



**ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

**Evaluación geoespacial para la ubicación de sitios potenciales de una central de biomasa residual agrícola de banano en la provincia de El Oro, basada en SIG y análisis multicriterio.**

Díaz Macas, Daniela Vanessa

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente

PHD. Almeida Padilla, Oswaldo Vinicio

26 de agosto del 2021



## Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TesisFinal-DíazMDanielaV111.pdf (D112038576)  
**Submitted:** 9/3/2021 7:34:00 PM  
**Submitted By:** revisiones.urbund.ecu@gmail.com  
**Significance:** 6 %

Oswaldo  
Padilla  
Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo  
Padilla Almeida  
Número de identificación (IDN)  
00000000000000000000000000000000  
Universidad de las Fuerzas Armadas  
ESPE, no (Departamento de Ciencias de  
la Tierra y la Construcción,  
espe@espe.edu.ec) a:00000000000000000000000000000000  
Fecha: 2021.09.03 15:14:22 -0500

### Sources included in the report:

ArtCient\_BiomasaSólida\_Apupalo\_Arcos\_Barroso.pdf (D92752287)  
 SALAZAR-TOALA.docx (D80007467)  
<https://www.slideshare.net/santiancho/analisis-con-el-articulo-n1>  
<https://1library.co/document/y4x8ln9z-determinacion-potencial-energetico-biomasa-residual-cultivos-machala-ecuador.html>  
<https://www.elcomercio.com/cartas/cartas-lectores-opinion-energiasrenovables-ecuador.html>  
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4386>  
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1592>  
<https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/download/3108/2874>  
<https://docplayer.es/165087250-Universidad-politecnica-de-cartagena.html>  
[https://www.researchgate.net/publication/258121838\\_Metodologia\\_SIG\\_para\\_la\\_Localizacion\\_de\\_Centrales\\_de\\_Biomasa\\_mediante\\_Evaluacion\\_Multicriterio\\_y\\_Analisis\\_de\\_Red\\_Modelos\\_de\\_Localizacion-Asignacion\\_para\\_el\\_Aprovechamiento\\_de\\_Biomasa\\_Forestal](https://www.researchgate.net/publication/258121838_Metodologia_SIG_para_la_Localizacion_de_Centrales_de_Biomasa_mediante_Evaluacion_Multicriterio_y_Analisis_de_Red_Modelos_de_Localizacion-Asignacion_para_el_Aprovechamiento_de_Biomasa_Forestal)  
[https://eprints.ucm.es/16760/1/TFM\\_De\\_la\\_Paz\\_Blanco\\_Carlos.pdf](https://eprints.ucm.es/16760/1/TFM_De_la_Paz_Blanco_Carlos.pdf)  
[https://www.researchgate.net/publication/267386307\\_Determinacion\\_de\\_zonas\\_adecuadas\\_para\\_la\\_extraccion\\_de\\_biomasa\\_residual\\_forestal\\_en\\_la\\_provincia\\_de\\_Teruel\\_mediante\\_SIG\\_y\\_teledeteccion?opdsd=1](https://www.researchgate.net/publication/267386307_Determinacion_de_zonas_adecuadas_para_la_extraccion_de_biomasa_residual_forestal_en_la_provincia_de_Teruel_mediante_SIG_y_teledeteccion?opdsd=1)  
[https://ruralbioenergy.com/wp-content/uploads/2019/12/IO3-RB\\_Materiales-Didacticos\\_ES.pdf](https://ruralbioenergy.com/wp-content/uploads/2019/12/IO3-RB_Materiales-Didacticos_ES.pdf)  
[http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16320/1/E-11729\\_LAM%20SANMARTIN%20ERIKA%20PATRICIA.pdf](http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16320/1/E-11729_LAM%20SANMARTIN%20ERIKA%20PATRICIA.pdf)

### Instances where selected sources appear:

69



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
 CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE  
 CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "Evaluación geoespacial para la ubicación de sitios potenciales de una central de biomasa residual agrícola de banano en la provincia de El Oro, basada en SIG y análisis multicriterio", fue realizado por la Srta. Díaz Macas Daniela Vanessa, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por lo cual me permito acreditar y autorizar para que los sustente públicamente.

Sangolquí, 26 de agosto del 2021

Oswaldo  
 Padilla  
 Almeida

Firmado digitalmente por Oswaldo Padilla  
 Almeida  
 Nombre de reconocimiento (DN):  
 cn=Oswaldo Padilla Almeida, o=Universidad  
 de las Fuerzas Armadas ESPE,  
 ou=Departamento de Ciencias de la Tierra y  
 de la Construcción,  
 email=owpad@espe.edu.ec, c=EC  
 Fecha: 2021.08.30 09:55:45 -0500

PHD. Padilla Almeida, Oswaldo Vinicio

C.C: 1709776650



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE  
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, Srta. Díaz Macas Daniela Vanessa, con cédula de ciudadanía N° 1724644784 declaro que el contenido, ideas y criterio del trabajo de titulación: **"Evaluación geoespacial para la ubicación de sitios potenciales de una central de biomasa residual agrícola de banano en la provincia de El Oro, basada en SIG y análisis multicriterio"**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 26 de agosto del 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Daniela Vanessa Díaz Macas', written over a horizontal line.

Daniela Vanessa Díaz Macas

C.C: 1724644784



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE  
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Srta. Díaz Macas Daniela Vanessa, con cédula de ciudadanía N° 1724644784, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación; "Evaluación geoespacial para la ubicación de sitios potenciales de una central de biomasa residual agrícola de banano en la provincia de El Oro, basada en SIG y análisis multicriterio", en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 26 de agosto del 2021

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Daniela Vanessa Díaz Macas".

Daniela Vanessa Díaz Macas

C.C: 1724644784

## **Dedicatoria**

*A mi madre Cecilia, mi pilar fundamental, que ha estado conmigo incondicionalmente, me ha brindado su confianza y su respaldo, y me ha inspirado a perseguir mis sueños.*

*A mi familia por impulsarme a lograr mis objetivos, aconsejarme con sabiduría y respaldarme en todo momento.*

*A todos mis profesores, por compartir su conocimiento e intelecto para motivarnos e inspirarnos a ser profesionales de excelencia, pero sobre todo a ser excelentes seres humanos.*

*A mi perrita Milagro, por su compañía incondicional durante mis largas jornadas de estudio y madrugadas.*

*A mis amigos: Karen, Jonathan y Edelvis por las experiencias académicas y de vida que compartimos juntos.*

## **Agradecimientos**

*A Dios, por sus promesas cumplidas y por cumplir. Por cristalizar mi sueño de ser profesional.*

*A mi madre Cecilia, por su amor, paciencia, apoyo y dedicación constante.*

*A la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por formar profesionales de excelencia y permitir mi formación profesional.*

*Al Ing. Oswaldo Padilla, por respaldar mi trabajo, por su paciencia y dedicación constante para con sus alumnos y por guiarme en el desarrollo de esta investigación.*

*A todos y cada uno de los maestros que acompañaron mi crecimiento personal y cultivaron en mí su intelecto, valores y profesionalismo durante estos años de estudio*

## Índice de contenidos

Agradecimientos .....	7
Índice de contenidos .....	8
Índice de tablas .....	12
Índice de figuras.....	14
Resumen.....	16
Abstract .....	17
Capítulo I.....	18
Aspectos generales .....	18
Introducción.....	18
Antecedentes .....	19
Justificación de la investigación.....	23
Planteamiento del problema .....	27
Macro .....	27
Meso .....	29
Micro .....	29
Descripción resumida del proyecto.....	30
Área de estudio .....	31
Objetivos .....	33
Objetivo General .....	33
Objetivos Específicos .....	33
Metas .....	34
Hipótesis de investigación .....	34
Variables de Investigación.....	34
Capítulo II.....	36
Marco Teórico .....	36



Fundamentación Legal .....	36
Constitución de la República del Ecuador .....	36
Plan Nacional del Buen Vivir .....	37
Generalidades de la Biomasa.....	38
Clasificación de la biomasa .....	40
Biomasa residual.....	41
Biomasa residual agrícola .....	42
Importancia de la biomasa residual agrícola como fuente energética.....	43
Métodos de aprovechamiento de la Biomasa .....	45
Biogás .....	46
Digestión anaerobia .....	47
Combustión .....	49
Banano ( <i>Musa Paradisiaca</i> ) .....	50
Condiciones de cultivo.....	52
Residuos y producción de banano en la Provincia de El Oro.....	52
Energía.....	54
Energías Renovables .....	54
Sistemas de Información Geográfica .....	56
Análisis espacial.....	57
Método de análisis multicriterio (EMC). .....	58
Capítulo III.....	71
Metodología .....	71
Recursos .....	73
Recopilación de datos e información .....	73
Modelamiento de los factores parciales.....	75
Disponibilidad de biomasa residual agrícola potencial de banano (FBRAp) ....	77

	10
Superficie de masas agrícolas (Fsup) .....	82
Factor Pendiente (Fpend).....	83
Factor distancia a red vial (Fdist).....	84
Asignación de pesos a cada criterio .....	86
Índice de aptitud ponderado .....	87
Restricciones de áreas para el emplazamiento de una central de biomasa.....	87
Restricción pendiente (Rpend) .....	88
Restricción a red vial (Rvial) .....	88
Restricción a la red eléctrica (RRE).....	89
Restricción a cuerpos y corrientes de agua (Ragua) .....	90
Restricción de Áreas Naturales Protegidas (RANP) .....	90
Restricción a zonas pobladas (Rpob) .....	91
Restricción cobertura y uso de suelo. (Rcus) .....	91
Capítulo IV .....	93
Análisis de los resultados .....	93
Resultados de factores de parciales.....	93
Evaluación Multicriterio.....	100
Estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola de Banano (Demanda) .....	102
Conjunto de restricciones de áreas para determinar las posibles áreas de emplazamiento para una central de biomasa. ....	103
Resultado de las áreas de emplazamiento para la ubicación de una central de biomasa residual agrícola de banano.....	109
Alternativas de solución para la ubicación de una central de biomasa residual agrícola.....	110
Capítulo V .....	116

Discusión.....	116
Capítulo VI .....	119
Conclusiones y recomendaciones. ....	119
Referencias bibliográficas.....	122

### Índice de tablas

Tabla 1	<i>Matriz de Operacionalización de Variables</i> .....	35
Tabla 2	<i>Producción de banano y residuos generados en los cantones de la provincia de El Oro</i> .....	53
Tabla 3	<i>Escala fundamental de comparación por pares de Saaty</i> .....	62
Tabla 4	<i>Matriz de comparación jerárquica</i> .....	64
Tabla 5	<i>Ejemplo de matriz pareada</i> .....	65
Tabla 6	<i>Matriz pareada normalizada</i> .....	65
Tabla 7	<i>Obtención del vector característico, eigenvector</i> .....	65
Tabla 8	<i>Matriz de pesos resultantes para cada alternativa</i> .....	66
Tabla 9	<i>Vector de la suma ponderada</i> .....	67
Tabla 10	<i>Vector de consistencia</i> .....	67
Tabla 11	<i>Valores aleatorios para el cálculo del índice de azar, o índice de inconsistencia aleatoria IA (Valores de consistencia en función del tamaño de la matriz)</i> .....	68
Tabla 12	<i>Criterios y restricciones para las variables consideradas</i> .....	72
Tabla 13	<i>Información geográfica utilizada para el desarrollo de la investigación</i> .....	74
Tabla 13	<i>Información de Tipo de Caja – Banano Convencional</i> .....	79
Tabla 14	<i>Disponibilidad de biomasa residual agrícola, potencialmente aprovechable</i> .....	82
Tabla 15	<i>Intervalos de tamaño del cultivo</i> .....	83
Tabla 16	<i>Intervalos de la variable pendientes. Relación de pendientes (%) y eficiencia de extracción de biomasa (%)</i> .....	84
Tabla 17	<i>Distancia de extracción a vías principales</i> .....	86
Tabla 18	<i>Capacidad de acogida de los usos de suelo para las instalaciones</i> .....	92
Tabla 20	<i>Matriz de comparaciones pareadas</i> .....	101
Tabla 21	<i>Valores de los parámetros de la matriz de comparaciones pareadas</i> .....	101

Tabla 22 Áreas y radios de influencia de las tres alternativas resultantes .....	110
Tabla 23 <i>Primera alternativa de solución para el cantón El Guabo y su posible conexión a la red eléctrica nacional.</i> .....	112
Tabla 24 <i>Segunda alternativa de solución para los cantones Machala – Santa Rosa y su posible conexión a la red eléctrica nacional.</i> .....	114

## Índice de figuras

Figura 1	<i>Área de estudio</i> .....	32
Figura 2	<i>Proceso de Análisis Multicriterio</i> .....	59
Figura 3	<i>Diagrama de proceso para la ubicación de una central de biomasa</i> .....	76
Figura 4	<i>Modelo conceptual de la disponibilidad de biomasa potencial teórica aproximada</i> .....	78
Figura 5	<i>Factor de disponibilidad de la biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable de banano</i> .....	93
Figura 6	<i>Factor normalizado de disponibilidad de la biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable de banano (BRAp)</i> .....	94
Figura 7	<i>Factor de superficie de las masas agrícolas (FFsup)</i> .....	95
Figura 8	<i>Factor de superficie de las masas agrícolas normalizado (Fsup)</i> .....	96
Figura 9	<i>Factor de pendientes relacionado a la eficiencia de extracción de la biomasa (Fpend)</i> .....	97
Figura 10	<i>Factor de pendientes relacionado a la eficiencia de extracción de la biomasa normalizado (Fpend)</i> .....	98
Figura 11	<i>Factor de distancias de extracción a las vías principales (Fdist)</i> .....	99
Figura 12	<i>Factor de distancias de extracción a las vías principales normalizado (Fdist)</i> .....	100
Figura 13	<i>Mapa de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola de banano</i> .....	102
Figura 14	<i>Mapa de restricción: pendientes</i> .....	103
Figura 15	<i>Mapa de restricción: ríos</i> .....	104
Figura 16	<i>Mapa de restricción: áreas protegidas</i> .....	105
Figura 17	<i>Mapa de restricción: Uso de suelo</i> .....	106
Figura 18	<i>Mapa de restricción: vías</i> .....	107
Figura 19	<i>Mapa de restricción: zonas pobladas</i> .....	108

Figura 20 <i>Alternativas de solución para el emplazamiento de una central de biomasa residual agrícola de banano.</i> .....	109
Figura 21 <i>Primera alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa</i> .....	111
Figura 22 <i>Segunda alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa</i> .....	113
Figura 23 <i>Tercera alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa</i> .....	115

## Resumen

Ecuador es un productor de biomasa que dispone de recursos agrícolas, forestales y pecuarios, de cuyos desechos se puede obtener suficiente materia orgánica para producir energía limpia y renovable. El caso de estudio presenta una metodología para determinar las zonas de la provincia de El Oro más adecuadas para el emplazamiento de una central de biomasa que permita el aprovechamiento energético de los residuos agrícolas generados por la producción de banano, utilizando el método de análisis multicriterio denominado “Proceso de análisis jerárquico AHP”. La metodología comprendió tres fases: primero, se definieron cuatro factores territoriales para determinar las áreas óptimas para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable de banano, luego, se definieron los criterios restrictivos para determinar las áreas potenciales para el emplazamiento de una central de biomasa que aproveche los residuos de banano como materia prima; la segunda fase, comprendió la asignación de pesos, que fueron resultantes de la evaluación multicriterio aplicada a los factores seleccionados, y por último, en la tercera fase, las capas resultantes se combinaron creando un análisis integrado de las posibles alternativas en donde ubicar una central de biomasa.

Los resultados indican que los cultivos de banano pueden generar hasta 130,712 ton/ha de residuos agrícolas al año. También, se logró determinar nueve áreas de ubicación para una central de biomasa, de las cuales tres cumplieron con gran parte de los requisitos establecidos para su emplazamiento y se ubican en diferentes cantones de la provincia de El Oro.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA**
- **BIOENERGÍA**
- **BANANO**
- **EVALUACIÓN MULTICRITERIO**
- **PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO**



### **Abstract**

Ecuador is a biomass producer with agricultural, forestry and livestock resources, from which enough organic matter can be obtained to produce clean and renewable energy. The case study presents a methodology to determine the most suitable areas in the province of El Oro for the location of a biomass power plant that would allow the use of energy from agricultural waste generated by banana production, using the multi-criteria analysis method called "AHP hierarchical analysis process". The methodology comprised three phases: first, four territorial factors were defined to determine the optimal areas for the utilization of potentially usable agricultural waste banana biomass; then, restrictive criteria were defined to determine the potential areas for the location of a biomass plant to use banana residues as raw material; The second phase involved the assignment of weights resulting from the multi-criteria evaluation applied to the selected factors, and finally, in the third phase, the resulting layers were combined to create an integrated analysis of the possible alternatives for locating a biomass plant.

The results indicate that banana crops can generate up to 130,712 tons/ha of agricultural residues per year. Also, nine location areas for a biomass power plant were determined, of which three met most of the requirements established for their location and are located in different cantons of the province of El Oro.

#### **KEY WORDS:**

- **AGRICULTURAL RESIDUAL BIOMASS**
- **BIOENERGY**
- **BANANA**
- **MULTICRITERIA EVALUATION**
- **HIERARCHICAL ANALYSIS PROCESS**

## **Capítulo I**

### **Aspectos generales**

En este capítulo se presenta una descripción del aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola como una alternativa para frenar el cambio climático e impulsar el cambio de la matriz energética a nivel mundial y nacional. El emplazamiento de tecnologías que viabilicen la producción de energía renovable, es un factor determinante debido a los requisitos técnicos y ambientales que se debe cumplir para lograr el máximo aprovechamiento del recurso. El estudio pretende encontrar áreas idóneas para el emplazamiento de una central de biomasa que pueda utilizar como materia prima, los residuos que se generan en la producción de banano.

### **Introducción**

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo localizar un sitio dentro de la provincia de El Oro donde sea técnica, sostenible y económicamente viable, ubicar una central de biomasa para el aprovechamiento de residuos agrícolas de banano, con el fin de promover la gestión de residuos y el aprovechamiento energético de los mismos. Teniendo en cuenta la cantidad de residuos orgánicos que la industria bananera genera, se plantea la posibilidad de revalorizar este residuo utilizándolo como fuente de energía eléctrica, consiguiendo de este modo cubrir las necesidades energéticas de la provincia de El Oro, evitando el consumo de combustibles fósiles y disminuyendo las emisiones de carbono, lo cual facilitará cumplir los objetivos marcados en distintas normativas energéticas.

Otro de los intereses principales del proyecto de tesis es establecer una metodología base que sirva como una guía para fomentar el cambio de la matriz energética y el aprovechamiento de la biomasa agrícola en el país y de esta manera lograr establecer espacios en los cuales se puede aprovechar energéticamente la biomasa.

Para dar solución a esta problemática, es necesario identificar la cantidad de biomasa disponible para el aprovechamiento energético y a partir de ello, analizar y seleccionar las variables que darán viabilidad al proyecto y serán de utilidad para la representación geoespacial de cada variable.

A través del método de análisis multicriterio, mediante la técnica de análisis jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) que se desglosa del mismo, se evalúan todas las variables o causas de idoneidad preseleccionadas y se establece un rango de peso en importancia dependiendo de cada variable, el peso que se le asigna a cada una se determina mediante operaciones matriciales según los parámetros y el procedimiento que dicta la técnica AHP.

Luego, haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se incorporan los pesos a las capas de cada variable, según corresponda y mediante el uso de la Calculadora Ráster integrada en el software SIG, se combina cada capa para realizar el análisis. El resultado será una nueva capa que muestre las áreas idóneas para emplazamiento de una central de biomasa con fines energéticos.

### **Antecedentes**

Son varios los estudios que anteceden a la presente investigación, los cuales persiguen una misma motivación: promover el uso de energías renovables, lograr un aprovechamiento eficiente y rentable de los recursos; para ello es importante resaltar el interés medioambiental en lograr el consumo de los recursos de forma sostenible, sin embargo, el proceso para la toma de decisiones en gestión energética suele ser complicado y requiere conocimientos en diferentes disciplinas ( Schwager Energy, 2020).

Este estudio pretende determinar y evaluar la ubicación idónea para el emplazamiento sostenible de una central de biomasa que logre el máximo aprovechamiento de la biomasa residual proveniente de los residuos generados en la producción de banano, en la provincia de El Oro. Para lograrlo, el lugar debe cumplir con ciertas características o criterios necesarios

para el óptimo uso de la materia prima; evaluación que se realizará mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica y la técnica de evaluación multicriterio, proceso analítico jerárquico (AHP); paralelamente se espera establecer una línea base metodológica para la localización de sitios óptimos para un futuro emplazamiento de una planta de biomasa además de lograr un impulso en el cambio de la matriz energética actual para la provincia y el país.

Se conoce que los residuos agrícolas generados en las operaciones de producción y despacho de algunos cultivos pueden ser utilizados como combustibles orgánicos en aplicaciones eléctricas, térmicas y/o de co-combustión (García-Martín, y otros, 2011). Los aportes científicos que sirven de base al caso de estudio, destacan el potencial energético que proviene de los residuos de banano y además resaltan la importancia de ubicar tecnologías de energía renovable de forma amigable con el entorno, como se describe a continuación:

La estimación del aporte energético que provee la biomasa residual de la producción del cultivo de banano se basa en instrumentos proporcionados por las bases de datos nacionales como el 'Atlas Bioenergético del Ecuador', publicado en el año 2014, en un esfuerzo colaborativo entre varias entidades estatales cuyo propósito radica en: "Ser una herramienta que localice, identifique, describa y cuantifique las áreas con el mayor potencial bioenergético en el país", además de que su objetivo consiste en ser "el instrumento base" para la formulación de perfiles de proyectos, políticas y futuras investigaciones en el ámbito bioenergético" (ESIN Consultora S.A, 2014) . También se tomará como referencia al 'Catastro Bananero del Ecuador', realizado en conjunto por el antiguo Ministerio de Agricultura Ganadería Acuicultura y Pesca (MAGAP) y la Empresa Comercializadora de Orgánicos Bioindustriales ECOBIS S.A, para la ubicación y delimitación de las fincas productoras de banano más representativas que podrían disponer de una elevada producción de biomasa residual, criterio de materia prima que será considerado para el análisis en curso. (ECOBIS S.A, 2013)

En el proyecto de titulación “Determinación del potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en el Cantón Machala, El Oro – Ecuador”, realizado por Aguilar (2019), a partir de muestras recolectadas en la finca San Enrique y mediante la caracterización química y energética de la biomasa residual obtenida, se pudo estimar que podría obtenerse aproximadamente 12’849,57 toneladas de biomasa residual, lo que representa 9,94 GWh/año de energía eléctrica para satisfacer la demanda energética de cerca de 1560 familias en la localidad. Así mismo, Serrano et al. (2017), en su investigación: “Determinación del potencial de generación eléctrica a partir de biomasa en el Ecuador”, calcularon la capacidad latente de generar electricidad a partir de residuos agrícolas de los cultivos de banano, arroz, caña de azúcar y cacao, mediante tecnologías de conversión energética de biomasa, donde llegaron a la conclusión de que el banano, al representar la mayor cantidad de residuos generados al año, posee los mayores potenciales de generación de energía eléctrica. Las mencionadas investigaciones permiten evidenciar la aptitud y dimensionar la viabilidad del presente caso de estudio en la provincia de El Oro, además de que los resultados permiten aproximar los beneficios que se lograrían al apostar por el uso de energías renovables.

En el “Estudio Técnico– Económico de una planta de generación eléctrica a base de biogás”, realizado en la provincia del Azuay por Lalvay & Vidal (2013), con la finalidad de promover el desarrollo sustentable en los cantones Girón y Santa Isabel, se propone una alternativa a la quema directa del biogás para aprovechar sus características inflamables y generar energía eléctrica mediante el uso de un motor de combustión interna y su propio generador, en colaboración con la Empresa Pública Municipal Mancomunada de Aseo Integral de la Cuenca del Jubones (EMMAICJ). Los autores utilizan como ejemplo, el modelo de la compañía de economía mixta para el aprovechamiento de desechos: EMAC-BGP-ENERGY, fundada en el año 2012 y en operación desde hace 8 años, la cual nació a partir de un estudio que indicaba que la cantidad estimada de biogás disponible en el relleno sanitario de Pichacay tendría la capacidad suficiente para la generación de 2 MW de potencia además de contribuir

significativamente la reducción de la contaminación ambiental y la emisión de gases de efecto invernadero en la ciudad de Cuenca y sus alrededores (Conto & Tipan, 2018). Esta investigación se toma como referencia de éxito en el aprovechamiento de los residuos para generar electricidad.

En la investigación: “Optimal location of a biomass power plant in the province of Granada analyzed by multi-criteria evaluation using appropriate Geographic Information System according to the Analytic Hierarchy Process”, los autores Herrera Seara et al. (2010), pretenden estimar la capacidad de acogida de una central de biomasa en la provincia de Granada (España), mediante herramientas de decisión como la técnica de evaluación multicriterio por el método de análisis jerárquico (AHP), metodología que también será utilizada para el tema en desarrollo. Los resultados arrojaron tres áreas óptimas para la instalación de una planta de biomasa: Caniles, Salar y Moclín; los autores concluyeron que los SIG son indispensables en la toma de decisiones en especial cuando se refiere a energías renovables y biomasa.

En el estudio: “A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel”, realizado en la Península Superior de Michigan, los autores Zhanga et al. (2011) elaboran una propuesta para la ubicación idónea de una planta de biocombustibles a partir de biomasa leñosa. La importancia de esta investigación radica en la naturaleza dispersa de la biomasa y los costos asociados con el transporte, en la cual incluyen variables adicionales como el precio del combustible, la distancia para recoger la materia prima y la disponibilidad de madera; los autores concluyen que la ciudad de Ishpeming es el área adecuada para la producción de biocombustibles. Los criterios y metodología empleada servirán de modelo para la realización de la investigación en curso.

Jeong & Ramírez (2017) en su estudio: ‘A Multicriteria GIS-Based Assessment to Optimize Biomass Facility Sites with Parallel Environment—A Case Study in Spain’, sostienen que encontrar el área ideal para la instalación de una central de biomasa es “una preocupación crítica que actualmente está recibiendo una mayor atención debido a que la materia prima de

biomasa se encuentra dispersa geográficamente”. Aplicado en la provincia de Extremadura (España), su metodología se basa en el empleo de técnicas de evaluación multicriterio mediante combinación lineal ponderada (WLC) con herramientas SIG y un análisis estratégico de implementación basado en criterios para optimizar la ubicación de una instalación de biomasa que sea amigable con el medio ambiente. A partir de los resultados obtenidos con doce criterios seleccionados, el estudio concluye que las ubicaciones más adecuadas, son aquellas que se encuentran cercanas a las áreas forestales y agrícolas y además ocupan el 9.25% de la superficie del área de estudio, siendo el criterio más influyente: el tipo de vegetación bajo criterios ambientales. El estudio está relacionado a la investigación ya que emplea herramientas geoespaciales y criterios ambientales similares a los que serán utilizados para el desarrollo de este estudio.

Existen varias investigaciones, además de las mencionadas, que a través de las herramientas SIG y técnicas de EMC para la toma de decisiones, pretenden dar solución a los problemas de ubicación para el emplazamiento de tecnologías de energía renovable, de tal forma que se logre evaluar la idoneidad espacial y geográfica para posicionar este tipo de infraestructura, además de ayudar a la diversificación del sector energético y dar una base científica para el sector empresarial y gubernamental. Aunque en el país existen innumerables alternativas para el aprovechamiento de los residuos agroindustriales, en especial aquellos provenientes de los cultivos de banano y también se ha contemplado la rentabilidad de adoptar el uso de energías renovables, aún no se logra evidenciar cambios relevantes en toda la región, además de que son pocas las investigaciones que se han realizado denotando la importancia que la tecnología de energías renovables demanda.

### **Justificación de la investigación**

A nivel mundial, la energía eléctrica juega un rol importante debido a su participación como insumo principal para todas las actividades productivas y para satisfacer las necesidades

básicas de la población, es por esta razón que naciones de todo el mundo están constantemente buscando alternativas de solución para la demanda energética de su región y continuamente preparan la construcción de centrales eléctricas de diversos tipos, especialmente los países desarrollados, quienes están apuntando a la generación de electricidad distribuida que consiste en producir bioelectricidad a pequeña escala, para luego conectarse a la red de distribución eléctrica regional (Lalvay & Vidal, 2013).

La necesidad del uso de energías alternativas inagotables, sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, agudiza el ingenio de millones de personas en todos los ámbitos de la ciencia (Castro & Ocampo, 2015). El empleo de un amplio rango de fuentes naturales inagotables de las diferentes energías renovables (Biomasa, Eólica, Geotérmica, Marina, Minieólica, Mini hidráulica, Solar), favorece la seguridad del suministro energético debido al aumento de la diversidad energética por un lado y la disminución de la dependencia energética con el exterior, por otro (De La Paz, 2011).

En el Ecuador, durante los últimos años, se ha hecho especial énfasis sobre la necesidad de adoptar e implementar estrategias distintas sobre el uso de hidrocarburos en sus diferentes presentaciones; es así, que muchas instituciones gubernamentales como el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), el Instituto Nacional de Pre inversión (INP), el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) e instituciones públicas y privadas, han incrementado sus esfuerzos investigativos para impulsar el cambio de la matriz energética y el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento energético de la biomasa residual, con la finalidad de reemplazar el uso de combustibles fósiles y garantizar su autonomía energética (ESIN, 2014)

La biomasa es una alternativa limpia y teóricamente inagotable con respecto al uso de combustibles fósiles para la generación de energía, y presenta varias ventajas, como su disponibilidad (desechos, biomasa forestal y agrícola), emisión neutra de carbono y fácil combustión” (Rojas Quiroga & Acevedo Torres, 2017). Dentro de este campo, los residuos



agrícolas son una potencial fuente de recursos económicos para los habitantes de los países en vías de desarrollo (empleo) y en países desarrollados (menor consumo de energía fósil), además de mejorar el control de residuos, reciclaje de nutrientes, suministro eléctrico en zonas rurales y reducción de contaminación por emisiones de CO<sub>2</sub> (Castro & Ocampo, 2015). Dentro de lo que corresponde a biomasa residual agrícola, principales cultivos como paja de trigo, arroz, cascarilla, rastrojo de maíz y astillas de madera, se han estudiado como materia prima potencial para la generación de bioenergía, pero se desconoce sobre la conversión energética de principales cultivos no básicos como el banano (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016).

