentro del criterio ambiental. Considerando que con este criterio se están teniendo en cuenta muchos impactos indirectos, es vital destacar que entre mayor extensión tenga el área de la tecnología mayores serán los impactos asociados. De forma tal que para hacer una evaluación completa del desempeño ambiental, el subcriterio de área intervenida tendrá un rol fundamental, involucrando una gran cantidad de aspectos de una forma práctica y de fácil medición para las complejas configuraciones que se puedan presentar dentro de muchas localidades propias de las Zonas No Interconectadas.

Si bien durante el documento se ha realizado énfasis sobre la importancia de proteger las especies autóctonas y exóticas del país, el criterio de afectación de especies pasó a segundo lugar. Esto radica en que, a pesar de que la afectación de especies tiene una gran relevancia, al momento de hacer la evaluación sistemática del desempeño ambiental, este subcriterio solo se encarga de evaluar un aspecto casi excluyente sobre los demás, y a su vez, su representatividad variará dependiendo de la cantidad y el tipo de especies que se encuentren establecidas en las cercanías de la zona del proyecto. Estas características hacen que la ponderación del subcriterio frente al criterio ambiental tenga un valor alto, pero al no ser el subcriterio más incluyente su porcentaje no corresponderá al de mayor relevancia, sin dejar de lado la gran influencia que este puede tener respecto las consideraciones ambientales que se tomen con el proyecto.

En el caso de los dos criterios restantes, como se mencionó anteriormente, estos tienen aspectos en común con otros criterios de evaluación del proyecto, por lo que para estos subcriterios dicha condición de interdisciplinariedad permite que la evaluación de estos componentes dentro de los diferentes criterios sea una evaluación completa que logre involucrar cada uno de los diferentes puntos de vista que se tengan para alcanzar el objetivo fundamental del proyecto.

6.5 INDICADORES

En cuanto a la selección de indicadores, se tuvo en gran consideración la disponibilidad de información. Es necesario recalcar que muchas de las zonas no interconectadas del país se encuentran en zonas alejadas de difícil acceso, lo que podría dificultar la consecución de información, y por ende, la aplicación de la metodología. Lo dicho hasta aquí supone que los indicadores escogidos deben utilizar información de fácil acceso que a su vez tengan datos suficientes para hacer la correcta evaluación del desempeño de las tecnologías frente a las condiciones ambientales a las que estarán expuestas.

Para el subcriterio de área intervenida, se exploraron indicadores ecológicos como el índice de diversidad de Shannon, índice de división del paisaje, índice de contagio, entre otros⁵³. Sin embargo la complejidad de estos indicadores en algún momento se convertiría en una barrera para la implementación de la metodología. Buscando evitar estos problemas se elaboró un índice basado en el concepto de los indicadores anteriores en el que se evaluaría el desempeño de la tecnología en función de la cantidad y tipo de área ocupada por la tecnología. Este indicador busca relacionar el área útil no residencial designada (A_i), frente al área física ocupada por el proyecto (A_f) como se muestra en la ecuación 1.

Ecuación 1. Índice de área intervenida.

$$A_x = \frac{A_i}{A_f}$$

Esta relación se verá influenciada por la tipología designada para el proyecto. Sirva de ejemplo el caso de un arreglo solar implementado en los techos de una comunidad, frente un arreglo solar implementado en un área con un posible potencial de aprovechamiento, en ambos casos el área física se mantiene

⁵³ LIU, Shiliang, et al. Assessing the impact of hydroelectric project construction on the ecological integrity of the Nuozhadu Nature Reserve, southwest China. En: Stochastic environmental research and risk assessment. 2013. vol. 27, no 7, p. 1712.

constante. Sin embargo el área intervenida varía considerablemente, en el primer caso el área intervenida resulta mínima pues los techos corresponden a un área cuyo propósito no se vería alterado por la presencia de los paneles solares y la intervención podría estar relacionada con reforzamiento de estructuras ya existentes. Por el contrario la segunda configuración involucra la destinación de un terreno, en principio aprovechable, para las actividades de generación de energía, teniendo como consecuencia conflictos ambientales derivados de un porción de área, más extensa, intervenida. Es por esto que entre más cercano a cero sea el valor de A_x , menor será el impacto asociado y el desempeño ambiental será mejor.

