

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE BOMBEO
DE AGUA PARA RIEGO Y RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
USANDO FUENTES RENOVABLES**

**ANÁLISIS TÉCNICO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
HÍBRIDO FOTOVOLTAICO-HIDROELÉCTRICO PARA EL RIEGO Y
ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

SIMBA ACOSTA KEVIN GUSTAVO

kevin.simba@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. Santiago David Vaca Jiménez, Msc, PhD

santiago.vaca@epn.edu.ec

DMQ, 03 2023

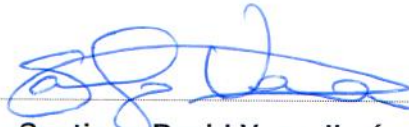
CERTIFICACIONES

Yo, KEVIN GUSTAVO SIMBA ACOSTA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Kevin Gustavo Simba Acosta

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por KEVIN SIMBA, bajo mi supervisión.



Santiago David Vaca Jiménez

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



KEVIN GUSTAVO SIMBA ACOSTA



ING. SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme unos padres que fueron un pilar fundamental en esta etapa de mi vida, ustedes son mi inspiración, gracias por siempre confiar en mis capacidades y caminar conmigo hasta alcanzar mis sueños. Gracias por creer en mí.

Agradezco a mis amigos y compañeros que formaron parte de este viaje, sin ustedes este camino no hubiera sido el mismo y no puedo dejar de pensar las horas de trabajo y diversión que logramos a lo largo de este viaje. Gracias por apoyarme en los momentos difíciles de la carrera y elaboración de este trabajo. Gracias por siempre estar.

Agradezco a mi director de tesis, Ing. Santiago Vaca por haberme guiado en este trabajo de titulación, sin usted, sin sus virtudes, su paciencia y constancia no hubiera logrado concluir este trabajo de manera sencilla. Gracias por sus consejos los cuales fueron útiles en los momentos que las ideas no fluían. Gracias por su orientación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE DE CONTENIDO	IV
RESUMEN.....	V
ABSTRACT	VI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	1
1.4 Marco teórico.....	2
2 METODOLOGÍA	9
2.1 Definición del sistema	9
2.2 Metodología.....	11
2.3 Generación de la capa del mapa del Ecuador para la Región Sierra	12
2.4 Generación de la capa del cultivo de papa	13
2.5 Generación de la capa de elevación y relieve.....	13
2.6 Generación de la capa de radiación solar	14
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	16
3.1 Resultados	16
3.2 Discusión.....	27
3.3 Conclusiones.....	28
3.4 Recomendaciones.....	29
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
5 ANEXOS.....	33
ANEXO I. Provincia del Carchi y sus Cantones	33
ANEXO II. Provincia de Imbabura y sus cantones	35
ANEXO III. Provincia de Pichincha y sus cantones.....	36
ANEXO IV. Provincia de Chimborazo y sus cantones.....	37
ANEXO V. Provincia de Cañar y sus cantones	38
ANEXO VI. Provincia de Azuay y sus cantones	39

RESUMEN

El presente trabajo está enfocado en el área de las energías renovables, debido a que en la región Sierra la producción de la papa se ve disminuida puesto que existen temporadas en la que los campos no poseen suficiente agua para soportar los cultivos, se analiza las condiciones climáticas y geográficas requeridas para implementar un sistema híbrido que utilice bombas como turbinas y paneles fotovoltaicos que provean de energía eléctrica para el riego del cultivo de la papa en la región Sierra y de esta manera aumente su rendimiento. Mediante el software QGIS se determinaron la zonificación agroecológica económica de la papa junto con el potencial solar para el funcionamiento del sistema fotovoltaico y la elevación para generar más electricidad y más riego para el cultivo por medio de la caída del agua.

Se realizó el mapeo de la superposición del potencial solar, el relieve y elevación de esta región y la zonificación agroecológica económica de la papa obteniendo de esta manera provincias y cantones que cumplen con las tres condiciones, una alta radiación solar, una alta diferencia de alturas y una alta o media zonificación agroecológica económica de este cultivo. Las provincias con mayor número de cantones que cumplieron con estas tres condiciones son la provincia del Carchi y la Provincia del Azuay, por lo tanto, estas provincias son especialmente interesantes para seguir el estudio de factibilidad de un sistema híbrido como el que se estudia en el presente trabajo.

PALABRAS CLAVE: cultivo de papa, sistema híbrido, bombas como turbinas, paneles fotovoltaicos, software QGIS, radiación solar, elevación.

ABSTRACT

The present work is focused on the area of renewable energies, because in the Sierra region the potato production is diminished since there are seasons in which the fields do not have enough water to support the crops, the conditions are analyzed climates and geography required to implement a hybrid system that uses pumps such as turbines and photovoltaic panels that provide electricity for the irrigation of potato crops in the Sierra region and thus increase their yield. Through the QGIS software, the economic agroecological zoning of the potato was determined together with the solar potential for the operation of the photovoltaic system and the elevation to generate more electricity and more irrigation for the crop through the fall of water.

The mapping of the superposition of the solar potential, the relief and elevation of this region and the economic agroecological zoning of the potato was carried out, thus obtaining provinces and cantons that meet the three conditions, high solar radiation, a high difference in heights and a high or medium economic agroecological zoning of this crop. The provinces with the largest number of cantons that met these three conditions are the province of Carchi and the Province of Azuay, therefore, these provinces are especially interesting to continue the feasibility study of a hybrid system like the one studied in the present work.

KEYWORDS: potato farming, hybrid system, pumps as turbines, photovoltaic panels, QGIS software, solar radiation, elevation.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La principal fuente de ingreso económico, no petrolero, del Ecuador es la venta y exportación de productos agrícolas [1]. Sin embargo, la producción agrícola del país se ve disminuida debido a que existen temporadas en las que los campos no poseen suficiente agua para soportar los cultivos. Es del interés del país, aumentar la producción agrícola. Para esto se necesita de sistemas de riego, que aumentan el rendimiento de los cultivos [2].

Se puede diseñar un sistema híbrido que consta de un sistema fotovoltaico y de micro generación hidroeléctrica. De esta manera, aportan ventajas económicas y técnicas [3]. Por esta razón, este componente se dedicará a analizar las condiciones climáticas y geográficas requeridas para implementar un sistema híbrido que utilice bombas como turbinas (PAT) y paneles fotovoltaicos con el fin de proveer energía eléctrica para el riego en las fincas del país. El entregable de este componente será un mapa geolocalizado en el que se observe la superposición de las condiciones climáticas y la zonificación agroeconómica de la papa en la región Sierra usando el software QGIS[4].

1.1 Objetivo general

Analizar las condiciones climáticas y geográficas requeridas para la implementación de un sistema híbrido que utilice microturbinas (PAT) y paneles fotovoltaicos para proveer de energía eléctrica para el riego del cultivo de la papa en la región Sierra.

1.2 Objetivos específicos

1. Revisar la literatura sobre los sistemas híbridos hidroeléctricos-fotovoltaicos.
2. Definir y describir el sistema híbrido hidroeléctrico-fotovoltaico.
3. Zonificar y diferenciar de forma espacial la necesidad de riego en el país.
4. Estimar la operación del sistema híbrido hidroeléctrico-fotovoltaico en las zonas de estudio.
5. Mapear la superposición del sistema híbrido y zonificación agroeconómica de la papa para la región Sierra.

1.3 Alcance

El trabajo tendrá tres fases:

1. Una fase exploratoria, en la que se revisa la literatura acerca de los sistemas híbridos hidroeléctricos-fotovoltaicos y de esta forma definir el sistema a utilizar para la generación de energía eléctrica.
2. La fase de modelación, en la que se determinan las necesidades de riego que existen en el país junto con la determinación del potencial solar para el funcionamiento del sistema fotovoltaico.
3. La fase de mapeo, en la que se localizarán los lugares de interés para este tipo de sistemas híbridos, mediante la superposición de mapas georreferenciados del potencial fotovoltaico y la zonificación agroeconómica de la papa en la región Sierra.

1.4 Marco teórico

Sistemas híbridos hidroeléctricos fotovoltaicos

Los sistemas híbridos se definen como un sistema de generación de energía que combina dos o más plantas de diferentes fuentes de energía [3]. Se utilizan generalmente para redes aisladas, de esta manera, aportan ventajas económicas y técnicas [3].

En este caso particular, el sistema híbrido lo compone una micro central hidroeléctrica que utiliza una bomba como turbina (PAT) y un sistema de energía solar fotovoltaica. Este tipo de sistemas funcionarán adecuadamente si cumplen con tres condiciones:

1. Una alta diferencia de alturas.
2. Una alta radiación solar o alto potencial de energía fotovoltaico.
3. Alta o media agricultura de la papa.

A continuación, se describirán con mayor detalle cada uno de estos sistemas.

Sistemas fotovoltaicos

Este tipo de sistemas transforma la energía de los rayos solares (radiación solar) en electricidad. Esta conversión se realiza a través de paneles solares, que están compuestos por varias celdas fotovoltaicas [5]. La mayoría de los paneles solares están hechos de silicio cristalino, tienen un límite de eficiencia teórica del 33% para convertir la energía solar en electricidad [6]. La energía producida por el panel solar se encuentra en forma de corriente continua (CC). Una de las características principales de los paneles fotovoltaicos es que únicamente producen electricidad cuando reciben la irradiancia solar. La cantidad

de energía que se genera es directamente proporcional a la irradiancia solar que incide sobre la superficie del panel [6].

Los sistemas solares pueden tener diferentes tamaños, se encuentran desde sistemas portátiles pequeños hasta plantas de generación masivas en una escala de servicios públicos. Esta tecnología es renovable, no produce contaminación durante su operación ni emisiones GEI [7]. Esta energía posee diversas aplicaciones, la más importante es satisfacer la necesidad energética de comunidades que no disponen de una red eléctrica o generar energía conectada a la red eléctrica [5].

Un sistema fotovoltaico está formado por:

- **Un generador fotovoltaico**

Es el encargado de transformar la energía solar en energía eléctrica. Está conformado por uno o varios módulos, o paneles fotovoltaicos que pueden estar conectados en serie y/o paralelo [5].

- **Baterías de acumulación**

Las baterías o acumuladores fotovoltaicos son utilizados como un sistema de almacenamiento, debido a que pueden existir diferentes periodos de generación (durante el día) y de consumo (durante la noche). Dando lugar a la operación de las cargas cuando el generador FV no sea capaz de generar la potencia necesaria para abastecer el consumo. Las baterías son utilizadas en la mayor parte de los sistemas FV teniendo diferentes excepciones como los sistemas de bombeo de agua con energía solar fotovoltaica y en los sistemas conectados a la red eléctrica [5].

- **Regulador de carga**

La función principal de un regulador de carga es de garantizar la vida útil de la batería y asegurar que la electricidad se entregue a los diferentes usuarios. El regulador de carga permite aprovechar la energía suministrada al máximo del generador FV, ya que determina cuánta de esta energía pasará a los diferentes usuarios, o hacia el banco de baterías evitando la sobrecarga y la sobredescarga [5].

- **Inversores**

Un inversor es un dispositivo electrónico cuya función es captar corriente eléctrica en forma de corriente continua (CC) y convertirla en corriente alterna (AC). Esta conversión es necesaria para poder interactuar con la red eléctrica, o a su vez utilizar los dispositivos

eléctricos, esto debido a que la mayoría de los equipos y aparatos electrónicos funcionan con AC. La eficiencia de la mayoría de los inversores ronda valores del 90% [6].

Tipos de sistemas solares fotovoltaicos

Existen tres tipos comunes de sistemas solares fotovoltaicos:

- **Sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red**

Conocido como el sistema fotovoltaico que interactúa con la red de electricidad. Este módulo utiliza un inversor básico conectado a la red, y no requiere de un banco de baterías para funcionar ya que utiliza la red para inyectar el excedente generado cuando hay demasiada irradiación, o tomando la electricidad de la red cuando el sistema solar no puede suplir la demanda [7].

- **Sistemas solares fotovoltaicos fuera de la red**

Aquellos que están aislados de la red eléctrica y dependen completamente de la generación eléctrica de los paneles, y el almacenamiento de las baterías para proveer de electricidad a los diferentes usuarios. Estos se utilizan principalmente para comunidades o aplicaciones en las que no se puede acceder debido a restricciones geográficas [7].

Micro centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una planta de energía que convierte la energía cinética y potencial del agua con el fin de producir energía mecánica mediante el uso de una turbina hidráulica que está conectada a un generador, que a su vez producirá energía eléctrica [3]. La electricidad generada por estas micro centrales hidroeléctricas dependen del caudal y la altura de instalación, cuanto mayor sean estas dos condiciones, mayor será la energía eléctrica que se pueda generar. La altura es la diferencia entre el nivel de hidroelectricidad en el embalse y el nivel de hidroelectricidad que sale de la turbina hidroeléctrica [3]. Esta energía es de origen renovable y genera casi nulas emisiones de GEI y contaminación [8]. Según la cantidad de producción de energía, la energía hidroeléctrica se clasifica como se indica en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas en función de la capacidad de potencia [3].