A pesar del potencial energético que tiene la biomasa, su aprovechamiento ha sido postergado debido a las grandes cantidades de dinero que se deben invertir en infraestructura para el desarrollo de plantas especializadas en la transformación energética de este recurso y el costo de transporte que supone movilizar los residuos a las centrales de transformación (Herrera Seara, Aznar Dols, Zamorano, & Alameda Hernández, 2010). Es por ello, que la viabilidad técnica de emplazar una central de biomasa en base a residuos agrícolas, depende a sobremanera de la disponibilidad de la materia, potencial energético, infraestructura adecuada y suministro continuo de materias primas (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016; Giraldo Cano & Montoya Martínez, 2015).

Son numerosos los factores ambientales que influyen en esta selección de áreas de emplazamiento para centrales de biomasa como por ejemplo: la consideración de proximidad a las zonas de producción de biomasa, la cercanía a cuerpos de agua, población urbana y rural y los costes de transporte, etc. (Junta de Andalucía, 2011), aspectos que se consideran para resolver el problema de la dispersión geográfica y espacial de los residuos y lograr un emplazamiento sostenible, además de evitar que se generen impactos durante la fase de construcción y operación de la misma (Jeong & Ramírez, 2017).

Al mismo tiempo, la alternativa de invertir en plantas de biogás para las distintas industrias que generan desechos orgánicos resulta ser de gran utilidad y rentabilidad

económica, algunas ventajas son: reducción de costos de tratamiento de residuos, oportunidades de clasificación, reutilización y reciclaje, disminución de residuos en el origen y en los sitios de disposición final, valor agregado a los residuos, cumplimiento de la legislación, etc. ( Schwager Energy, 2020)

Ecuador tiene un enorme potencial para el aprovechamiento de diversos residuos agrícolas, lo cual permite y facilita que la biomasa sea un recurso de uso alentador para el país, aunque también es preocupante reconocer que son nulas o muy pocas las empresas que han implementado el uso de la biomasa en sus procesos, las razones principales ante su ausencia, es la falta de conocimiento sobre el potencial biomásico que los sectores agrícolas e industriales disponen y el déficit tecnológico y económico que la industria bioenergética requiere (Galán, 2016) (XANDO). Esto sin duda, se convierte en una gran oportunidad para la investigación y diversificación de la matriz energética nacional, protección del medio ambiente y la valorización de las cadenas agrícolas e industriales.

En la provincia de El Oro, el cultivo de banano es el principal factor estabilizador social de la región, ya que representa una de las fuentes generadoras de empleo más importantes (Castañeda S, Jaramillo J, & Cotes T, 2010), además, los residuos que se generan son considerados como los más importantes, con un futuro prometedor de aprovechamiento, debido a su cantidad, localización centralizada y disponibilidad (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016).

En la presente investigación se pretende encontrar áreas óptimas para la ubicación sostenible de una planta de biomasa en función de la disponibilidad y potencial energético que los residuos de los cultivos de banano poseen, con el propósito de aportar con datos científicos que puedan servir de base para la contribución al proceso de cambio de la matriz productiva conducente hacia la seguridad energética, además de fortalecer los lineamientos del Plan Nacional del Buen Vivir (Castro & Ocampo, 2015). El proyecto obedecerá a criterios ambientales, sociales y económicos y será desarrollado mediante el uso sistemas de

información geográfica y análisis multicriterio. Se espera promover el desarrollo sustentable de la zona a través del aprovechamiento total de la fruta ícono en la producción agrícola de la provincia de El Oro, y paralelamente motivar a entidades públicas y privadas para que miren a este sector energético alternativo como una posibilidad de aprovechamiento, inversión y transformación a energías renovables, logrando de esta forma dar solución a un problema ambiental y generar oportunidades económicas y laborales para el país.

### **Planteamiento del problema**

#### ***Macro***

El sistema energético mundial depende del uso de combustibles fósiles y de la demanda de la población, que en las últimas décadas ha crecido exponencialmente ocasionando varios inconvenientes como la aceleración de la demanda de energía para cubrir la óptima operación y funcionamiento de bienes y servicios como el transporte, el internet, la vivienda y la industria, siendo necesario optar por soluciones más rentables que cubran al menos las necesidades básicas de una población con la condición adicional de que estas soluciones no sean otro medio de impacto al ambiente (Lalvay & Vidal, 2013); y el segundo inconveniente, es el incremento de los residuos que se generan en toda la cadena de producción, hasta el uso y posteriormente desecho de cualquier elemento de carácter orgánico e inorgánico (Saéñz & Urdaneta, 2014). En resumen, el crecimiento de la demanda energética ocasiona una mayor demanda de transporte, tecnología, industria y recursos, es decir, que el abastecimiento de energía se encuentra directamente relacionado con el crecimiento demográfico, la degradación del ambiente y la salud pública, por lo tanto, cada país se verá obligatoriamente comprometido a ser más eficiente energéticamente (Abdo Peralta, 2021).

Según datos de Naciones Unidas, se prevé que para el año 2050, la demanda de energía eléctrica se duplicará o incluso llegará a triplicarse a medida que la población mundial aumente y los países en desarrollo multipliquen sus economías, al mismo tiempo se espera

que las energías renovables cubran el 50% de la demanda hasta el 2035 (Roca, José, 2019). A nivel mundial sólo el 9% de la energía empleada corresponde a energías renovables, y a nivel de Latinoamérica y el Caribe, tan sólo se emplea el 25%, lo cual quiere decir que aún existe una gran dependencia al uso de combustibles fósiles. Por otra parte, la distribución energética también es un factor que se ve agravado en zonas rurales, donde distribuir energía es más difícil debido a las grandes distancias que hay entre cada vivienda, además de problemas técnicos recurrentes como las altas y bajas de voltaje que ocasionan daños a los aparatos electrónicos (Abdo Peralta, 2021).

Como se puede notar, a pesar de los esfuerzos por usar combustibles fósiles de manera eficiente, no existe un cambio significativo en cuanto a la reducción de gases de efecto invernadero, lo cual indudablemente con lleva a tomar nuevos enfoques e iniciativas de ingeniería audaces para lograr un desarrollo sostenible (Elizalde G, 2018).

Por su elevada tasa de producción, la agroindustria es uno de los principales detonantes para la generación de residuos orgánicos, ya que por lo general éstos no son procesados o dispuestos adecuadamente, situación que acelera el problema de contaminación ambiental. Sin embargo, los residuos agroindustriales también cuentan con un alto potencial de aprovechamiento en diferentes campos que aún no han recibido la atención que merecen, estos incluyen aplicaciones energéticas, elaboración de nuevos productos, implantación de nuevas tecnologías, agregación de valor a productos originales y recuperación de condiciones ambientales alteradas (Vargas & Pérez, 2018).

Para aplicaciones energéticas, es muy importante conocer el tipo de aprovechamiento, la disponibilidad y el potencial bioenergético de los diversos residuos agroindustriales existentes en un determinado territorio, aunque no es el único factor para determinar la viabilidad de utilización de este recurso, existen otros factores destacados de índole espacial que también inciden de forma decisiva en su aprovechamiento, por cuanto determinan el coste

de la extracción del recurso, como la pendiente, la distancia a la red de transporte, etc. (De La Paz, 2013).

### **Meso**

En Ecuador, el 89% de la energía proviene del petróleo, el 5% proviene del gas, el 4% a partir de hidroeléctricas y apenas el 2% a energías renovables (Abdo Peralta, 2021).

Actualmente, el país ha presentado un importante y preocupante crecimiento en la demanda energética, además de mencionar que el Sistema Nacional Interconectado del país cuenta básicamente con dos fuentes para la producción de electricidad, lo cual convierte a la red eléctrica nacional en ineficiente y limitante en cuanto a cobertura, distribución y transporte de energía eléctrica a grandes distancias, ocasionando pérdidas técnicas que se presentan en la transmisión, transformación y distribución de electricidad. Estas pérdidas se pueden evitar utilizando alternativas de centrales de generación eléctrica distribuidas que ayuden al consumo local y que utilicen recursos renovables (Lalvay & Vidal, 2013). Sin embargo, cabe mencionar que otro de los problemas principales para la ubicación de una central eléctrica a base de energías renovables alternativas es, la escasa información sobre energías renovables que existe en el país.

### **Micro**

En la provincia de El Oro, el servicio eléctrico es atendido por la empresa CNEL Regional El Oro, misma que ha incrementado y ampliado su capacidad de generación y red de servicios mediante redes de distribución logrando proveer de energía, incluso a diferentes comunas del Archipiélago de Jambelí. La empresa genera electricidad mediante la explotación del gas del golfo ubicado en Bajo Alto, y además tiene un solo punto de enlace al Sistema Nacional de Transmisión, ubicado en la parroquia La Peaña perteneciente al cantón Pasaje, subestación Machala (GADPEO, 2015). Este sistema es poco eficiente, costoso para los habitantes de la provincia y provoca serios impactos al medio ambiente al ser generado por un recurso no renovable.

Aunque la demanda de potencia y energía del sistema eléctrico en El Oro es muy variable y depende de la estacionalidad del clima, la provincia depende del interconectado para obtener electricidad, esto a pesar de que el territorio posee recursos hidráulicos, eólicos y de biomasa que pueden promover el consumo de energía alternativo, ya que el costo para obtener energía representa valores altos y genera tarifas altas para el usuario.

Una de las más grandes fuentes de biomasa que la provincia posee es el cultivo de banano, al ser una de las mayores actividades agrícolas que se desarrollan en la zona y en el Ecuador. Conocida como la principal productora de banano con 2' 594 000 toneladas anuales que representan el 43,3% del total de la producción nacional y una producción de 33,22% de las toneladas métricas de banano cosechadas sólo hasta el 2013 a nivel nacional, también es una de las actividades que genera la mayor cantidad de residuos agrícolas en el país, de la cual se registran aproximadamente 1' 453 368, 70 toneladas de desechos al año (ESIN Consultora S.A, 2014), que si no son aprovechados o dispuestos correctamente se convierten en un problema ambiental de contaminación además de ocupar grandes volúmenes de espacio en un relleno sanitario en el más afortunado de los casos.

Por lo mencionado anteriormente, la importancia en la localización adecuada de una o varias centrales de biomasa pueden determinar el éxito o fracaso en la rentabilidad y abastecimiento de energía eléctrica.

### **Descripción resumida del proyecto**

Tomando en cuenta el acelerado incremento de la población y el crecimiento exponencial en la generación de residuos, su inadecuado manejo y el aumento de la demanda energética además del lento pero inevitable cambio de la matriz energética, la presente investigación se centrará en el estudio, análisis y localización de áreas óptimas para la ubicación sostenible de una central de biomasa en la provincia de El Oro, de tal manera que se

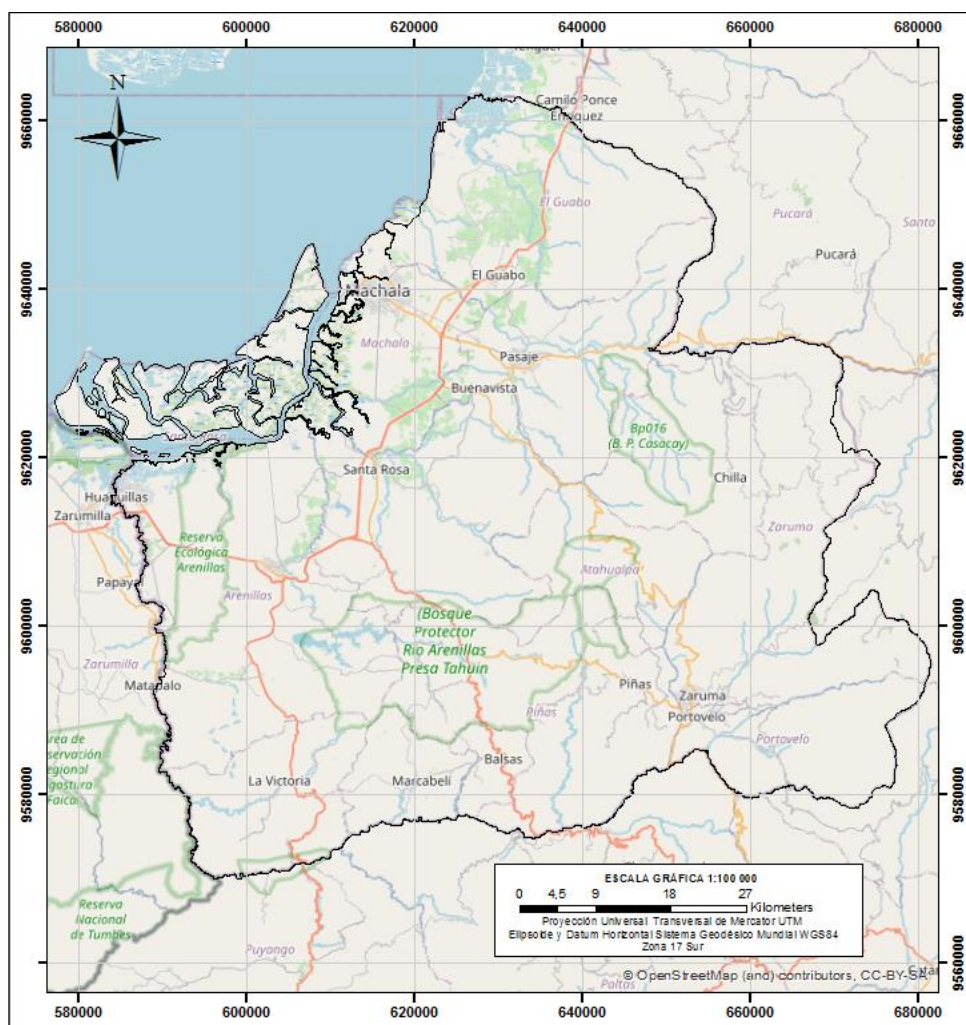
pueda aprovechar el potencial energético de los residuos que se obtienen en la producción de banano.

### **Área de estudio**

Uno de los objetivos planteados en este estudio, es posibilitar la utilización de los residuos agrícolas de banano como un recurso energético. En este contexto, la provincia de El Oro se convierte en un escenario ideal para el aprovechamiento de este recurso, dado que por un lado, esta provincia cuenta con una importante superficie agrícola dedicada al cultivo de banano (más del 70% de la producción total del país, junto con la provincia de Los Ríos) y a la vez presenta un gran volumen de residuos agrícolas, producto de la misma agroindustria (ESIN S.A, 2014) y por otro lado, en la región existen importantes problemas ambientales y socioeconómicos ocasionados por la demanda de energía eléctrica, costos elevados y residuos generados (GADPEO, 2015).

Figura 1

Área de estudio



Nota. Ubicación del área de estudio.

La provincia de El Oro ocupa una superficie total de 5 767 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por un clima tropical seco mega térmico y una temperatura promedio anual de 25 ° C. Según datos de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) (INEC, 2019), la producción de banano a nivel nacional ocupó cerca de 6,5 millones de toneladas hasta el año 2018, y sólo en la provincia de El Oro la producción fue de 1,6 millones de Tm. En la localidad existen amplias zonas destinadas al monocultivo de banano, en las cuales no se realiza el



adecuado manejo de la biomasa residual, lo cual desencadena varios problemas ambientales e incluso se desaprovecha una gran cantidad de energía (liberada en la combustión) que podría ser destinada a la producción de energía (Armas Espinel, 2017),

Entre los cantones que ocupa la provincia, los más representativos en el ámbito del banano, son los siguientes: El Guabo, Machala, Pasaje, Santa Rosa y Arenillas; la suma de éstos representa el 15,9% del total de la superficie nacional cultivada de banano (INEC, 2019), es decir, la mayor parte de las plantaciones de banano tienen lugar en estos cantones, por lo que presentan el mayor potencial para la obtención de residuos aprovechables.

La investigación realizada en la provincia de El Oro, se puede aplicar a diferentes sectores agrícolas a nivel nacional utilizando la misma metodología, basada en evaluaciones multicriterio.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Determinar los sitios potenciales para la ubicación de una central de biomasa residual agrícola de banano, en la provincia de El Oro, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y el método de evaluación multicriterio: Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

### ***Objetivos Específicos***

OE1: Estimar la disponibilidad de biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable del cultivo de banano, para la generación de electricidad, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y fórmulas matemáticas.

OE2: Seleccionar e identificar los factores espaciales para obtener las áreas de mayor aptitud para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola de banano, mediante la información cartográfica y científica, recopilada.

OE3: Identificar y modelar los criterios de restricción para determinar las áreas de emplazamiento de una central de biomasa, mediante el geoprocesamiento de las capas geográficas empleadas.

OE4: Evaluar las alternativas de emplazamiento para la ubicación de una central de biomasa, en base a la información recopilada y el uso de sistemas de información geográfica SIG.

### **Metas**

- Mapa de áreas óptimas para la ubicación de una central de biomasa en la Provincia de El Oro, escala 1:100 000 (Incluye serie de alternativas de solución).
- Geodatabase y base de datos alfanumérica de toda la información recopilada.
- Mapa de las zonas de cultivos de banano en la provincia de El Oro, escala 1:100 000.
- Mapas de los factores seleccionados para el emplazamiento de una central de biomasa, en la provincia de El Oro, escala 1:50 000
- Mapas de las áreas restringidas para el emplazamiento de una central de biomasa, escala 1:50 000.

### **Hipótesis de investigación**

H1: Es posible evaluar e identificar los sitios potenciales para la ubicación de una central de biomasa en la Provincia de El Oro, que pueda aprovechar la biomasa residual que se genera en la producción de banano, mediante el uso de Sistemas de información Geográfica y Análisis Multicriterio.

### **Variables de Investigación**

Las variables de la investigación que se emplearán para el desarrollo del proyecto de investigación se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1***Matriz de Operacionalización de Variables*

<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Subtipo</b>	<b>Método de observación</b>	<b>Fuente</b>
<b>Variable Dependiente</b>	Central de biomasa.	Cualitativo	Indirecto	-
	Cultivos de banano.	Cuantitativo	Indirecto	SNI
		Cualitativo		
	Potencial energético	Cuantitativo	Indirecto	-
		Cualitativo		
Pendiente.	Cuantitativo.	Indirecto	SNI	
<b>Variables Independientes</b>	Uso y cobertura del suelo.	Cualitativo	Indirecto	SNI
				Personal
	Áreas protegidas (SNAP)	Cuantitativo	Indirecto	SNI
				IGM
	Red vial / Red de transporte.	Cualitativo	Indirecto	SNI
				IGM
	Red eléctrica	Cualitativo	Indirecto	SNI
				IGM
	Población urbana y rural	Cualitativo	Indirecto	SNI
				IGM
Proximidad a cuerpos de agua.	Cuantitativo	Indirecto	SNI	
			IGM	

Una vez que se describió la problemática que motiva a esta investigación, justificación y antecedentes, además de los objetivos y metas a perseguir, es necesario describir y fundamentar el sustento teórico de la metodología planteada para la consecución y cumplimiento del propósito de este estudio.

## Capítulo II

### Marco Teórico

En el presente capítulo se describe el fundamento teórico que servirá de respaldo y guía para el desarrollo del presente proyecto. Dentro de este capítulo se establece una imagen clara y precisa de los acontecimientos que el investigador busca analizar, explicar o predecir. Se trata de un lente conceptual mediante el cual se observa e interpreta la realidad sin que se condicione necesariamente el planteamiento metodológico de la investigación.

#### **Fundamentación Legal**

La elaboración del proyecto, surge de la necesidad de ubicar instalaciones para el aprovechamiento energético de los residuos que se generan en la producción de banano, y apunta al cumplimiento de los objetivos y políticas del Plan Nacional para el Buen Vivir, de promover una mayor participación en el ámbito de las energías renovables para reducir la dependencia al uso de combustibles fósiles e impulsar el cambio de la matriz energética. Este tema cobra importancia en un momento en el que la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL), marca como objetivo que el 93% del consumo de energía en Ecuador, proceda de fuentes renovables (ARCONEL, 2015).

#### ***Constitución de la República del Ecuador***

Dentro del marco legal para el aprovechamiento de las energías renovables, se ha promulgado la inversión, investigación y desarrollo de energías limpias que ayuden a la diversificación eficiente de la canasta energética en el país. La Constitución de la República del Ecuador publicada en el año 2008 (Constitución de la República del Ecuador, 2008), hace referencia a las energías alternativas y recursos naturales, en distintos artículos que se mencionan a continuación:

“Art. 14. Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir. Se declara de

interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados”

“Art. 15. El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientales limpias y energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua”

“Art. 284. La política económica tendrá los siguientes objetivos.... Asegurar la soberanía alimentaria y energética”

“Art. 413. El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnológicas ambientalmente limpias y sanas, así como las energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.”

“Art. 414. El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de la emisión de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo”

### ***Plan Nacional del Buen Vivir***

Objetivo 7. Garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global.

Objetivo 11. Asegurar la soberanía y eficiencia de los sectores estratégicos para la transformación industrial y tecnológica.

Así mismo, el cumplimiento del proyecto basado en las normativas mencionadas tiene el propósito de impulsar a la diversificación del sector energético y dar una base científica para el sector empresarial y gubernamental, de acuerdo a la disponibilidad de residuos y el potencial energético de los mismos.

## Generalidades de la Biomasa

La biomasa es energía que se basa en la degradación espontánea o inducida de la materia orgánica como consecuencia de un proceso biológico, espontáneo o provocado, también se considera a toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis y procesos metabólicos de los organismos heterótrofos (Jarabo Friedrich, 1999). Según la Unión Europea, la biomasa es “...toda fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales, domiciliarios e industriales” (Cerdá, 2012)

En el proceso de fotosíntesis se producen grandes moléculas de alto contenido energético, cuyo coste de almacenamiento es nulo y, en principio, sin pérdidas. En este proceso, los vegetales transforman productos minerales sin valor energético, como el dióxido de carbono y agua, en materias orgánicas de alta energía, proceso que sólo tiene lugar en las plantas que contienen clorofila, ya que este compuesto es el que posibilita toda la serie de reacciones químicas que tienen lugar. Los productos que fabrican para sí las plantas (azúcares, proteínas, grasas, etc.) y el oxígeno que simultáneamente eliminan, sirven, a su vez, directa e indirectamente, de alimentos constituyentes o energéticos a todos los demás seres que habitan el planeta (Jarabo Friedrich, 1999)

Los sistemas vivos que captan y transforman la energía solar, están ampliamente distribuidos sobre la superficie terrestre y acuática, cubriendo una vasta extensión, lo que determina que la cantidad de energía almacenada por fotosíntesis sea aproximadamente 8,5 millones de TWh/año. Además, cerca del 40% de la biomasa existente en el planeta, está localizada en los océanos y, por lo tanto, es de difícil recolección. Por otra parte, la biomasa terrestre presenta la desventaja de que se encuentra altamente dispersa, haciendo que los costes energéticos de recolección y transporte limiten su posible aprovechamiento (Jarabo Friedrich, 1999).

En temas de conservación, aprovechamiento de energía, estimación de la fijación de carbono derivado del crecimiento de las plantas y proceso climáticos, la biomasa juega un rol muy importante (Rojas U, 2015). Además, es una de las alternativas de energía renovable más atractivas debido a que por medio de su conversión se pueden obtener una gran variedad de productos amigables con el medio ambiente, como biocombustibles sólidos, biocombustibles líquidos y biocombustibles gaseosos, los cuales pueden ser utilizados para abarcar diferentes necesidades energéticas (Kasper, Marangoni, & Ozair, 2013). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA Bioenergy), el 10 % de la energía primaria a nivel mundial proviene de la biomasa; gran parte de este porcentaje corresponde a los países pobres y en desarrollo, en donde la biomasa resulta ser la materia prima más utilizada para la producción de energía (Rural Bioenergy, 2018).

Una gran parte de la biomasa procede de residuos que es necesario eliminar, ya que en un contexto general son causantes de contaminación ambiental y ocupan un volumen considerable en los rellenos sanitarios o centros de disposición final; por tanto, el aprovechamiento energético de los residuos supone convertir un desecho en un recurso (Fernández, s.f). Las características físicas y químicas de la biomasa influyen en el proceso de conversión energética que se desee utilizar, por lo tanto es necesario conocer la composición del tipo de biomasa a utilizar, con el fin de seleccionar la tecnología más adecuada para su aprovechamiento energético (ESIN S.A, 2014).

Como fuente de energía, la biomasa tiene una gran aceptación a nivel mundial, debido principalmente a la facilidad de encontrar residuos energéticos que contribuyan a la creación de energía ya sea de fuentes naturales o residuales. Sin duda, es un recurso de gran importancia a corto y medio plazo dentro del ámbito energético, sin embargo, depende en gran parte de un adecuado manejo para que su aprovechamiento sea óptimo, eficiente y sostenible ambientalmente (Serrano, Mejía, & Ortiz, 2017).

En Sudamérica, países como Brasil, Colombia, Ecuador, entre otros, se destacan por ser países con grandes potenciales de biomasa debido a la gran cantidad de producción agrícola, agropecuaria y biodiversidad que presentan en sus terrenos, principalmente por los grandes bosques de la Amazonía que poseen. En este sentido, Ecuador es un país rico en biomasa debido a los ingentes recursos agrícolas, forestales y pecuarios que dispone y de cuyos desechos se puede obtener suficiente materia prima para producir energía limpia y renovable (ESIN S.A, 2014).

### ***Clasificación de la biomasa***

Los distintos tipos de biomasa se caracterizan por la cantidad de energía que contienen y que pueden llegar a liberar cuando se someten a un proceso de conversión. Los componentes predominantes de la biomasa son carbono, oxígeno e hidrógeno.

Según su composición, la biomasa se clasifica en: azucarada, almidonada, oleaginosa y lignocelulósica. Y de acuerdo a su origen tenemos:

- Biomasa natural: Biomasa que se genera de forma espontánea en los ecosistemas naturales, por ejemplo, bosques.
- Biomasa residual: Son todos aquellos subproductos derivados de las actividades agrícolas, ganaderas, humanas y forestales. Puede ser: residuos sólidos urbanos.
- Biomasa residual seca: Aquella procedente de recursos generados por actividad agrícola, forestal, industria agroalimentaria e industria maderera.
- Biomasa residual húmeda: La constituyen los vertidos biodegradables, tales como aguas residuales e industriales incluidos los residuos agrícolas.

Según la Unión Europea, existen cuatro fuentes energéticas diferentes que hacen uso de la biomasa: (1) biomasa sólida, (2) biogás, (3) fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y (4) biocarburantes (biocombustibles sólidos) (Cerdá, 2012).



### ***Biomasa residual***

Según el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA Libro VI, 2015), la biomasa residual es “la que se genera en cualquier tipo de actividad humana fundamentalmente en los procesos productivos de los sectores agrícola, ganadero, así como los residuos sólidos y líquidos de asentamientos urbanos utilizados para aprovechamiento energético” (Armas Espinel, 2017).

Dentro de este contexto, la biomasa residual es aquella que se produce como resultado de cualquier proceso en el que se consuma materia orgánica. Se genera en explotaciones agrícolas, forestales o ganaderas, y también se consideran a todos los residuos de origen humano y orgánico que se generan en las industrias y en los núcleos urbanos (Fernández, s.f); y presenta la ventaja de producirse de forma continua y creciente como consecuencia de la actividad humana (Jarabo Friedrich, 1999).

Siendo así, los residuos engloban a todos aquellos materiales que se generan en una cadena de producción e inicia en las actividades de producción, transformación y consumo que no han alcanzado ningún valor económico dentro del contexto en el que son generados (Jarabo Friedrich, 1999).

La biomasa residual se puede transformar en bioenergía (Rodríguez, Piastrellini, & Arena, 2018), siempre y cuando se brinde un adecuado manejo de la misma, ya que con ello se garantiza un buen suministro energético y también la solución a la mala disposición de los residuos.

En Ecuador, la biomasa residual procedente de la agricultura constituye un recurso potencialmente aprovechable como fuente de combustibles y otros subproductos. Sin embargo, no ha sido ampliamente utilizado, debido a la carencia de información que existe sobre cantidad y calidad de estos recursos para su transformación.

### ***Biomasa residual agrícola***

En el sector agrícola, la biomasa residual se considera un pasivo ambiental no utilizado, pero con un gran potencial de aprovechamiento (Torres Álvarez & Peña Cortés, 2012), y está conformada por los subproductos que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas. La actividad agrícola es la que reporta una mayor cantidad de residuos seguida de la actividad domiciliaria, mientras que las actividades forestales e industriales registran un menor aporte (Rodríguez, Piastrellini, & Arena, 2018).