Cosa similar sucede al hacer la comparación entre tecnologías donde la tipología y la extensión permitirán evaluar, para cada una de ellas, el uso razonable del área y poder así mitigar indirectamente muchos impactos relacionados a las actividades de instalación y operación del proyecto.

En el caso del subcriterio de afectación de especies, debido a la gran riqueza ecológica del país, se deberán evaluar las especies que tengan importancia ecosistémica dentro de los parámetros de la respectiva autoridad ambiental que ejerza en la zona de aplicación. Para lograr la evaluación de este aspecto se utilizarán los índices de abundancia relativa (ecuación 2) para cuantificar el riesgo de afectar las especies y el índice de circularidad de radio (ecuación 3) para medir la compacidad del hábitat en el que se encuentran, permitiendo relacionar así el riesgo compuesto al que se expone una especie si la tecnología resulta estar involucrada dentro de su hábitat.

El índice de abundancia relativa busca relacionar el número de especies encontradas dentro de un marco de referencia definido (α), respecto al número de individuos dentro de una referencia poblacional geográfica (β), como se muestra en la siguiente función:

Ecuación 2. Índice de abundancia relativa.

$$AR = \frac{\alpha}{\beta} \times 100$$

Entre menor sea la abundancia, la implementación del proyecto será más favorable desde un punto de vista ambiental, debido a que existirán menos especies expuestas a los efectos negativos de la tecnología.

Por otro lado el índice de circularidad de radio buscará minimizar la exposición del perímetro del hábitat, relacionando el área de este (A_h) con el área del círculo de menor proporción que este comprometiendo este hábitat (A_c), esta relación se expresa en la siguiente función.

Ecuación 3. Índice de circularidad de radio.

$$CR = \frac{A_h}{A_c}$$

Entre más cercano sea el valor de este índice a cero, significará que habrá más protección de los recursos bióticos y abióticos internos del hábitat, mientras que una cercanía a uno representaría todo lo contrario.

Respecto al subcriterio de cambio climático se definieron dos tipos de evaluación de desempeño para las tecnologías, el primero relacionado al impacto de la tecnología sobre las condiciones meteorológicas del lugar y el segundo respecto a la vulnerabilidad de la tecnología frente a los efectos de los cambios del clima que se han presentado en los últimos años a nivel nacional. Para hacer esta evaluación se identificaron las locaciones más vulnerables del país frente a los efectos del cambio climático, ilustración 3.

Con esta información y de mano de la evidencia recopilada frente a la influencia de las tecnologías sobre las condiciones meteorológicas y las deficiencias que se puedan presentar con el recurso energético se hará una valoración cualitativa respecto al desempeño de la tecnología.

En el caso de la influencia sobre las condiciones meteorológicas se utiliza una escala numérica entre 0 y 3, donde 0 significara que no hay efecto sobre el parámetro y 3 será que el impacto es muy notorio, de igual manera se identificará la naturaleza del impacto, definido como positivo o negativo, dando un escala resultante que oscilaría entre -3 y 3. Los parámetros a evaluar serán temperatura, humedad relativa, albedo y precipitación.

Para ilustrar mejor el funcionamiento de este indicador, se puede plantear el caso en el que se utilice un arreglo de turbinas eólicas en una zona con una alta temperatura promedio, en, donde al implementar esta tecnología, dependiendo de la cantidad de energía necesaria para suplir la demanda, se podría dar un incremento en la temperatura local, recibiendo así una valoración de -1 respecto a