Tipos de hidroeléctrica	Capacidad de Potencia
Hidroeléctricas grandes	> 100 MW
Hidroeléctricas medianas	15 – 100 MW

Hidroeléctricas pequeñas	1 – 15 MW
Mini hidroeléctrica	100 Kw – 1 MW
Micro hidroeléctrica	5 kW – 100 kW
Piko hidroeléctrica	< 5 kW

La potencia que produce una micro central hidroeléctrica es inferior a 100 kW según la Tabla 1.1. La energía generada de 5 – 100 kW de potencia se puede utilizar para impulsar bombas de riego, actividades agrícolas y rurales, equipos agrícolas, y otros aspectos que aumenten los ingresos de una población y sus necesidades [3].

La energía eléctrica generada por una planta micro hidroeléctrica se calcula de acuerdo a la Ecuación 1.1.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3$$

Ecuación 1.1. Potencia eléctrica de una microcentral hidroeléctrica [3]

Donde ρ es la densidad hidráulica [kg/m^3], A es el área transversal del flujo hidroeléctrico [m^2], y v es la velocidad del flujo hídrico [m/s] [3].

Bombas como turbinas (PAT)

Cuando se tienen cuerpos de agua que se movilizan a través de diferentes alturas, se puede usar el concepto de turbinas de bombeo, o también denominadas Bombas como Turbinas (PAT) [9].

Las bombas como turbinas (PAT) es un concepto que consiste en usar bombas hidráulicas comerciales en reversa. Es decir, que se usa el exceso de flujo y presión para que la bomba actúe como una turbina y así generar electricidad [10].

Las ventajas de usar una PAT para una central micro hidráulica, en comparación con las turbinas especialmente diseñadas, es que se puede usar al motor como generador abaratando costos y tiempo de diseño. Además, otras ventajas son las siguientes:

- Bajo costo,
- Disponibles para una amplia gama de alturas y caudales,
- Disponible en una gran cantidad de tamaños estándar,
- Fácil instalación.

Además, las bombas como turbinas pueden utilizarse como alternativa a las válvulas reductoras de presión únicamente si el consumo se mantiene alto y la presión es similar, de no ser así, no existe producción de energía y la pérdida de carga producida es insignificante [11].

La desventaja principal al usar una PAT es la dificultad para encontrar las características de la turbina que son necesarias para la selección de la bomba adecuada para un sitio en particular [10]. Una PAT es 3 a 5 % menos eficiente que cuando funciona como bomba [12]. En la Figura 1.1 se muestra el rendimiento de una bomba al ser usada como turbina.

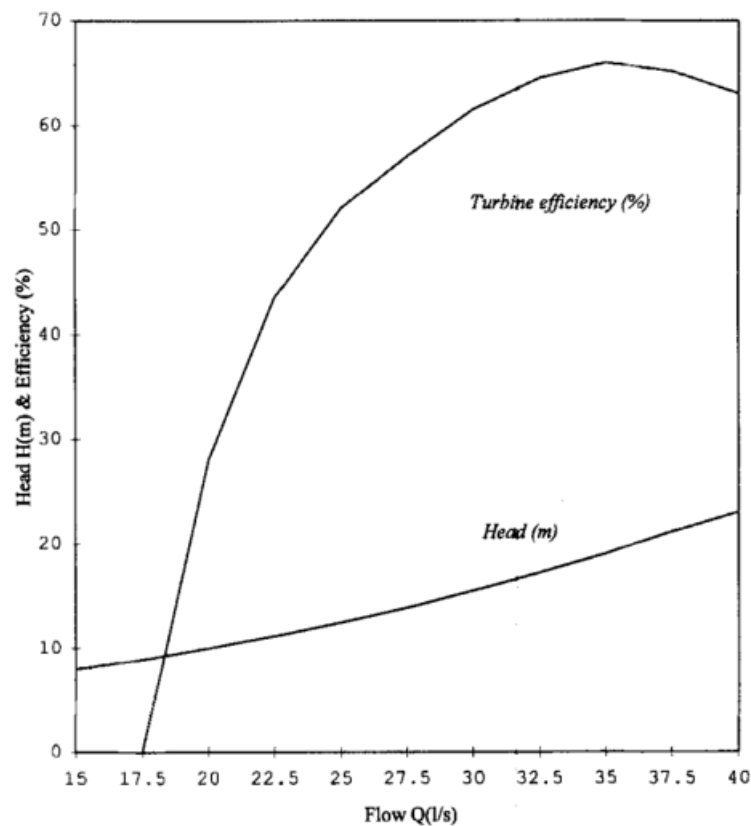


Figura 1.1. Característica de rendimiento de la bomba como turbina [10].

Las PAT se pueden instalar de dos formas, en función a su conexión a la red:

- Fuera de la red: Las PAT se instalan en un área remota conectada a una red de generación de electricidad existente. Estos son factibles entre 7.5 kW a 55 kW.
- En la red: Son factibles entre 100 a 1000 kW, las bombas se instalan conectadas a una red eléctrica existente [12].

Sistemas de Riego

Antes de hablar de los sistemas de riego, es importante definir que el riego es un proceso de destinar agua a los cultivos para satisfacer sus necesidades. Las diversas fuentes de agua son pozos, estanques, lagos, pozos entubados, canales e incluso represas. La frecuencia, velocidad, cantidad y tiempo van a variar dependiendo el cultivo, tipo de suelo y las estaciones en la que se encuentren [13].

Los sistemas de riego requieren de una gran cantidad de energía para poder extraer el agua subterránea, o para poder distribuirla a las diferentes zonas de cultivos. Esta energía debe ser provista por medio de fuentes renovables para que su aplicación no genere consecuencias adversas al clima, o contribuya con la contaminación. Una de las fuentes de energía más interesantes, por la madurez de la tecnología, consiste en el uso de unidades fotovoltaicas. Es decir, la implementación de sistemas de bombeo fotovoltaicos. Además de proveer energía limpia, esta puede suplir las necesidades de riego en áreas remotas donde la conexión a la red eléctrica no es posible [14].

Existen diferentes sistemas de riego usados para mejorar el rendimiento de los cultivos. Estos sistemas se practican en función de los tipos de suelos que existen, climas, cultivos y recursos [13]. Los principales sistemas de riego utilizados por los agricultores son:

- Riego por inundación
- Riego localizado
- Riego por aspersión
- Riego por goteo
- Riego manual

Métodos de riego

El riego puede ser llevado a cabo por dos métodos diferentes, el método tradicional donde el riego se lo realiza manualmente, es barato pero su eficiencia es pobre debido a la distribución desigual del agua. Y el método moderno, el cual ayuda de manera adecuada a usar el agua, este método implica dos sistemas, el sistema de rociadores que consiste en rociar agua sobre el cultivo ayudando a que la distribución del agua sea de forma uniforme y el método de goteo donde el suministro de agua es realizado gota a gota en las raíces del cultivo utilizando una tubería o manguera [13]. A continuación, se habla sobre el riego usado en el proyecto.

Riego por inundación

El riego por inundación es un riego en superficie. El agua es aplicada de manera directa sobre el terreno por medio de la fuerza de la gravedad, facilitando el movimiento del líquido y la filtración en el terreno a regar. Para esto, la parcela o cultivo debe estar nivelada de manera que el agua se extienda de forma uniforme. Por esta razón, no es necesario del diseño de tuberías para irrigar los campos, ni tampoco el aplicar presión mecánica para el riego del agua [15]. Lo que conlleva a que no es necesario del uso de una maquinaria para llevarlo a cabo.

El riego se puede ejecutar desde las esquinas del terreno o desde un punto alto para lograr que exista la absorción suficiente del agua en todo el terreno [15]. El riego por inundación consta de tres fases:

- La fase del riego, consiste en la introducción del agua en el terreno.
- La fase del llenado, en la que se prolonga hasta que haya una lámina de agua en toda la superficie, siempre se emplea la cantidad mínima necesaria.
- La fase de vaciado, que consiste en la infiltración en el terreno.

El aporte de agua se realiza en grandes cantidades para que su avance sea rápido. Por lo tanto, debe cortarse el avance del agua antes de que todo el cultivo se haya cubierto para conseguir un consumo hídrico eficiente [15].

La ventaja más destacada del riego por inundación es el bajo costo, es un tipo de riego que no necesita de infraestructura especial para transportar el agua a todo el cultivo. Además, como no requiere de sistemas de bombeo, no existe consumo energético alguno, y por ende gasto corriente por electricidad. El único gasto que existe es el del agua a menos que el terreno posea de su propia fuente de agua[15] .

El sistema de riego por inundación posee una eficiencia elevada a la hora de infiltrarse en el cultivo y llega a ser imprescindible para cultivos como lo es el arroz que debe permanecer inundado una gran parte de su crecimiento. Una de las principales desventajas del riego por inundación es que requiere una gran cantidad de agua para suplir las ineficiencias del sistema. Además, las pérdidas por evaporación también pueden ser bastante significativas, por lo que este es un aspecto importante que tomar en cuenta [15].

2 METODOLOGÍA

2.1 Definición del sistema

El sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico está compuesto por una planta de energía solar fotovoltaica y una micro central hidroeléctrica.

Planta de energía solar fotovoltaica

El sistema a utilizarse consiste en un sistema independiente que posee las siguientes características:

- Una bomba solar que consta de un sistema de bombeo (sumergible) y el campo solar para su funcionamiento. Puede tener la capacidad de sacar agua desde 10 m hasta 70 m de profundidad con un caudal máximo de 12000 litros/hora.
- Un generador solar, compuesto por 4 paneles fotovoltaicos que generan 450Wp (pico) cada uno.
- Un controlador automático.
- 60 metros de cable 3x4 mm para la bomba y 25 m de cable 2x1 mm para la sonda
- Un acumulador, el cual se encarga de almacenar la energía producida por los paneles fotovoltaicos para disponer de corriente eléctrica necesaria en los días nublados o fuera de las horas de luz.
- Un regulador de carga, con el fin de asegurar la eficiencia máxima del sistema al momento de estar funcionando y poder evitar sobrecargas o descargas excesivas al acumulador.
- Un inversor de bombeo solar que pueda entregar hasta 11 kW y posea un rango de voltaje de entrada: 500 – 750 V DC, y salida de 380 V AC.

A continuación, se presenta un esquema de la planta de energía solar fotovoltaica.

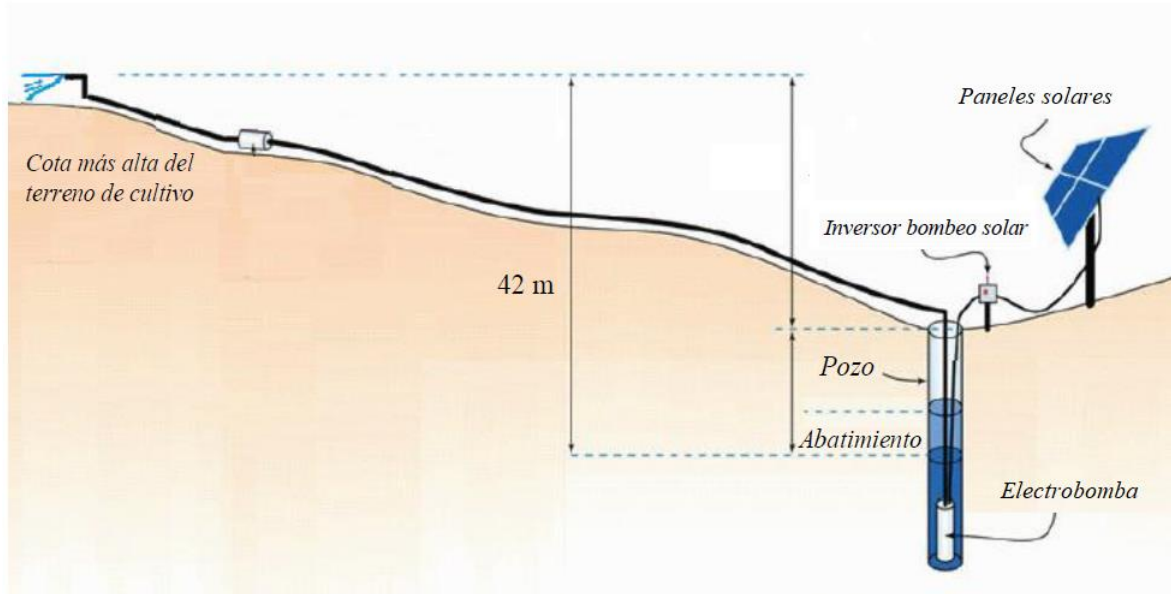


Figura 2.1. Sistema de bombeo fotovoltaico .

Micro Central Hidroeléctrica

Para el sistema hidroeléctrico consiste en una micro central hidroeléctrica, el agua almacenada en la cámara de recarga recorrerá por una tubería de presión por acción de la gravedad, dirigiéndose hacia una estructura que albergará la bomba que funcionará como turbina, para de esta manera obtener energía eléctrica. El agua desviada es usada para el riego del cultivo. Los requisitos mínimos para que este sistema funcione son:

- La cámara de recarga ubicada a no más de 1 kilómetro del punto de uso.
- Una altura de al menos 10 metros.
- Un caudal volumétrico de al menos 10 litros por segundo.