La evaluación de la producción de residuos agrícolas que se origina de las actividades agroindustriales, se realiza mediante el empleo de un coeficiente denominado Factor de Cosecha a Residuo (FCR) o Ratio de Residuos del Cultivo *i* (RTC); este factor, es la relación entre residuos y producto que caracteriza el volumen de residuos generados por tipo de producto y, aplicado al volumen en toneladas anuales de la producción agrícola, proporciona como resultado el volumen en toneladas de los residuos producidos (ESIN S.A, 2014)

Entonces, en términos simples, se trata de toda aquella materia orgánica que proviene del sector primario de la actividad humana, es decir, la agricultura. Un residuo agrícola se define como la planta cultivada o porción de ella que es preciso separar y descartar para obtener el fruto o para facilitar el cultivo agrícola propio o posterior (Jarabo Friedrich, 1999)

Por lo general, los residuos agrícolas quedan esparcidos en el campo como consecuencia de las prácticas de mantenimiento de podas, reposición por diferentes motivos y cosechas de los cultivos; una fracción de estos desechos queda en el suelo, en forma de raíces, hojas o frutos no aprovechables, y no pueden ser utilizados como fuente energética, pues es necesaria su incorporación al suelo, con lo que contribuyen a mejorar considerablemente la fertilidad del terreno (Jarabo Friedrich, 1999), además de protegerlo de la erosión y mantener el nivel óptimo de nutrientes orgánicos. Dentro de ésta categoría, también está el banano de rechazo que es de buena de calidad para el consumo humano o de animales y que suele distribuirse a la población de forma local. El excedente recolectado de los residuos

se aprovecha para diferentes propósitos, por ejemplo, los residuos de la caña de azúcar se emplean para la generación de vapor, como sustituto de la leña para la cocción de alimentos, para la producción de compost y como alimento animal (ESIN S.A, 2014).

El sector agrícola cuenta con los residuos provenientes del corte de la cosecha y los residuos agroindustriales obtenidos luego del procesamiento de los productos agrícolas (Galán R, 2016). Según (Escalante Hernández, Orduz Prada, Zapata Lesmes, Cardona Ruiz, & Duarte Ortega, 2007) , entre las diversas fuentes de biomasa residual agrícola se pueden destacar dos grandes tipos de cultivos, los cultivos transitorios (Arroz y Maíz) y los cultivos permanentes (Banano, Café, Plátano, Caña de panela, Palma aceite y Caña de azúcar).

### ***Importancia de la biomasa residual agrícola como fuente energética***

Al convertir un residuo en un recurso, se realiza un proceso de reciclaje y al mismo tiempo se contribuye con el cuidado del medio ambiente (Armas Espinel, 2017). El tratamiento de los residuos es una actividad costosa, que por lo general no se lleva a cabo con eficacia, bien por falta de una legislación adecuada o por carencia de medios tecnológicos y económicos. No obstante, un posible aprovechamiento de los residuos con fines energéticos tiene enormes ventajas, algunas de las cuales se enumeran a continuación (Jarabo Friedrich, 1999):

- Los residuos se producen de forma continua y tienen un valor económico negativo como materia prima.
- La biomasa residual suele estar concentrada en lugares determinados (dependiendo del tipo), facilitando un ahorro en costes de transporte.
- La utilización de residuos con fines energéticos es un sistema de doble aprovechamiento, por una parte, reduce los impactos ambientales que se generan durante una mala gestión y por otra, permite el abastecimiento energético a una población.

- Algunos métodos de aprovechamiento generan co-productos valiosos, que hacen que el tratamiento de la biomasa residual sea necesario, de tal forma que pueda convertirse en una actividad de interés económico y, fundamentalmente, social, debido a los beneficios que generaría su aprovechamiento.
- Reducción de las emisiones de azufre y partículas y de gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>.

Al igual que el resto de recursos proveedores de biomasa, presenta la característica de estar disponible continuamente en comparación a otras fuentes de energías renovables como la eólica o la hidroeléctrica, principalmente porque la biomasa conserva su energía hasta el momento de su empleo. Esta particularidad, hace que la biomasa sea la energía renovable más fácil de gestionar, facilitando la creación de un stock energético para momentos en que las fuentes energéticas convencionales no se encuentren disponibles ( Jarabo Friedrich, 1999; Lorente, Antolín, & Doblas, 2009). Por otra parte, una de las principales desventajas que limita su desarrollo y utilización frente a otras energías de este grupo, es la escasa concentración espacial que presentan, su ubicación en terrenos de difícil acceso y el desconocimiento de la cantidad de biomasa residual existente en una plantación (IDAE, 2007). Además de otros factores no menos importantes como: la recolección, el transporte, el almacenaje y el tratamiento de la biomasa, que conllevan una logística casi siempre compleja y, por lo tanto, costosa (Fernández, s.f).

Por lo tanto, conocer la disponibilidad de la biomasa existente en un territorio, no es la única dificultad a la hora de buscar áreas de emplazamiento para una central bioenergética (Domínguez, Ciria, & Luis, 2002; Abdo Peralta, 2021; Velásquez M, 2006). En el presente caso de investigación también se han destacado otros factores de índole espacial que inciden de forma decisiva en el aprovechamiento de este recurso, ya que determinan la rentabilidad y el costo de la extracción de la biomasa, estos son: la pendiente, pues controla la eficiencia de extracción y el empleo de maquinaria (Álvarez, 2004; Esteban, Pérez, Ciria, & Carrasco, 2004);

la extensión de las masas agrícolas, que establece el número desplazamientos que serán necesarios en cada cultivo para extraer la materia prima (Asikainen, Björheden, & Nousiainen, 2004)); y por último, está la distancia a pistas, caminos y carreteras para el transporte desde la zona de extracción hasta el lugar de transformación energética (Álvarez, 2004) (Esteban, Pérez, Ciria, & Carrasco, 2004).

Los factores seleccionados, son fácilmente modelizables en un SIG, asignando valores de aptitud recogidos en base a la bibliografía empleada, relacionada a la viabilidad técnica para la extracción de biomasa residual, de tal modo que se puede obtener las zonas de aprovechamiento óptimas, para la extracción de la biomasa (García-Martín, y otros, 2011). Es así, como la biomasa residual agrícola se convierte en una opción muy atractiva para la producción de bioenergía en contribución al cambio de matriz energética basada en combustibles fósiles por una alternativa amigable con el entorno.

Es importante resaltar que el proceso de transformación de los residuos agrícolas en forma de energía requiere la inversión de tecnologías nuevas, una vez determinada la metodología de conversión energética, el propósito también, es que se convierta en una alternativa económicamente viable para el suministro y distribución de energía a una población.

La idea de este trabajo es que la industria bananera pueda optar por el aprovechamiento de sus residuos generando energía limpia para el autoabastecimiento, abastecimiento local y posterior distribución a la red eléctrica nacional (Jarabo Friedrich, 1999).

### **Métodos de aprovechamiento de la Biomasa**

No todos los tipos de residuos pueden ser aprovechados con la misma tecnología y que un mismo residuo puede ser utilizado aplicando diferentes procesos tecnológicos. A continuación, se presenta una breve descripción del biogás (biocombustible gaseoso) y el proceso tecnológico que se puede aplicar a la biomasa en cuestión, para su aprovechamiento energético (Cerdá, 2012).

## **Biogás**

El biogás es una mezcla gaseosa de metano (55-65%) y CO<sub>2</sub> (35-45%); y pequeñas proporciones de nitrógeno, (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) (Fernández, s.f); cuya composición depende tanto del sustrato como del tratamiento en sí; destacándose como uno de los productos principales del proceso de digestión anaerobia para el aprovechamiento energético de la biomasa. Este producto, se obtiene a partir de un proceso de fermentación anaeróbica de los componentes orgánicos de los residuos, denominado “metanización”. Este fenómeno de fermentación ocurre por las bacterias que se desarrollan en ambientes ausentes de oxígeno (mediante digestión aneróbica) y el resultado es un gas denominado “biogás” (Armas Espinel, 2017)

Es importante resaltar, que el poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano (9.500 kcal /m<sup>3</sup>), logrando aumentar si se elimina todo o parte del CO<sub>2</sub> que le acompaña. Este tipo de transformación tiene lugar de manera espontánea en pantanos, fondos de lagunas y lagos en los que exista depósitos de materia orgánica. Por tal motivo, el metano recibe el nombre del “gas de los pantanos” (Fernández, s.f).

El volumen de biogás generado por unidad de material potencialmente digerible es muy variable en términos de rendimiento, ya que depende en gran manera de la composición de la materia prima y de las condiciones del proceso como: temperatura, velocidad de alimentación, tiempo de retención y tipo de digestor. Por lo general la biomasa vegetal tiene un rendimiento mayor, en comparación al biogás generado por la biomasa animal; sin embargo, el contenido de metano del gas procedente de vegetales es menor, lo que reduce su poder energético (Cabrera, y otros, 2011).

El biogás es empleado en varias formas, como:

- Aplicación directa como fuente de calor (cocina, alumbrado).
- Combustión en calderas de vapor convencionales, que aprovecha el calor generado para calentar el digestor y para lograr una calefacción general.

- Combustible en motores de combustión interna acoplados a generadores de electricidad (generar electricidad).

Tiene numerosas ventajas y funciones como, por ejemplo, impedir que gases como el  $\text{CO}_2$  y el metano ( $\text{CH}_4$ ) escapen de forma descontrolada a la atmósfera, es importante recordar que el componente más abundante de los gases de efecto invernadero es el metano, que además de ser peligroso por su inflamabilidad es uno de los gases más potentes en cuanto a persistencia y contaminación (su incidencia es 21 veces superior a la del  $\text{CO}_2$  (Fernández, s.f). Generar energía con biogás también contribuye a contrarrestar los malos olores asociados a la descomposición de la materia orgánica (Fernández, s.f).

Para obtener biogás, la digestión anaerobia es el proceso ideal y típico de depuración, y también es empleado para el tratamiento de aguas residuales y efluentes orgánicos de industrias agrarias o de explotaciones ganaderas.

### ***Digestión anaerobia***

La generación de biogás mediante digestión anaerobia se produce a partir de residuos orgánicos húmedos sometidos a fermentación. En este proceso biológico, la materia orgánica se descompone en ausencia de oxígeno, en los productos: biogás (gaseoso); biol (líquido) y biosol (sólido) gracias a la acción de bacterias o microorganismos específicos (ESIN S.A, 2014).

Se trata de un proceso de fermentación microbiana basado en rigurosas condiciones de ausencia de oxígeno (medio anaerobio), que da lugar a una mezcla de productos gaseosos (principalmente metano y dióxido de carbono), conocido como biogás y a una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodo o fango), en la que se encuentran los componentes difíciles de degradar, junto con el nitrógeno, fósforo y los elementos minerales inicialmente presentes en la biomasa (Fernández, s.f)

Todo tipo de biomasa es útil para este procedimiento, especialmente aquella de alto contenido en humedad. Sin embargo, al tratarse de un proceso biológico, la viabilidad del

tratamiento para cada tipo de materia orgánica depende de una serie de factores relacionados con su composición y su contenido en nutrientes. Por ello, la biomasa más utilizada para someterla a digestión anaerobia es la de tipo residual (Fernández, s.f). Este tratamiento puede aplicarse a excedentes de cosechas, cultivos energéticos, residuos agrícolas, ganaderos, lodos de agua y efluentes industriales (Cabrera, y otros, 2011)

La tecnología para los procesos de digestión anaerobia presenta grandes ventajas en cuanto a aplicación por varios motivos:

- Se trata de residuos localizados.
- Los residuos tienen gran cantidad de agua.
- Aportan un alto contenido en nutrientes para el crecimiento bacteriano.
- El efluente del proceso mejora notablemente la concentración de nutrientes respecto al residuo original, lo que supone una gran ventaja para su utilización posterior en la agricultura

Debido a la crisis energética cada día son más numerosas las centrales de biomasa que recuperan el biogás y lo utilizan como aporte energético (térmico y eléctrico) de la misma planta.

Durante la digestión, la biomasa de partida, compuesta de moléculas complejas, se descompone en moléculas más pequeñas durante tres etapas, para tener productos finales como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ):

Durante la primera etapa, la hidrólisis, ciertos tipos de bacterias (aerobias, anaerobias o facultativas) producen la degradación de los polímeros orgánicos complejos constituyentes de la biomasa, dando lugar a moléculas más simples.

Durante la segunda etapa, la acidogénesis, otro grupo de bacterias producen varios compuestos simples, entre los que destacan ácidos volátiles como el acético, así como



hidrógeno y dióxido de carbono, que serán utilizados como alimento por las bacterias metano génicas en la siguiente etapa.

La tercera etapa, la metanogénesis, implica la degradación de las sustancias producidas en etapas anteriores a metano y dióxido de carbono por parte de un grupo de bacterias estrictamente anaerobias, denominadas metano génicas. La magnitud de su población condiciona fuertemente la producción de metano, ya que su velocidad de reproducción es muy baja y necesitan unas condiciones del medio muy propicias. Las condiciones óptimas y los rangos de oscilación de las variables que afectan a la digestión anaerobia han sido estudiadas por muchos investigadores que, desgraciadamente, no se ponen de acuerdo en todos los puntos

El proceso de digestión se lleva a cabo en los llamados digestores, que son recipientes estancos que deben permitir la carga y descarga de materiales y poseer un dispositivo para recoger el gas producido. Potencialmente, los sistemas de digestión anaerobia tienen varias misiones; por ejemplo, pueden ser necesarios para producir o ahorrar energía, reducir la carga orgánica de un residuo, eliminar microorganismos patógenos o aumentar el valor de un residuo como fertilizante. Para una aplicación determinada, puede ser de mayor importancia una de estas funciones, o varias a la vez (IDAE, 2007).

### ***Combustión***

La combustión directa es la forma más antigua y común para aprovechar la energía de la biomasa. Los sistemas de combustión directa son aplicados para generar calor, el cual puede ser utilizado para calefacción, cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. El calor generado puede aprovecharse en la producción de vapor para procesos industriales y electricidad.

Las tecnologías de combustión directa van desde sistemas simples, como estufas, hornos y calderas, hasta otros más avanzados como combustión en lecho fluidizado. El uso de

calderas y turbogeneradores para la generación eléctrica es muy común. Implementar procesos de cogeneración de electricidad y calor permite mejorar los rendimientos (ESIN S.A, 2014)

A pesar de que ésta técnica es una práctica muy generalizada, vale mencionar que la combustión de biomasa no contribuye al aumento del efecto invernadero, porque el carbono liberado forma parte de la atmósfera actual (se trata del carbono que absorben y liberan continuamente la plantas durante su crecimiento) y no del carbono que se almacena en el subsuelo, capturado en épocas remotas precisamente como el gas natural o petróleo.

### **Banano** (*Musa Paradisiaca*)

El banano es una hierba tropical perenne de gran tamaño (megaforbia) que carece de tronco verdadero y en su lugar, posee vainas foliares que se desarrollan formando pseudotallos similares a fustes verticales que llegan a alcanzar hasta 30 cm de diámetro y 7 m de altura. Se caracteriza por tener hojas grandes dispuestas en forma de espiral y por su fruto oblongo que tarda entre 80 y 180 días en desarrollarse por completo (ESIN S.A, 2014). La temporada alta de producción, ocurre en los meses enero a abril y la temporada baja en los meses de mayo a diciembre (Motoche, Garzón, Carvajal, & Quezada, 2021).

En términos agrícolas, se trata de un cultivo permanente con un límite de vida productivo desde la siembra hasta la cosecha, de 12 meses (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016). La planta tiene un racimo de fruto en su vida liberando una gran cantidad de residuos (almidón y biomasa lignocelulósica) que pueden ser empleados con fines energéticos (ESIN S.A, 2014).

Después de la cosecha, el cultivo de banano debe tener un peso promedio de 100 kg, que están repartidos en 15 kg de hojas, 50 kg de pseudotallo, 33 kg de banano y 2 kg de raquis, es decir que aproximadamente el 67% del volumen total de la producción queda sin utilidad aparente (Regalado Castro, 2017), generando cuatro tipos de residuos agrícolas: pseudotallo, hojas (residuos agrícolas de campo), raquis y plátanos de rechazo (residuos

agrícolas de producción) (ESIN S.A, 2014); y cuatro residuos corrientes como: bolsas de polietileno, bolsas de empaque, fertilizantes y nematicidas (Anagumbra & Naranjo, 2015). Un estudio de Brasil muestra que cada tonelada de banano recolectado genera una significativa cantidad de biomasa residual, compuesta por 3 t de pseudotallo, 150 kg de raquis y 480 kg de hojas, en materia fresca (Kasper, Marangoni, & Ozair, 2013), mientras que, la proporción de bananos desechados varía entre un 10% y un 30% de la producción total de banano (Robinson & Galán, 2012). Según datos obtenidos en el Atlas Bioenergético del Ecuador, existen tres tipos de tecnologías que pueden aprovechar este residuo como materia prima para generar bioenergía, como son: combustión, gasificación, ciclos ORC (Ciclo Orgánico Rankine); además, se estima que el PCI (potencial calórico interno) de los residuos de campo es de 12,625 MJ/kg y 4,180 MJ por cada kilogramo de residuos de producción, con ello se estima que la producción de energía eléctrica ocuparía 698,20 kWh/t (base seca) (ESIN S.A, 2014).

Un buen clima y buen suelo hacen de Ecuador un productor de banano de alta calidad (Motoche, Garzón, Carvajal, & Quezada, 2021). Con una producción nacional aproximada de 224 137 hectáreas (En la provincia de El Oro se concentran 9 914 ha.) y contribuye con el 29% de las exportaciones mundiales (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016). Hasta el año 2019 la superficie plantada fue de 190.381 ha (Motoche, Garzón, Carvajal, & Quezada, 2021) y la superficie cosechada de 183.347 hectáreas (INEC, 2019). La producción se concentra principalmente en la Región Costa, en la provincia de Los Ríos con el 33,56%, El Oro con 24,06% y Guayas con el 25,83%; y suman el 84,1% de la superficie total cosechada de éste producto (INEC, 2019) (Motoche, Garzón, Carvajal, & Quezada, 2021).

Un análisis de la superficie cosechada resulta de suma importancia considerando que dicho indicador mantiene una relación directa con el nivel de producción, ante una mayor extensión sembrada y consecuentemente cosechada, se refleja una mayor producción y mayor volumen de residuos generados (Guerrero A. , 2014). Se estima que sólo la provincia de El

Oro encierra un potencial de biomasa disponible de 190.102 t año<sup>-1</sup> de materia fresca (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016).

Con toda esta información se determinó que este país sudamericano cuenta con 224.137 hectáreas dedicadas al cultivo, de las cuales 59.914 se encuentran concentradas en la zona noroccidental de la provincia de El Oro.

Los residuos de banana son reconocidos como los residuos agrícolas más importantes del país y con un futuro prometedor debido a la cantidad que se produce, localización centralizada y disponibilidad (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016). La bioconversión de la biomasa residual de banano en biocombustibles o energía podría reemplazar una proporción significativa de combustibles fósiles y diversificar la canasta energética (Guerrero A. , 2014).

### ***Condiciones de cultivo***

El banano exige las siguientes condiciones para un óptimo desarrollo:

- Clima cálido y una constante humedad en el aire.
- Requiere una temperatura media de 26 °C a 27 °C, con lluvias prolongadas y regularmente distribuidas. El crecimiento se detiene a temperaturas inferiores a 18 °C y se producen daños a temperaturas menores de 13 °C y mayores de 45 °C.
- Son preferibles las llanuras húmedas próximas al mar, resguardadas de los vientos y regables.
- Los suelos ricos en potasio, arcillo-silíceos, calizos, o los obtenidos por la roturación de los bosques, susceptibles de riego en verano, pero que no retengan agua en invierno.
- La platanera tiene una gran tolerancia a la acidez del suelo, oscilando el pH entre 4,5 y 8.

### ***Residuos y producción de banano en la Provincia de El Oro.***

La relación entre residuos y producción de banano es de 2:1. De todos los residuos que se liberan, una parte permanece sobre el suelo para recuperar la fertilidad del mismo y otra parte llega a vertederos a cielo abierto. En el primer caso, contribuyen a mantener la humedad

del suelo y aportar materia orgánica, sin embargo, también suponen un riesgo potencial de diseminación de enfermedades; y en ambos casos se generan gases de efecto invernadero al descomponerse. El índice de fruto de rechazo que no ha logrado alcanzar los estándares de calidad para la venta y exportación, varía entre el 8 y el 20%, por lo general, este residuo sirve para alimentación animal, pero la mayoría de los productores prefieren dejarlo descomponerse al aire libre por razones económicas (Carhuancho L, 2015).

**Tabla 2**

*Producción de banano y residuos generados en los cantones de la provincia de El Oro.*

Provincia	Cantón	Superficie (km <sup>2</sup> )	Producción Absoluta (t/año)	Densidad de Producción (t/km <sup>2</sup> /año)	Residuos (t/año)	Densidad de residuos (t/km <sup>2</sup> /año)	Energía Bruta (TJ/año)
El Oro	Arenillas	806,13	119229,74	147,90	78691,63	97,62	993,51
	El Guabo	603,39	763774,49	1265,80	504091,16	835,43	6364,35
	Machala	323,47	543692,34	1680,82	358836,95	1109,34	4530,46
	Pasaje	455,54	452352,43	992,13	298552,60	654,81	3769,34
	Piñas	616,92	6969,25	11,30	4599,70	7,46	58,07
	Santa Rosa	810,67	306097,28	377,58	202024,21	249,21	2550,64
	Zaruma	651,59	3833,64	5,88	2530,21	3,88	31,91
	<b>Subtotal</b>	<b>4268,11</b>	<b>2195949,18</b>	<b>4481,42</b>	<b>1449326,4</b>	<b>2957,74</b>	<b>18298,3</b>
				<b>6</b>		<b>2</b>	

*Nota.* La tabla consigna los principales parámetros: producción absoluta de cada actividad, cantidad de residuos resultantes, ambos en toneladas anuales (t/año), la densidad de producción y de residuos en toneladas anuales por kilómetro cuadrado (t/km<sup>2</sup>/año) y la estimación energética asociada en TJ/año, para cada cantón de la provincia de El Oro. Tomado y adaptado de (ESIN S.A, 2014)

La tabla 2, fue adaptada para la presente investigación a partir de los datos del Atlas Bioenergético del Ecuador, cabe recalcar que dentro del documento no se han incluido los cantones cuya producción de residuos no supere los valores mínimos significativos para su utilización energética. El valor mínimo significativo para su consideración ha sido de 14,5 TJ/año. Los datos se presentan ordenados de mayor a menor según la producción absoluta a nivel provincial, en toneladas/año; y los cantones en orden alfabético.

## **Energía**

Es la capacidad que tienen todos los cuerpos para originar trabajo, como generar calor, emitir luz, etc. Toda la energía existente en el planeta, es de origen solar, sus fuentes de calor y luz son las encargadas de desarrollar diferentes reacciones químicas que permiten la existencia de todas las formas de vida existentes, y sirven como material primario para la creación de energía (Galán R, 2016).

Una vez que la energía solar alcanza la superficie del planeta, ésta es transformada químicamente por las plantas a través de la fotosíntesis y gran parte de esta energía se almacena en forma de carbono orgánico como proceso dentro del balance energético de la Tierra, garantizando condiciones óptimas para el desarrollo de la vida (Galán R, 2016).

Dentro de contexto, la matriz energética es una representación cuantitativa del total de la energía que utiliza un país e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica, o de combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón (Abdo Peralta, 2021)

## ***Energías Renovables***

La bioenergía es toda aquella energía obtenida a partir recursos renovables como: viento, agua, residuos orgánicos (biomasa), etc. y que se pueden utilizar una amplia gama de productos y servicios. Tienen un carácter complementario, entre ellas mismas y con otras fuentes energéticas, además permiten un aprovechamiento de recursos locales a escala global,

se caracterizan por ser parte de un recurso cuya tasa de renovación es igual o superior a la de su consumo (Domínguez & Marcos, 2000).

Las aplicaciones y beneficios de las energías renovables son muy importantes ya que contribuyen a la investigación, innovación y desarrollo sostenible de naciones y pueblos, por las siguientes razones: se trata, de fuentes energéticas inagotables, se basan en flujos y ciclos naturales del planeta, son energías limpias, reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, no desgastan la capa de ozono, son aplicables en la agroindustria, transporte, generación de energía eléctrica de uso doméstico, comunicaciones, turbinas, cohetes, satélites, barcos, trenes, automotriz, etc. (El Comercio, 2018)

Los costos de las fuentes de energía renovable también son un factor importante para determinar la competitividad de su aprovechamiento, ya que es probable que inversionistas apuesten por una tecnología nueva que genera electricidad por debajo del precio de mercado para futuras expansiones (Lojano & Ríos, 2013). Las energías renovables aparte de ser amigables con el medio ambiente, constituyen una fuente importante de empleo, siendo la biomasa la que reporta más oportunidades de empleo (De La Paz, 2013). Además, poseen algunas peculiaridades geográficas que las diferencian de otras fuentes. Se trata de recursos que se distribuyen de forma extensiva en comparación con fuentes de concentración fuerte como el petróleo; por lo general, dependen en muchos casos de variables climatológicas (precipitaciones, viento, insolación), además su coste como materia prima es bajo o incluso nulo (viento, radiación, biomasa), su aprovechamiento suele ser tradicional y en ocasiones, pueden ser una alternativa para conectarse a la red eléctrica de un país o estado (Domínguez & Marcos, 2000)

Este nuevo modelo de energías alternativas, actualmente está en auge debido al interés mundial de frenar el calentamiento global, y parte de tres premisas: la diversificación de fuentes energéticas, la racionalización y eficiencia en el consumo de recursos y el respeto al medio ambiente (Domínguez & Marcos, 2000). Dentro del campo investigativo de este estudio,

también se ha supuesto que la producción de bioenergía, es lo suficientemente atractiva como para competir con los usos actuales de los residuos.

Por último, para este trabajo se contempla exclusivamente como fuente de energía, la biomasa residual agrícola de banano, que al igual que el resto de recursos proveedores de biomasa presenta la ventaja de su disponibilidad constante y su particularidad de conservar la energía hasta el momento de su utilización. Esta característica en particular hace que la biomasa sea energía renovable más fácil de gestionar, permitiendo crear un stock energético para temporadas en que otras fuentes no se encuentren disponibles (Jarabo Friedrich, 1999).

### **Sistemas de Información Geográfica**

La principal característica de los SIG es almacenar información y ligarla espacialmente a una superficie (Xolalpa N, 2020). Su médula espinal, es la información geográfica de un acontecimiento, fenómeno o territorio que se busca representar en un mapa, y ésta se divide en dos componentes principales, el componente espacial que hace referencia a la posición del elemento dentro de un sistema de referencia establecido y responde a la pregunta ¿Dónde? Por otra parte, el componente temático responde a la pregunta ¿Qué? Y tiene lugar en las características que adscribe el componente espacial. Ambos componentes son independientes entre sí, es decir, que pueden ser representados de forma espacial o de forma temática de manera independiente (Flores R, s.f).

Un sistema de información geográfica integra información espacial y no espacial, además ofrece un marco consistente de análisis para los datos, diferentes formas de manipularlos y desplegarlos. Estos son usados en distintas áreas para la administración territorial, análisis de redes, logística, ruteo, análisis demográfico, exploración de recursos y modelos de transporte (Xolalpa N, 2020).

El proceso realizado por los SIG cubre: manipulación, adquisición de datos, procesamiento de datos, georreferenciación, compilación y documentación del proceso de



análisis. Otra característica importante es que, la información geográfica analizada por puede ser representada en dos formatos de datos; en forma vectorial o ráster, ambos formatos tienen características propias. La principal diferencia que existe entre ellos es que los datos ráster se guardan en forma de píxeles mientras que los datos vectoriales se guardan en formas geométricas pudiendo ser puntos, líneas y polígonos. Los datos vectoriales tienen una mejor definición cuando se trata de delimitar áreas, mientras que los datos ráster proporcionan una mejor versatilidad al momento de trabajar, tienen menos peso en la memoria de procesamiento de las computadoras (Xolalpa N, 2020).

Los SIG permiten dar una representación a la realidad simplificándola con el objetivo de que se pueda interpretar y se tenga un fácil entendimiento de los fenómenos que ocurren, son categorizados como modelos de interpretación con los cuales se intenta describir a los objetos espaciales de un entorno (Xolalpa N, 2020).

### ***Análisis espacial***

El análisis espacial es un conjunto de técnicas que requiere el acceso a los componentes de dato espacial, localización y atributos de los objetos y/o fenómenos a investigar, ya que los resultados dependen en gran parte de dichos componentes (Goodchild & Haining, 2005). El objetivo principal. es proporcionar un conocimiento sobre las partes que conforman un problema para finalmente llegar a una solución.

El modelado hace referencia a generar nuevos datos por medio de un proceso establecido en tres partes; primero, datos espaciales existentes en la base de datos; segundo, modelos que describan en cierta forma el proceder del mundo real bajo determinadas condiciones; tercero, operaciones de los SIG. A partir de este proceso se obtienen resultados a problemas espaciales de variable complejidad (Gómez & Barredo, 2005). Cabe mencionar que, la simplicidad o complejidad del análisis espacial dependerá de modelo de análisis elegido. Los métodos de análisis se clasifican en tres tipos: estadístico-probabilístico, lógico y matemático.

Para efectos del caso, haremos énfasis en el modelo matemático, el cual se subdivide en datos de tipo discreto o continuo. El primero utiliza operaciones aritméticas multicriterio para obtener un resultado en particular, por ejemplo: la aptitud del terreno; por otra parte, el modelo continuo se realiza por medio de una interpolación.