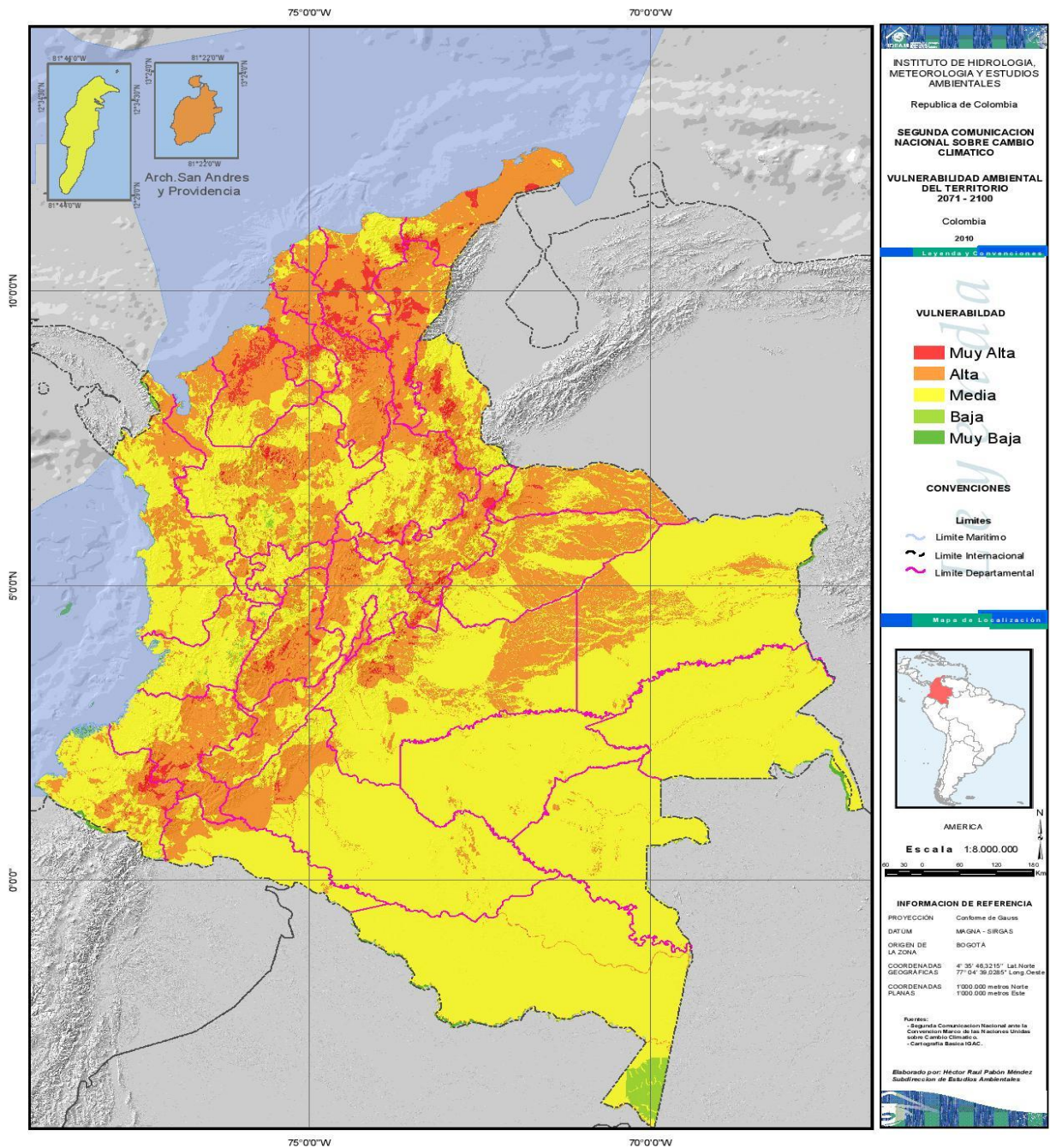
la influencia sobre el cambio climático, suponiendo que la potencia pico de la planta de generación no es tan alta⁵⁴.

Simultáneamente, se hará la evaluación de vulnerabilidad de manera similar utilizando la información disponible registrada para el país, respecto a la vulnerabilidad de las diferentes zonas de implementación. Siguiendo la escala cualitativa presentada en la ilustración 3, se plantea una escala numérica entre 1 y 5, donde 1 significa que la tecnología a implementar será poco afectada por las condiciones de la zona (Muy baja vulnerabilidad – verde oscuro en la ilustración 3) y 5 será relacionado con una alta influencia de estos efectos sobre la operación de la tecnología (Muy alta vulnerabilidad – Rojo en la ilustración 3).

Para ejemplificar el ítem de vulnerabilidad, se podría usar como caso el de una central hidroeléctrica, en la cual la generación se vea comprometida por fenómenos climáticos como el Niño, donde las sequías experimentadas en la zona de implementación, pueden comprometer la eficiencia de la tecnología e incluso inhabilitarla durante un tiempo, terminando así con la naturaleza sostenible y efectiva de la alternativa de solución, recibiendo como consecuencia un valor de 4, suponiendo que la zona de implementación se encuentra dentro de un área catalogada con alta vulnerabilidad, como se puede ver en la ilustración 3. Esta evaluación se puede complementar con estudios realizados en la zona de implementación, en el caso de que estos estén disponibles y puedan orientar mejor los criterios de selección frente a las alternativas.