La cámara de recarga tendrá que estar diseñada para que actúe como una reserva de agua y de esta manera mantener la presión de caída en la tubería, requiere de una entrada continua de agua para mantener su nivel máximo [16].

La tubería de presión será de material polietileno de alta densidad, su longitud será de 40 a 50 metros, dependiendo la distancia entre la cámara de recarga y la ubicación de la PAT. Además, para un caudal de 5 [l/s] el diámetro nominal de la turbina de presión tendrá que ser de 50 [mm] [17].

La característica para la bomba es su funcionamiento con motores de 110 kW. La potencia mecánica de entrada probable a la bomba por tanto está entre 93 kW y 105 kW, dependiendo de la eficiencia del motor. Una bomba usada como PAT a 97 kW y 740 rpm,

funcionará con una eficiencia del 82% [16]. De esta forma la energía obtenida por el PAT será almacenada en un banco de baterías para su consumo.

El sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico es válido para terrenos que contengan al menos un pozo de agua de entre los 5 a 15 metros de profundidad y una altura de elevación desde el pozo hacia la cota más alta del terreno entre al menos 40 a 50 metros.

Para la captación de agua se utiliza una bomba sumergible que extrae el agua desde el fondo del pozo hacia la cámara de recarga, esto se logra con la energía eléctrica producida por la planta de energía solar fotovoltaica. Una vez ubicado en la cámara de recarga, el agua se dirige hacia la micro central hidroeléctrica por una tubería de presión y la fuerza de la gravedad que ejerce la pendiente del terreno, se utiliza una bomba como turbina para proveer de energía eléctrica y el riego al cultivo por inundación.

Es necesario una bomba sumergible que genere una potencia de hasta 9.2 kW, 380 V CA, para una altura de 50 m.

2.2 Metodología

En este trabajo están involucradas tres variables, la radiación solar usada para el sistema fotovoltaico, el relieve o la altura del terreno, útil para determinar la energía potencial de la PAT y la zonificación agroecológica económica de la papa. Se busca un lugar que contenga un valor elevado de las tres variables.

Las variables involucradas para realizar el mapa en la Región Sierra fueron realizadas mediante el software QGIS. QGIS es una aplicación de Software Libre y de Código abierto, profesional de GIS (sistema de información geográfica), que proporciona una amplia gama de aplicaciones, de capacidades a través de sus complementos y funciones básicas. Puede visualizar, gestionar, editar, analizar datos y diseñar mapas imprimibles [18]. Un sistema de información geográfica o GIS es un campo usado para recopilar, gestionar y analizar datos, un GIS integra varios tipos de datos usados para analizar la ubicación espacial y organizar capas de información en visualizaciones, además, permite elaborar mapas que se comunican, realizan análisis, comparten información y resuelven problemas complejos [19]. Esto es útil para el proyecto al momento de superponer las variables como capas y analizar la información de las tres variables.

La capacidad que posee un GIS es revelar conocimientos profundos sobre datos, relaciones, patrones, de esta manera ayuda a la toma de decisiones óptimas para el proyecto [19].

QGIS puede trabajar con shapefiles, documentos tipo vector, tipo ráster y tipo TIFF [18]. Un shapefile es un formato sencillo no topológico utilizado para almacenar ubicaciones geográficas y la información de atributos de las entidades geográficas que son representadas por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). Este tipo de documentos pueden incluir tablas de atributos o tablas del database [20]. Un documento tipo vector no emplean pixeles, al contrario, son creados con ecuaciones matemáticas, líneas y curvas, por medio de puntos fijados en una cuadrícula permitiendo aumentar o reducir su tamaño de manera que no se pierda su resolución [21]. Un documento tipo ráster son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados encargados de almacenar datos que representan fenómenos del mundo real [22]. Un archivo TIFF, cuyas siglas son “Tag Image File Formate” es un archivo informático usado para almacenar la información de imágenes y gráficos rasterizados [23]. Esto permite una toma de decisiones de los datos obtenidos del territorio y elementos que lo componen.

Para realizar el mapa de la Región Sierra se van a superponer tres mapas, a continuación, se explicará el procedimiento para generar cada mapa.

2.3 Generación de la capa del mapa del Ecuador para la Región Sierra

1. Se ingresó a la página GADM [24] para obtener el mapa del Ecuador. Esta página provee mapas y datos espaciales de las subdivisiones para todos los países.
2. Al utilizar el mapa del Ecuador tipo SHAPE de ESRI en QGIS se observa que el sistema de referencias de coordenadas asignado, y con el que se trabajará, es el EPSG:32717 – WGS 84 / UTM zone 17S, esto nos ayudará a poder reproyectarla hacia un sistema de referencia local.
3. Usando la tabla de atributos y escogiendo las provincias que pertenecen a la región, se obtuvo el mapa únicamente para la Región Sierra debido a que el cultivo de la papa se da en esta región, se lo guardó como un archivo nuevo en un formato tipo SHAPE de ESRI y se utilizó las coordenadas asignadas.
4. De la misma manera que se obtuvo el mapa del Ecuador también se utilizó un mapa dividido por cantones y parroquias tipo SHAPE, a este mapa se lo dividió únicamente para la Región Sierra. Esto se consiguió realizando un recorte con la herramienta de geoproceto para un archivo vectorial, la capa de entrada fue el

mapa del Ecuador dividido por parroquias, la capa de salida fue la Región Sierra, una vez obtenida esta capa se la guardó usando las coordenadas asignadas como un archivo SHAPE de ESRI.

2.4 Generación de la capa del cultivo de papa

1. Se obtuvo el mapa de zonificación agroecológica económica de la papa en el geoportal del IGM o sigtierras [25] donde se visualiza información cartográfica y documental que genera SIGTIERRAS-MAG [25].
2. El archivo descargado tipo SHAPE dispone la zonificación de la papa en todo el Ecuador en 4 niveles cuantitativos, siendo el nivel alto la zonificación donde mayores ingresos económicos de la papa se da y el nivel bajo donde el menor ingresos económicos produce el cultivo. Al ser shapefile, se repitió el proceso de cortar el mapa con la herramienta de geoprocso para obtener la información únicamente en la región Sierra.
3. Para visualizar los niveles categorizados de la zonificación agroecológica económica de la papa se utilizó la herramienta de simbología de QGIS, un valor categorizado y una rampa de color tipo espectral. De esta manera se distinguen en qué provincias y parroquias se encuentra la zonificación agroecológica económica alta y media, se escogen estas zonas debido a que son lugares los cuales tienen el potencial de aumentar la producción del cultivo.

2.5 Generación de la capa de elevación y relieve

1. Se obtuvo un archivo tipo TIFF desde la página Earthdata Search [26]. Earthdata Search es una aplicación de búsqueda para el sistema de información y datos del sistema de observación de la tierra (EOSDIS) de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA [27].
2. Para tener la capa únicamente en la Región Sierra se utilizó la herramienta de extracción para archivos tipo ráster. Se usó la opción cortar ráster por capa de máscara. La capa de entrada para este proceso fue el mapa de elevación, mientras que, la capa de máscara fue el mapa de la Región Sierra, una vez obtenido esta nueva capa se la guardó con un formato tipo GeoTIFF con las coordenadas asignadas.

3. Para una mejor visualización de esta capa, en propiedades, la opción simbología, se utilizó un tipo de renderizador de valores en paleta/únicos usando una rampa de color tipo espectral.
4. Para realizar el relieve de la Región Sierra se utilizó la herramienta análisis del terreno ráster, opción de relieve. La capa de altitud en este caso será la capa obtenida de la elevación para la Región Sierra.
5. Se asignaron los límites de altitud cada 1000 metros, esto se lo realizó para que existan 6 niveles y la paleta de colores provea una mejor lectura siendo el límite inferior desde 2 msnm, información almacenada en el archivo TIFF hasta el límite superior que es la elevación máxima con un valor de 6256 msnm. Una vez obtenido esta nueva capa se la guardó con un formato tipo GeoTIFF para su análisis respectivo.

2.6 Generación de la capa de radiación solar

1. El mapa de radiación solar se obtuvo de la página SOLARGIS [28], la cual ofrece mapas de recurso solar y datos GIS para el desarrollo de proyectos solares [29].
2. El mapa se obtuvo en formato TIFF y proporciona datos del potencial de energía fotovoltaica (PV) estimado del periodo desde 1999-2018. Representa un promedio a largo plazo de la producción potencial de la electricidad diaria o anual de una planta de energía solar fotovoltaica que se conecta a una red de 1 kW de pico [29]. Sus unidades se encuentran en kWh/kWp.
3. Para recortar el mapa y que solo aparezca en la Región Sierra se utilizó la herramienta de extracción que pertenece a los archivos tipo ráster. Se usó la opción cortar ráster por capa de máscara donde la capa de entrada pertenece al mapa de la irradiancia horizontal global, y la capa de máscara es el mapa de la Región Sierra.
4. Una vez obtenida esta nueva capa se la guardó con el nombre de GHI_Sierra en un archivo .tiff y usando las propiedades, opción simbología, se le asignó un valor en paleta/únicos y una transparencia del 70% para una mejor visualización al momento de superponer las capas.

Finalmente, para el análisis de las variables se buscará zonas geolocalizadas en donde la zonificación agroecológica económica de la papa sea alta o media, su relieve en el mapa sea notorio (posea relieves medianos y altos) y su altitud esté entre los 2600 a 3600 msnm debido a que uno de los requerimientos climatológicos para el cultivo de papa es que su

altitud esté en el rango de estos valores [30]. Para la parte solar, el rango de radiación deberá estar entre los 3.7 a 4.7 kWh/kWp. Los 3.7 kWh/kWp representan el 75 percentil de los sistemas fotovoltaicos instalados y los 4.7 kWh/kWp representan el 99.5 percentil de los sistemas fotovoltaicos instalados según el atlas solar global el cuál demanda la energía de los países [31].

De esta manera se localiza la provincia, cantón y parroquia en donde el sistema híbrido podría funcionar adecuadamente.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Se obtuvieron lugares en la región Sierra donde las tres variables cumplen con las especificaciones para que el sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico funcione. Desde la Figura 3.1 hasta la Figura 3.10 se presenta un cantón para cada provincia que cumple con estas tres variables.

Provincia: Carchi

Cantón: TULCAN

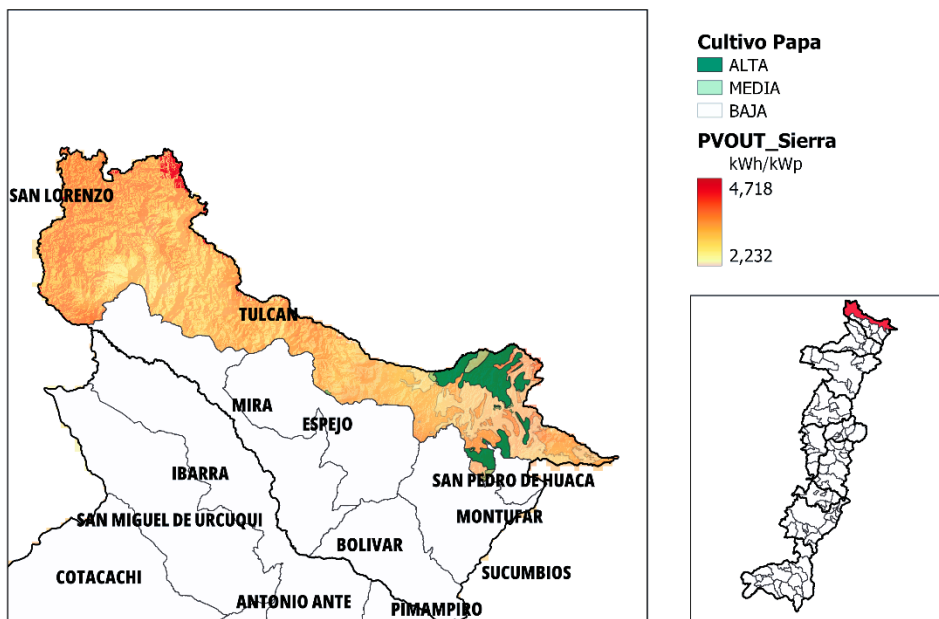


Figura 3.1. Cantón Tulcán

El cantón Tulcán ubicado en la provincia del Carchi cuenta con una zonificación agroecológica económica alta, para el cultivo de papás, en las parroquias de Tufiño, Tulcán y Urbina (Taya). La parroquia de Tufiño tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.464 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 3121 msnm, la parroquia de Tulcán tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.672 kWh/kWp, es una zona de relieves pequeños y tiene una elevación de 2998 msnm y la parroquia de Urbina, posee un potencial de energía fotovoltaica de 3.76 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 3049 msnm.