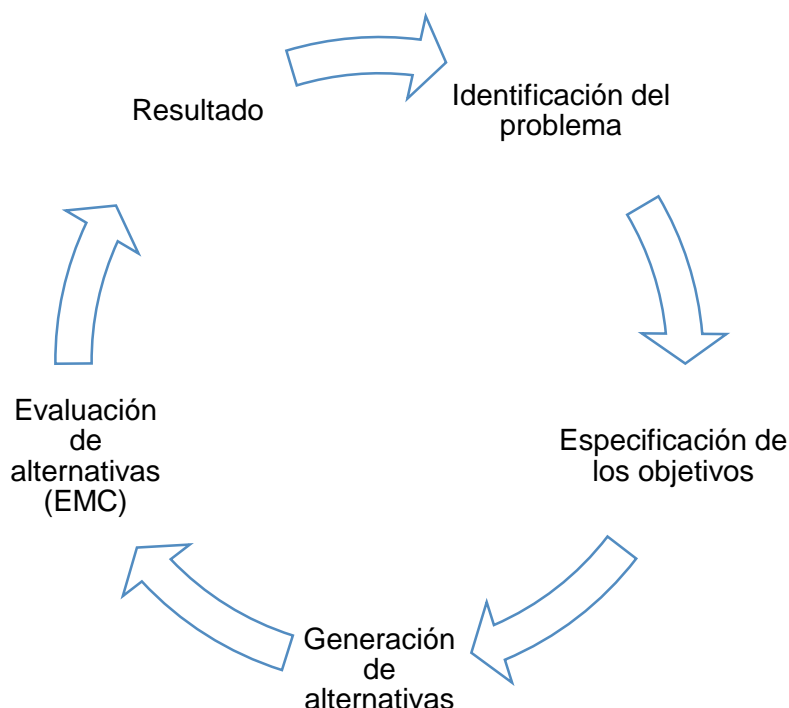
***Método de análisis multicriterio (EMC).***

El análisis multicriterio o evaluación multicriterio (EMC), es una herramienta que consiste en la evaluación completa entre variables, integración de múltiples alternativas y limitaciones que permitan dar solución a cualquier problema en particular (Manzano S, Pineda J, & Gómez A, 2019). Se basa en la evaluación de una serie de alternativas sobre la base de una serie de criterios (Elizalde G, 2018), que permite identificar diversas soluciones para resolver un problema.

En síntesis, la EMC permite analizar un número finito de criterios con varias alternativas y jerarquizarlas de acuerdo a su grado de importancia (Palacios Orejuela, 2018). El método sigue un proceso estructurado y equilibrado en cada faceta del problema planteado, particularmente por su amigable capacidad en integrar factores intangibles sociales y repercusiones ambientales.

## Figura 2

### Proceso de Análisis Multicriterio



*Nota.* Tomado y adaptado de (Elizalde G, 2018)

Las alternativas son objetos o entidades espaciales susceptibles a evaluación, jerarquización y orden. Cada alternativa está definida por los distintos criterios que intervienen y se hayan considerado pertinentes para dicha evaluación. Los criterios se componen de factores, que son aquellos que determinan el grado de importancia de un criterio en base a las alternativas disponibles y a la vez asigna un peso de acuerdo al nivel de importancia consensuado; y también se compone de condiciones o restricciones, que son todas aquellas características que la solución final puede y debe poseer. El método de asignación de pesos, se basa en el método de comparación por pares de Saaty y utiliza el cálculo de eigenvector de una matriz de comparaciones binarias de los factores (Saaty, 1977)

Es importante, reconocer que los factores pueden fortalecer o debilitar los criterios a través de la manipulación de sus atributos con determinadas reglas de decisión y valoración.

Una evaluación particular se puede obtener aplicando el procedimiento de la regla de decisión, misma que se estructura a partir de los objetivos propuestos en función de la evaluación que se pretende realizar. La correcta asignación de valores cuantitativos o ponderación de las categorías correspondientes a cada criterio, es responsabilidad del centro tomador de decisiones y marca el resultado del proceso de evaluación (Gómez-Delgado, Cano, & Ignaciocoaut, 2006).

Los métodos de evaluación multicriterio se clasifican en compensatorios, no compensatorios y difusos (Jankowski, 1995). (Elizalde G, 2018). Los métodos compensatorios requieren que el centro tomador de decisiones especifique los pesos de cada criterio de forma numérica en una escala de razón o estableciendo prioridades. El método de suma lineal ponderada que corresponde al proceso de análisis jerárquico (AHP) (Elizalde G, 2018).

Este método representa un gran apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación, ya que permite integrar diferentes criterios de acuerdo a la opinión de los individuos involucrados, en un solo marco de análisis para dar una visión integral del tema en estudio; y en el ámbito geográfico, consiste en la integración de información geoespacial utilizando variables cartográficas como datos de partida.

**Proceso de análisis jerárquico (AHP, Analytic Hierarchy Process).** Desarrollado por el profesor Thomas Saaty (1980) en respuesta a problemas concretos de la toma de decisiones en el Departamento de Defensa de los E.E.U.U, la técnica AHP permite de una manera eficiente y gráfica mediante un modelo jerárquico, estructurar la información, priorizar variables, analizar la información por partes y observar los efectos que se generarían si se efectúan cambios de prioridades o grados de importancia en cada variable. Consiste en utilizar la capacidad de las personas para emplear la información y experiencia con el fin de comparar opciones pareadas y otorgar una ponderación a su relación entre sí (Palacios Orejuela, 2018) (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016); se basa en el principio de “fraccionar un problema

en partes y luego combinar todas las soluciones de los subproblemas en una conclusión (Manzano S, Pineda J, & Gómez A, 2019).

El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), es un método matemático propicio para evaluar alternativas cuando se consideran varios criterios y requiere que el investigador o mediador realice evaluaciones subjetivas según la importancia de cada criterio y de tal forma precisar la prioridad con respecto a cada una de las alternativas para cada criterio (Vargas G, 2020). Utiliza elementos de álgebra matricial y consiste en utilizar alternativas pareadas, construir matrices a partir de estas comparaciones y establecer prioridades entre las variables, jerarquizando el grado de importancia de cada criterio frente a otro. Una vez establecido el rango de importancia de cada criterio, todas las variables se integran para obtener las alternativas disponibles que darán solución al objetivo principal (Vargas G, 2020). Un elemento de soporte muy importante para tomar la decisión final son los resultados que se obtienen frente a las alternativas existentes.

Existen tres principios y funciones básicas que componen la técnica AHP (Manzano S, Pineda J, & Gómez A, 2019):

**Es escalable:** Tiene una escala general que puede aplicarse a cualquier situación, es decir, permite integrar criterios subjetivos y objetivos, como estimaciones numéricas, verbales y gráficas. Esta característica de universalidad provee una gran flexibilidad y amplitud para las comparaciones pareadas.

**Complejidad:** Saaty descompone un problema en subproblemas por jerarquización. Luego de ponderados, los sub-problemas se integran nuevamente para dar solución al problema inicial.

**Síntesis:** La técnica AHP tiene un orden sistémico porque permite analizar las alternativas de solución a partir de la descomposición jerárquica, mantiene las interdependencias existentes entre las variables, factores, criterios y posibles soluciones, por lo tanto, la solución obtenida es sobre el sistema y no una porción del mismo.

**Principio de descomposición.** Este principio permite estructurar en un rango jerárquico, un problema completo en subproblemas con dependencias de acuerdo al nivel de descomposición en el que se encuentren. Se realizan juicios comparativos que permiten realizar combinaciones pareadas biunívocas de todas las variables de un sub-grupo con respecto al criterio principal de ese sub-grupo (Saaty L. T., 1990)

A continuación, la escala propuesta por (Saaty, 1977) permite realizar una comparación pareada de los criterios:

**Tabla 3**

*Escala fundamental de comparación por pares de Saaty.*

Intensidad	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Ambos criterios contribuyen de igual forma al objetivo.
3	Importancia moderada	Escala y juicio favorecen levemente un criterio sobre otro
5	Importancia grande	Fuerte importancia de un criterio sobre otro. El juicio y la escala favorecen fuertemente una actividad.
7	Importancia muy grande	Un criterio es mucho más importante sobre otro. Su predominancia se demostró en la práctica.
9	Importancia extrema	La evidencia que favorece a un criterio sobre otro, es absoluta y totalmente clara.
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes.
Recíprocos	$a_{ij} = 1/a_{ji}$	Si el criterio A es de importancia grande frente al criterio B, las notaciones serán: Criterio A frente a criterio B: 5/1 Criterio B frente a criterio A: 1/5

*Nota.* Tomado y adaptado de (Xolalpa N, 2020; Saaty, 1977)

Existen distintas combinaciones con dichos valores para generar escalas que no tengan tantas opciones pudiendo reducirse incluso solamente a tres opciones en la escala de Saaty (Xolalpa N, 2020). Dentro de la composición jerárquica, las soluciones locales se integran para obtener la solución general que se está buscando.

Una vez que se conoce la ponderación de los criterios, se pasa a ponderar las distintas alternativas en función de cada criterio. Primero, se comparan todas las alternativas en función de cada criterio y se obtienen  $n$  matrices, siendo  $n$  el número de criterios, y de cada una de ellas se calcula su vector propio, y ello nos indicará la ponderación de cada alternativa en función de cada criterio.

Luego del procedimiento anterior, se obtienen dos matrices, una matriz columna  $n \times 1$  con la ponderación de los criterios (siendo  $n$  el número de criterios) y otra matriz  $m \times n$  de las ponderaciones de las alternativas para cada criterio (siendo  $m$  el número de alternativas)

El producto de la segunda matriz por la primera dará como resultado una matriz  $m \times 1$  que señala la ponderación de las alternativas en función de todos los criterios y del grado de importancia de estos, por lo tanto, nos indica cuál es la alternativa más óptima e interesante (Aznar B & Guijarro M, 2012). El principio de descomposición se basa en los siguientes axiomas:

Axioma 1. Corresponde al análisis matricial que se ejecuta a los criterios y alternativas y garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional. Si en un criterio, la alternativa A es  $n$  veces mejor que B, entonces B es  $1/n$  veces mejor que A.

Axioma 2. Los elementos o características que son comparadas no deben diferir mucho en cuanto a la característica principal de comparación establecida.

Axioma 3. Debe existir dependencia jerárquica en las alternativas de dos niveles consecutivos.

Axioma 4. Las probabilidades deben estar representadas en la estructura de criterios y alternativas (Xolalpa N, 2020).

Al obtenerse la matriz de comparaciones pareadas entre las diferentes alternativas, se calcula lo que se conoce como prioridad de cada alternativa, este paso se denomina sintetización y se trata de un proceso matemático preciso donde se calculan valores y vectores característicos también conocidos como eigen vectores (Vargas G, 2020).

Es importante mencionar que la matriz pareada debe cumplir con las siguientes propiedades (Saaty, 1977):

Reciprocidad: Si  $a_{ij}=x$ , entonces  $a_{ji}=1/x$ ;  $1/9 \leq x \leq 9$ .

Homogeneidad: Si los elementos  $i$  y  $j$  son considerados igualmente importantes, entonces:  $a_{ij}=a_{ji}=1$ ; además  $a_{ii}=1$  para todo  $i$ .

Consistencia: Si  $a_{jk} \cdot a_{kj} = a_{ij}$  para todo  $1 \leq i, j, k \leq n$ . Esta propiedad, ocurre muy rara vez, supondría un caso ideal, muy pocas veces realista, debido a la subjetividad innata de los decisores (Aznar B & Guijarro M, 2012).

Solo se necesitan  $n(n-1)/2$  comparaciones para construir una matriz de dimensión  $n \times n$ , esto por la propiedad de reciprocidad. Por ejemplo, si la matriz fuese de rango 3, el número de comparaciones pareadas necesarias es de:  $3(3-1)/2=3$  (Aznar B & Guijarro M, 2012).

El siguiente ejemplo es una referencia del proceso de síntesis que se lleva a cabo de la siguiente forma:

Primero, es necesario comparar el grado de importancia que tiene cada criterio con respecto al otro, de tal forma que quede una matriz cuadrada. Luego, se suman los valores de cada columna dentro de la matriz de comparaciones pareadas.

#### Tabla 4

*Matriz de comparación jerárquica.*

CRITERIO	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
C <sub>1</sub>	1	C <sub>1</sub> /C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> /C <sub>3</sub>
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> /C <sub>1</sub>	1	C <sub>2</sub> /C <sub>3</sub>
C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> /C <sub>1</sub>	C <sub>3</sub> /C <sub>2</sub>	1

*Nota.* Tomado y adaptado (Saaty, 1977)



**Tabla 5**

*Ejemplo de matriz pareada.*

<b>CRITERIO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	1.00	4.00	7.00
<b>B</b>	0.25	1.00	5.00
<b>C</b>	0.14	0.20	1.00
<b>Σ</b>	1.39	5.20	13.00

Luego, se divide cada elemento de la matriz entre la sumatoria de su columna y la matriz resultante se conoce como matriz pareada normalizada. Por último, la sumatoria de cada celda que conforma una fila y forma una columna es el vector característico o eigenvector (Vargas G, 2020).

**Tabla 6**

Matriz pareada normalizada

<b>CRITERIO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>A</b>	1/1.39	4/5.20	7/13
<b>B</b>	0.25/1.39	1/5.20	5/13
<b>C</b>	0.14/1.39	0.20/5.20	1/13

**Tabla 7**

*Obtención del vector característico, eigenvector*

<b>CRITERIO</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>eigenvector</b>
<b>A</b>	0.72	0.77	0.54	2.03
<b>B</b>	0.18	0.19	0.38	0.76
<b>C</b>	0.10	0.04	0.08	0.22

Finalmente, se procede a normalizar la columna eigenvector calculando el promedio del eigenvector correspondiente a cada criterio, este promedio se realiza sobre peso que tiene cada alternativa (Vargas G, 2020).

**Tabla 8**

*Matriz de pesos resultantes para cada alternativa*

	<b>Peso A1</b>	<b>Peso A2</b>
<b>A</b>	2.03/3	0.6757
<b>B</b>	0.76/3	0.2523
<b>C</b>	0.22/3	0.0720

Por último, la sumatoria de la columna de pesos debe dar como resultado 1. En este punto, los factores ponderados determinarán el grado de importancia que cada uno de los factores tiene dentro del modelo de investigación (De La Paz, 2013). Cabe recalcar, que debe existir consistencia de los juicios para que la calidad de la decisión final sea buena; es muy difícil lograr una consistencia perfecta porque los juicios son subjetivos y por lo tanto es de esperar cierta inconsistencia en casi cualquier conjunto de comparaciones pareadas (Vargas G, 2020).

El nivel de consistencia entre comparaciones pareadas se puede calcular como el Ratio de Consistencia (CR) de la matriz A. Un valor de  $CR < 0.10$  indica un nivel medio de consistencia entre las comparaciones pareadas mientras que un valor de  $CR > 0.10$  indica inconsistencia entre los juicios. Si el valor del ratio de consistencia, se mantiene en un intervalo aceptable, se continua con el proceso, caso contrario, se debe reevaluar cada juicio y modificarlos sobre las comparaciones. Para obtener el Ratio de Consistencia (CR) entre comparaciones pareadas, se hace el siguiente procedimiento (Vargas G, 2020).

Primero, se debe obtener el vector de la suma ponderada, multiplicando la matriz de pesos por la matriz de comparaciones pareadas.

**Tabla 9***Vector de la suma ponderada*

CRITERIO	VECTOR DE LA SUMA PONDERADA
<b>A</b>	$((0.6757*1) + (0.2523*4) + (0.0720*7)) = 2.19$
<b>B</b>	$((0.6757*0.25) + (0.2523*1) + (0.0720*5)) = 0.78$
<b>C</b>	$((0.675*0.14) + (0.2523*0.20) + (0.0720*1)) = 3.01$

Luego, se debe calcular el vector de consistencia dividiendo el vector de la suma ponderada entre el promedio.

**Tabla 10***Vector de consistencia*

CRITERIO	VECTOR DE CONSISTENCIA
<b>A</b>	$2.19/0.675 = 3.24$
<b>B</b>	$0.78/0.252 = 3.10$
<b>C</b>	$0.22/0.073 = 3.01$

El siguiente paso, es calcular el valor lambda ( $\lambda_{\text{máx}}$ ), que es el promedio del vector de consistencia.

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{3,24+3,10+3,01}{3} = 3,12 \quad (1)$$

Por último, el índice de consistencia IC (CI) se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$IC(CI) = \frac{\lambda_{\text{máx}} - 1}{n - 1} \quad (2)$$

Donde, (n) es el número de atributos:

$$IC(CI) = \frac{3.12 - 3}{3 - 1} = \frac{0.12}{2} = 0.06$$

Luego, se calcula la proporción de consistencia PC o ratio de consistencia CR, que indica el nivel de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas con la siguiente fórmula:

$$PC(CR) = \frac{IC}{IA} \quad (3)$$

Dónde: IC(CR) es el índice de consistencia calculado, e IA es el índice de consistencia aleatorio o índice de azar. El índice de azar IA, es el índice de consistencia de una matriz de comparaciones pareadas generadas aleatoriamente, y depende del número de elementos que son comparados.

Para la asignación del índice de azar IA, o valores aleatorios para el cálculo del IC, se recurre a la siguiente tabla:

**Tabla 11**

*Valores aleatorios para el cálculo del índice de azar, o índice de inconsistencia aleatoria IA*

*(Valores de consistencia en función del tamaño de la matriz)*

Orden (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Valor	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

*Nota.* Tomado y adaptado de (Aznar B & Guijarro M, 2012)

En función del tamaño de la matriz o n elementos comparados, se elige el índice de consistencia aleatorio más apropiado, luego se calcula la porción de consistencia PC o Ratio de Consistencia CR, siendo el cociente calculado CI entre el valor de consistencia aleatorio, como se explica en la siguiente fórmula:

Para el ejemplo anterior, éste sería:

$$PC(CR) = \frac{0.06}{0.58} = 0.10$$

Tal como se ve en el ejemplo, las comparaciones pareadas están dentro del rango aceptable por lo que se puede continuar con la investigación.

**Normalización de datos.** La normalización es un proceso en el cual, un conjunto de valores expresados es convertido a otros valores para que se expresen en una misma escala, debido a que el rango de los factores suele ser diferente; se trata de una adecuación de los

valores originales para convertirlos a una misma escala y hacerlos comparables, de tal forma, que luego se pueda aplicar un peso de importancia relativa para cada criterio, lo cual permitirá la compensación de las variables (De La Paz, 2013).

La normalización utilizada en el presente caso de estudio, es una transformación lineal que se realiza haciendo uso de la herramienta Calculadora ráster, empleando la siguiente ecuación (Véase la ecuación 4):

$$f_i = \frac{v_i - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}} \times c \quad (4)$$

Dónde:

$f_i$  = Valor del factor normalizado

$v_i$  = Valor original del factor  $i$  (distintos valores que presenta el ráster en los diferentes píxeles)

$v_{\max}$  = Valor máximo del ráster a normalizar

$v_{\min}$  = Valor mínimo del ráster a normalizar

$c$  = rango de estandarización (Establecido por el centro de decisiones, puede variar entre 100 o 255)

De este modo, las clases de cualquier mapa pueden ser asociadas con valores de pertenencia en una tabla de atributos en donde la medición de la variable puede ser: categórica, ordinal o en intervalos.

**Obtención de los factores.** Los factores son elementos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa de solución con respecto a otra y pueden ser de carácter cualitativo o cuantitativo (De La Paz, 2013). Dentro de la investigación se proponen una serie de condiciones que deben reunir las zonas de mayor aptitud para considerarse como áreas óptimas, respecto a cualquier tipo de investigación (Manzano S, Pineda J, & Gómez A, 2019).

**Obtención de restricciones.** Las restricciones son los criterios o factores que facilitan o limitan el análisis geográfico de las regiones y a través de ellos se pueden diferenciar las

zonas óptimas de las no óptimas para el cumplimiento o establecimiento de un proyecto, en base a las condiciones que el centro decisor establezca (De La Paz, 2013).

Estos elementos se fundamentan sobre la base de la lógica booleana (verdaderos o falsos) y excluyen de manera definitiva las áreas de estudio que no cumplen los requisitos establecidos debido a sus condiciones (De La Paz, 2011). Las restricciones se generan uno por cada restricción, mediante mapas binarios de unos (no hay restricción) y ceros o NoData (sí hay restricción). Finalmente, estos mapas binarios se multiplican entre sí, definiendo así las áreas de exclusión, procedimiento que se puede resolver mediante la herramienta Calculadora Ráster o la función Reclasificar del software ArcGIS.

## Capítulo III

### Metodología

En la presente investigación, únicamente se han considerado los residuos agrícolas de banano. La evaluación, metodologías y técnicas aplicadas, se realizaron considerando la superficie dedicada a estos cultivos y los residuos que se generan. Se incluye la evaluación de la disponibilidad y distribución de la biomasa, ubicación de las instalaciones de aprovechamiento y optimización de transporte y conexión a la red eléctrica nacional.

La metodología aplicada en esta investigación se divide en tres etapas. La primera etapa comprende, evaluar la disponibilidad de biomasa residual agrícola a través de herramientas SIG, la segunda etapa consiste en obtener y reclasificar cada uno de los criterios y restricciones territoriales que determinan la disponibilidad de la materia prima y la aptitud de una zona para ser explotada en función de los criterios recogidos en la bibliografía, fuentes de información y opinión de expertos en el área. En la tercera fase, se determina la idoneidad del sitio para el futuro emplazamiento de una central de biomasa. Dichos factores son sumamente importantes para determinar la viabilidad técnica de extraer la biomasa residual de banano presente en el territorio (Rodríguez, Piastrellini, & Arena, 2018).

Es así, que a partir de diferentes datos se obtienen factores y restricciones que afectan tanto al aprovechamiento del recurso, como al emplazamiento de centrales de biomasa. Por lo tanto, se lograron determinar cuatro factores territoriales que intervienen en la viabilidad técnica para la extracción de biomasa: disponibilidad de materia prima, la pendiente, la superficie de las masas agrícolas y la distancia a caminos y vías principales (García-Martín, y otros, 2011).

En cuanto a la restricciones impuestas se tuvo como criterios: distancia a cuerpos de agua, cobertura y uso de suelo, distancia a vías principales, áreas protegidas, topografía, etc. (De La Paz, 2013), y en especial, restricción que también se deben tomar en cuenta con respecto al área de cultivo de banano, como son: que la infraestructura bioenergética esté

ubicada cerca de una subestación eléctrica y que su ubicación debe cubrir un radio medio de 10 km hasta las parcelas de producción (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016)

**Tabla 12**

*Criterios y restricciones para las variables consideradas*

	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fundamento</b>
<b>Factores</b>	Disponibilidad de la biomasa residual agrícola	>37 ton/ha.año	(García-Martín, y otros, 2011)
	Superficie de masas agrícolas	Cultivos > 100 ha	(García-Martín, y otros, 2011)
	Pendiente – Eficiencia de extracción	<10 Ha	(Jeong & Ramírez, 2017)
	Distancia de extracción a vías principales	< 2400 m	(De La Paz, 2013)
	Vías	< 500 m	(TULSMA Libro VI, 2015)
<b>Restricciones</b>	Zona Urbana	>500 m	(TULSMA Libro VI, 2015)
	Pendiente	< 35%	(De la Paz, 2011)
	Uso de suelo	Apto – No Apto	(Palacios Orejuela, 2018)
	Cuerpos de agua	>200 m	(TULSMA Libro VI, 2015)
	Red eléctrica y subestaciones eléctricas	< 1000 m	(De La Paz, 2013)
	SNAP	Apto – No Apto	(TULSMA Libro VI, 2015)

El conocimiento adecuado de las fuentes o recursos energéticos en estudio, sumado al conocimiento de las necesidades técnicas de emplazamiento para una central de biomasa, así como el impacto sobre el medio ambiente que ésta podría ocasionar, establecerá una



localización óptima y una buena integración en el medio para las instalaciones de aprovechamiento de biomasa.

### **Recursos**

La herramienta clave para la gestión, análisis, procesamiento y representación de las distintas bases de datos y capas de información geográfica utilizadas para el presente trabajo, fue el software ArcGIS 10.3 perteneciente al campo de los Sistemas de Información Geográfica SIG.

### **Recopilación de datos e información**

Las bases de datos y capas de información geográfica han sido obtenidas de diferentes fuentes de información. Para identificar y localizar residuos de carácter agrícola se parte desde la búsqueda de información geográfica de las zonas que poseen cultivos intensivos y extensivos en sus diferentes formas, para ello se ha consultado la información geográfica y teórica, disponible en el Portal de Geoservicios del Instituto Geográfico Militar IGM, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca MAGAP, aquella contenida en el Sistema de Información Nacional de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca SINAGAP, el Atlas Bioenergético del Ecuador y de los catastros de uso de tierras, así como en el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC y otras instituciones tanto del sector público como privado, vinculadas a la actividad agroindustrial de banano.

Además, también se utilizaron datos extraídos de literatura científica publicados por diversos organismos académicos nacionales e internacionales, los cuales se complementaron con información obtenida mediante consultas a profesionales con vasta experiencia en la temática.

La información geoespacial que se buscó y recopiló cuenta con los atributos necesarios para formar y/o calcular las variables para el análisis multicriterio. Los archivos seleccionados se detallan en la siguiente tabla a continuación (Véase tabla 13):

**Tabla 13**

*Información geográfica utilizada para el desarrollo de la investigación.*

Archivo	Descripción	Tipo	Escala	Fuente
Mapa del Catastro Bananero de la provincia de El Oro (2013)	Sistema parcelario de los cultivos de banano en le provincia de El Oro,	Shapefile (.shp)	1:5000	Geoportal del Ministerio de Agricultura (MAGAP, CGSIN, DIGDM, 2013)
Red de vías, autopistas y carreteras.	Información que representa la red vial en vías de primer, segundo y tercer orden en el país.	Shapefile (.shp)	1: 50 000	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)
Ríos principales y ríos dobles.	Información geográfica que representa los cauces fluviales del Ecuador.	Shapefile (.shp)	1: 50 000	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)
Cobertura y uso de suelo	Ubicación, distribución y extensión de diferentes tipos de vegetación.	Shapefile (.shp)	1: 100 000	Geoportal del Ministerio de Agricultura (MAGAP, CGSIN, DIGDM, 2013)
Áreas naturales protegidas	Cobertura del sistema de áreas naturales protegidas de la provincia de El Oro.	Shapefile (.shp)	1: 50 000	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)
Límites administrativos del Ecuador, provincias y cantones	Información que representa los límites provinciales, hidrografía, red	Shapefile (.shp)	1: 50 000	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)

	viaria y poblaciones del país.			
Subestaciones eléctricas	Cobertura de las subestaciones eléctricas ubicadas en cada provincia del país.	Shapefile (.shp)	1: 50 000	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)
Modelo Digital del Terreno	Representación del terreno.	Ráster	100 x 100 m	Capas de información geográfica básica del Ecuador (IGM, 2014)

La proyección utilizada en el estudio es la “Transverse de Mercator” y el sistema de coordenadas es el “WGS 84 UTM Zona 17S”. Se trabajó con variables de disponibilidad de biomasa, pendiente, masas agrícolas, uso de suelo, ríos, vías, áreas protegidas, zona urbana, etc. A cada factor se asignó una ponderación mediante la matriz de Saaty, para posteriormente ser ingresados en un SIG y con los productos obtenidos realizar una intersección con las restricciones definidas, mediante el uso del álgebra de mapas.

### **Modelamiento de los factores parciales**

La metodología del proceso de análisis jerárquico (AHP), propone descomponer un problema en subproblemas para después unir todas las posibles soluciones en una sola conclusión. Dentro de este ámbito, es necesario primero establecer los “factores” que intervienen en el proceso (distinguiendo entre los factores de análisis y los criterios de restricción), los cuales son aspectos que aumentan o disminuyen la valoración de una alternativa como solución al problema, estos pueden ser de carácter cualitativo o cuantitativo. Para el propósito del caso se han establecido factores técnicos y ambientales, lo cuáles tendrán un formato ráster (si la información geográfica disponible está en formato vectorial será

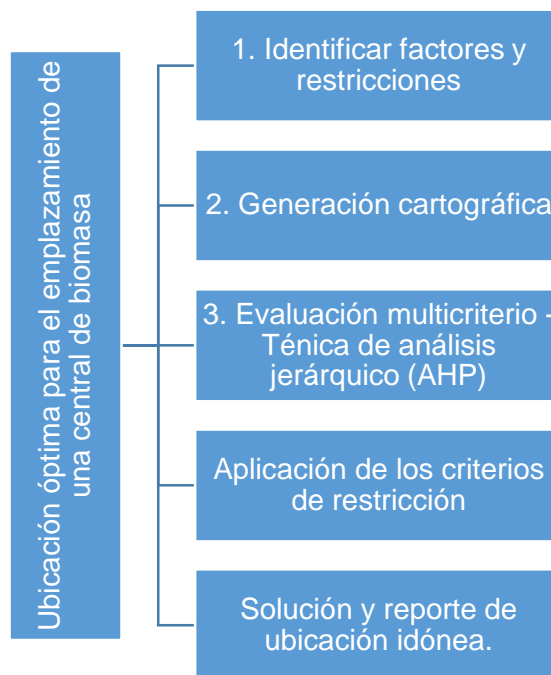
necesario transformarla a formato ráster (Tamaño de celda/píxel 100x100 m)) para posteriormente proceder con la evaluación multicriterio.

Se utilizó la técnica de análisis jerárquico (AHP), para determinar los pesos de los criterios y subcriterios, a partir de la información recopilada, experiencia y conocimiento de expertos, debido a que no hay información precisa sobre los requisitos que debe cumplir una central de biomasa para ser emplazada en un entorno ideal de aprovechamiento.

A continuación, se detallan los factores y restricciones utilizados para este fin (Veáse figura 3), los cuales fueron jerarquizados en base a la normativa del (TULSMA Libro VI, 2015), para la creación de rellenos sanitarios en el país y también se consideraron criterios no reglamentarios que fueron adaptados debido a la falta de información sobre centrales de biomasa. Estos elementos son los subproblemas en los cuáles es descompuesto el problema principal, y comprenden una serie de alternativas que dan solución a los subproblemas.

### Figura 3

*Diagrama de proceso para la ubicación de una central de biomasa*



Como se puede apreciar, se tomaron en cuenta distintos factores importantes para la elección de estas zonas, como: disponibilidad de la biomasa residual agrícola, masas agrícolas, topografía del terreno, distancia de extracción, así como restricciones técnicas y ambientales que afectan a estos factores. Esta metodología proporciona mapas de las zonas de mayor aptitud y disponibilidad para el aprovechamiento del recurso, además de facilitar la localización idónea para el emplazamiento de centrales de biomasa.