⁵⁴ ROY, Somnath Baidya y TRAITEUR, Justin J. Op. cit. p. 17902.

Ilustración 3. Vulnerabilidad ambiental del territorio colombiano para el periodo 2017-2100.



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Vulnerabilidad ambiental del territorio 2017-2100. Escala 1: 8.000.000. Bogotá: IDEAM, 2010.

Finalmente, el subcriterio de generación de gases efecto invernadero y otros gases, se propone evaluar cuantas toneladas de CO₂ se emitirán, o dejarán de emitir, debido a la implementación de la tecnología. Para esto se utilizarán factores de emisión correspondientes a cada tecnología, considerando las actividades de transporte, tanto de los materiales para la instalación de la tecnología como de los posibles repuestos e insumos necesarios para el mantenimiento; y las emisiones generadas por la operación, como serían en el caso de biomasa y generación con diésel. Para cada actividad involucrada en el proceso desde la instalación hasta la operación y mantenimiento se realizará el siguiente cálculo.

Ecuación 4. Cálculo de emisiones según la actividad.

$$\text{Emisiones} = \text{Factor de emisión} * \text{Actividad}$$

Esta ecuación utilizará factores de emisión, como los consignados en el anexo 3 de la guía práctica para el cálculo de emisiones de efecto invernadero (GEI)⁵⁵. Se realizarán los cálculos para las fases de transporte y operación de la tecnología. Para la parte de transporte se considerará el tipo de vehículo y el combustible utilizado, y según sea la información requerida por el factor de emisión se utilizará la información de distancia recorrida o la cantidad de combustible consumido.

Ecuación 5. Cálculo de emisiones CO₂ durante la implementación de la tecnología.

$$\text{Emisiones CO}_2 = \text{Emisiones transporte} + \text{Emisiones Operacion}$$

Así, por ejemplo, para establecer el indicador para la tecnología de generación con diésel, en el componente de transporte se tendrían que considerar las actividades de transporte de los materiales, en función del factor de emisión condicionado por la distancia recorrida, en segunda instancia se considerará también esta actividad determinando cuanta distancia se recorrerá durante el periodo de vida del proyecto para llevar el recurso hasta la planta de generación. En el caso de las emisiones por operación, el factor de emisión deberá estar en función de cuanta energía se ha generado o cuantos litros de diésel se han consumido. Al final de este ejercicio se tendrá la emisión total de CO₂ a partir de la generación de energía por medio de una tecnología alimentada con diésel.

En otro ejemplo, utilizando el caso de la energía solar fotovoltaica, el cálculo de las emisiones se realizará únicamente considerando las emisiones de transporte pues

⁵⁵ DEL CANVI CLIMÀTIC, Oficina Catalana. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, 2012, Anexo 3.

en la fase de operación no existe generación de gases. Entre menores sean las emisiones al ambiente mejor será el comportamiento del indicador al momento de hacer la evaluación.

En conclusión, para la evaluación ambiental de un proyecto dentro del contexto colombiano, se definieron seis indicadores dentro de 4 subcriterios ambientales como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Indicadores definidos para los subcriterio ambientales.

Subcriterio	Indicador	Positivo	Negativo
Área intervenida	A_x	$A_x \rightarrow 0$	$A_x \geq 1$
Afectación de especies	AR	$AR \rightarrow 0$	$AR \rightarrow 1$
	CR	$CR \rightarrow 0$	$CR \rightarrow 1$
Cambio climático	<i>Impacto</i>	<i>Impacto</i> $\rightarrow 3$	<i>Impacto</i> $\rightarrow -3$
	<i>Vulnerabilidad</i>	<i>Vulnerabilidad</i> $\rightarrow 1$	<i>Vulnerabilidad</i> $\rightarrow 3$
Generación de GEI y otros gases	<i>Emisiones CO₂</i>	<i>Emisiones CO₂</i> $\rightarrow 0$	<i>Emisiones CO₂</i> $\rightarrow \infty$

7 CONCLUSIONES

Es un hecho que el país necesita llevar el servicio de energía eléctrica a todas las comunidades de las Zonas No Interconectadas, y preferiblemente se debe de optar por la prestación del servicio a partir de fuentes de carácter ilimitado y renovable buscando alcanzar los objetivos de sostenibilidad propuestos internacionalmente. Sin embargo, la sostenibilidad no solo dependerá de la viabilidad tecnológica, sino también de diversos factores intrínsecos del sistema en el que estas tecnologías se vayan a desarrollar. La implementación de una herramienta como la propuesta por el programa de investigación “Generación y suministro de energía eléctrica sostenible para zonas no interconectadas de Colombia”, resulta una estrategia pertinente para permitir la correcta selección de diferentes tecnologías para las zonas del país que aún no se encuentran beneficiados con un sistema de energía eléctrico de calidad.