Provincia: Imbabura

Cantón: OTAVALO

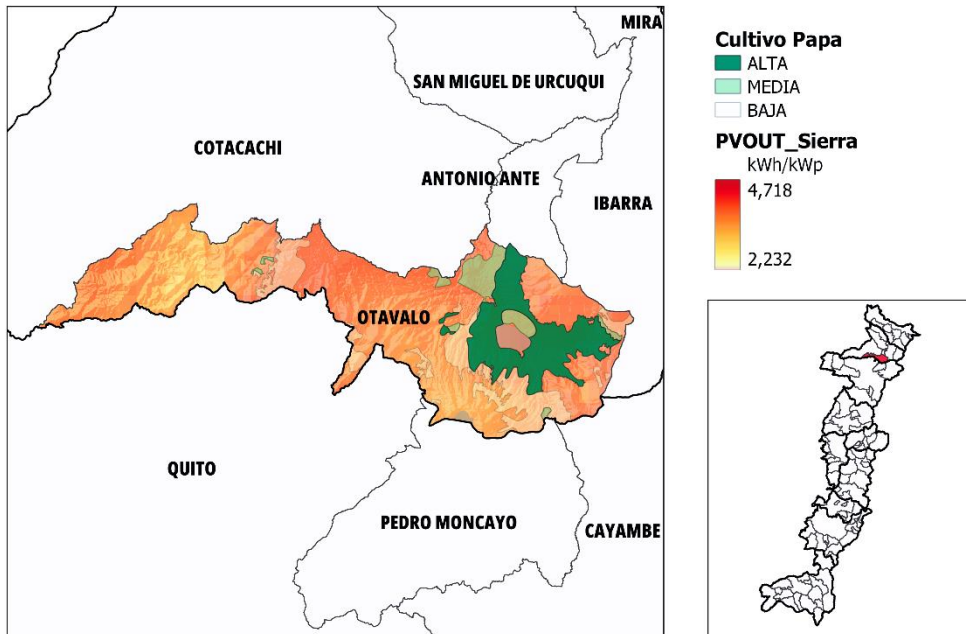


Figura 3.2. Cantón Otavalo

El cantón Otavalo ubicado en la provincia de Imbabura cuenta con una zonificación agroecológica económica alta en las parroquias de Eugenio Espejo, San Rafael, Gonzales Suarez, San Pablo y Otavalo. La parroquia de Eugenio Espejo tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.809 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene en una elevación de 2790 msnm, en la parroquia de San Rafael el potencial de energía fotovoltaica es de 3.912 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene en una elevación de 2855 msnm, la parroquia de Gonzales Suarez donde el potencial de energía fotovoltaica es de 3.984 kWh/kWp cuenta con una zona de relieves medianos y tiene en una elevación de 2807 msnm, la parroquia San Pablo tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.984 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2857 msnm y la parroquia de Otavalo la cual tiene un potencial de energía fotovoltaica de 4.01 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2747 msnm.

Provincia: Pichincha

Cantón: MEJIA

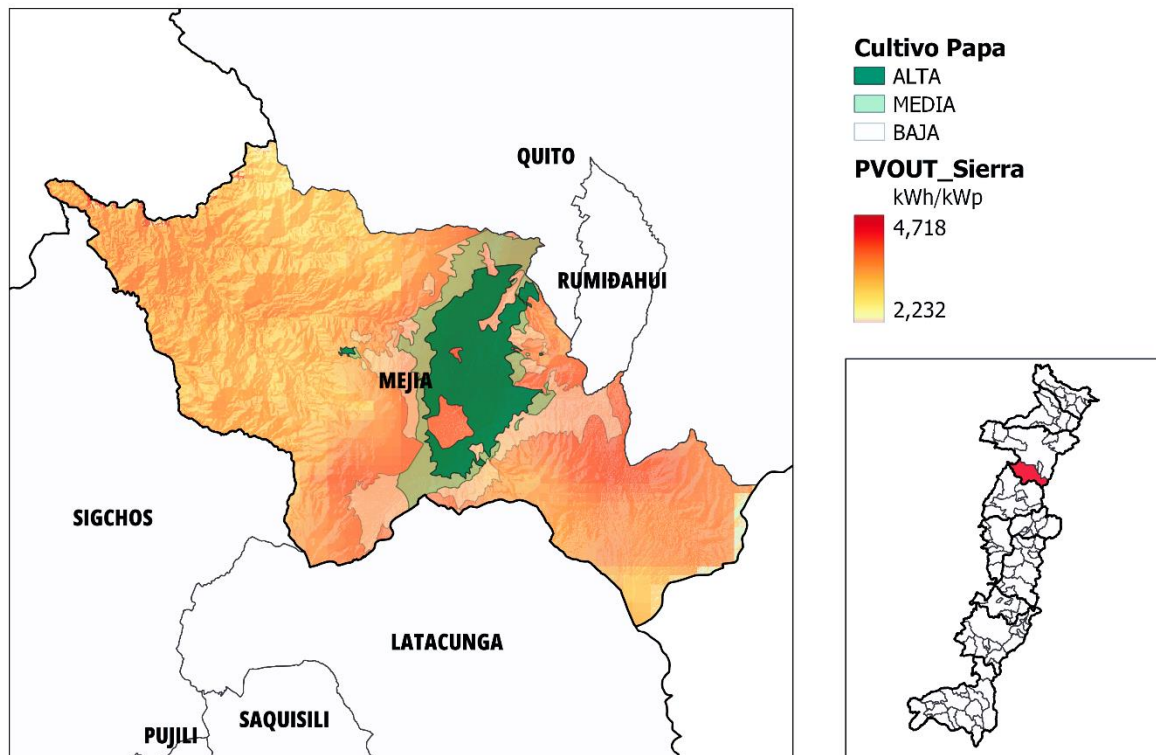


Figura 3.3. Cantón Mejía

El cantón Mejía ubicado en la provincia de Pichincha cuenta con una zonificación agroecológica económica alta en las parroquias de Tambillo, Aloag y Machachi. La parroquia de Tambillo tiene un potencial de energía fotovoltaica de 4.074 kWh/kWp, es una zona de relieves pequeños y medianos y posee una elevación de 2787 msnm, en la parroquia de Aloag el potencial de energía fotovoltaica es de 4.187 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2890 msnm y la parroquia de Machachi donde el potencial de energía fotovoltaica es de 4.153 kWh/kWp, es una zona de relieves grandes y tiene una elevación de 2919 msnm.

Provincia: Cotopaxi

Cantón: SIGCHOS

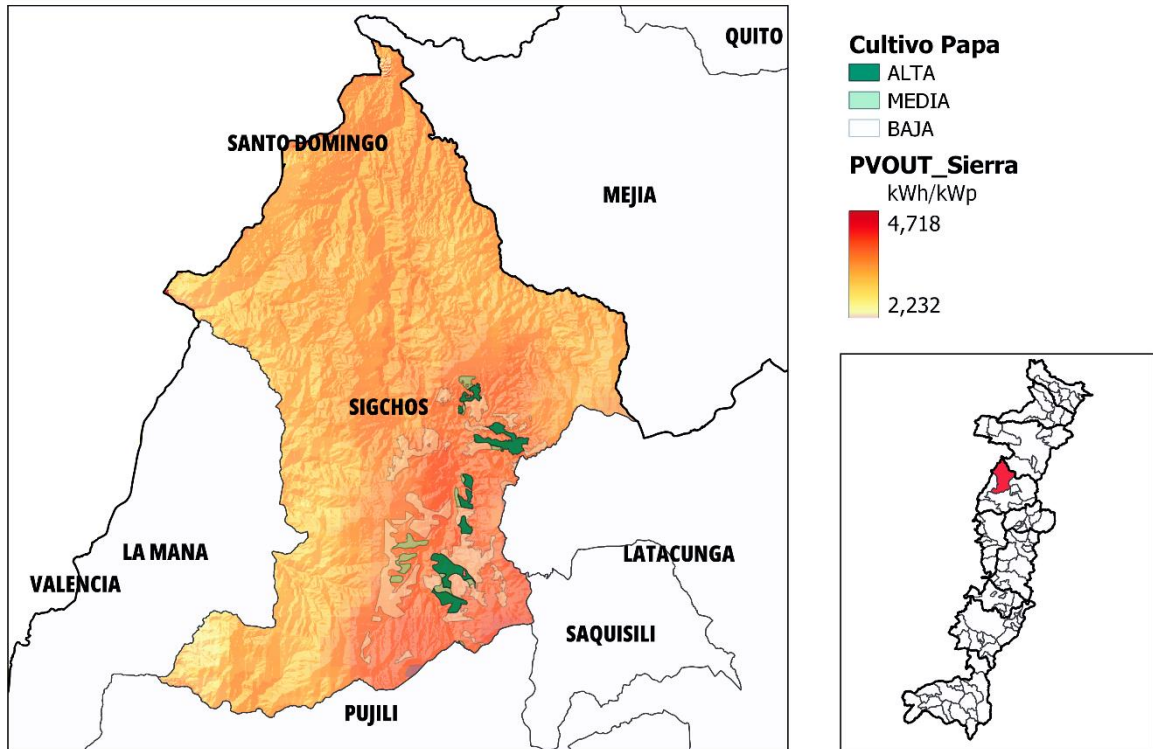


Figura 3.4. Cantón Sigchos

El cantón Sigchos ubicado en la provincia de Cotopaxi cuenta con una zonificación agroecológica económica alta en la parroquia de Sigchos y media y alta en la parroquia de Isinlivi. La parroquia de Sigchos tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.881 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2948 msnm y la parroquia de Isinlivi la cual posee un potencial de energía fotovoltaica de 4.104 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y grandes y tiene una elevación de 3081 msnm.

Provincia: Tungurahua

Cantón: PATATE

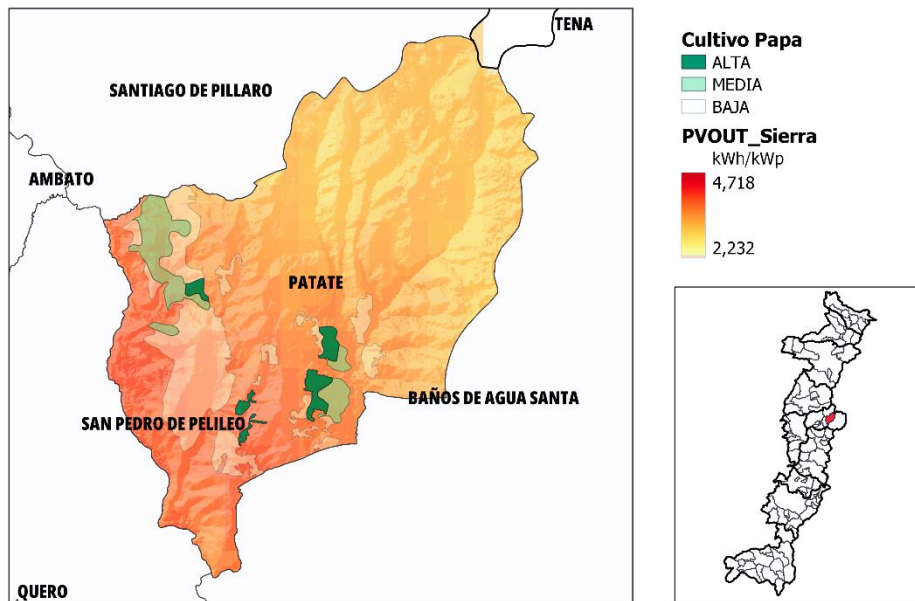


Figura 3.5. Cantón Patate

El cantón Patate ubicado en la provincia de Tungurahua cuenta con una zonificación agroecológica económica alta y media en la parroquia del Triunfo. Esta parroquia tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.714 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2907 msnm.

Provincia: Bolívar

Cantón: GUARANDA

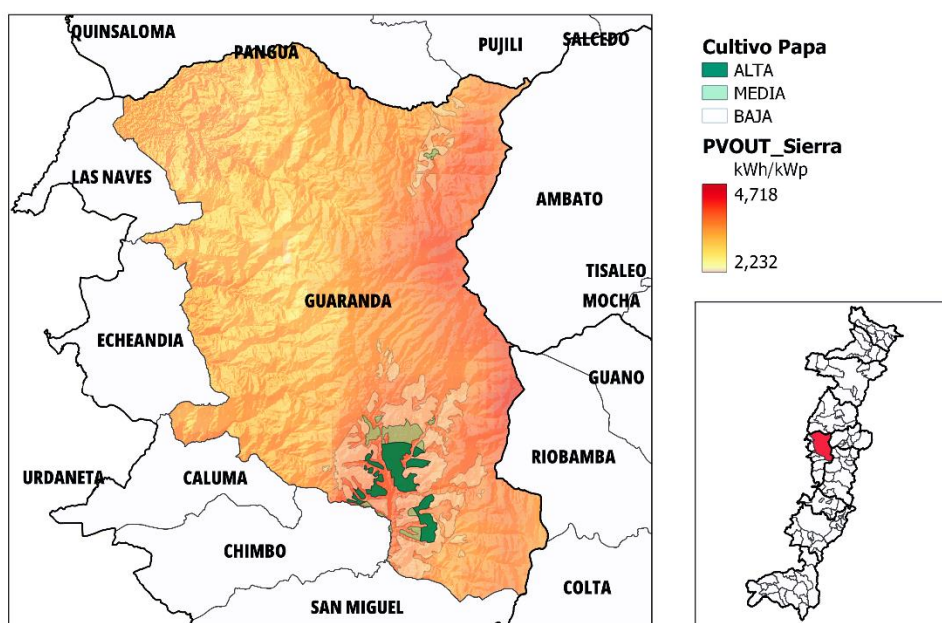


Figura 3.6. Cantón Guaranda

El cantón Guaranda ubicado en la provincia de Bolívar cuenta con una zonificación agroecológica económica alta en las parroquias de Guaranda y San Simón. La parroquia de Guaranda tiene un potencial de energía fotovoltaica de 4.11 kWh/kWp, es una zona de relieves grandes y tiene una elevación de 2817 msnm y en la parroquia San Simón el potencial de energía fotovoltaica es de 3.778 kWh/kWp, es una zona de relieves altos y posee una elevación de 2960 msnm.