Una de las fases más importantes para el proceso analítico jerárquico es la comparación pareada de los criterios. El primer paso, es que cada criterio debe ser jerarquizado en orden de importancia y de acuerdo a las alternativas que le corresponden, a continuación, se detalla el procedimiento ejecutado previamente con cada factor seleccionado.

#### ***Disponibilidad de biomasa residual agrícola potencial de banano (FBRAp)***

El banano es uno de los productos que mayor cantidad aporta en la generación de residuos agropecuarios, ya que en producción es uno de los cultivos más significativos de la región orense (Anagumbra & Naranjo, 2015). En la provincia de El Oro, los cantones que concentran la mayor parte de la superficie total cultivada de banano son: El Guabo, Machala, Pasaje, Santa Rosa y Arenillas; en consecuencia, estos cantones concentran la mayor disponibilidad de residuos provenientes de la actividad agrícola (Véase tabla 2).

A diferencia de la biomasa forestal, la biomasa residual agrícola se caracteriza por no presentar una alta dispersión geográfica, por lo que es necesario diferenciar primero, las áreas con la mayor disponibilidad del recurso (demanda de biomasa) y por otro lado la oferta de emplazamientos potenciales para su aprovechamiento y transformación energética (oferta de sitios potenciales) (De La Paz, 2013).

La disponibilidad de la materia prima residual, es uno de los criterios más importantes para el propósito del presente estudio. Esta etapa comprendió la evaluación y estimación de la producción potencial de biomasa residual del cultivo de banano a través de herramientas SIG. El objetivo de la identificación de los principales cultivos de banano es poder realizar una

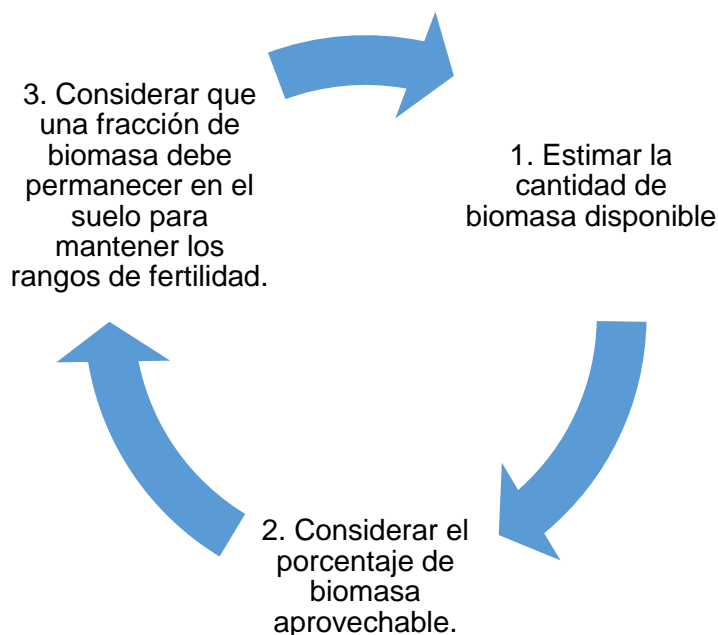
estimación del volumen potencial de residuos que se generan en cada una de las plantaciones de tal modo que podrían transformarse en bioenergía.

Debido a la escasa o nula información para calcular la disponibilidad de biomasa residual de un cultivo agrícola, debieron realizarse cálculos y estimaciones a partir de supuestos teóricos basados en datos extraídos de literatura e información científica, además de aproximaciones metodológicas basadas en la mejor información recopilada y datos complementarios obtenidos mediante consultas a profesionales con vasta experiencia en la temática. El objetivo de este paso es, estimar la disponibilidad de biomasa residual potencialmente aprovechable.

Para tener un mejor entendimiento y abordar el problema de mejor manera se realizó un modelo conceptual de la disponibilidad potencial teórica aproximada de biomasa considerando los criterios más importantes para su óptimo aprovechamiento (Veáse figura 4).

#### **Figura 4**

*Modelo conceptual de la disponibilidad de biomasa potencial teórica aproximada*



*Nota.* Tomado y adaptado de (García-Martín, y otros, 2011)

La información utilizada para evaluar y estimar la disponibilidad potencial de biomasa residual del cultivo de banano se obtuvo a partir de la información disponible en el catálogo de datos del Ministerio de Agricultura MAG, el Atlas Bioenergético del Ecuador y se basó en la información geográfica disponible, que en este caso fue el sistema parcelario del cultivo de banano extraído del Mapa de catastro bananero de la provincia de El Oro, también proporcionado por el portal de Geoservicios del Ministerio de Agricultura MAG. Esta información permitió estimar la biomasa residual agrícola potencial (BRAp) y disponible.

El punto de partida de este paso consistió en la dedicación de tiempo para el tratamiento de la base catastral bananera de El Oro, sobre la cual no se halló información precisa en cuanto a uso, unidades y significado de cada celda dentro de la tabla de atributos. Por ejemplo, la producción anual de banano de cada plantación está determinada en (cajas/ha.año), ante lo cual fue necesario encontrar un valor promedio sobre el peso de cada caja de banano para realizar la respectiva transformación de unidades a (t/ha.año).

Una caja de banano convencional de exportación tipo 22XU, pesa entre 18,14 kg netos y 19,45 kg netos (Asociación Agraria Bananera "Fincas de El Oro", 2019). Para tomar valores de referencia, en la siguiente tabla se detalla el peso de cada caja de banano convencional para exportación, obtenidos del Instructivo para la Selección de Subpartida de banano orgánico y convencional de la Aduana del Ecuador (Véase tabla 13):

**Tabla 13**

*Información de Tipo de Caja – Banano Convencional*

<b>Información del tipo de caja</b>	<b>Peso Neto Caja en (lb)</b>
22XU (43 lb.)	43
22XU (41.5 lb)	41.5
22XUCS (41.5 lb)	41.5
22XUCSS (41.5 lb)	41.5
22XU (42.5 lb)	42.5
22XU (42.77 lb)	42.77
22XU (40.79 lb)	40.79

22XU (41.89 lb)	41.89
22XU (40.34 lb)	40.34
<b>Promedio (lb)</b>	<b>41.75</b>

*Nota.* Tomado y adaptado de (MAGAP, 2016)

Para obtener un valor estable, se obtuvo el valor medio de una caja de banano convencional por 41.75 lb, para con ello proceder al cambio de unidades de (cajas/ha.año) a (ton/ha-año).

A continuación, a partir de los datos teóricos y geográficos disponibles, se estimó la cantidad teórica de biomasa residual agrícola que se genera anualmente en cada cultivo de banano, empleando la siguiente fórmula (BEFS - FAO, 2014):

$$CR_{tot} = CP_i \times RTC \quad (6)$$

Donde:

$CR_{tot}$  = Cantidad de biomasa residual agrícola del producto i (t/ha/año)

$CP_i$  = Cantidad procesada de materia prima i, o producción del cultivo i (t/ha/año)

$RTC$  = Ratio de residuos del producto i o tasa de residuos generados por unidad de cultivo i (t BRA/t)

Con los datos mencionados se logró estimar la cantidad de biomasa residual agrícola disponible, que es la cantidad total de residuos agrícolas que se generan a partir de la producción anual de banano. El ( $CR_{tot}$ ) se estimó a partir del valor de producción de banano y la relación entre residuos y producto, ya que la cantidad de residuos agrícolas está directamente relacionada a la producción de cultivos.

El Ratio de residuos (RTC) es un factor que varía en función de las características y requisitos de cada cultivo, como la variedad, el tipo, la zona climática, prácticas de manejo, características del suelo, etc. (Scarlat, Martinov, & Dallemand, 2010). En cuanto al RTC de la biomasa lignocelulósica se ha tomado como referencia los valores medios utilizados en el estudio de (Guerrero A. , 2014) y (Carhuancho L, 2015), siendo el valor de 2,13 t BRA/ t.



No toda la biomasa residual existente puede ser extraída en su totalidad, para obtener la biomasa residual agrícola (BRAp) potencialmente aprovechable con fines energéticos, la FAO (BEFS - FAO, 2014) establece que al menos el 25% de los residuos generados permanezcan en el suelo para conservar los umbrales de fertilidad del mismo, además de considerar las alternativas de uso tradicional como leña, forraje animal y uso doméstico. Cabe destacar que este porcentaje variará dependiendo de cultivo, y que por lo general una gran parte de (BRA) no será reutilizada sino eliminada por medios tradicionales, por lo tanto su reciclaje en bioenergía sigue siendo una óptima alternativa (Carhuancho L, 2015).

No hay información disponible en la bibliografía sobre valores determinados de cantidad de biomasa residual agrícola para considerar a su extracción como eficiente y rentable, más en este caso se ha optado por utilizar los valores recogidos en el estudio de (García-Martín, y otros, 2011) para masas de residuos forestales, quienes consideraron tres factores indispensables al momento de jerarquizar las alternativas correspondientes al criterio de disponibilidad de biomasa, y son los siguientes: porcentaje de residuos que debe permanecer en el suelo para mantener los rangos de fertilidad (en este caso la FAO recomienda que el 25% de los residuos agrícolas se mantengan en el suelo), rentabilidad de extracción de biomasa (para términos de referencia tomaremos los rangos óptimos de extracción de biomasa recogidos en el mencionado caso de estudio, realizado para determinar zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia española de Teruel, que contempla valores comprendidos en un amplio rango de valores que oscila cantidades  $\geq 37$  t/ha), y por último la eficiencia de maquinaria empleada, que para el presente caso, omitiremos por falta de información disponible (Veáse tabla 14).

**Tabla 14**

*Disponibilidad de biomasa residual agrícola, potencialmente aprovechable.*

<b>Clasificación</b>	<b>Cantidad de BRA Rentable (t/ha)</b>
<b>Marginalmente Apto</b>	15-20
<b>Poco Apto</b>	20-25
<b>Moderadamente Apto</b>	25-30
<b>Adecuadamente Apto</b>	30-37
<b>Supremamente Apto</b>	≥ 37

*Nota.* Tomado y adaptado de (García-Martín, y otros, 2011)

En este estudio, cada cultivo dentro del catastro bananero se ha tomado como puntos de demanda (puntos de producción) y cada polígono representa una pequeña tenencia. Este procedimiento permitió cuantificar el volumen de los residuos y diagnosticar la disponibilidad de biomasa mediante el empleo de fórmulas matemáticas (Veáse ecuación 6), de ese modo también se ha podido definir y volcar en la cartografía los siguientes parámetros:

- Producción de cultivo a nivel provincial
- Densidad de producción de cultivo a nivel cantonal
- Densidad de producción de residuo a nivel cantonal
- Potencial energético de cada residuo relevado a nivel cantonal.

En resumen, este factor se ha obtenido a partir del shapefile (.shp) del Catastro Bananero de la provincia de El Oro, procesado en función de la estimación de residuos generados anualmente por hectárea de cultivo; posteriormente esta capa fue convertida a formato ráster (Polígono a Ráster /Polygon to Raster) con un tamaño de celda de 100 x 100 m y finalmente se realizó una reclasificación y normalización del ráster obtenido.

### ***Superficie de masas agrícolas (Fsup)***

El segundo criterio considerado para determinar la ubicación idónea para el emplazamiento de una central de biomasa, es la extensión de las masas agrícolas objeto de estudio. Aunque no se ha encontrado en la bibliografía consultada un tamaño determinado para

la extracción de biomasa residual agrícola, los costes de operación se reducen cuando la zona es extensa, además de que, a mayor extensión, mayor es la disponibilidad de residuos en el área, menor es el tiempo de desplazamiento para su recolección y mayor la rentabilidad de extracción.

El área de estudio requiere la determinación de las zonas donde existe la mayor producción y en consecuencia mayor generación de residuos agrícolas para facilitar la localización de la biomasa, recolección, manejo sustentable, distribución y un correcto aprovechamiento. (García-Martín, y otros, 2011).

Para determinar la superficie máxima de extracción de biomasa, se utilizó el campo (Class\_tam) de la tabla de atributos del Catastro Bananero de El Oro, tomando en cuenta que el beneficio será mayor mientras el área del cultivo sea extensa y suficientemente productiva (Véase tabla 15).

**Tabla 15**

*Intervalos de tamaño del cultivo.*

<b>Superficie de cada cultivo</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Menores a 5 ha</b>	Marginalmente Apto
<b>De 5 a 10 ha</b>	Poco Apto
<b>De 10 a 30 ha</b>	Moderadamente Apto
<b>De 30 a 100 ha</b>	Adecuadamente Apto
<b>Mayores a 100 ha</b>	Supremamente Apto

*Nota.* Tomado y adaptado de (García-Martín, y otros, 2011)

La alternativa en el tamaño de cada cultivo permitió evaluar las áreas de cultivo más extensas, seleccionando aquellas unidades productivas con una superficie mayor a las 5 hectáreas. Posterior a ello, se procede a normalizar la capa ráster del factor mencionado.

### ***Factor Pendiente (Fpend)***

La pendiente también es un factor importante, debido a la eficiencia de recogida que el transporte o maquinaria debe emplear, costos y también porque se considera que, por encima

de cierto porcentaje de inclinación, el trabajo de la maquinaria deja de ser rentable y el riesgo de generar erosión durante los trabajos es muy alto (García-Martín, y otros, 2011).

En la bibliografía consultada no existen umbrales precisos para determinar la eficiencia de recogida para la extracción de biomasa. En el estudio realizado por (García-Martín, y otros, 2011) se estima que el transporte utilizado para los trabajos de recolección de biomasa opera hasta determinados valores máximos de pendiente, de tal manera que el terreno susceptible de ser utilizado para el acopio de biomasa se clasifica en función de este factor. Para ello, se han considerado los intervalos de pendiente del estudio realizado por (Garañeda & Bengoa, 2005), los cuales establecen intervalos de eficiencia del 80% en zonas con pendientes <10%, del 70% en zonas con pendientes comprendidas entre el 10 – 30%, del 20% para pendientes del 30 – 50% y nula, para zonas con pendientes >50%. El ráster de pendientes se obtuvo con un tamaño de celda de 100 x 100 m (García-Martín, y otros, 2011).

### **Tabla 16**

*Intervalos de la variable pendientes. Relación de pendientes (%) y eficiencia de extracción de biomasa (%)*

<b>Clasificación</b>	<b>Pendientes (%)</b>	<b>Eficiencia de extracción (%)</b>
Supremamente apto	<10%	80%
Adecuadamente apto	10 – 30%	70%
Marginalmente apto	30 – 50%	20%
No apto	>50%	Nula

*Nota.* Tomado y adaptado de (Garañeda & Bengoa, 2005)

Para obtener la cartografía de este factor se utilizó un MDE de la provincia de El Oro, cuyo tamaño de celda es de 100x100 m y se calculó la pendiente en porcentajes, aplicándose finalmente la máscara de la provincia usada en las cartografías de estimación.

### **Factor distancia a red vial (*Fdist*)**

El coste de extracción de la biomasa es el cuarto factor más importante del presente caso de estudio, depende de la naturaleza del terreno y de la distancia de las masas agrícolas

donde tentativamente se ejecutarían los trabajos de extracción hasta las principales vías de comunicación (carreteras, caminos o pistas).

Lo ideal es encontrar una zona con una buena infraestructura vial y, en particular, con fácil acceso para tratar de reducir los costos económicos y energéticos en el transporte de materias primas siempre que sea posible (De la Paz, 2011). Grandes distancias incluyen un mayor consumo de energía y combustible, por ende mayores costos de extracción, además pueden ocasionar la pérdida o degradación de la biomasa hasta niveles no óptimos, es así, que se establece que la mejor alternativa de vialidad son los caminos asfaltados de primer orden y los caminos lastrados de segundo orden (Anagumbra & Naranjo, 2015; Vargas G, 2020).

El presente subapartado pretende modelar el efecto que tiene el factor distancia entre la zona de extracción y las pistas, caminos, para transportar la biomasa residual agrícola hasta la central de transformación energética. Dentro de las alternativas que se plantean está, que mientras menor sea la distancia para la recolección de la materia prima residual, mayor será la probabilidad de hallar un área adecuada de emplazamiento (Vargas G, 2020).

En el estudio de (García-Martín, y otros, 2011) y (De la Paz, 2011) planteado para la ubicación de centrales eléctricas en función del aprovechamiento de los residuos forestales, se concluyó que la rentabilidad es máxima cuando las distancias de extracción a las vías principales son <100 m, disminuyendo la rentabilidad de forma proporcional hasta llegar a distancias >3000 m, en las que el beneficio es nulo. Reiterando a la escasa información sobre el aprovechamiento de biomasa residual agrícola, se ha considerado como óptimos, valores de distancias <100 m; a partir de ahí el valor va disminuyendo de forma proporcional hasta ser nulo para distancias  $\geq 3000$  m.

En el estudio de (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016) para la ubicación de una central de biomasa, se ha considerado un valor de impedancia máxima de 20 km; valor que se considera adecuado para el transporte de biomasa, debido a la distribución del área de cultivo de banano y el futuro emplazamiento de una central de biomasa. Así mismo, en el estudio

realizado por (Domínguez & Marcos, 2000) el valor de referencia tomado como distancia máxima para el transporte de biomasa, es de 25 km.

En la provincia de El Oro el cultivo se concentra en un área específica, lo que hace que el transporte de la biomasa sea más fácil y también disminuye los costos de distribución de energía. En función de ello, se realizó la ponderación del factor de distancia a la red vial, en seis intervalos, tomando en cuenta que el costo de extracción de la biomasa será menor mientras menor sea la distancia de transporte hacia vías principales (Veáse tabla 17 ). Para la obtención de este índice se utilizó como información base una capa vectorial proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM); de la cual se extrajo las vías pavimentadas y de primer orden, con un valor máximo de 2400 m.

**Tabla 17**

*Distancia de extracción a vías principales.*

<b>Clasificación</b>	<b>Acceso vial (m)</b>
<b>Supremamente adecuado</b>	0 - 400
<b>Adecuado</b>	400 - 800
<b>Moderadamente adecuado</b>	800 - 1200
<b>Poco adecuado</b>	1200- 1600
<b>No apto</b>	2000 - 2400
<b>Nulo</b>	>2400

*Nota.* Tomado y adaptado de (De La Paz, 2013)

Este factor se obtiene mediante la herramienta “Distancia Euclideana/Euclidean Distance” sobre cobertura a caminos, carreteras y autovías. Como este factor depende de la distancia, se le ha realizado el ajuste opuesto para que las localizaciones más próximas a las vías de comunicación tomen valores más elevados.

### **Asignación de pesos a cada criterio**

Una vez obtenidos los factores parciales normalizados, se determina un peso en función de la importancia del recurso y la dificultad de extracción, para así obtener un ráster ponderado

con las zonas de aprovechamiento y disponibilidad de biomasa residual agrícola del cultivo de banano (De la Paz, 2011).

### ***Índice de aptitud ponderado***

El índice de aptitud ponderado ( $I_{apt}$ ), combina los factores parciales previamente calculados y ponderados, con los diferentes pesos asignados a cada factor (mediante la técnica AHP) para modelar su importancia en aptitud global (Veáse ecuación 7)

$$I_{apt} = (w_{BRAP} \times F_{BRAP}) + (w_{Pend} \times F_{Pend}) + (w_{sup} \times F_{sup}) + (w_{dist} \times F_{dist}) \quad (7)$$

Donde,  $w_{BRAP}$ ,  $w_{pend}$ ,  $w_{sup}$ , y  $w_{dist}$  corresponden a los pesos que se asignan a cada factor respectivamente:  $F_{BRAP}$ ,  $F_{Pend}$ ,  $F_{Sup}$  y  $F_{dist}$ . El producto final es un ráster ponderado con las zonas de mayor disponibilidad de biomasa residual agrícola potencial, y permite conocer aquellas zonas más adecuadas, así como las menos idóneas para el aprovechamiento de este recurso energético.

Finalmente, se estableció que el criterio más importante es el factor de disponibilidad de biomasa, seguido de la superficie de masas agrícolas del cultivo de banano, pendientes y distancia de extracción a la red vial.

### **Restricciones de áreas para el emplazamiento de una central de biomasa.**

Las capas de restricciones se han obtenido a través de la herramienta "Raster Calculator/Calculadora Ráster", las cuáles fueron reclasificadas previamente en dos clases, de tal manera que se ha asignado el valor de 1 para las zonas sin restricción y que cumplen con las especificaciones dadas, y el valor de 0 (No data) a las zonas restringidas que no cumplen con las condiciones.

Debido a la falta de información existente sobre el tema en análisis, los parámetros utilizados para evaluar cada restricción se basaron en estudios de investigación nacionales e internacionales realizados para la ubicación de centrales de biomasa y rellenos sanitarios en diferentes provincias del país. Dado que el emplazamiento de una central de biomasa está

directamente vinculada a la gestión y manejo de residuos, se podría solventar otro problema que aqueja a la provincia de El Oro, mediante la ubicación simultánea de un relleno sanitario que también pueda ampliar su uso a la generación de electricidad; dichos parámetros se basaron en la normativa del (TULSMA Libro VI, 2015).

Restricciones como: pendiente, distancia a la red vial, cuerpos de agua, áreas naturales protegidas, subestaciones eléctricas y cobertura de uso del suelo, se clasificaron como parámetros que limitan o viabilizan el proyecto de emplazamiento de una central de biomasa y se detallan en los siguientes apartados.

### ***Restricción pendiente (Rpend)***

La pendiente condiciona de forma sustancial el emplazamiento de una central de biomasa, se prefiere que la instalación de una infraestructura de este tipo se ubique en terrenos planos o ligeramente inclinados. Por ello, el umbral de la pendiente es más restrictivo, es así, que valores por encima del 30% no se consideran adecuados para ubicar una infraestructura de biomasa como tal (De La Paz, 2013).

Esta restricción, también contribuye a disminuir el riesgo de erosión durante los trabajos de recolección y transporte de biomasa; y además permite obtener una buena eficiencia de extracción.

### ***Restricción a red vial (Rvial)***

La accesibilidad a las instalaciones es un dato de suma importancia para el suministro del recurso, ya que influye directamente en los costos de transporte y el estado óptimo de la biomasa, así como para la construcción y posterior gestión y mantenimiento de la central. Un sitio de transformación energética cercano a la red vial de una región, permite la reducción de tiempos en suministro, disminuyendo el costo de recolección y minimizando el impacto al medio ambiente (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016).

En consecuencia, se ha estimado que una distancia superior a 200 m a la red viaria conlleva mayor coste de construcción de infraestructuras y posibles afecciones ambientales



que pueden hacer inviable el proyecto (De La Paz, 2013). Sin embargo, basándonos también en los criterios para la ubicación de un relleno sanitario en la ciudad de Macas, según el fundamento del (TULSMA Libro VI, 2015), toda infraestructura relacionada a la gestión y/o aprovechamiento de residuos, deberá ubicarse a una distancia  $< 500$  m, desde el punto de demanda hasta el punto de oferta (Palacios Orejuela, 2018).

En este trabajo se propone una distancia máxima de 500 metros, como valor límite para la selección de áreas idóneas para el emplazamiento de una central de biomasa agrícola. Esta restricción se obtuvo a través de la herramienta de (“Áreas de influencia/Buffer”).

### ***Restricción a la red eléctrica (RRE)***

La localización de una central de biomasa debe estar próxima a una red o subestación eléctrica existente, puesto que una ubicación alejada de la infraestructura eléctrica implica que el aprovechamiento energético de la central sea local, por lo tanto, el beneficio no lograría un gran alcance, y, conlleva un gasto adicional de conexión que puede hacer inviable el proyecto (Jeong & Ramírez Gómez, 2017). En cuanto a las líneas de alta tensión, se considera importante que la central de biomasa se ubique a una distancia aproximada de 1000 m para poder conectarse a la red eléctrica, caso contrario la realización de una nueva línea eléctrica provocaría impactos ambientales sobre los recursos naturales, sociales y culturales (desbroce de la vegetación, construcción de torres, etc.), aumentando el daño mientras más larga sea longitud de la línea (De la Paz, 2011).

Para esta restricción, se ha considerado la capa de subestaciones eléctricas y red eléctrica nacional, obteniendo áreas de influencia en función de los criterios de eficiencia mediante la herramienta “Zona de Influencia/Buffer”. En el presente proyecto de investigación se ha empleado un radio de eficiencia de 1000 m a subestaciones eléctricas y en el caso de la red eléctrica, una distancia  $< 500$  m; estos valores fueron tomados del estudio para la Localización de Centrales de Biomasa de (De la Paz, 2011). Las capas resultantes se

fusionaron en una sola capa mediante la herramienta (Fusionar/Merge), luego fue transformada a una capa ráster (Polígono a Ráster /Polygon to Raster).

### ***Restricción a cuerpos y corrientes de agua (Ragua)***

Los cuerpos de agua son los mayores recursos naturales de un sitio, destacan por el valor económico y ecológico que representan, por lo tanto, su protección es de gran importancia (Cubillo B, 2005).

El aprovechamiento de la biomasa residual como recurso energético y el emplazamiento de una central de biomasa como tecnología de aprovechamiento también tiene sus repercusiones sobre el medio ambiente; para evitar algún tipo de contaminación, es indispensable que la central de biomasa, se ubique lejos de un cuerpo o corriente de agua. Basada en el estudio realizado por (Palacios Orejuela, 2018) para la ubicación de un relleno sanitario en la ciudad de Macas, se ha contemplado que la instalación esté ubicada a distancias mayores a 200 metros de cualquier cauce fluvial, de tal manera que una infraestructura para el aprovechamiento energético no tenga efectos nocivos sobre el agua.

Esta restricción se ha obtenido mediante la herramienta (“Área de influencia/Buffer”) a los cuerpos y cauces de agua, realizando posteriormente un recorte con la herramienta (“Borrar/Eraser”) para obtener finalmente la banda de exclusión de 200 m. Posteriormente, las capas se combinaron en una sola capa con la herramienta (“Fusionar/Merge”).

### ***Restricción de Áreas Naturales Protegidas (RANP)***

Un área natural protegida es una porción de territorio acuático o terrestre que se conserva por ser un territorio cuyos ecosistemas, comunidades o elementos biológicos son singulares por su rareza, importancia o fragilidad; la explotación de recursos está limitada, y se prohíbe el emplazamiento de infraestructuras que puedan alterar el ecosistema protegido (Vargas G, 2020). Por ende, la alternativa más óptima es, que la central de biomasa se ubique a una distancia lo suficientemente grande con el objetivo de no alterar el ecosistema.

Para obtener esta restricción, fue necesario convertir la capa vectorial del Sistema de Áreas Naturales Protegidas (SNAP) a ráster (Polígono a Ráster /Polygon to Raster), y posteriormente se realiza la reclasificación de este ráster (Reclasificar/Reclassify) asignando el valor de 0 a los espacios protegidos para excluir aquellos espacios naturales que presentan protección por cualquier administración competente.

### ***Restricción a zonas pobladas (Rpob)***

El emplazamiento de una central de biomasa, se convierte en una infraestructura de carácter industrial, que para el presente caso de estudio, maneja y acopia los residuos agrícolas del cultivo de banano para su aprovechamiento energético, por lo tanto su ubicación deberá respetar la distancia de influencia impuesta en el TULSMA (TULSMA Libro VI, 2015) y en base al estudio realizado por (Palacios Orejuela, 2018), se determina que su ubicación deberá estar a < 500 de los centros poblados de la región orense.

### ***Restricción cobertura y uso de suelo. (Rcus)***

En la selección de un área idónea para el emplazamiento de una infraestructura de carácter industrial, se deben analizar los terrenos con mayor capacidad de acogida para este uso. En este sentido, se han propuesto una serie de usos del suelo con mayor capacidad de acoger la central de Biomasa, por tener una menor afección ambiental sobre el medio, basados en la capa de cobertura y uso de suelo de El Oro.

En ese sentido, suelos áridos o industriales se clasificaron como aptos o ideales debido a que poseen las características necesarias para facilitar la instalación de una industria generando un menor impacto sobre el medio. A continuación, se muestra una tabla (Veáse tabla) con las clases de uso del suelo identificadas, en donde se especifica la clase y su propuesta como apto o restringido para albergar este tipo de industria de energías renovables.

**Tabla 18**

*Capacidad de acogida de los usos de suelo para las instalaciones.*

<b>Uso del Suelo</b>	<b>Subclasificación</b>	<b>Capacidad de acogida</b>
Bosque	Bosque Nativo	No apto
	Plantación Forestal	No apto
Cuerpos de agua	Natural	No apto
	Artificial	No apto
Tierras agropecuarias	Tierra Agropecuaria	No apto
Vegetación arbustiva y herbácea	Arbustiva	No apto
	Páramo	No apto
Zona Antrópica	Área poblada	No apto
	Infraestructura	No apto
Otras Tierras	Áreas sin cobertura vegetal	Apto

*Nota.* Clasificación de los usos de suelo en la provincia de El Oro, para identificar las zonas óptimas de emplazamiento.

Para obtener esta restricción, en primer lugar, se ha convertido la capa vectorial de Cobertura y Uso de Suelo, a ráster (Polígono a Ráster /Polygon to Raster), y posteriormente se ha realizado una reclasificación (Reclasificar/Reclassify) asignando el valor 0 para las zonas restringidas y el valor de 1 para zonas aptas.