Este trabajo de grado permitió hacer la definición del criterio ambiental y sus subcriterios para el marco nacional, como contribución al desarrollo integral de la herramienta de selección ya mencionada. Se logró identificar que para las diferentes tecnologías contempladas, existen consecuencias ambientales similares que permitieron definir los subcriterios aplicables para Colombia. A pesar de que inicialmente se establecieron siete subcriterios, se encontró que, desde el punto de vista de la metodología multicriterio, se podrían encontrar subcriterios en común entre los criterios principales, y con el fin de buscar hacer la mejor evaluación ambiental dentro de la metodología se escogieron únicamente aquellos subcriterios que impactaran con mayor fuerza dentro de la dimensión ambiental del entorno de implementación.

En segundo lugar, se determinó el grado de relevancia de cada subcriterio en función de la representatividad de estos, la cantidad de impactos involucrados y la repercusión ambiental asociada a la esencia del subcriterio. El área intervenida fue el criterio que tuvo el mayor porcentaje asignado para la medición del desempeño ambiental dentro de la herramienta, seguido por la afectación de especies, la generación de gases y en último lugar el cambio climático.

Es importante resaltar que cada subcriterio debe tener asociado un método de evaluación. Este método debe de ser sencillo de realizar, debido a las complejidades que se puedan presentar en las Zonas No Interconectadas, respecto a la consecución de la información y la manera de medición, En función de esta disponibilidad, se definieron indicadores simples que logran evaluar de manera completa como se desenvuelve la tecnología frente a cada criterio. Muchos de los indicadores se basaron en otras herramientas previamente establecidas, estos se modificaron debido a que para las condiciones de estas

zonas del país, la información requerida podría ser de compleja adquisición. Este es uno de los principales motivos por los que antes de escoger una metodología se debe de plantear correctamente que tan efectiva va a ser la medición de los parámetros, acorde con la información que esté disponible, por parte del escenario y de la comunidad beneficiada por el proyecto.

Dicho lo anterior, se puede concluir que el desarrollo de una metodología multicriterio requiere un estudio previo de los parámetros asociados, sin mencionar que cada caso de desarrollo puede suponer nuevos criterios involucrados dependiendo de los objetivos y las limitaciones propias de cada contexto. Esto significa que los resultados expuestos en este documento no son de universal aplicación, pues las particularidades de las zonas no interconectadas, la disponibilidad de recursos y la viabilidad tecnológica establecerían un marco de consideración diferente en donde los parámetros de referencia y las prioridades, independientemente de la cantidad y el carácter de los criterios abordados, resultarían diferentes a los escogidos para su desarrollo dentro de las condiciones de esta nación.

8 RECOMENDACIONES

Como se ha mencionado anteriormente no existe una herramienta de este tipo, que sea de carácter universal. Se debe de considerar, en primer lugar el objetivo de sostenibilidad, con el fin de que este sea acorde con las limitaciones y las capacidades del entorno de aplicación. Dependiendo de la prioridad que se tenga en cada caso el número de criterios involucrados puede variar, y de igual manera su relevancia para el proyecto puede establecer un criterio orientado a materializar las condiciones de desarrollo óptimas según lo estipulado para el medio.

Al momento de definir los subcriterios, se debe de tener en cuenta que entre mayor sea el número de estos, más complicada será la evaluación y menor será la representatividad de cada uno frente al propósito del proyecto. Los subcriterios deben de establecerse con el fin de evaluar la mayor cantidad de aspectos que estén exclusiva o mayoritariamente relacionados a la esencia del criterio al que pertenecen.