Provincia: Chimborazo

Cantón: CHAMBO

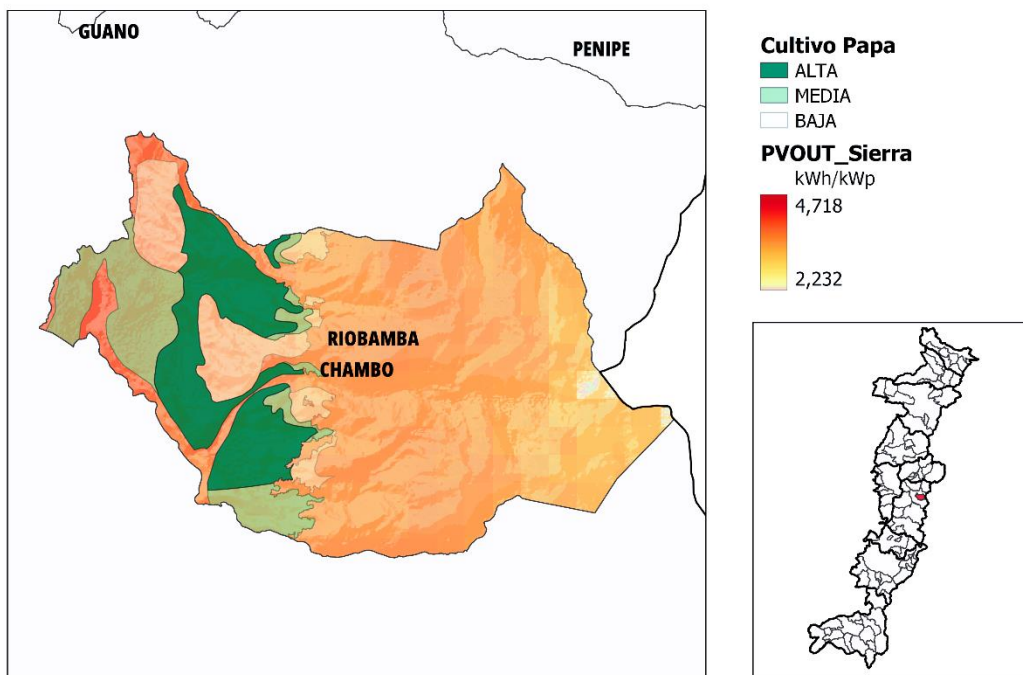


Figura 3.7. Cantón Chambo

El cantón Chambo ubicado en la provincia de Chimborazo cuenta con una zonificación agroecológica económica alta de la papa en la parroquia de Chambo. Tiene un potencial de energía fotovoltaica de entre los 3.911 y 4.078 kWh/kWp, posee varios pequeños y medianos y tiene una elevación de 3065 msnm.

Provincia: Cañar

Cantón: DELEG

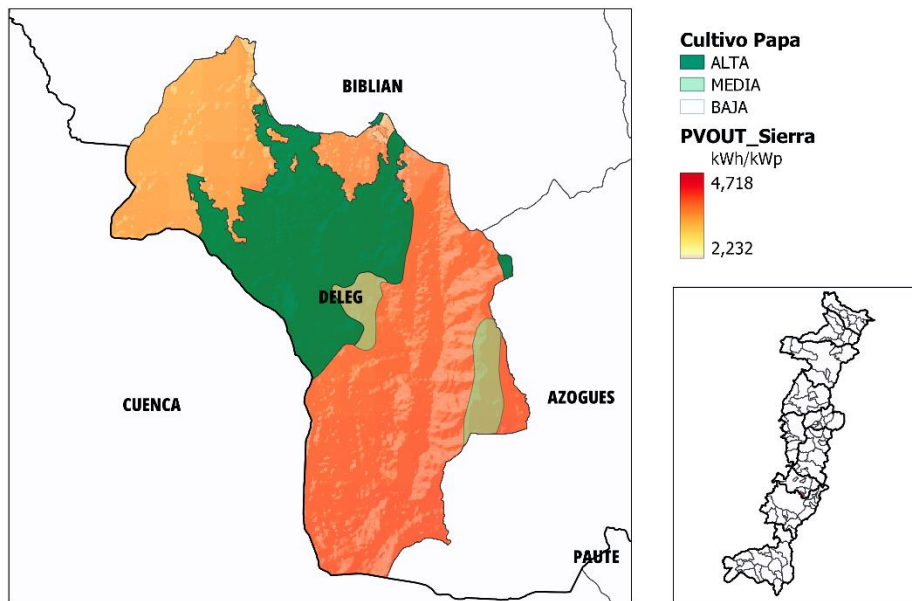


Figura 3.8. Cantón Deleg

El cantón Deleg ubicado en la provincia de Cañar cuenta con una zonificación agroecológica económica alta de la papa específicamente en la parroquia de Deleg, esta parroquia tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.805 kWh/kWp, es una zona de relieves pequeños y tiene una elevación de 2955 msnm.

Provincia: Azuay

Cantón: CUENCA

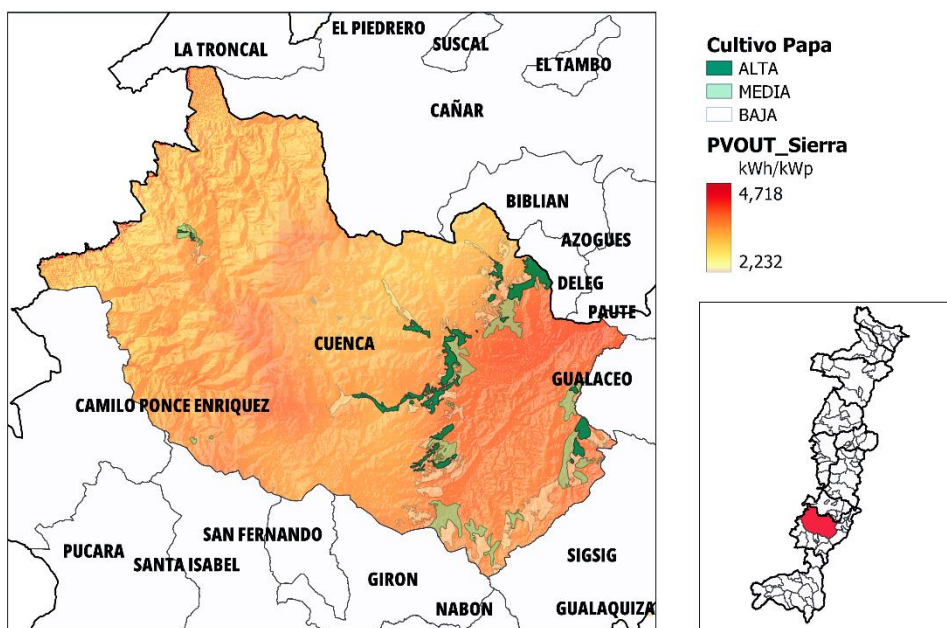


Figura 3.9. Cantón Cuenca

El cantón Cuenca ubicado en la provincia del Azuay cuenta con una zonificación agroecológica económica alta y media de la papa. La zonificación alta predomina en la parroquia de Baños, San Joaquin y Checa (Jidcay). La parroquia de Baños tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.755 kWh/kWp, es una zona de relieves pequeños y tiene una elevación de 2866 msnm. La parroquia de San Joaquín tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.85 kWh/kWp, posee relieves pequeños y tiene una elevación de 2846 msnm y la parroquia de Checa (Jidcay) tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.818 kWh/kWp, es una zona de relieves pequeños y tiene una elevación de 2810 msnm.

Provincia: Loja

Cantón: SARAGURO

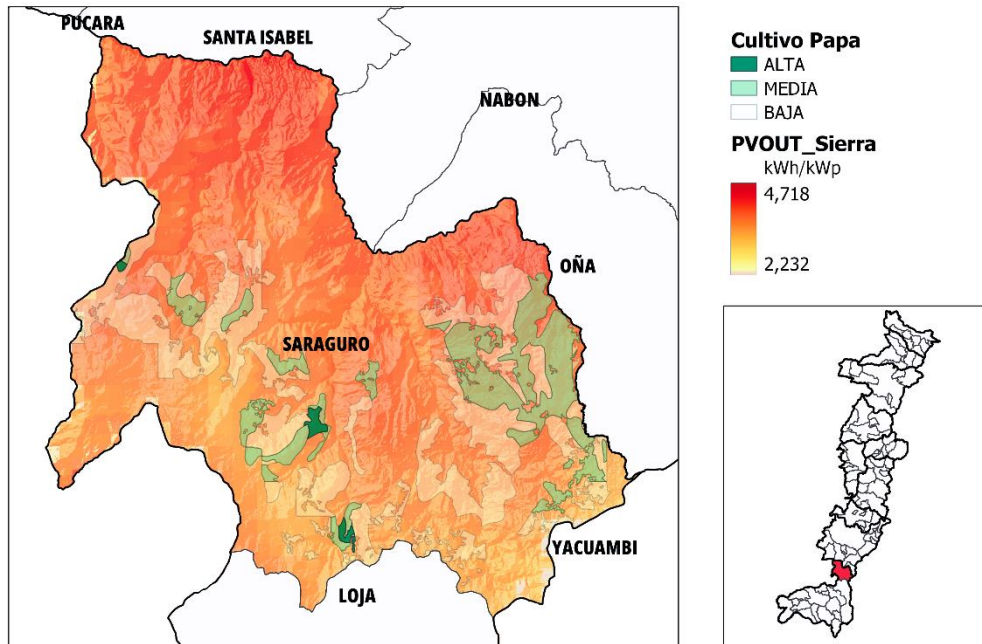


Figura 3.10. Cantón Saraguro

El cantón Saraguro ubicado en la provincia de Loja cuenta con una zonificación agroecológica económica alta y media de la papa. Aunque más predomina la zonificación media de la papa, en la parroquia de El Paraíso de Celen existe la zonificación alta a pequeña escala. La parroquia El Paraíso de Celen tiene un potencial de energía fotovoltaica de 3.727 kWh/kWp, es una zona de relieves medianos y tiene una elevación de 2770 msnm.

En la Tabla 3.1 se muestra a detalle la provincia, cantón y parroquia que cumplen con las variables y especificaciones de manera que sea útil aplicar el sistema híbrido fotovoltaico.

Tabla 3.1. Resultados de las provincias, cantones y parroquias que cumplen con las variables

Provincia	Cantón	Parroquia	Cultivo de Papa	PVOUT [kWh/kWp]	Relieves	Altitud [msnm]
Carchi	Tulcán	Tufiño	Alta	3,464	Medianos	3121
		Tulcán	Alta	3,672	Pequeños	2998
		Urbina (Taya)	Alta	3,76	Medianos	3049
	Bolívar	García Moreno	Media	4,34	Medianos	3051
		Bolívar	Alta y Media	4,082	Medianos	2598
	Espejo	El Ángel	Alta	3,968	Pequeños	3018
	Montufar	La Paz	Alta	4,095	Pequeños	2966
		San Gabriel	Alta	4,008	Pequeños	2800
		San Cristóbal	Alta	3,775	Pequeños	2885
	San Pedro de Huaca	Huaca	Alta y Media	3,577	Medianos	2927
Imbabura	Otavalo	Eugenio Espejo	Alta	3,809	Medianos	2790
		San Rafael	Alta	3,912	Medianos	2855
		Gonzales Suarez	Alta	3,984	Medianos	2807
		San Pablo	Alta	3,984	Medianos	2857
		Otavalo	Alta	4,01	Medianos	2747
	Antonio Ante	San Francisco de Natabuela	Alta y Media	3,667	Medianos	2721
		Atuntaqui	Alta y Media	3,773	Medianos	2798
		San Roque	Alta y Media	3,942	Medianos	2819
	Ibarra	San Miguel de Ibarra	Alta	3,779	Medianos	2953
		La Esperanza	Alta	3,928	Medianos	2884
Pichincha	Mejía	Tambillo	Alta	4,074	Pequeños y Medianos	2787
		Alóag	Alta	4,187	Medianos	2890
		Machachi	Alta	4,153	Grandes	2919
	Cayambe	Cayambe	Alta	4,208	Medianos	3003
		Olmedo	Alta	4,255	Medianos	3080
	Pedro Moncayo	Tupigachi	Alta	4,151	Pequeños	2970
		Tabacundo	Alta	4,17	Pequeños	2923
Cotopaxi	Sigchos	Sigchos	Alta	3,881	Medianos	2948
		Isinlivi	Alta y Media	4,104	Medianos y Grandes	3081