## Capítulo IV

### Análisis de los resultados

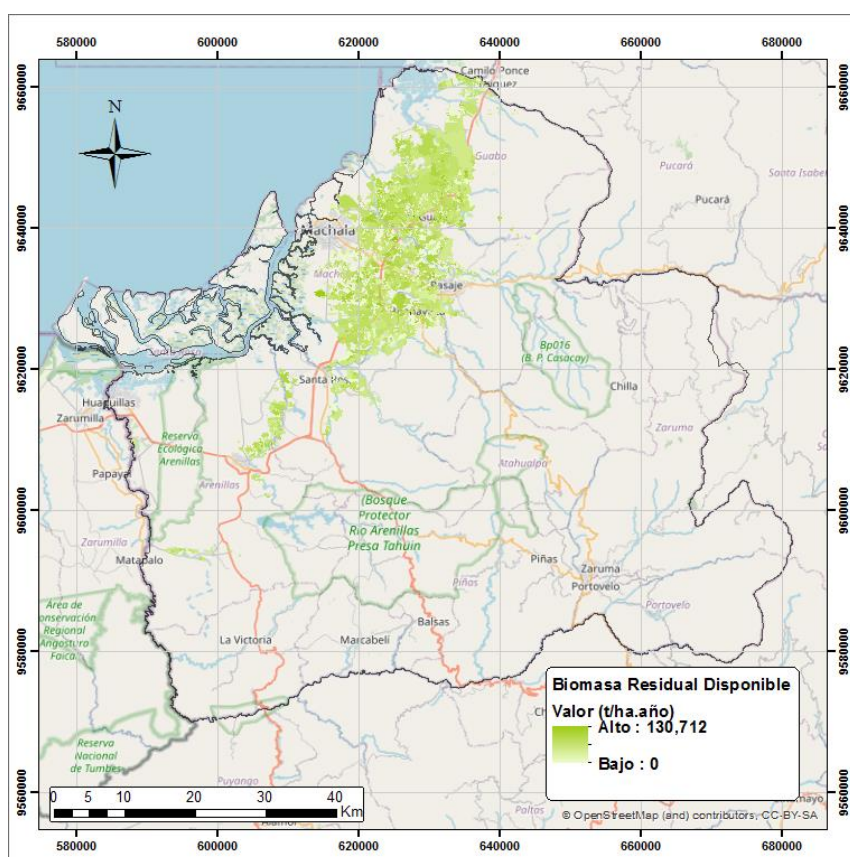
A continuación, se presentan los principales hallazgos que surgieron en el desarrollo de esta investigación.

#### Resultados de factores de parciales

La cuantificación de los factores se realizó en base a criterios técnicos como la cantidad del recurso disponible y la facilidad de extracción del recurso (Veáse figuras 5 -12).

#### Figura 5

*Factor de disponibilidad de la biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable de banana.*



*Nota.* Índice de biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable (BRAp). El valor más alto del índice, corresponde a un mayor volumen de residuos generados siendo este de 130,712 t/ha.año.

**Figura 6**

*Factor normalizado de disponibilidad de la biomasa residual agrícola potencialmente aprovechable de banano (BRAp)*

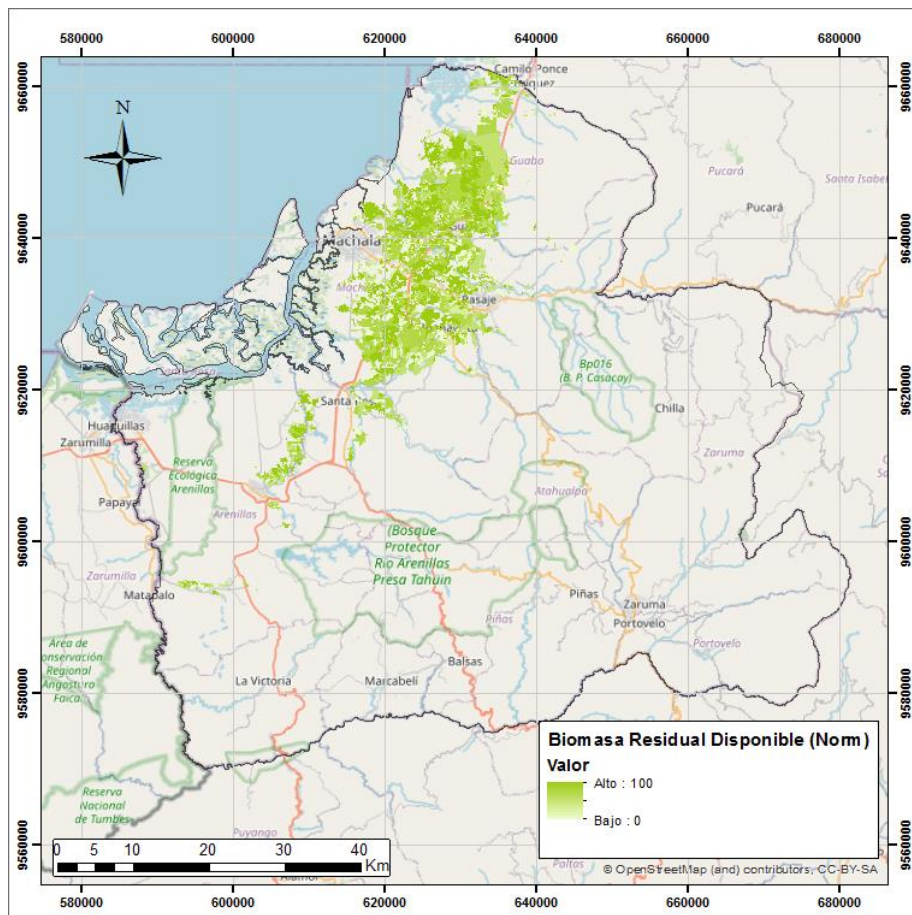
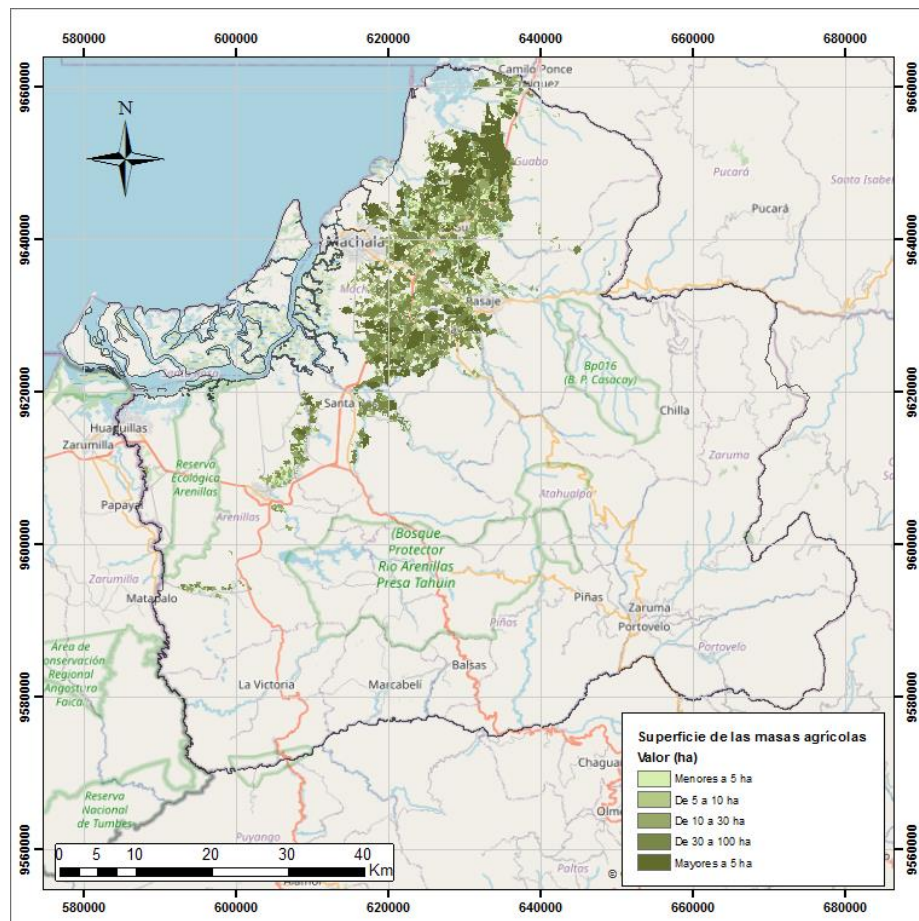


Figura 7

Factor de superficie de las masas agrícolas (FFsup)



Nota. Índice de las superficies de masas agrícolas del cultivo banano en cinco intervalos que van de las superficies menores a cinco hectáreas (en verde claro) hasta las superficies mayores a cien hectáreas (en verde oscuro).

Figura 8

Factor de superficie de las masas agrícolas normalizado ( $F_{sup}$ )

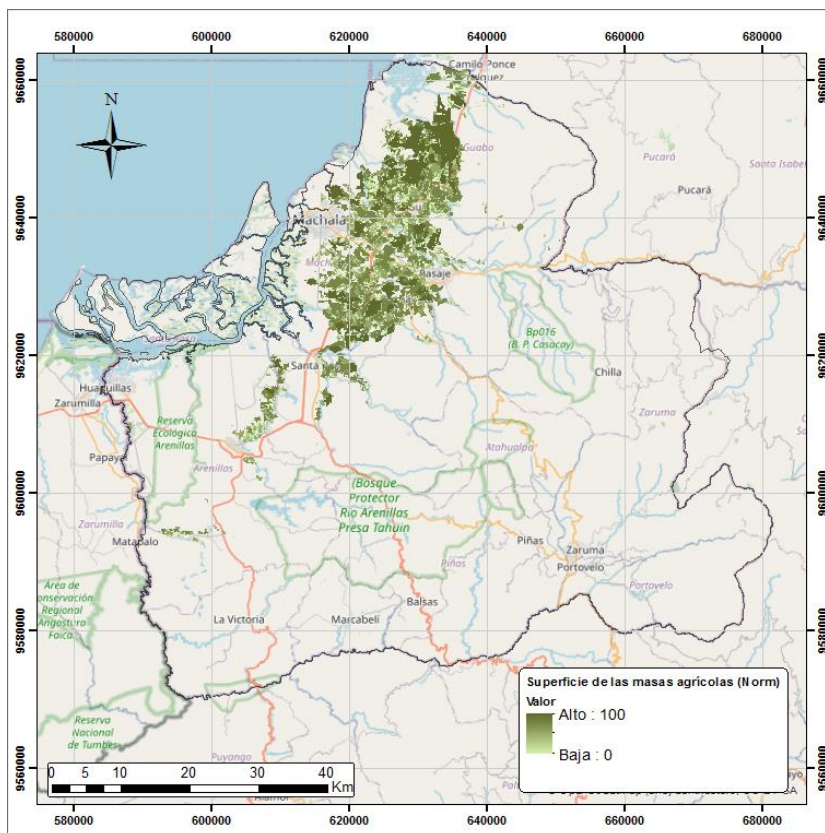
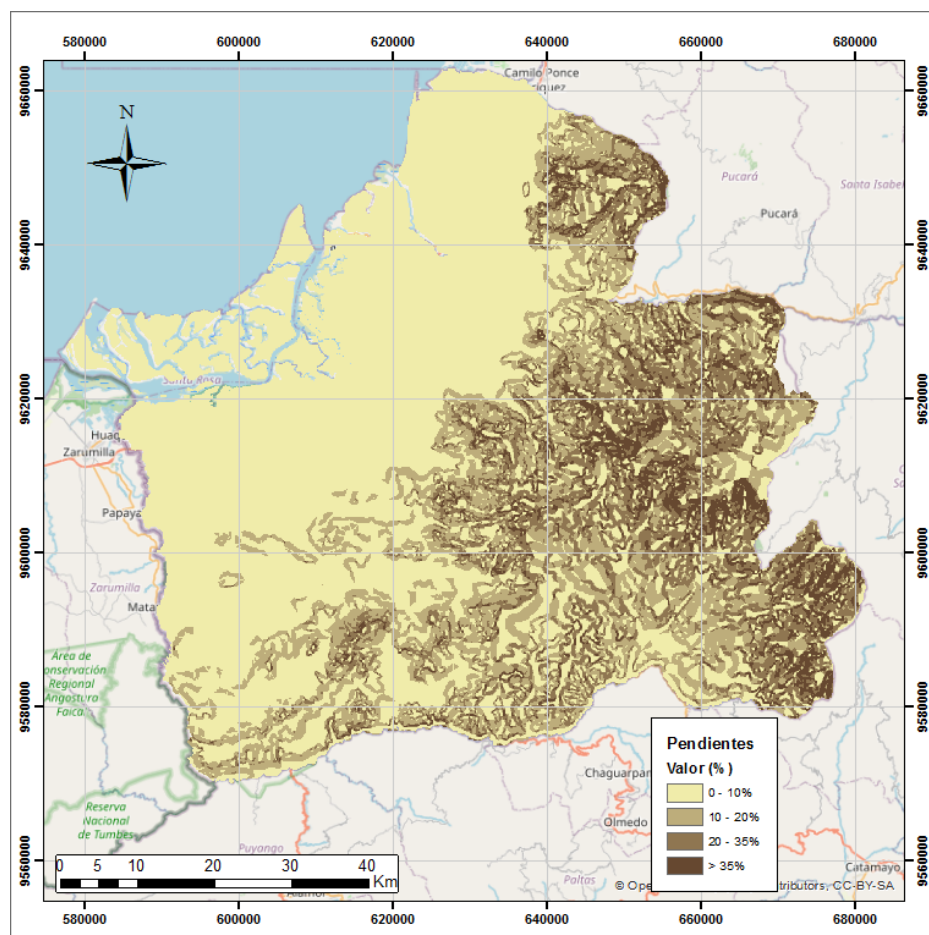




Figura 9

Factor de pendientes relacionado a la eficiencia de extracción de la biomasa ( $F_{pend}$ )



*Nota.* Índice de pendientes en porcentaje, en cuatro intervalos que van de (0 a 10%) hasta pendientes (>30%) relacionado a la eficiencia de extracción (80%) y (Nula) respectivamente.

En este trabajo se propone una pendiente del 30% como valor límite de extracción, que permite mantener un riesgo bajo de erosión en las zonas de fuertes pendientes, así como obtener una buena eficiencia de extracción, ya que este parámetro se reduce en gran proporción a partir de este valor de pendiente.

**Figura 10**

*Factor de pendientes relacionado a la eficiencia de extracción de la biomasa normalizado (Fpend)*

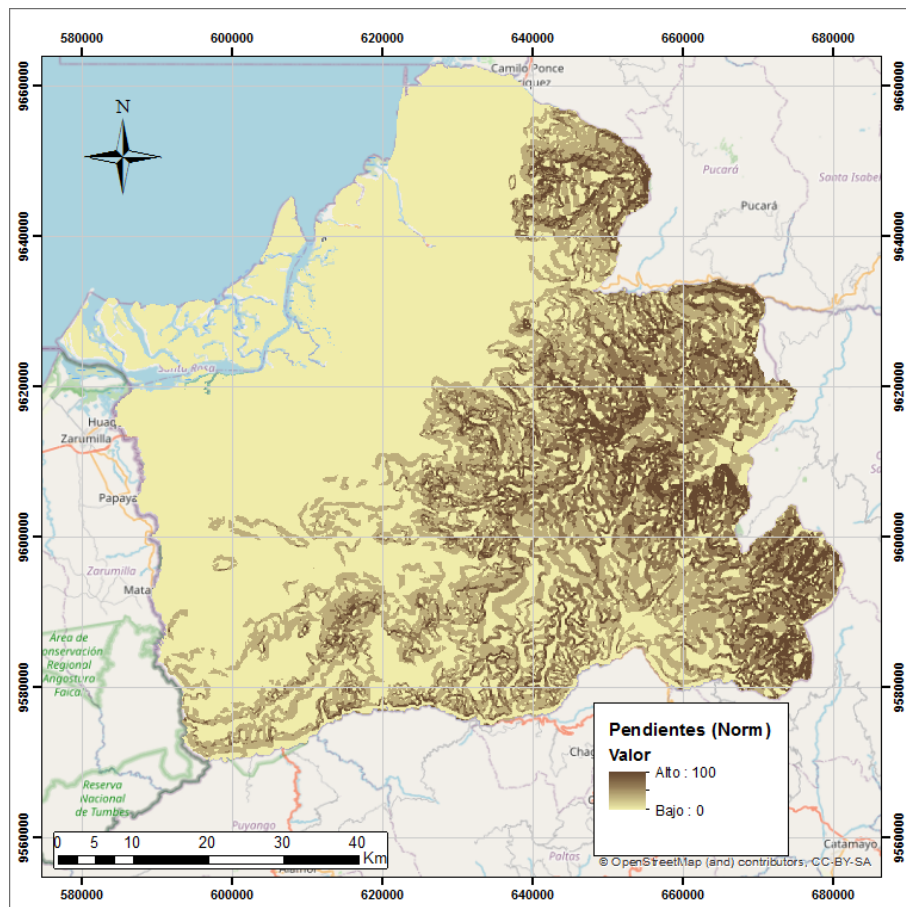
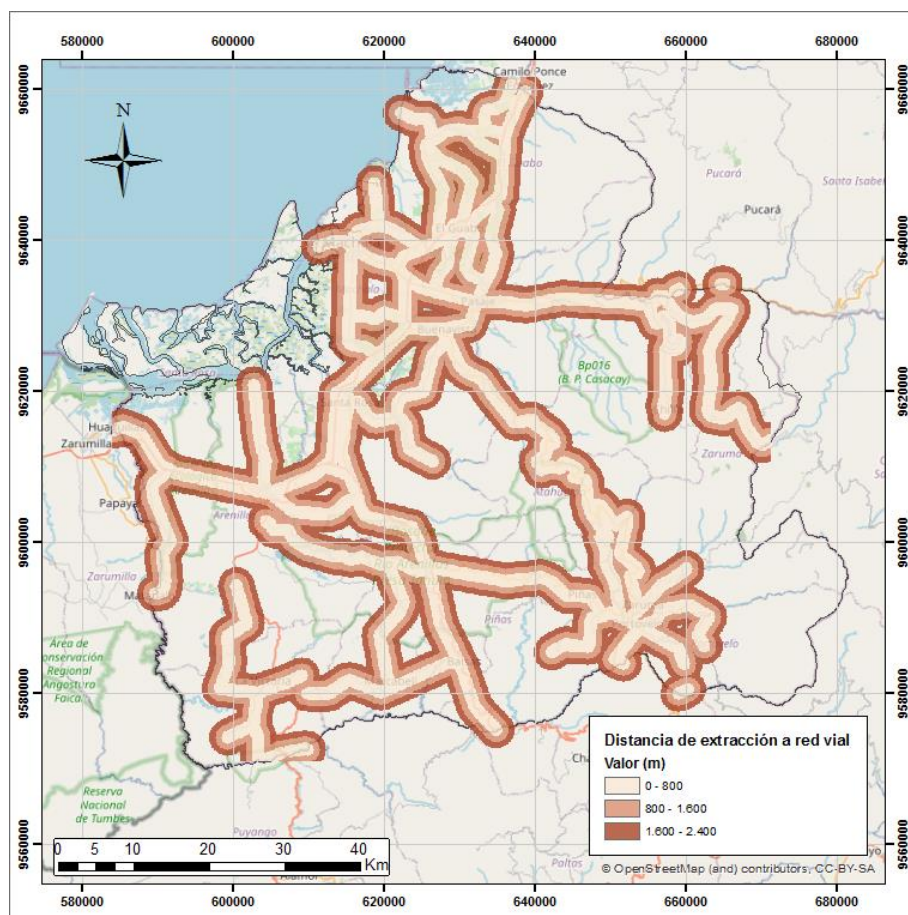


Figura 11

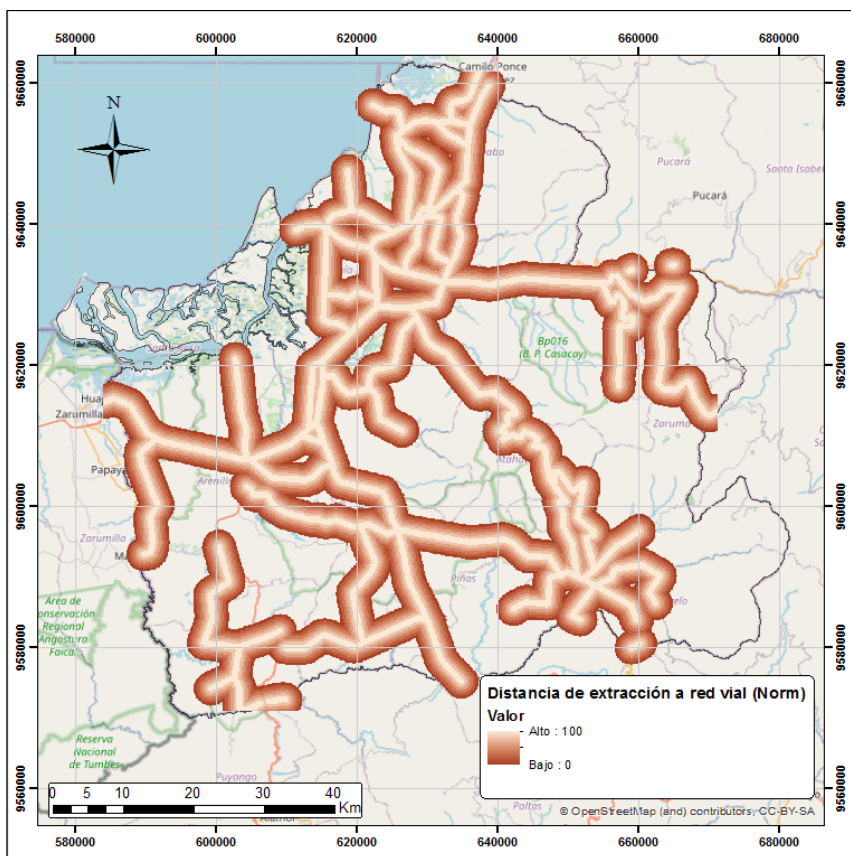
Factor de distancias de extracción a las vías principales (Fdist)



Nota. Índice de extracción de biomasa rentable, que va de (0 a 400 m) en tonos claros y de (1600 a 2400 m) en tonos oscuros, el índice está relacionado a los tiempos de recolección y distribución de la biomasa, costos de transporte (maquinaria).

Figura 12

Factor de distancias de extracción a las vías principales normalizado (Fdist)



Como se puede evidenciar en los resultados un gran porcentaje de la superficie de cultivos de banano en la provincia de El Oro generan valores superiores o iguales a 37 8ton/ha.año), de biomasa residual agrícola.

Posterior a ello, todos los factores normalizados fueron jerarquizados de acuerdo a su importancia y evaluados en el siguiente paso, mediante la técnica de análisis jerárquico (AHP).

### Evaluación Multicriterio

En el presente caso de estudio, la matriz de comparaciones pareadas se define en la siguiente tabla (Veáse tabla 20):

**Tabla 20***Matriz de comparaciones pareadas*

Factores	Disponibilidad de Biomasa Residual Agrícola	Superficie de masas agrícolas	Pendientes	Acceso vial
Disponibilidad de Biomasa Residual Agrícola	1	2	5	6
Superficie de masas agrícolas	1/2	1	3	4
Pendientes	1/5	1/3	1	3
Acceso vial	1/6	1/4	1/3	1

*Nota.* Asignación de pesos a los factores normalizados y considerados para evaluar las áreas más aptas en cuanto a disponibilidad de biomasa y rentabilidad de extracción.

**Tabla 21***Valores de los parámetros de la matriz de comparaciones pareadas.*

Parámetros	Valores
	2,0581
Autovector o eigenvector	1,1541
	0,5216
	0,2662
	0,5145 → Disponibilidad de biomasa
	0,2885 → Superficie de masas agrícolas
	0,1304 → Pendientes
	0,0665 → Distancia de extracción a vías
Índice de consistencia (IC)	0,0349

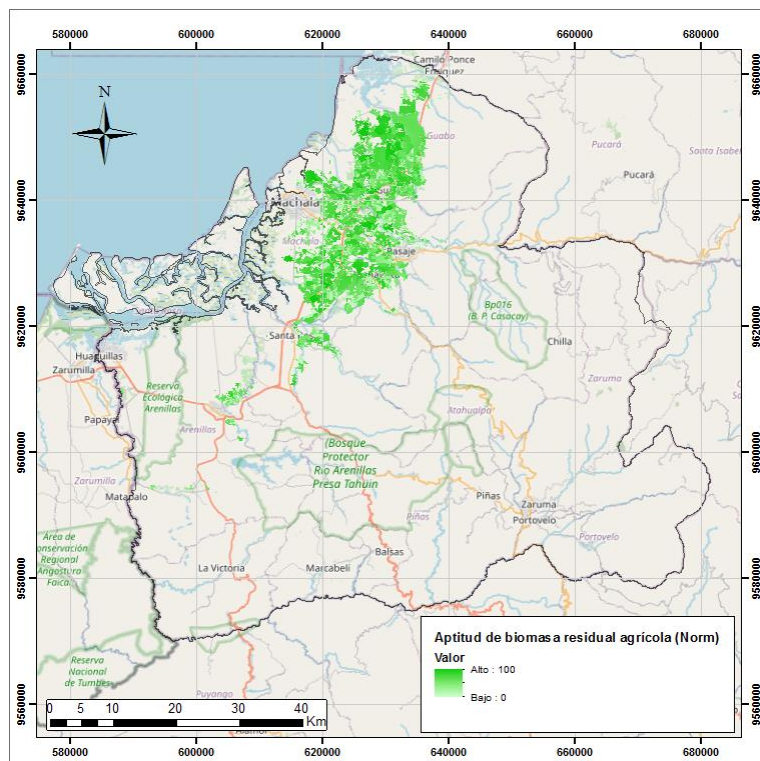
Debido a que el índice de consistencia es menor a 0.10, se puede continuar con la investigación. Por lo tanto, luego de asignar los pesos correspondientes a cada factor, el siguiente paso fue obtener el índice de aptitud de la biomasa residual agrícola.

### Estimación de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola de Banano (Demanda)

Partiendo de la matriz de comparación pareada (Véase tabla 21), se obtuvo la importancia de cada uno de los criterios, en primer lugar, se encuentra la disponibilidad de biomasa con un 51,45% de peso, en segundo lugar, está la superficie de las masas agrícolas con el 28,85%, en tercer lugar, está la topografía del terreno con un 13,04% y por último el factor de distancias de extracción de biomasa a las principales vías de comunicación con el 6,65% de peso.

#### Figura 13

*Mapa de zonas aptas para el aprovechamiento de la biomasa residual agrícola de banano.*



*Nota.* Los valores en tonos oscuros indican una mayor aptitud de las áreas para el aprovechamiento de la biomasa y valores claros indican lo contrario.

En la figura 13, tal como se puede evidenciar, existe una gran aptitud para el aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola generada en la producción de banano. Un gran porcentaje de la superficie de cultivos se muestra en tonos verdes oscuros.

### **Conjunto de restricciones de áreas para determinar las posibles áreas de emplazamiento para una central de biomasa.**

En el siguiente apartado, las restricciones se han obtenido mediante una serie de geoprocetos, de tal manera que los productos estén estandarizados en dos categorías de 0 (No data) y 1 (Aptos) (Véase figuras 14- 19)

#### **Figura 14**

*Mapa de restricción: pendientes.*

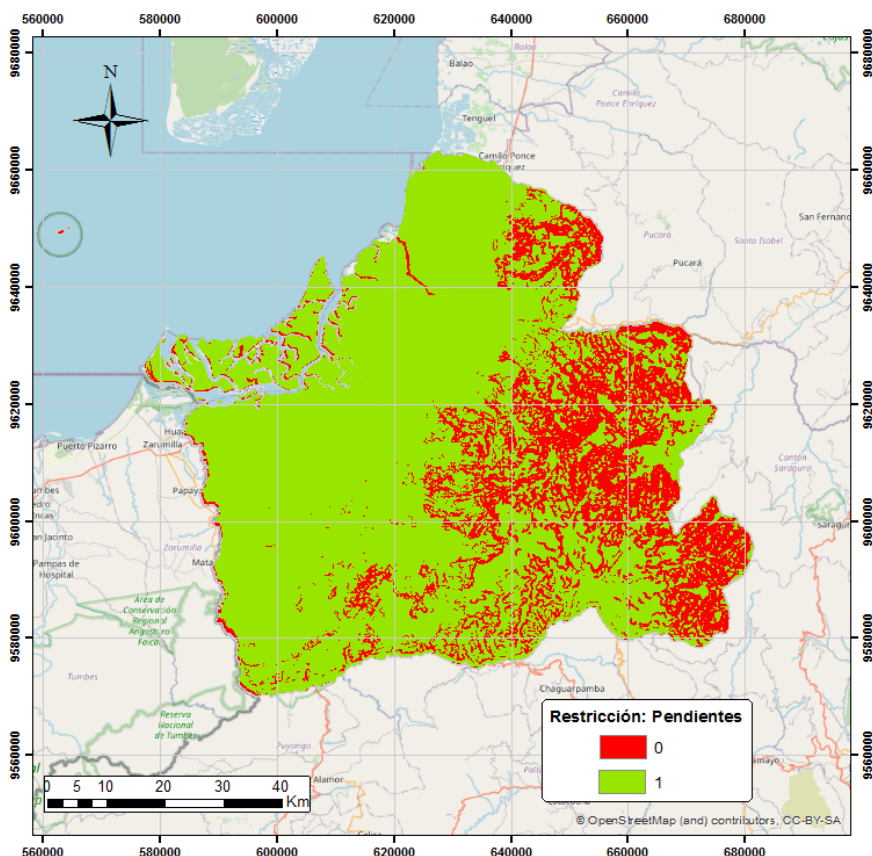


Figura 15

Mapa de restricción: ríos.