Los indicadores utilizados para la evaluación de los subcriterios, se deben definir en función de la información disponible, por lo que se deben de encontrar maneras de medir el desempeño por medio de métodos prácticos y representativos. Un indicador cuya implementación sea de carácter muy complejo puede entorpecer la efectividad de la herramienta, reduciendo así el impacto de esta frente a las posibles soluciones escogidas para la necesidad.

La información determinada en este documento, puede variar según cambien las condiciones a nivel nacional, por lo que en cada intento de actualizar esta metodología se deben de estudiar tanto las limitaciones del contexto como las de las tecnologías involucradas buscando así renovar los criterios asociados frente a los nuevos retos que puedan traer consigo las nuevas formas de desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

ARCEO, Ángel Almarales, *et al.* Impacto ambiental de las tecnologías de aprovechamiento energético de la biomasa. En: Tecnología Química. 2001. vol. 21, no. 2, p. 98-105.

ARMSTRONG, Alona; OSTLE, Nicholas y Whitaker, Jeanette. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. En: Environmental Research Letters. Julio, 2016. vol. 11, no. 7, p. 074016.

CENTRO DE ESTUDIOS ECONÓMICOS. Comentario Económico del día: Tendencias Energéticas mundiales y de Colombia, Bogotá D.C: ANIF, 2014. 2 p.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 143. (11, julio, 1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. 2 p.

_____. Ley 855. (18, diciembre, 2003). Por la cual se definen las zonas no interconectadas.

_____. Ley 1665. (16, julio, 2013). Por la cual se aprueba el “Estatuto de la agencia internacional de energías renovables (IRENA)”, hecho en Bonn, Alemania, el 26 de enero de 2009. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2013. 36 p.

_____. Ley 1715. (13, mayo, 2014). Por la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2014. 26 p.

Diario Oficial. Bogotá, D.C., 2003. 2 p.

CORPOEMA, Consorcio Energético. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Bogotá D.C., Diciembre, 2010, vol. 2, p. 367.

DAI, Kaoshan, *et al.* Environmental issues associated with wind energy—A review. *En: Renewable Energy*. 2015, vol. 75, p. 911-921.

DEL CANVI CLIMÀTIC, Oficina Catalana. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Generalitat de Catalunya Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. 2012.

EK, Kristina. Public and private attitudes towards “green” electricity: the case of Swedish wind power. *En: Energy Policy*. 2005, vol. 33, no 13, p. 1677-1689.

ESCALANTE, H., *et al.* Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. *Bucaramanga, Colombia. Ediciones Universidad Industrial de Santander*, 2011.

FERNÁNDEZ BARBERIS, Gabriela y Escribano Ródenas, María del Carmen. La Ayuda de la Decisión Multicriterio: orígenes, evolución y Situación actual. Madrid: Universidad CEU San Pablo, 2011, 19 p.

FLÓREZ ACOSTA, Jorge Hernán; TOBÓN OROZCO, David Fernando y CASTILLO QUINTERO, Gustavo Adolfo. ¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia? un análisis de la estructura institucional. Bogotá D.C., Enero-Junio 2009. vol. 22, no. 38, p.219-245.

GECEVIČIUS, Giedrius; MARKEVIČIUS, Antanas y MARČIUKAITIS, Mantas. Local Sustainable Energy Strategies as Opportunity for European Union Regional Development. *En: Environmental Research, Engineering and Management*. 2015. vol. 71, no 3, p. 49-57.

HEIN, CRIS D. y SCHIRMACHER, MICHAEL R. Impact of wind energy on bats: a summary of our current knowledge. *En: Human–Wildlife Interactions*. 2016. vol. 10, p. 19-27.

HERNÁNDEZ, Juan Manuel Diez y SANZ, Sergio Olmeda. Diseño ecohidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos. *En: Energética*. Julio, 2008. no 39, p. 65-76.

INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Vulnerabilidad ambiental del territorio 2017-2100. Escala 1: 8.000.000. Bogotá: IDEAM, 2010.

INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS (IPSE). Oportunidades actuales en el campo de las energías renovables en Colombia [diapositivas]. Bogotá D.C., Octubre 2015. 26 diapositivas, color.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS, S.A. Energías renovables y eficiencia energética. Canarias: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., 2008. 148 p.

KIKUCHI, Ryunosuke. Risk formulation for the sonic effects of offshore wind farms on fish in the EU region. En: Marine pollution bulletin. 2010. vol. 60, no 2, p. 172-177.