Tungurahua	Patate	El Triunfo	Alta y Media	3,714	Medianos	2907
Bolívar	Guaranda	Guaranda	Alta	4,11	Grandes	2817
		San Simón	Alta	3,778	Altos	2960
Chimborazo	Chambo	Chambo	Alta	3,95	Medianos	3065
	Riobamba	Quimiag	Alta	3,8	Medianos	3068
		Pungalá	Alta y Baja	3,662	Medianos y Grandes	3151
	Chunchi	Chunchi	Alta y Media	3,683	Medianos	2932
		Llagos	Alta y Media	3,626	Medianos	2889
Cañar	Déleg	Déleg	Alta	3,805	Pequeños	2955
	Azogues	Pindilig	Alta y Baja	3,73	Medianos	2856
		Luis Cordero	Alta	4,15	Medianos	2917
		Cojitambo	Alta y Media	4,053	Pequeños	2840
		Taday	Alta y Baja	3,651	Pequeños	3154
	Biblián	Nazon	Alta	3,542	Pequeños	3029
		Jerusalén	Alta	3,59	Pequeños	2988
	Suscal	Suscal	Alta	3,747	Medianos	2765
Azuay	Cuenca	Baños	Alta	3,755	Pequeños	2866
		San Joaquín	Alta	3,85	Pequeños	2846
		Checa (Jidcay)	Alta	3,818	Pequeños	2810
	Chordeleg	La Unión	Alta	3,745	Medianos	3014
	Gualaceo	Mariano Moreno	Alta	4,405	Medianos	3017
		Daniel Córdova Toral	Alta	3,88	Medianos	2864
	Paute	Bulán (José Víctor Izquierdo)	Alta	3,61	Medianos	2786
	San Fernando	Tomebamba	Alta	3,783	Pequeños y Medianos	3099
		San Fernando	Alta	3,607	Pequeños	2917
Loja	Saraguro	El Paraíso de Celen	Alta y Media	3,727	Medianos	2770

En la Figura 3.11 se presenta el mapa de la Región Sierra dividido por cantones y los anexos I hasta el VI se presenta cada Cantón mencionado en la Tabla 3.1.

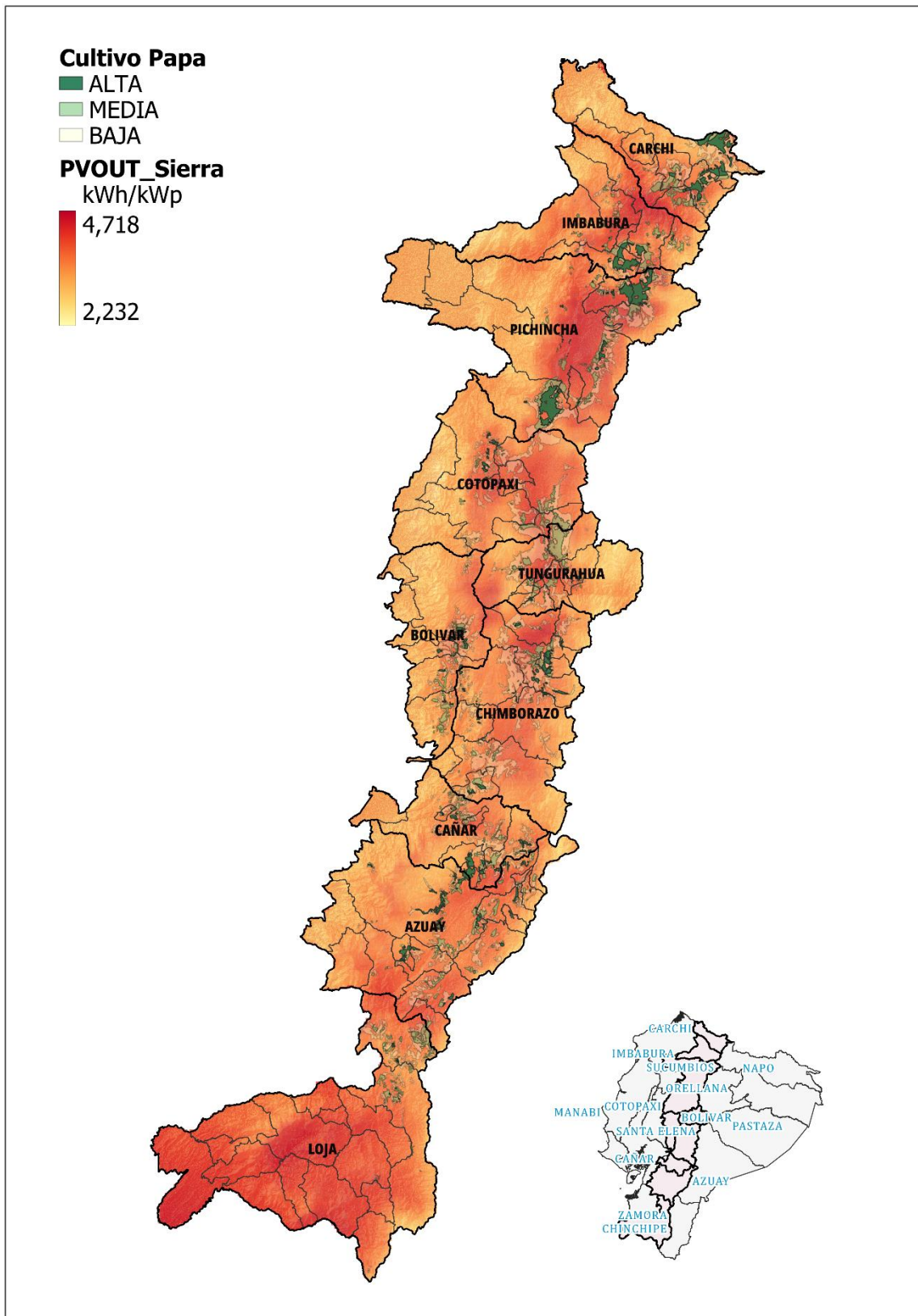


Figura 3.11. Mapa de la Región Sierra

3.2 Discusión

Los resultados que se obtuvieron sirven para ubicar lugares que cumplan con las tres variables (radiación solar, elevación y cultivo de papa) y de esta forma utilizar el sistema híbrido, el alto potencial de energía fotovoltaica (PVOUT) aprovecha la parte fotovoltaica del sistema híbrido. La elevación y el relieve es utilizado para la micro central hidroeléctrica, mientras más relieves haya en las zonas, la probabilidad de encontrar una caída de agua importante será mayor y, por lo tanto, se podrá generar más electricidad y más riego para el cultivo. El cultivo de papa alto y medio sirve para el ingreso económico en estas zonas del país aumentando el rendimiento de estos cultivos.

El presente trabajo contó con varias limitaciones, una de ellas fue el mapa del relieve, debido a que el mismo programa nos proporcionó este mapa a partir de la capa de elevación, por esta razón, no se visualiza en detalle que tan grandes son estos relieves y su altitud de manera exacta. Otra limitación fue el mapa de la radiación solar ya que, existen datos únicamente hasta el año 2018 y no se encuentran actualizados y además existen áreas que no se logran ver a detalle. Lo mismo sucedió con el mapa de la zonificación agroeconómica de la papa, al ser una zona muy amplia no se visualizan bien. Una de las más grandes limitaciones fue la superposición de las capas, esto debido a las paletas de colores de cada capa, no se logró visualizar la capa de la altitud y la radiación solar al mismo tiempo porque las bandas de colores de estas capas se chocaban entre si y opacaban la una a la otra. Por esta razón, se sobrepuso primero la capa PVOUT sobre la capa del relieve y se desactivó la capa de la elevación. Esto no influenció en el análisis de datos, únicamente en la visualización general del mapa.

En trabajos futuros se puede aplicar estas tres variables para las regiones faltantes del Ecuador, aunque el cultivo de papa no se produce en todo el país existen diversos cultivos de cada región que generan un gran ingreso económico, pero, debido a que no todo el año existen lluvias continuas, el sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico será útil para mejorar el rendimiento de estos cultivos no solamente para el sistema de riego sino también para generar energía en lugares aislados a la red eléctrica. El país cuenta con un gran potencial de energía fotovoltaica pero una limitante será que en la región Costa y la región Amazónica no existen grandes relieves, al contrario, son lugares llanos por lo que la micro central hidroeléctrica no será de mucha utilidad y se le tomaría como mayor importancia a la planta de energía solar fotovoltaica, pero de igual forma útil para el riego con un sistema diferente al riego por inundación.

3.3 Conclusiones

- Se realizó de manera adecuada el mapeo de la superposición del potencial solar, el relieve y elevación junto con la zonificación agroecológica de la papa para la región Sierra.
- Se obtuvieron diversos cantones que cumplen con estas tres variables de forma satisfactoria y algunos cantones que cumplen con dos de las tres variables mencionadas.
- Las provincias con mayor número de cantones que cumplieron con las tres variables son la provincia del Carchi y la provincia del Azuay, estas provincias cuentan con cinco cantones en donde el cultivo de papa, el potencial fotovoltaico, la altitud y relieve son óptimos para implementar el sistema híbrido. Estas provincias son especialmente interesantes para seguir el estudio de factibilidad de un sistema híbrido como el que se estudia en el presente trabajo.
- La parroquia Mariano Moreno ubicada en el cantón Gualaceo perteneciente a la provincia del Azuay es el lugar que mejores características posee para la implementación del sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico, esto se debe a que cuenta con un potencial de energía fotovoltaica de 4.405 kWh/kWp, su zonificación agroeconómica de la papa es alta y posee relieves que permitirán que la caída del agua sea suficiente para generar electricidad y el riego.
- El cantón San Pedro de Huaca ubicado en la provincia del Carchi junto con el cantón Biblian ubicado en la provincia de Cañar y el cantón Paute ubicado en la provincia del Azuay cumplen con dos de las tres variables, poseen un potencial de energía fotovoltaica menor a 3.7 kWh/kWp, por lo tanto, se encuentran fuera del rango especificado y puede no tener suficiente radiación para soportar la parte fotovoltaica del sistema híbrido.
- El cantón Montufar ubicado en la provincia del Carchi, el cantón Pedro Moncayo ubicado en la provincia de Pichincha, el cantón Biblian ubicado en la provincia de Cañar y el cantón Cuenca ubicado en la provincia de Cañar son los lugares que poseen relieves pequeños y por lo cual la micro central hidroeléctrica no será útil debido a que no tendrá pendientes que movilicen el agua hacia la PAT para generar energía eléctrica y el riego por inundación.

- El cantón Biblian ubicado en la provincia de Cañar únicamente cumple con la zonificación agroeconómica alta de la papa, posee pequeños relieves y un potencial de energía fotovoltaica menor al rango establecido, por lo tanto, no es factible utilizar el sistema híbrido en esta parte de la región.
- La provincia de Loja es la zona que mejor potencial de energía fotovoltaica posee, pero no se dedican en gran manera al cultivo de la papa, por lo que un sistema híbrido fotovoltaico puede ser útil para otros tipos de cultivos, no para el de la papa.

3.4 Recomendaciones

- Asignar un sistema de referencias de coordenadas que concuerden con la ubicación de donde se va a trabajar o realizar el mapa para que no exista problemas al superponer las capas.
- Utilizar matices de colores en cada capa que permitan visualizar la superposición de las variables de una manera adecuada.
- Se recomienda realizar el mapa con otro tipo de cultivo que no sea la papa, debido a que no existen muchas zonas donde predomine este soporte económico pero el potencial de energía fotovoltaica es apto para utilizar paneles solares.
- Utilizar el sistema híbrido hidroeléctrico fotovoltaico únicamente en los lugares que cumplan con las tres variables de manera correcta para que la eficiencia de este sea alta.
- Dividir al mapa en cantones y parroquias para que, de esta forma al momento de visualizar los lugares óptimos se pueda tener una mejor referencia de la zona georreferenciada.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gobierno del Ecuador, "Agricultura, la base de la economía y la alimentación," 2019.
- [2] A. Morabito and P. Hendrick, "Pump as turbine applied to micro energy storage and smart water grids: A case study," *Appl Energy*, vol. 241, pp. 567–579, May 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.018.
- [3] R. Syahputra and I. Soesanti, "Planning of hybrid micro-hydro and solar photovoltaic systems for rural areas of central Java, Indonesia," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/5972342.
- [4] I. Samora, P. Manso, M. J. Franca, A. J. Schleiss, and H. M. Ramos, "Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: The case study of the city of Fribourg," *Water (Switzerland)*, vol. 8, no. 8, Aug. 2016, doi: 10.3390/w8080344.
- [5] M. A. Abella, "Sistemas Fotovoltaicos," Madrid, 2005.
- [6] Energy Education, "Photovoltaic System," 2018. https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_system (accessed Dec. 05, 2022).
- [7] Solar Square, "SOLAR PHOTOVOLTAIC SYSTEM: TYPES, COMPONENTS, AND ADVANTAGES & DISADVANTAGES," Jun. 24, 2022. <https://www.solarsquare.in/blog/solar-photovoltaic-system-benefits/> (accessed Dec. 05, 2022).
- [8] L. Wang, S. J. Chen, S. R. Jan, and H. W. Li, "Design and implementation of a prototype underwater turbine generator system for renewable microhydro power energy," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 49, no. 6, pp. 2753–2760, Nov. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2263272.
- [9] A. Stoppato, A. Benato, N. Destro, and A. Mirandola, "A model for the optimal design and management of a cogeneration system with energy storage," *Energy Build*, vol. 124, pp. 241–247, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.09.036.
- [10] A. A. Williams, N. P. A. Smith, C. Bird, and M. Howard, "Pumps as Turbines and Induction Motors as Generators for Energy Recovery in Water Supply Systems."
- [11] G. M. Lima, E. L. Junior, and B. M. Brentan, "Selection of Pumps as Turbines Substituting Pressure Reducing Valves," *Procedia Eng*, vol. 186, pp. 676–683, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.249.
- [12] North Ridge Pumps, "How Can a Pump Create Energy," 2020.
- [13] BYJU'S, "Irrigation," Jul. 23, 2020. <https://byjus.com/biology/irrigation/> (accessed Feb. 20, 2023).
- [14] J. K. Kaldellis, E. Meidanis, and D. Zafirakis, "Experimental energy analysis of a stand-alone photovoltaic-based water pumping installation," *Appl Energy*, vol. 88, no. 12, pp. 4556–4562, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.05.036.