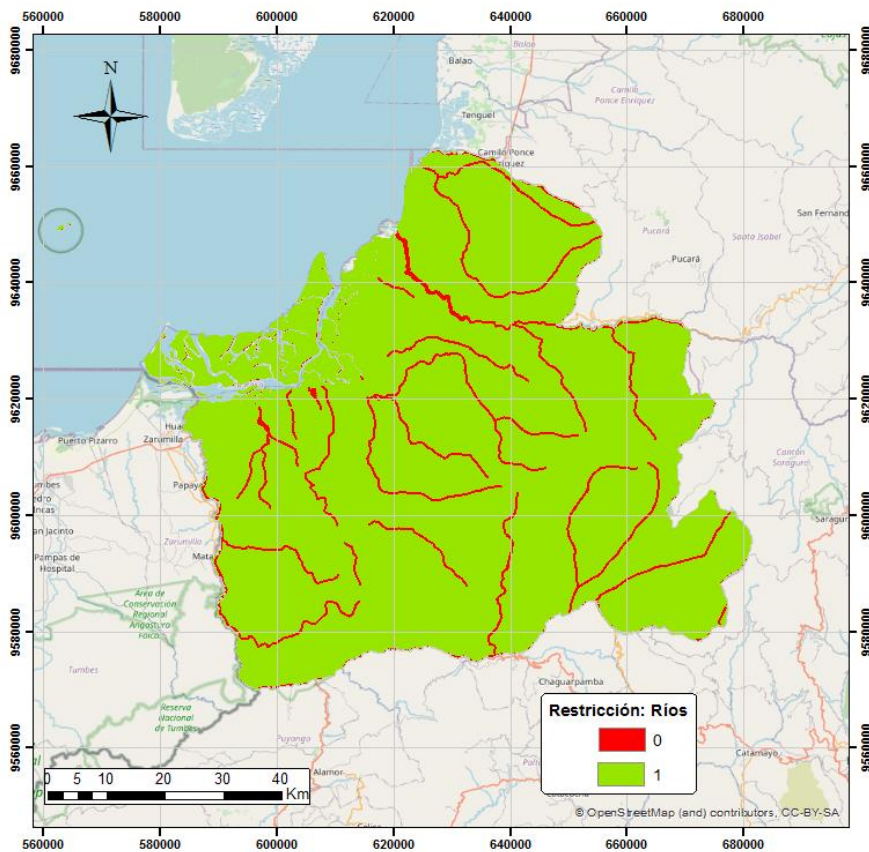




Figura 16

Mapa de restricción: áreas protegidas

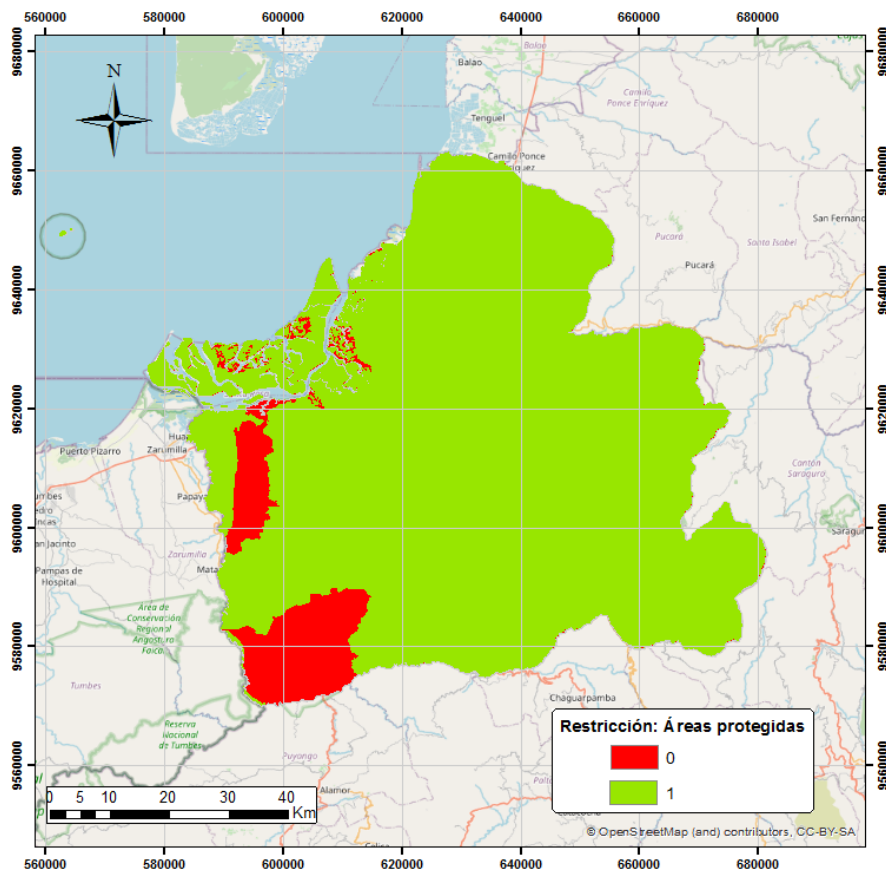


Figura 17

Mapa de restricción: Uso de suelo

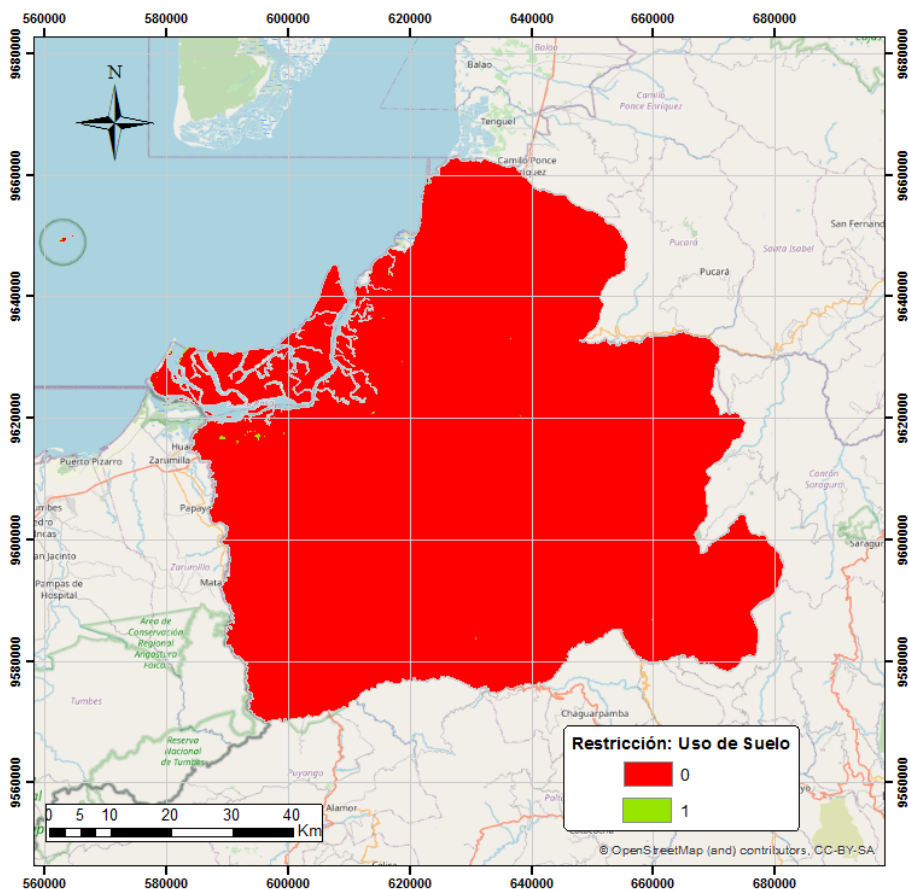


Figura 18

Mapa de restricción: vías

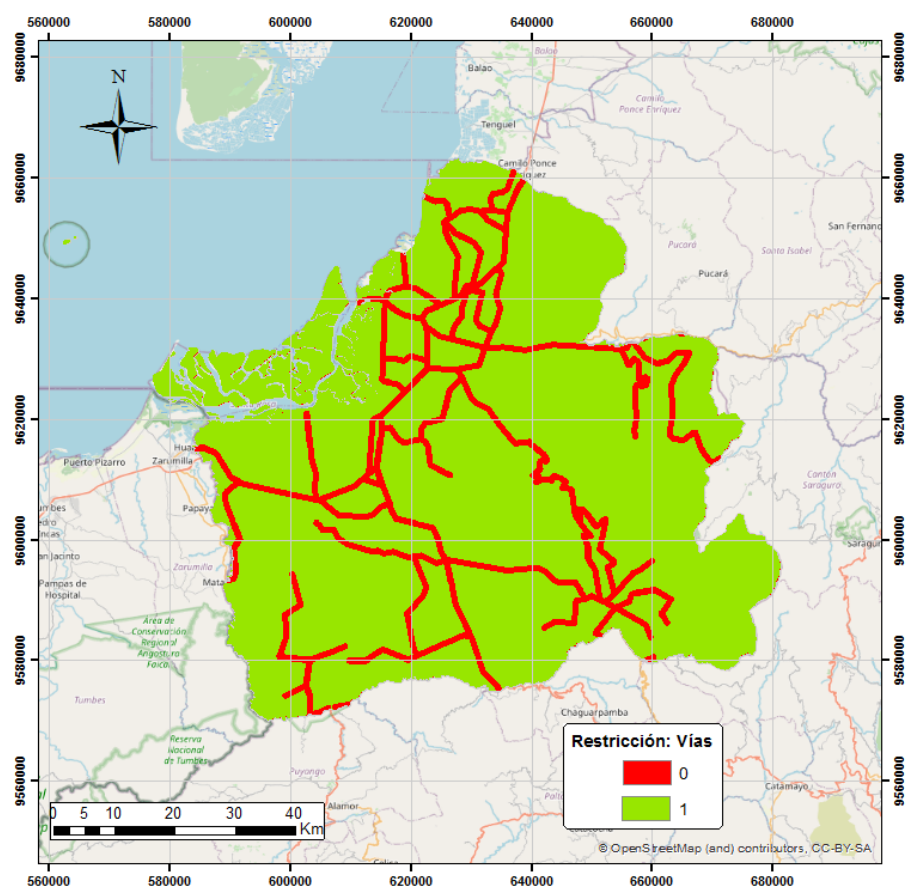
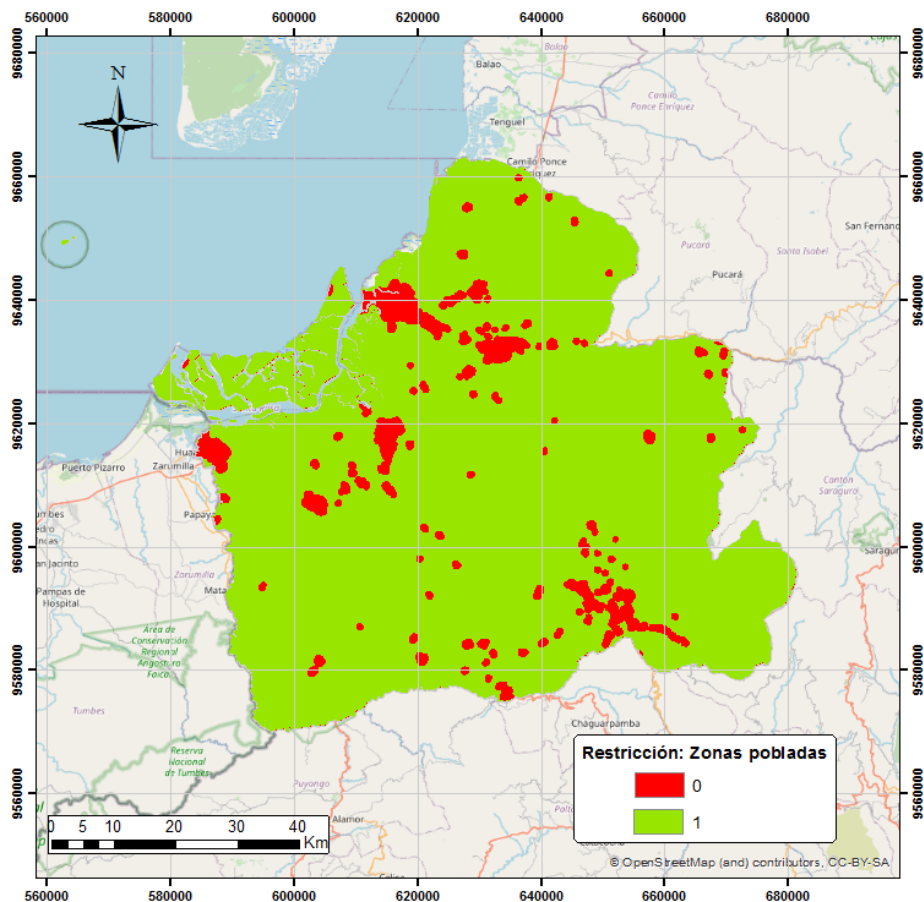


Figura 19

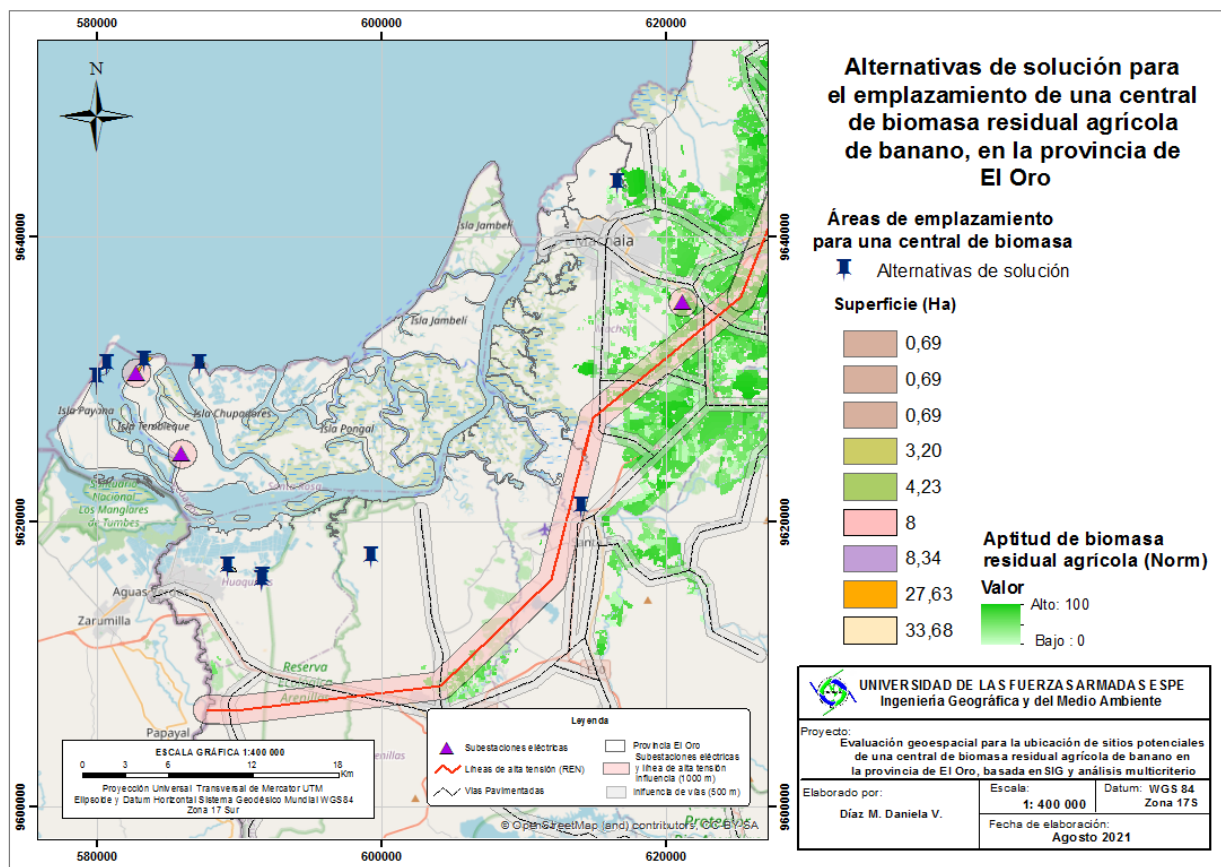
Mapa de restricción: zonas pobladas



## Resultado de las áreas de emplazamiento para la ubicación de una central de biomasa residual agrícola de banano

Figura 20

Alternativas de solución para el emplazamiento de una central de biomasa residual agrícola de banano.



*Nota.* Se obtuvieron nueve áreas de emplazamiento para la ubicación de una central de biomasa en la provincia de El Oro, de las cuales se seleccionó aquellas áreas que cumplieran con la condición de cercanía a vías pavimentadas, subestaciones eléctricas y red eléctrica nacional.

El resultado final de la evaluación multicriterio y la técnica de análisis jerárquico (AHP) mediante el uso de los sistemas de información geográfica SIG, es un ráster cuyo tamaño de celdas es de 100 x 100 m, y representan las zonas potenciales para el emplazamiento de una o

varias centrales de biomasa en la provincia de El Oro. Cabe resaltar, que los resultados parciales obtenidos permiten extraer una serie de información como superficies, porcentajes, etc., y que de estos resultados se puede dar varias interpretaciones y ampliar la visión con respecto a cualquier factor y restricción seleccionado.

### **Alternativas de solución para la ubicación de una central de biomasa residual agrícola.**

En el proceso, se ha establecido un radio de influencia para los factores de vías y subestaciones eléctricas y líneas de alta tensión, esto, debido a la particularidad restrictiva de estos factores, de tal modo que se los ha incluido dentro del mapa resultante, en el cuál se puede determinar las áreas que cumplen con las condiciones impuestas y que además están lo suficientemente cerca de la red vial de El Oro y a la red eléctrica. El resultado de la evaluación multicriterio son nueve áreas posibles para el futuro emplazamiento de una central de biomasa, de las cuáles, solamente se han seleccionado tres posibles alternativas que cumplan con el área determinada para el emplazamiento de una central de transformación bioenergética, que son 10 Ha (Guerrero, Aguado, Sánchez, & Curt, 2016), (Véase tabla 22)

**Tabla 22**

Áreas y radios de influencia de las tres alternativas resultantes

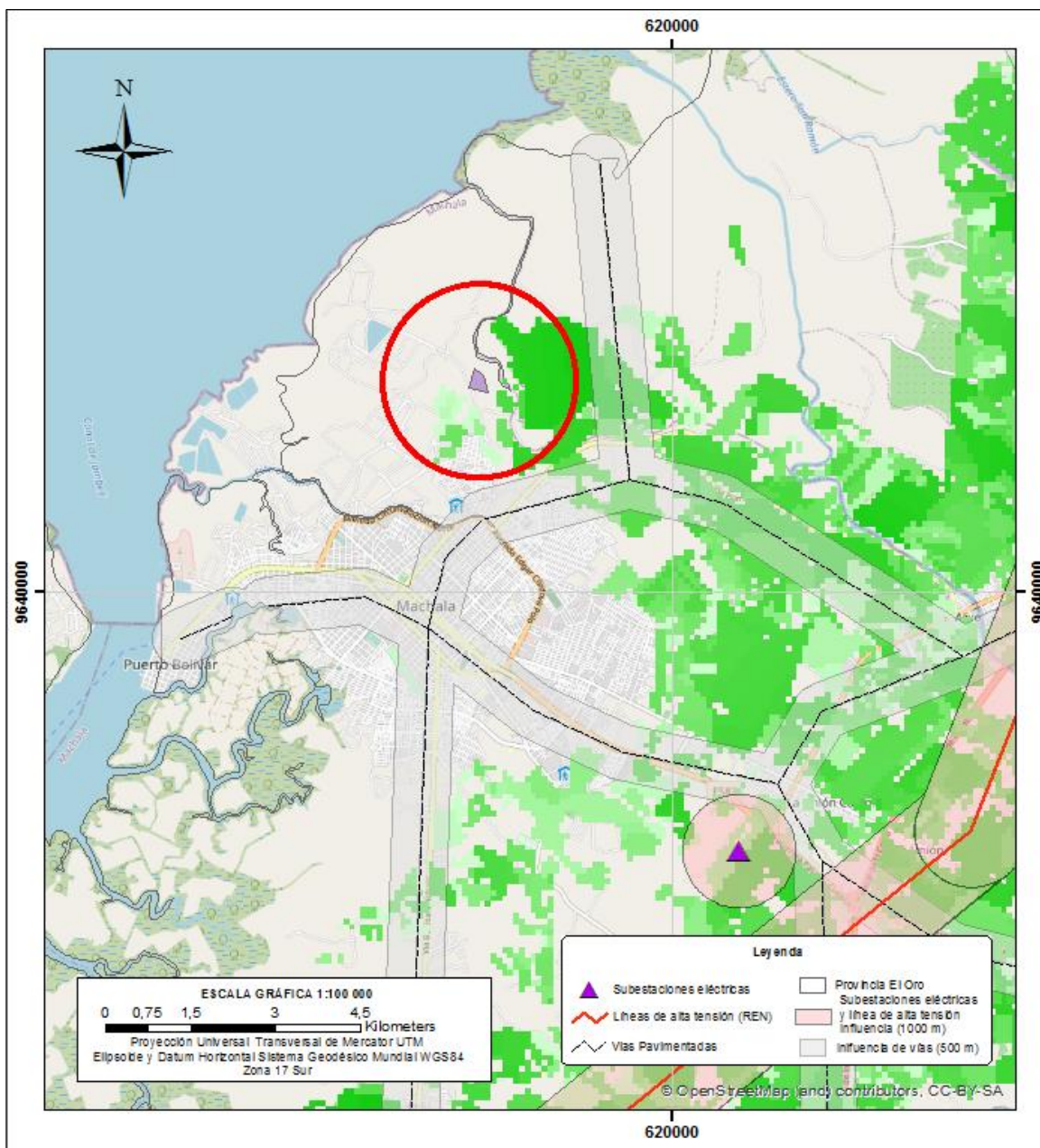
<b>Alternativas</b>	<b>Cantón</b>	<b>Área de influencia (Ha)</b>
1	El Guabo	8,34
2	Machala – Santa Rosa	0,69
3	Huaquillas	33,69

Según la tabla 22, se han seleccionado tres áreas para el emplazamiento de una central de biomasa, de las cuales, la segunda alternativa es una excepción que bien puede definirse en una visita de campo. Sin embargo, ésta alternativa se ha seleccionado por ubicarse dentro de las condiciones establecidas para el caso de estudio, es decir: a) a menos de 1000 m de líneas de alta tensión y subestaciones eléctricas, b) a menos de 500 metros de vías principales,

sin embargo, cabe recalcar que el área para la instalación de una infraestructura de biomasa es menor a las 10 Ha, y por tal motivo no sería considerada como una alternativa.

**Figura 21**

*Primera alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa*



La primera alternativa para el emplazamiento de una central de biomasa que aproveche los residuos agrícolas que se generan en la producción de banano, ocupa un área de 8,34 Ha y está ubicada en el cantón El Guabo, donde se registra una producción aproximada de 335,43 t/km<sup>2</sup>.año de residuos agrícolas, con una producción energética estimada de 6 364,35 TJ/año (ESIN S.A, 2014). Esta alternativa está a una distancia mayor a 500 metros de la red vial y también, a una distancia superior a los 1000 de la red eléctrica nacional y subestaciones eléctricas, sin embargo, se considera que la provincia de El Oro, actualmente posee una infraestructura vial muy buena por lo que se considera igualmente, que es el área óptima para la instalación de una central de biomasa que puede aportar energéticamente al cantón de El Guabo (Véase tabla 23).

**Tabla 23**

*Primera alternativa de solución para el cantón El Guabo y su posible conexión a la red eléctrica nacional.*

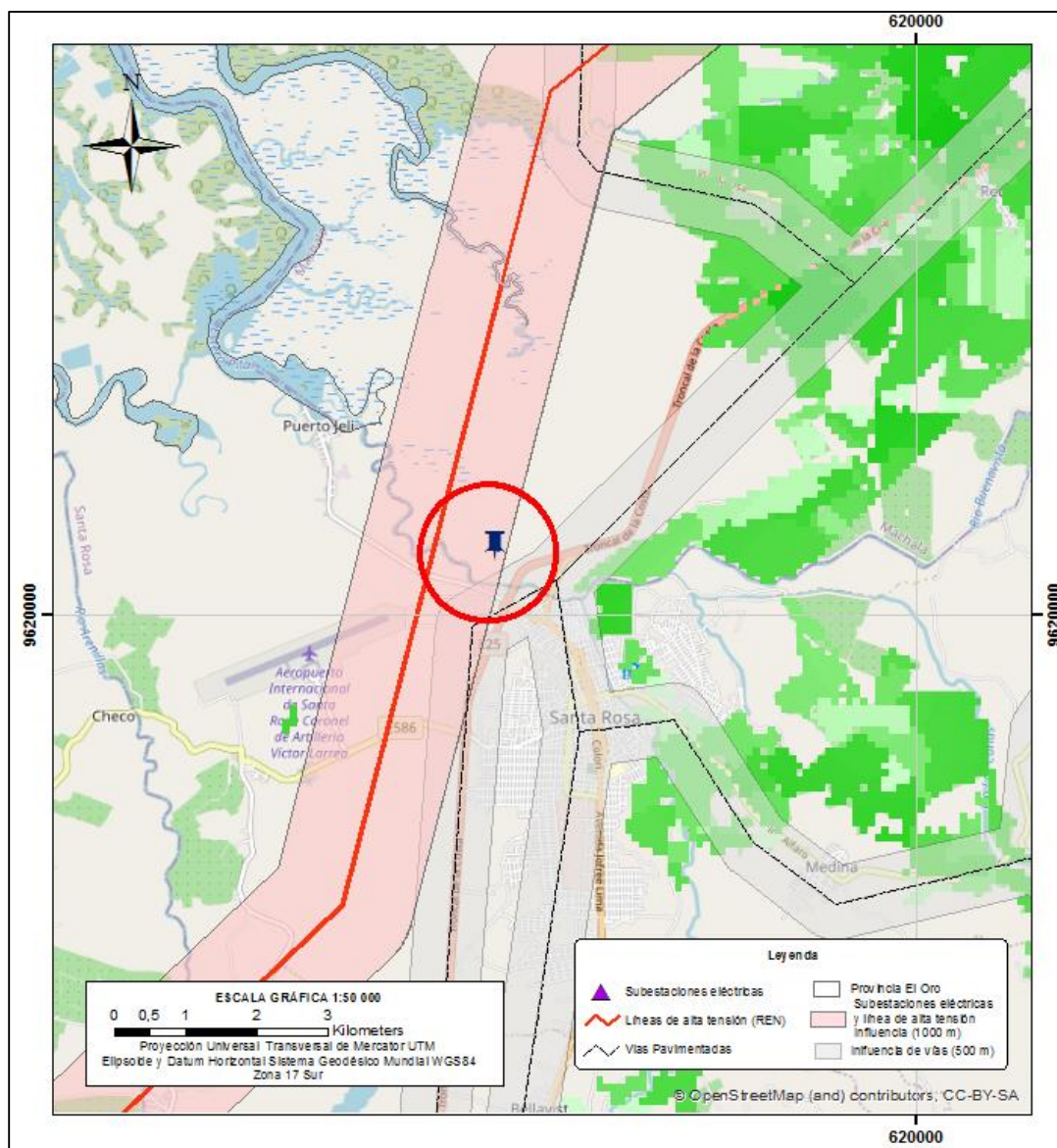
Alternativas	Cantón	Área de influencia (Ha)	Subestación eléctrica	Línea de alta tensión
1	El Guabo	8,34	Bajo Alto Termogas Machala	Milagro Machala (138 kV) Machala Perú – Zorritos (230 kV)

Como posible alternativa para generar y distribuir electricidad a partir de la biomasa residual agrícola de banano (energía renovable), esta infraestructura podría conectarse a la subestación eléctrica Bajo Alto (Termogas Machala) y a la línea de alta tensión de Milagro-Machala (138 Kv) y Perú - Zorritos (230 Kv), con las pertinentes consideraciones eléctricas y técnicas para el caso.



Figura 22

Segunda alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa



Como segunda alternativa para el emplazamiento de una central de biomasa, esta opción ocupa un área de 0,69 Ha y está ubicada entre el cantón Machala – Santa Rosa, donde se registra una producción aproximada de residuos de 1109,34 t/km<sup>2</sup>.año y 249,21 t/km<sup>2</sup>.año, con una producción energética estimada de 4 530,46 TJ/año y 249,21 TJ/año, respectivamente

(ESIN S.A, 2014). Esta segunda alternativa está a una distancia superior a 500 metros de la red vial y también, a una distancia menor a los 1000 metros de la línea de alta tensión, sin embargo, el área que ocupa no entra dentro del rango mínimo que se necesitaría para ubicar una central de biomasa, sin embargo, se considera que puede realizarse una visita de campo que permita verificar los resultados. Además, tiene una buena cobertura para áreas donde se generan una buena cantidad de residuos agrícolas.