KROHN, Søren y DAMBORG, Steffen. On public attitudes towards wind power. En: Renewable energy. 1999. vol. 16, no 1, p. 954-960.

LLOYD, Alan C. y CACKETTE, Thomas A. Diesel engines: environmental impact and control. En: Journal of the Air & Waste Management Association. 2001. vol. 51, no 6, p. 809-847.

LIU, Shiliang, *et al.* Assessing the impact of hydroelectric project construction on the ecological integrity of the Nuozhadu Nature Reserve, southwest China. En: Stochastic environmental research and risk assessment. 2013. vol. 27, no 7, p. 1709-1718.

LOSS, Scott R.; WILL, Tom y MARRA, Peter P. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. En: Biological Conservation. 2013. vol. 168, p. 201-209.

MCCRARY, M. D., *et al.* Wildlife interactions at Solar One. Final report. Los Angeles: County Natural History Museum Foundation, CA (USA). Section of Ornithology, 1984.

MINJARES, Ray, *et al.* Reducing black carbon emissions from diesel vehicles: impacts, control strategies, and cost-benefit analysis. Washington D.C., Abril, 2014. 79 p.

MOSCOSO MARÍN, Luz Bibiana y MONTEALEGRE TORRES, Jorge Luis. Impactos en la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia. En: Producción+ Limpia. 2013. vol. 8, no 2, p. 85-93.

NACIONES UNIDAS. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014, París: UNESCO, 2014. 230 p.

NACIONES UNIDAS. Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible 2017 [en línea]. Naciones Unidas, 2017 [Consultado el 11 de Enero de 2017]. Disponible en Internet: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible>

NATURSTYRELSEN, Skov-og, *et al.* Danish offshore wind-Key environmental issues. DONG energy. Dinamarca, Noviembre, 2006.

PENG, Yuan; GUOSHENG, Chen y YANCAI, Ruan. The Research on the Assessment of Sustainable Development of County Economy. En: Energy Procedia. 2011. vol. 5, p. 921-925.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE. Impactos ambientales asociados a la generación de energía eléctrica [en línea]. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2017 [Consultado el 14 de Febrero de 2016]. Disponible en Internet: http://web.ing.puc.cl/~power/mercados/impamb/EIA%20Electrico_archivos/Page1271.htm

REALPE JIMENEZ, Alvaro; DIAZGRANADOS, Jorge A. y ACEVEDO MORANTES, Maria Teresa. Electricity generation and wind potential assessment in regions of Colombia. En: Dyna. 2012. vol. 79, no 171, p. 116-122.

REN21, Renewables. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, France, 2016.

RODRÍGUEZ MURCIA, Humberto. Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. En: Revista de Ingeniería. Enero, 2009, no. 28 , p. 83-89.

ROSSO CERÓN, Ana Maria y KAFAROV, Viatcheslav. Barriers to social acceptance of renewable energy systems in Colombia. En :Current Opinion in Chemical Engineering. Noviembre, 2015, vol. 10, p. 103-110.

ROY, Somnath Baidya y TRAITEUR, Justin J. Impacts of wind farms on surface air temperatures. En: Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010. vol. 107, no 42, p. 17899-17904.

SAATY, Thomas L. Decision making with the analytic hierarchy process. En: International journal of services sciences. 2008. vol. 1, no 1, p. 83-98

SUN, C. S., *et al.* Environmental impact of wind power generation projects. En: J. Electr. Power Sci. Technol. 2008. vol. 23, p. 19-23.

TURNEY, Damon y FTHENAKIS, Vasilis. Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011. vol. 15, no 6, p. 3261-3270.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Cadena del petróleo 2013, Bogotá D.C: Ministerio de Minas y Energía; 2013. 207 p.

WELDU, Yemane W. y ASSEFA, Getachew. Evaluating the environmental sustainability of biomass-based energy strategy: Using an impact matrix framework. En: Environmental Impact Assessment Review. 2016. vol. 60, p. 75-82.

WYMAN, Oliver. World Energy Trilemma 2015 Energy Sustainability Index. London: UK: World Energy Council, 2015.

ZHOU, Liming, *et al.* Diurnal and seasonal variations of wind farm impacts on land surface temperature over western Texas. En: Climate dynamics. 2013. vol. 41, no 2, p. 307-326. de Cambio Climático, O. C. (2012). Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Barcelona: Oficina Catalana de Cambio Climático.