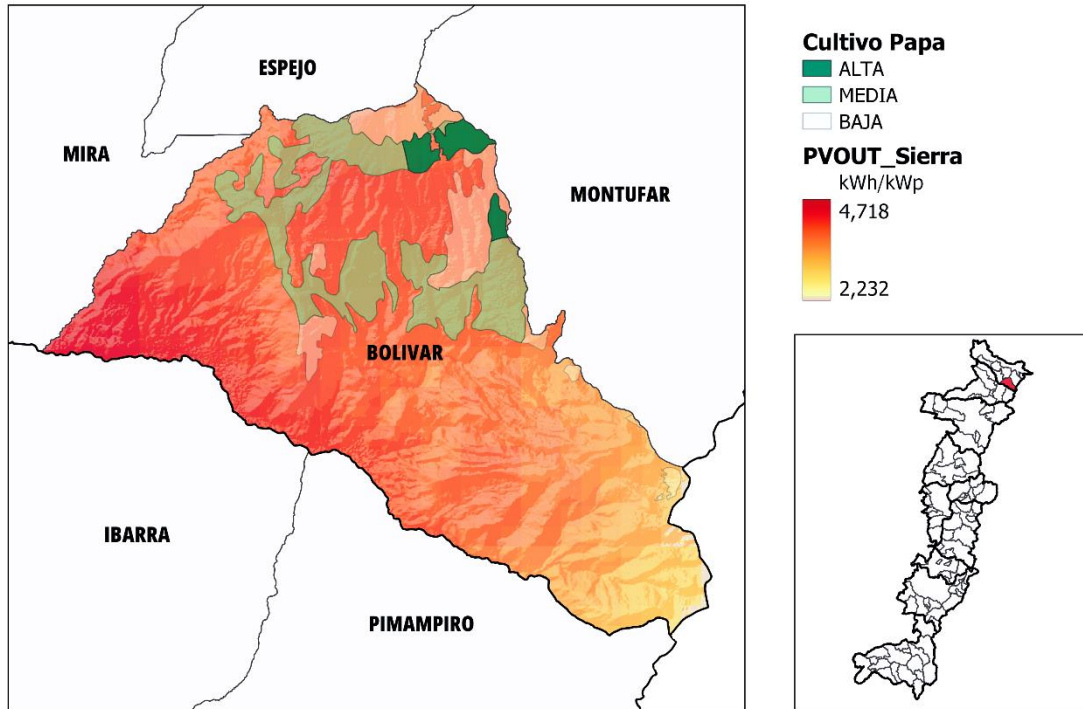
- [15] Sergio Delgado Martorell, "En qué consiste el riego por inundación," Feb. 24, 2022. <https://prismab.com/blog/en-que-consiste-el-riego-por-inundacion/#:~:text=El%20riego%20por%20inundaci%C3%B3n%20es%20un%20riego%20en%20superficie.,la%20infiltraci%C3%B3n%20en%20el%20terreno.> (accessed Dec. 05, 2022).
- [16] Greacen Chris and Kerins Megan, "A guide to pump-as-turbine pico-hidropower systems.," 2018.
- [17] Vivas Rodríguez Bryan Eduardo, "Diseño de una micro central hidroeléctrica para haciendas de la Garza," Ibarra, Feb. 2020.
- [18] QGIS, "QGIS," Dec. 16, 2022. <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html> (accessed Jan. 12, 2023).
- [19] ESRI, "Qué es GIS," 2020. <https://www.esri.es/es-es/descubre-los-gis/qu-es-sig/qu-es-sig> (accessed Feb. 03, 2023).
- [20] ArcGIS ESRI, "ArcMap," 2016. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm> (accessed Jan. 13, 2023).
- [21] Adobe, "Archivos Vectoriales," 2019. <https://www.adobe.com/la/creativecloud/file-types/image/vector.html> (accessed Feb. 23, 2023).
- [22] ArcGIS, "¿Qué son los datos ráster?," 2021. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm#:~:text=Los%20r%C3%A1steres%20son%20fotograf%C3%ADas%20a%C3%A9reas,de%20uso%20de%20la%20tierra.> (accessed Feb. 20, 2023).
- [23] Adobe, "Archivos TIFF," 2021. <https://www.adobe.com/la/creativecloud/file-types/image/raster/tiff-file.html> (accessed Feb. 20, 2023).
- [24] GADM, "GADM maps and data," 2018. <https://gadm.org/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [25] Gobierno del Ecuador, "GEOPORTAL," 2020. <http://www.sigtierras.gob.ec/geoportal/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [26] NASA, "EarthData Search," 2020. <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (accessed Feb. 23, 2023).
- [27] NASA, "EarthData," 2010. <https://www.earthdata.nasa.gov/> (accessed Jan. 12, 2023).
- [28] SOLARGIS, "SOLARGIS Download," 2018. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/ecuador> (accessed Feb. 23, 2023).
- [29] SOLARGIS, "SOLARGIS," 2022. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/overview> (accessed Feb. 03, 2023).
- [30] INIAP, "Papa," 2017. <http://tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/explore-2/mraiz/rpapa#:~:text=Altitud%3A%202600%20%E2%80%93%203600%20msnm.,%3A%2014%20%E2%80%93%2020%20C%20B0C.&text=Suelo%3A%20Francos%20C%20bien%20drenados%20C,buen%20contenido%20de%20materia%20org%C3%A1nica.> (accessed Feb. 23, 2023).

[31] ESMAP, *Global Photovoltaic Power Potential by Country*. Washington DC: Banco Mundial, 2020.

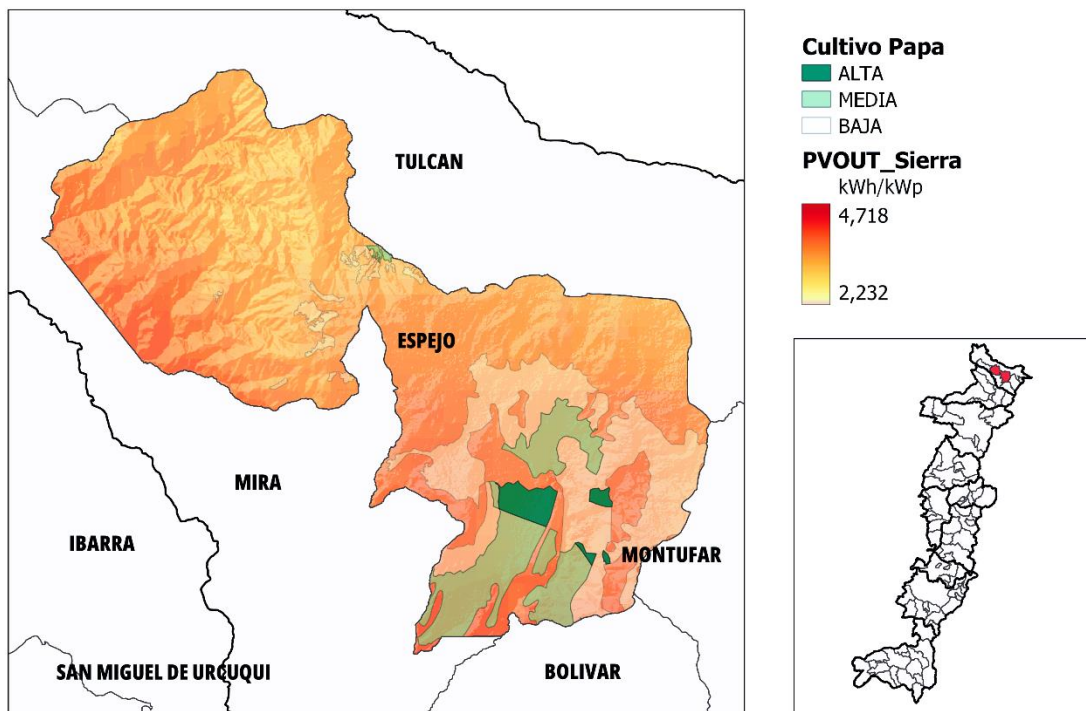
5 ANEXOS

ANEXO I. PROVINCIA DEL CARCHI Y SUS CANTONES

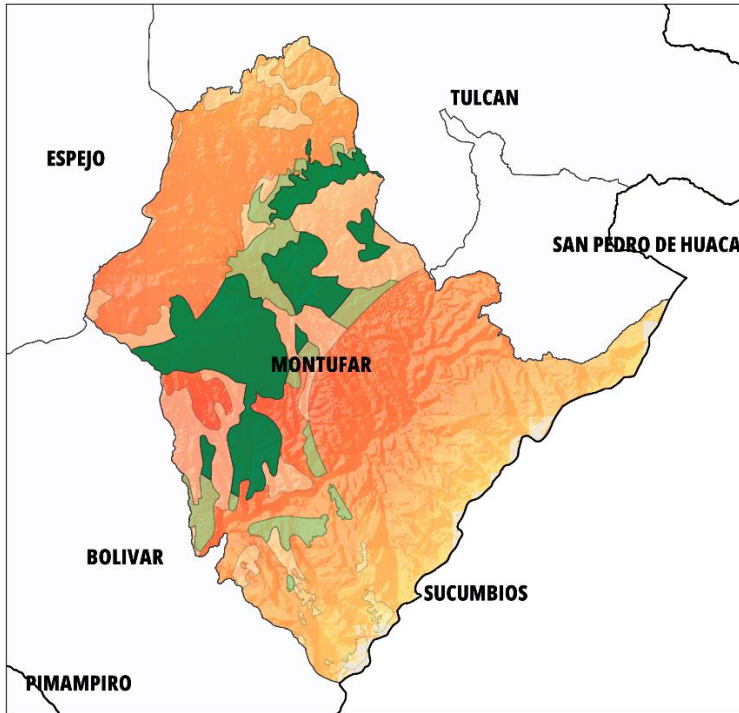
Cantón: BOLIVAR



Cantón: ESPEJO



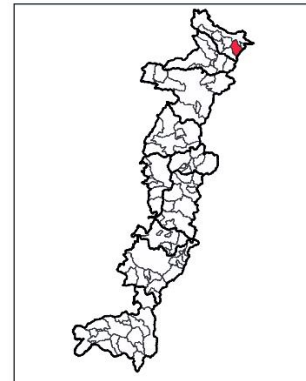
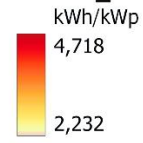
Cantón: MONTUFAR



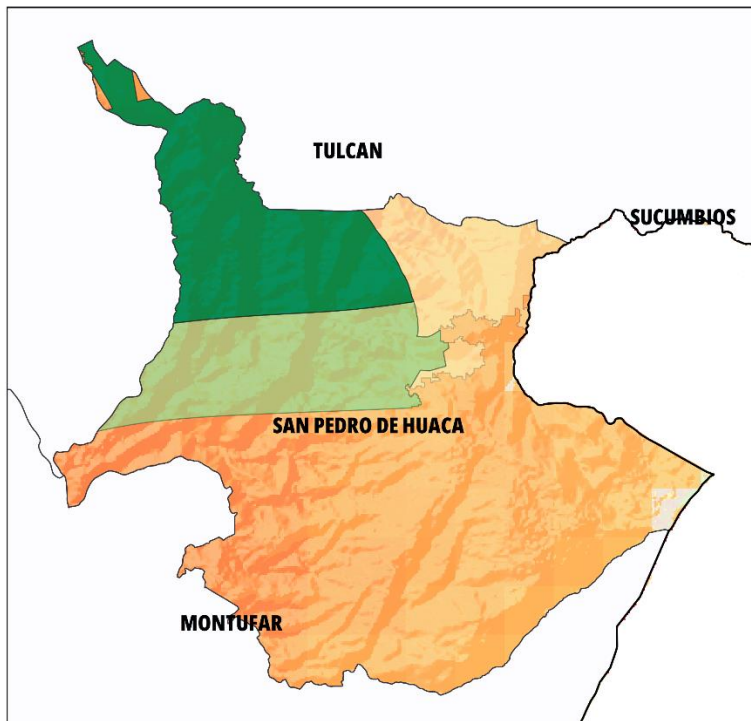
Cultivo Papa

- ALTA
- MEDIA
- BAJA

PVOUT_Sierra



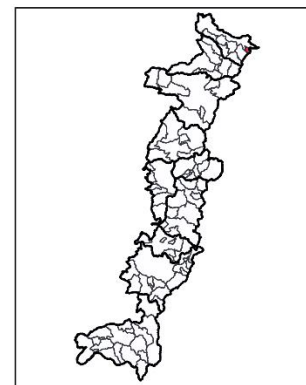
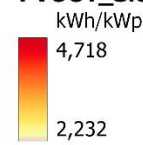
Cantón: SAN PEDRO DE HUACA