#### Tabla 24

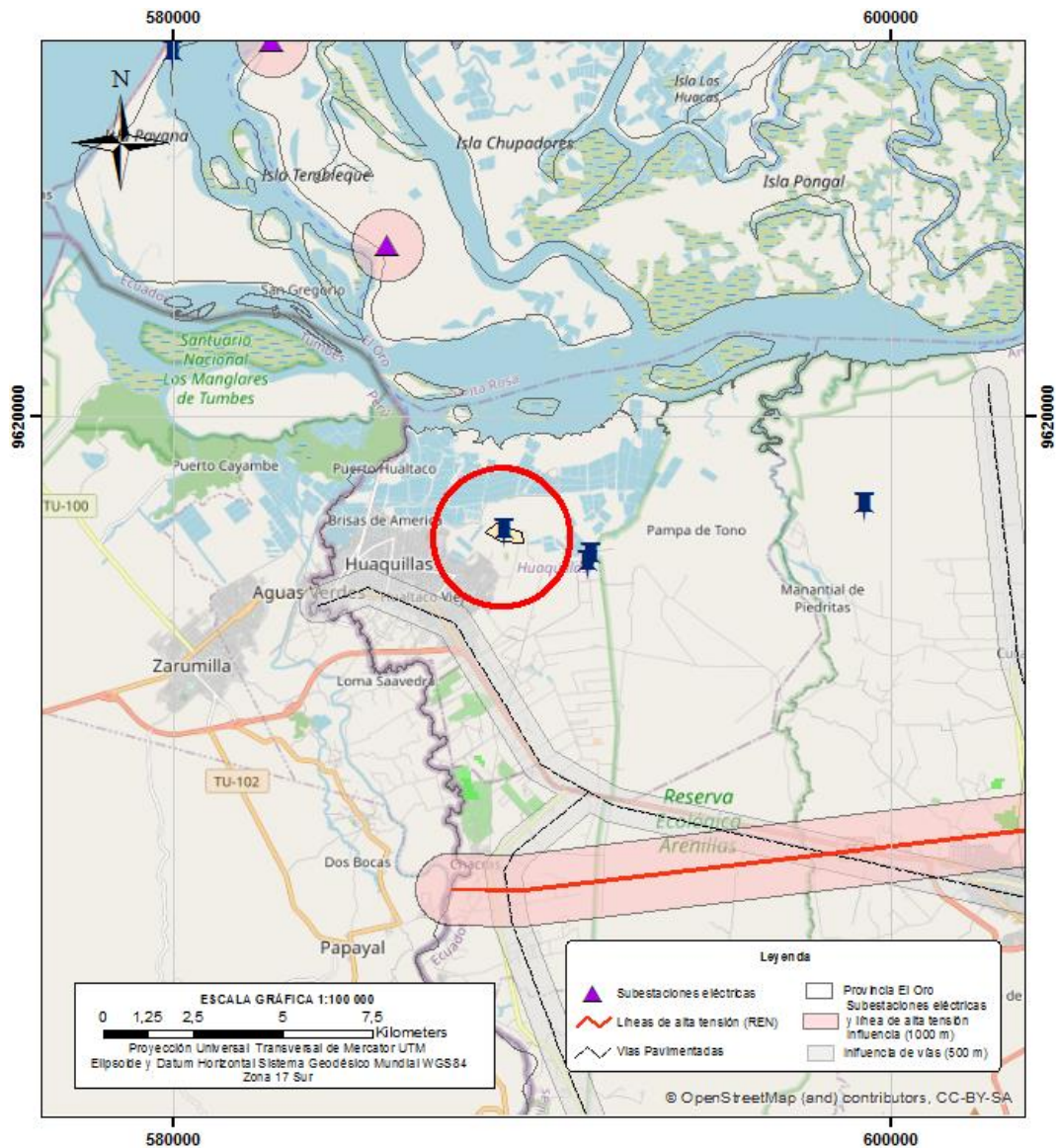
*Segunda alternativa de solución para los cantones Machala – Santa Rosa y su posible conexión a la red eléctrica nacional.*

Alternativas	Cantón	Área de influencia (Ha)	Subestación eléctrica	Línea de alta tensión
2	Machala – Santa Rosa	0,69	Bajo Alto Termogas Machala	Milagro Machala (138 kV) Machala Perú – Zorritos (230 kV)

Finalmente, se ha determinado que la tercera alternativa para el emplazamiento de una central de biomasa se encuentra ubicada en el cantón Huaquillas, de la provincia de El Oro, tiene una extensión de 33,69 Ha, sin embargo, se encuentra a una distancia superior a 500 m (aprox.) de las vías principales y pavimentadas por lo que el tiempo utilizado para transportar la biomasa sería mayor y no está dentro del área de influencia a líneas de alta tensión y red eléctrica nacional, de tal modo que sería necesario implementar otro tipo de alternativas para que la instalación pueda conectarse a la red y ampliar la distribución energética a toda la región. Sin embargo, para efectos del caso, esta solución bien podría abastecer energéticamente al cantón de Huaquillas y de ser necesario podría ampliar su distribución a países vecinos (Véase figura 23).

**Figura 23**

*Tercera alternativa de solución para el emplazamiento de una central de biomasa*



## Capítulo V

### Discusión

Dentro de este capítulo se discute la metodología utilizada y los resultados obtenidos, en contraste con las investigaciones científicas existentes.

El empleo de la biomasa como fuente de energía renovable aporta con una serie de ventajas, como el balance positivo de CO<sub>2</sub> (carbono neutro) y de energía, permite dar uso a suelos no productivos, reduce los riesgos de incendios forestales y plagas ocasionadas por los insectos y aumenta las ofertas de empleo en el sector rural.

En Ecuador, existe un desconocimiento parcial o incluso total de las energías alternativas y su potencial eléctrico para el país, teniendo en cuenta que la región dispone de abundantes recursos renovables para contribuir al desarrollo energético y satisfacer la demanda de energía, existente y futura. La provincia de El Oro cuenta con abundantes cantidades de biomasa residual agrícola, de sumo valor para la producción de bioenergía, en especial, de uno de sus cultivos más representativos como es el banano. Esta investigación constituye un primer peldaño para impulsar la investigación y el aprovechamiento de la biomasa residual para la generación de energía renovable a nivel provincial y regional.

Dentro de este contexto, la propuesta de utilizar la biomasa residual generada en toda la cadena productiva del cultivo de banano, con fines bioenergéticos, incluye varias ventajas, como: la concentración del cultivo en el área de estudio (localización centralizada), lo cual minimiza el costo y la energía empleada para el transporte de la biomasa (Fernández J. , 2004); la extensa superficie de los cultivos de banano en la región orense (cantidad de biomasa); y por último, la producción continua de banano que está directamente relacionada a la producción de residuos agrícolas a lo largo de todo el año (Santa-Maria, Ruiz-Colorado, Cruz, & Jeoh, 2013). De tal forma, se garantiza que el suministro de biomasa es constante y no depende de una temporada específica del año (Guerrero A. , 2014).

La metodología propuesta para identificar un sitio de emplazamiento para el aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola, bajo sustento teórico, permite una planificación sustentada y coherente a futuro, en caso de que el proyecto se considere viable para los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) municipales o regionales. El presente estudio, entrega una propuesta técnica para la ubicación de una central de biomasa en la provincia de El Oro, que podría ser considerada en posteriores estudios, sobre la temática analizada. Los índices de aptitud seleccionados integran cuatro factores determinantes para la eficiencia y rentabilidad de extracción de la biomasa: cantidad de biomasa residual potencialmente aprovechable, topografía del terreno, superficie de las masas agrícolas y distancias de extracción hacia las vías de comunicación principales.

Los resultados integran los factores y restricciones seleccionados mediante las funciones implementadas por un SIG, e indican tres posibles alternativas de emplazamiento que pueden aprovechar grandes cantidades de residuos agrícolas para abastecer energéticamente a sus cantones, e incluso para conectarse a la red eléctrica nacional.

Los factores más limitantes a la hora de determinar la capacidad de explotación del recurso biomásico, son la cobertura de uso de suelo y la cantidad de biomasa disponible, puesto que en el área existen múltiples usos del suelo que hace que el modelamiento de esta restricción se bastante rígido. Por otra parte, en cuanto al factor de cantidad de biomasa, será variable según las necesidades de la central de biomasa y los futuros trabajos encaminados a viabilizar esta infraestructura.

Aún existen diversos desafíos que superar antes de lograr un óptimo aprovechamiento de la biomasa residual agrícola, como: falta de confianza por parte del sector productivo e industrial, los métodos empleados para la transformación de la biomasa a energía eléctrica, costos de transformación energética, tecnología requerida, etc. El propósito de implementación de una central de transformación energética de la biomasa residual agrícola, está dirigido principalmente al sector industrial, ya sea que pueda ser para el autoabastecimiento en primera

instancia como también para que los excedentes de energía puedan ser enviados al sistema de interconexión de la red eléctrica nacional cuando estos se produzcan.

Finalmente, la provincia de El Oro tiene un gran potencial para la producción de bioenergía a partir de los residuos agrícolas de banano. En lo que corresponde a biomasa residual lignocelulósica podría utilizarse para la generación de energía con un potencial de capacidad instalada de 18 MW.

## Capítulo VI

### Conclusiones y recomendaciones.

En este apartado, llegamos a la siguiente conclusiones y recomendaciones:

Mediante el uso de SIG y técnicas de evaluación multicriterio se ha logrado localizar las áreas más adecuadas para el aprovechamiento energético de la biomasa residual agrícola de banano.

El aprovechamiento de los residuos agrícolas como materia prima para la creación de bioproductos y bioenergía, podría ayudar a reducir tanto el volumen de residuos en rellenos sanitarios, así como también, minimizar su impacto ambiental con el entorno causado por la degradación orgánica de los residuos orgánicos. Además, el emplazamiento de una nueva infraestructura y uso económico de la biomasa residual agrícola de un cultivo podría potenciar el desarrollo de los pequeños agricultores de la región para obtener un ingreso extra y abrir mayores oportunidades de empleo.

Tomando en cuenta que la seguridad alimentaria es una prioridad mundial, el aprovechamiento de la biomasa residual con fines bioenergéticos no afecta de ningún modo la seguridad alimentaria, caso contrario podría mejorar la calidad de vida de la gente que vive en sectores rurales.

La ubicación geoespacial adecuada para instalar una central de biomasa de forma sostenible y eficiente, es un aspecto crucial dentro del campo de las energías alternativas. Para efectos del caso, el empleo de las herramientas adecuadas, también juega un rol importante, como la aplicación de una evaluación multicriterio poderosa y efectiva que pueda responder a las dificultades de seleccionar los criterios y factores más importantes para obtener energía renovable y sostenible.

El consumo de recursos energéticos renovables, permitirá aumentar la generación de energía renovable para zonas rurales y no conectadas a la red eléctrica nacional, para que

puedan ser abastecidas las veredas, municipios, pueblos, fincas, etc., y se les proporcione así un servicio continuo y de buena calidad

La renovación de la canasta energética debe ser un camino arduo hacia la investigación y promoción de las diferentes fuentes de energías renovables, es por esto que el país debe aumentar la cantidad de proyectos de generación de energía a partir de fuentes alternativas, como la biomasa residual agrícola.

En cuanto a los resultados obtenidos y las áreas determinadas para el emplazamiento de una central de biomasa, se recomienda realizar una visita previa de campo para confirmar que las áreas son óptimas y no representan afectaciones ambientales ni económicas para su realización.

Cabe destacar que el sector bananero ecuatoriano se ha enfrentado en los últimos dos años a grandes desafíos: En el 2019, la llegada del hongo del Fusarium raza 4 a América Latina que representa una amenaza latente, y en el 2020, el inesperado Covid-19, que puso a prueba la seguridad alimentaria de todos los países en medio de una inesperada cuarentena. La pandemia no sólo impactó la salud de la población, sino que cambió la dinámica de la demanda en los países consumidores de banano, causó dificultades logísticas para el traslado de la fruta, y afectó el flujo de pagos a lo largo de toda la cadena. A esas condiciones coyunturales, debe sumarse el comportamiento de la producción de los competidores directos del banano ecuatoriano.

El uso de Sistemas de Información Geográfica brinda muchas facilidades debido a las numerosas herramientas y extensiones que posee, en especial la herramienta ArcGIS. Se trata de una herramienta determinante para la localización de los recursos energéticos y la ubicación idónea para la creación de una infraestructura de aprovechamiento de biomasa.

La información cartográfica que brindan las instituciones gubernamentales debería estar estandarizada, con una misma estructura y formato con el objeto de que su manejo sea más sencillo y óptimo de manipular.



Por último, esta investigación pretende impulsar la política de planificación de la gestión de la energía renovable y sostenible en todos los sectores privados, niveles gubernamentales y varias partes industriales, y la metodología aplicada se puede utilizar para resolver problemas de decisión debido a la característica maleable, técnica y adaptable de la metodología propuesta.

Esta tesis puede ser tomada como referencia para dar solución a problemas de gestión y manejo de residuos agrícolas a nivel local y regional, además de impulsar el aprovechamiento de los residuos como materia prima para la generación de electricidad.

Finalmente, se recomienda ampliar la presente investigación a otros cultivos característicos de cada provincia, de tal forma que se pueda trabajar con diferentes residuos agrícolas y replicar la metodología propuesta hacia otros lugares y con diferentes recursos alternativos que suministren bioproductos o bioenergía a sus territorios.

### Referencias bibliográficas

- Schwager Energy. (2020). Plantean factibilidad para instalar planta generadora a partir de biogás en Región Metropolitana. *Electricidad - La revista energética de Chile*.
- Abdo Peralta, P. A. (Abril de 2021). Matriz Energética del Ecuador. *Procesos Sanitarios en Manufactura*. Quito, Pichincha, Ecuador: Capacitaciones Lebens Ecuador.
- agroalimentando.com. (s.f). Cómo obtener bioenergía de los residuos del plátano. *Agroalimentando*.
- Aguilar, D. (2019). *Determinación del potencial energético de la biomasa residual de cultivos de banano en el cantón Machala, El Oro - Ecuador*. Quito: Tesis.
- Álvarez, J. (2004). Estudio sobre la utilización de biomasa con fines energéticos; análisis metodológico sobre abastecimiento y costes. *Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León*.
- Anagumbra, M. B., & Naranjo, L. (2015). *ZONIFICACIÓN EN BASE A LA GENERACIÓN DE RESIDUOS DEL SECTOR AGROPECUARIO PARA EL APROVECHAMIENTO BIOENERGÉTICO EN LA PROVINCIA DE LOS RÍOS MEDIANTE EL USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*. Quito.
- ARCONEL. (2015). *Ecuador posee un 51,78% de energía renovable*. Obtenido de Regulación eléctrica : <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>
- Armas Espinel, D. A. (2017). *DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL DE GUAYABA (Psidium guajava L.) EN ROCAFUERTE, CANTÓN IBARRA, PROVINCIA DE IMBABURA*". Ibarra - Ecuador: Tesis de grado.
- Asikainen, A., Björheden, R., & Nousiainen, I. (2004). Cost of wood energy. *Bioenergy from sustainable Forestry: Guiding principles and practice*, 125 - 157.
- Asociación Agraria Bananera "Fincas de El Oro". (2019). *Agricultura responsable, Futuro Sostenible (Banano Cavendish)*. Obtenido de <https://www.fincasdeeloro.com.ec/>

- Aznar B, J., & Guijarro M, F. (2012). Nuevos métodos de valoración. En J. Aznar B, & F. Guijarro M. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- BEFS - FAO. (2014). *User manual of crop residues and livestock residues. Natural Resources Module Agricultural Residues Component*. Bioenergía y Seguridad Alimentaria.
- Cabrera, M., Vera, A., Cornejo, J., Ordás, I., Tolosana, E., Ambrosio, Y., & Garraza, J. (2011). *Evaluación del Potencial de Energía de la Biomasa*. Madrid - España: IDAE.
- Carhuancho L, F. M. (2015). *Valorización energética de la Biomasa Residual Agrícola de banano en la región de Piura-Perú*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Castañeda S, D. A., Jaramillo J, D. F., & Cotes T, J. M. (2010). Componentes de la variabilidad espacial en el manejo por sitio específico en banano . *Universidad Nacional de Colombia, Medellín*, 836 - 845.
- Castro, K., & Ocampo, J. (2015). *CARACTERIZACIÓN FÍSICO- QUÍMICA DE LA BIOMASA RESIDUAL DEL CULTIVO DE CACAO (Theobroma cacao L), NARANJA (Citrus sinensis, variedad valenciana,) Y MANDARINA (Citrus reticulata) EN LA PROVINCIA BOLÍVAR*. Guaranda - Ecuador: Universidad Estatal de Bolívar.
- Cerdá, E. (2012). *Energía obtenida a partir de la biomasa*. Madrid - España: Universidad Complutense de Madrid.
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Quito: Decreto Legislativo 0 - Registro Oficial 449 de 20 de Octubre del 2008.
- Conto, O., & Tipan, D. (2018). *Universidad. del Azuay - Escuela de Ingeniería Civil y Construcciones*. Obtenido de Evaluación del Comportamiento Hidráulico de los Lixiviados de la Fase Norte I del Relleno Sanitario de Cuenca:  
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7601>
- Cubillo B, P. (2005). *Research Gate*. Obtenido de Ubicación del nuevo relleno sanitario en base a criterios ambientales, socioeconómicos y técnicos, y propuesta de plan de reciclaje en la ciudad de Quero, Latacunga:

- [https://www.researchgate.net/publication/277148458\\_Ubicacion\\_del\\_nuevo\\_relleno\\_sanitario\\_en\\_base\\_a\\_criterios\\_ambientales\\_socioeconomicos\\_y\\_tecnicos\\_y\\_propuesta\\_de\\_plan\\_de\\_reciclaje\\_en\\_la\\_ciudad\\_de\\_Quero\\_canton\\_Quero\\_provincia\\_del\\_Tungurahua](https://www.researchgate.net/publication/277148458_Ubicacion_del_nuevo_relleno_sanitario_en_base_a_criterios_ambientales_socioeconomicos_y_tecnicos_y_propuesta_de_plan_de_reciclaje_en_la_ciudad_de_Quero_canton_Quero_provincia_del_Tungurahua)
- De la Paz, C. (2011). *Metodología SIG para la localización de Centrales de Biomasa mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de localización - asignación para el aprovechamiento de la biomasa forestal*. Madrid, España: Tesis de Maestría.
- De La Paz, C. (Diciembre de 2011). *METODOLOGÍAS PARA LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE CENTRALES DE BIOMASA Y MINIHIDRÁULICA COMO RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES EN LA COMARCA DE EL BIERZO*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de Trabajo de Fin de Máster.
- De La Paz, C. (2013). Metodología SIG para la Localización de Centrales de Biomasa mediante Evaluación Multicriterio y Análisis de Redes. Modelos de Localización- Asignación para el Aprovechamiento de Biomasa Forestal. *Informes Técnicos CIEMAT*.
- Domínguez, J., & Marcos, J. (Julio de 2000). *Análisis de la producción potencial de energía con Biomasa en la región de Andalucía (España) utilizando Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de Research Gate:  
[https://www.researchgate.net/publication/41247294\\_Analisis\\_de\\_la\\_produccion\\_potencial\\_de\\_energia\\_con\\_Biomasa\\_en\\_la\\_region\\_de\\_Andalucia\\_Espana\\_utilizando\\_Sistemas\\_de\\_Informacion\\_Geografica?enrichId=rgreq-6a7d4457c69b1cc4842c1de5a058a843-XXX&enrichSource=Y2](https://www.researchgate.net/publication/41247294_Analisis_de_la_produccion_potencial_de_energia_con_Biomasa_en_la_region_de_Andalucia_Espana_utilizando_Sistemas_de_Informacion_Geografica?enrichId=rgreq-6a7d4457c69b1cc4842c1de5a058a843-XXX&enrichSource=Y2)
- Domínguez, J., Ciria, P., & Luis, E. (2002). EVALUACIÓN DE LA BIOMASA POTENCIAL COMO RECURSO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN DE NAVARRA (ESPAÑA). *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 1-10.
- ECOBIS S.A. (Agosto de 2013). *CATASTRO BANANERO DEL ECUADOR*. Obtenido de <https://fliphtml5.com/wtae/jvvh/basic>

- El Comercio. (13 de Febrero de 2018). *Aprovechamiento de energías renovables en el Ecuador*. Obtenido de El Comercio: <https://www.elcomercio.com/cartas/cartas-lectores-opinion-energiasrenovables-ecuador.html>
- Elizalde G, J. D. (Agosto de 2018). *Exploración Geotérmica con SIG en Maguarichic, Chihuahua*. Obtenido de Repositorio digital de la Universidad Autónoma de México: [https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB\\_UNAM/TES01000776556](https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000776556)
- Escalante Hernández, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2007). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. *Ministerio de Minas y Energía*, 30.
- ESIN Consultora S.A. (2014). *Ministerio Coordinador de Producción, Empleo y Competitividad, Ministerio de Electricidad y Energía Renovable e Instituto Nacional de Preinversión*. Obtenido de Atlas Bioenergético de la República del Ecuador: [https://nbsapforum.net/sites/default/files/4.%20Eficiencia%20energC%CC%A7tica\\_Luis%20Mazano.pdf](https://nbsapforum.net/sites/default/files/4.%20Eficiencia%20energC%CC%A7tica_Luis%20Mazano.pdf)
- ESIN S.A. (2014). *Atlas bioenergético de la República del Ecuador*. Quito - Ecuador.
- Esteban, L., Pérez, P., Ciria, P., & Carrasco, J. (2004). Evaluación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria. Análisis de alternativas para su aprovechamiento energético. *CIEMAT*, Madrid - España.
- Fernández, J. (2004). Energía de la Biomasa. *La energía en sus Claves.*, 398 - 445.
- Fernández, J. (s.f). *Energía de la Biomasa* . Madrid, España: Iberdrola.
- Flores R, V. G. (s.f). Los Sistemas De Información Geográfica (SIG) en la enseñanza de la geografía desde nivel básico hasta universitario. Una nueva experiencia educativa en México. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*.
- GADPEO. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de El Oro*. El Oro.

- Galán R, X. F. (2016). POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA. *FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA - ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL*.
- Galán, F. (2016). POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN COLOMBIA. *FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA. ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL*.
- Garañeda, R., & Bengoa, L. (2005). Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León. *La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad. 4º Congreso Forestal Español. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales*.
- García-Martín, A., García-Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F., & Montorio, R. (Enero de 2011). DETERMINACIÓN DE ZONAS ADECUADAS PARA LA EXTRACCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL FORESTAL EN LA PROVINCIA DE TERUEL MEDIANTE SIG Y TELEDETECCIÓN. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica GeoFocus.*, 19-50. Obtenido de Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica GeoFocus.
- Giraldo Cano, N., & Montoya Martínez, N. (2015). *Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hoja) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido*.
- Gómez, M., & Barredo, J. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio (Segunda edición). *Research Gate*.
- Gómez-Delgado, M., Cano, B., & Ignaciocoaut, J. (2006). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio.
- Goodchild, M., & Haining, R. (2005). SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes. *Investigaciones regionales - Sección PANORAMA Y DEBATES*.

- Guerrero, A. (2014). *Valorización de Biomasa Residual Agrícola para Aprovechamiento Energético. Caso de Estudio: El Oro - Ecuador*. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Guerrero, A. B., Aguado, P. L., Sánchez, J., & Curt, M. D. (2016). GIS-Based Assessment of Banana Residual Biomass Potential for Ethanol Production and Power Generation: A Case Study. *Waste and Biomass Valorization*, 405 - 415.
- Herrera Seara, M., Aznar Dols, F., Zamorano, M., & Alameda Hernández, E. (2010). Optimal location of a biomass power plant in the province of Granada analyzed by multi-criteria evaluation using appropriate Geographic Information System according to the Analytic Hierarchy Process. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*.
- IDAE. (2007). *Energías Renovables - Biomasa - Digestores Anaerobios*. Madrid - España: Gobierno de España, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, IDAE.
- IGM. (2014). *Capas de información geográfica básica del Ecuador*. Obtenido de Geoportal de servicios del Instituto Geográfico Militar:  
<http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- INEC. (2019). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC)*. Obtenido de Ecuador en Cifras: [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas\\_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin%20Tecnico%20ESPAC\\_2019.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2019/Boletin%20Tecnico%20ESPAC_2019.pdf)
- Jankowski, P. (1995). Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. *International Journal of Geographical Information Systems*, 251 - 273.
- Jarabo Friedrich, J. (1999). La energía de la biomasa. *SAPT*.

- Jeong, J. S., & Ramírez Gómez, Á. (2017). A Multicriteria GIS-Based Assessment to Optimize Biomass Facility Sites with Parallel Environment—A Case Study in Spain. *Energies*, 1-14.
- Jeong, J. S., & Ramírez, Á. (2017). Optimizing the location of a biomass plant with a fuzzy-Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (F-DEMATEL) and multi-criteria spatial decision assessment for renewable energy management and long-term sustainability. *Journal of Cleaner Production*.
- Junta de Andalucía. (2011). Estudio básico del biogás. *Agencia Andaluza de la Energía. Consejería de economía, innovación y energía*.
- Kasper, E., Marangoni, C., & Ozair, N. (2013). *Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source*. Obtenido de Science Direct - Repositorio Digital: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890413004639>
- Lalvay, E., & Vidal, J. P. (2013). *Universidad de Cuenca - Escuela de Ingeniería Eléctrica*. Obtenido de ESTUDIO TÉCNICO – ECONÓMICO DE UNA PLANTA DE GENERACIÓN ELECTRICA A BASE DE BIOGÁS: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4386>
- Lojano, I., & Ríos, Ó. (2013). Análisis Técnico Económico para la generación de energía solar fotovoltaica en el Ecuador y su conexión a la red pública, basada en el artículo 03 de la Regulación N° Conelec - 004/11. *Tesis de grado - Universidad de Cuenca*.
- Lorente, J. I., Antolín, J. E., & Doblás, F. J. (2009). La construcción mediática de lo ecológico. Estrategias discursivas en la información de actualidad. *RLCS, Revista Latina de Comunicación*.
- MAGAP. (03 de Agosto de 2016). *Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca*. Obtenido de Instructivo para la Selección de Subpartida, Banano Orgánico y Convencional - Unidad de Banano:



- <https://www.aduana.gob.ec/archivos/Boletines/2016/INSTRUCTIVO%20SELECCION%20ODE%20SUBPARTIDA%20BANANO%20ORGANICO%20O%20CONVENCIONAL.pdf>
- MAGAP, CGSIN, DIGDM. (2013). *Geoportal de Agricultura - MAG*. Obtenido de Catálogo de datos geográficos agropecuarios:
- <http://geoportal.agricultura.gob.ec/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/3e97b62a-b31d-40b3-83bf-5282a970dcec>
- Manzano S, L. R., Pineda J, N., & Gómez A, M. (2019). MÉTODO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO. Aplicación a la gestión sostenible del agua en la cuenca del río Nenetzingo, México. *Research Gate*.
- Motoche, M. A., Garzón, V. J., Carvajal, H. R., & Quezada, J. M. (Mayo de 2021). *Análisis de la Participación de Banano en las Exportaciones Agropecuarias de Ecuador Periodo 2015-2019*. Obtenido de Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas (REMCA) - Revista Científica Multidisciplinaria:
- <https://remca.umet.edu.ec/index.php/REMCA/article/view/379/0>
- Palacios Orejuela, I. F. (2018). EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA LA UBICACIÓN DE UN RELLENO SANITARIO EN LA CIUDAD DE MACAS, A TRAVÉS DE LA PONDERACIÓN DE SUS VARIABLES CON EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO, AHP. *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa (Vol III)*.
- Regalado Castro, D. C. (2017). Determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas. *Título de grado*.
- Robinson, J., & Galán, V. (2012). *Plátano y bananas*. Obtenido de Mundiprensa:
- <https://www.mundiprensa.com/catalogo/9788484765424/platanos-y-bananas>
- Roca, José. (16 de Febrero de 2019). *Informe McKinsey: la demanda mundial de energía se estabilizará en 2035*. Obtenido de El periódico de la energía:
- <https://elperiodicodelaenergia.com/informe-mckinsey-la-demanda-mundial-de-energia-se-estabilizara-en-2035/>

- Rodríguez, P. D., Piastrellini, R., & Arena, A. P. (2018). ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL APTA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA PROVINCIA DE MENDOZA. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente (ASADES)* , 75-84.
- Rojas Quiroga, H., & Acevedo Torres, C. (2017). *Cuantificación del Potencial Energético de los Residuos Agrícolas de la Caña de Azúcar en el Departamento de Cundinamarca*. Obtenido de Repositorio de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.: <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6390>
- Rojas U, R. S. (2015). Estimación de biomasa forestal mediante el uso de imágenes radar. *Titulación de Máster Universitario en Ingeniería Geodésica y Cartografía*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Rural Bioenergy. (2018). La Agencia internacional de la Energía (IEA). Interesantes publicaciones y análisis sobre Bioenergía. *Rural bioenergy*.
- Saaty, L. T. (1990). International Journal of Geographical Information Systems. . *European International Journal of Geographical Information Systems*. , 9 - 26.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. En *J Math. Psychology* (págs. 234-281).
- Saézn, A., & Urdaneta, J. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y El Caribe. *Revistas Científicas de América Latina*.
- Santa-Maria, M., Ruiz-Colorado, A., Cruz, G., & Jeoh, T. .. (2013). Evaluación de la viabilidad de la producción de biocombustibles a partir de la biomasa lignocelulósica de los residuos de banano, en comunidades agrícolas en Perú y Colombia. *Bioenergy Res*, 1000 -1011.
- Scarlat, N., Martinov, M., & Dallemand, J. (2010). Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: potential and limitations for bioenergy use. *Waste Management New York, N.Y.*, 1889 - 1897.

- Serrano, J., Mejía, W., & Ortiz, J. (2017). *Determinación del potencial de generación a partir de biomasa en el Ecuador*. Obtenido de Revista de la Facultad de Ciencias Químicas: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1592>
- Torres Álvarez, Ó., & Peña Cortés, F. (2012). Zonificación del potencial energético de la biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. Antecedentes para la planificación energética regional. *Universidad Católica de Temuco, Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ciencias Ambientales*, 77-84.
- TULSMA Libro VI. (2015). Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente . *Acuerdo Ministerial 061 Libro VI*.
- Vargas G, A. I. (2020). Análisis multicriterio para ubicar una reserva de ajolotes. *Tesis para obtener el grado de Ingeniera Geomática - Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). *APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE*. Obtenido de Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Fundación Universitaria de San Gil–Unisangil, Yopal, Casanares.: <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/download/3108/2874>
- Velásquez M, A. (2006). DISTRIBUCIÓN DE BIOMASA EN PLÁNTULAS DE OYAMEL EN DECLINACIÓN. *Inerciencia*.
- Xolalpa N, R. (2020). Evaluación de la Accesibilidad a Servicios Públicos en la CDMX usando análisis multicriterio y SIG. En T. p. Ingeniería. Ciudad de México.
- Zhanga, F., Johnson, D., & Sutherland, J. (2011). A GIS-based method for identifying the optimal location for a facility to convert forest biomass to biofuel. *Biomass and Bioenergy*, 3951-3961.