Cultivo Papa

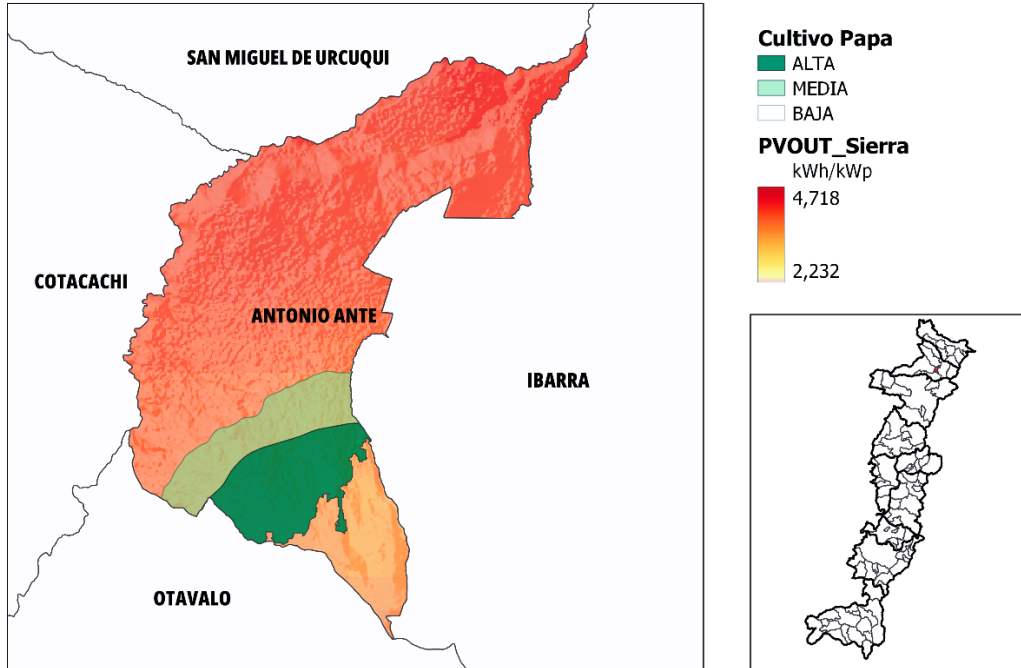
- ALTA
- MEDIA
- BAJA

PVOUT_Sierra

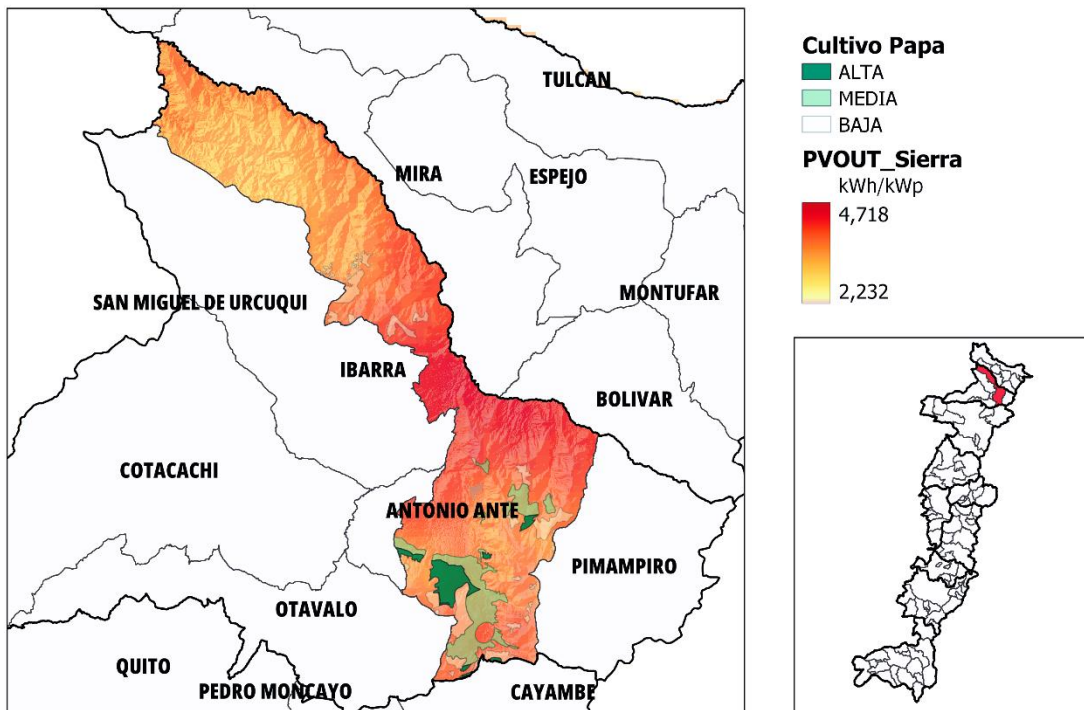


ANEXO II. PROVINCIA DE IMBABURA Y SUS CANTONES

Cantón: ANTONIO ANTE

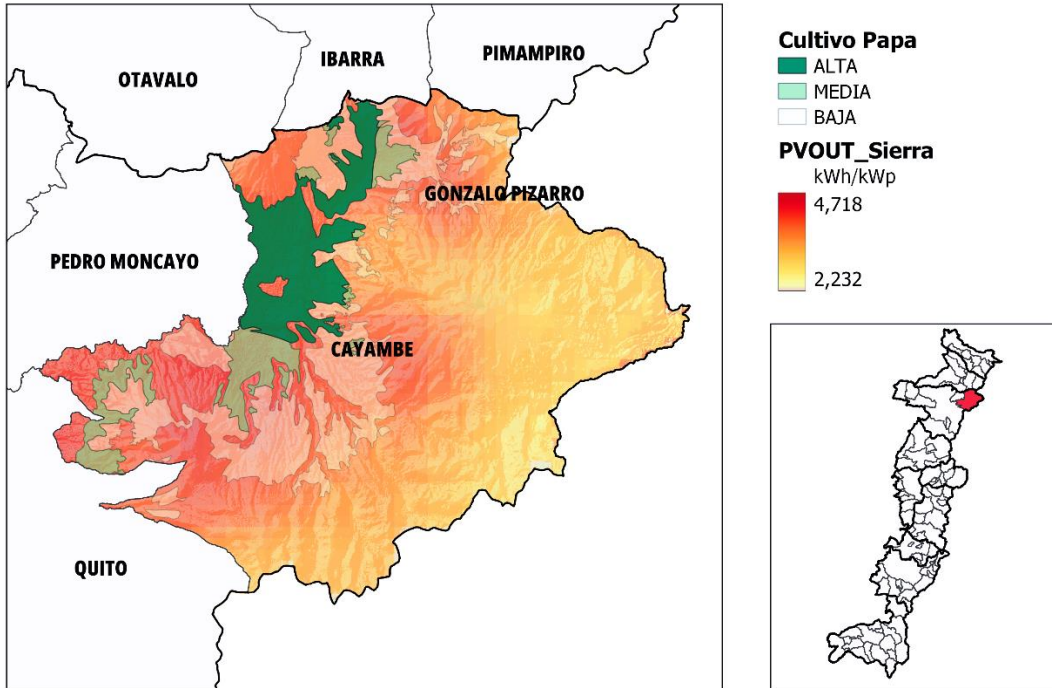


Cantón: IBARRA

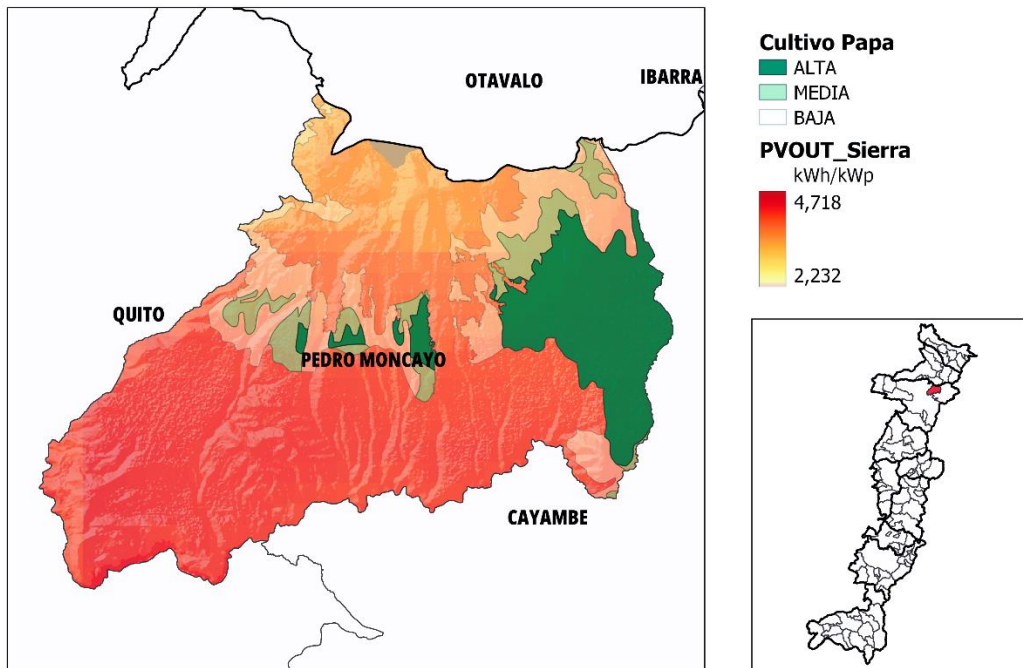


ANEXO III. PROVINCIA DE PICHINCHA Y SUS CANTONES

Cantón: CAYAMBE

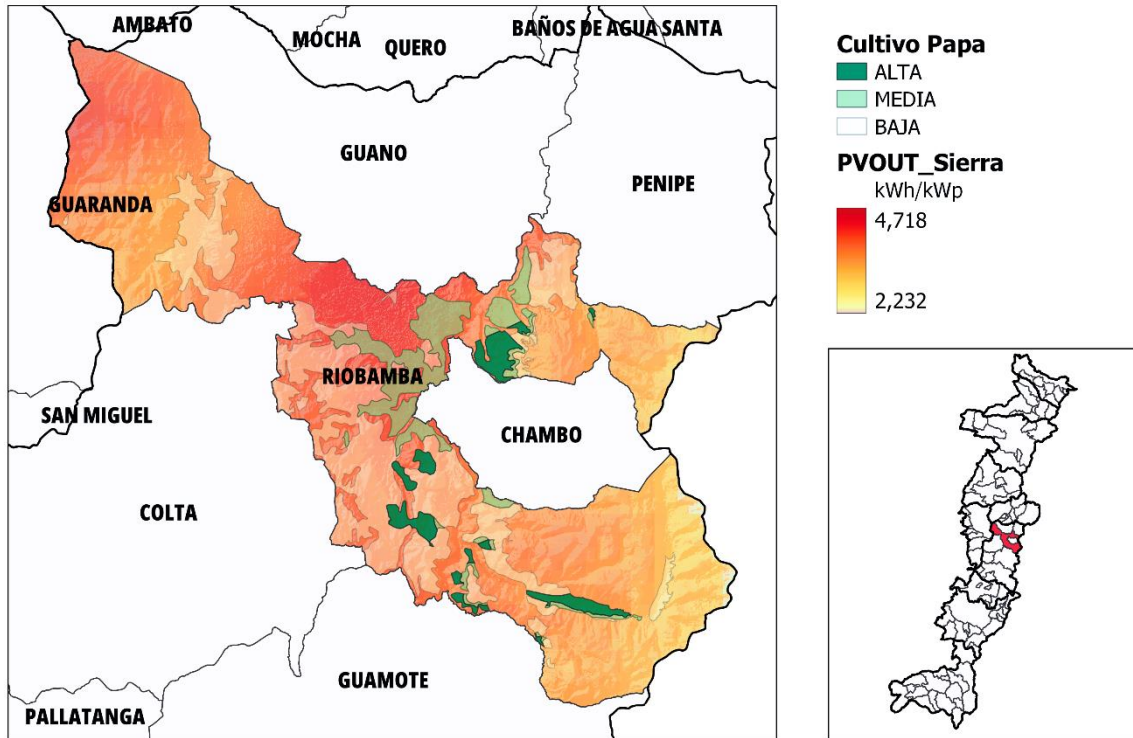


Cantón: PEDRO MONCAYO

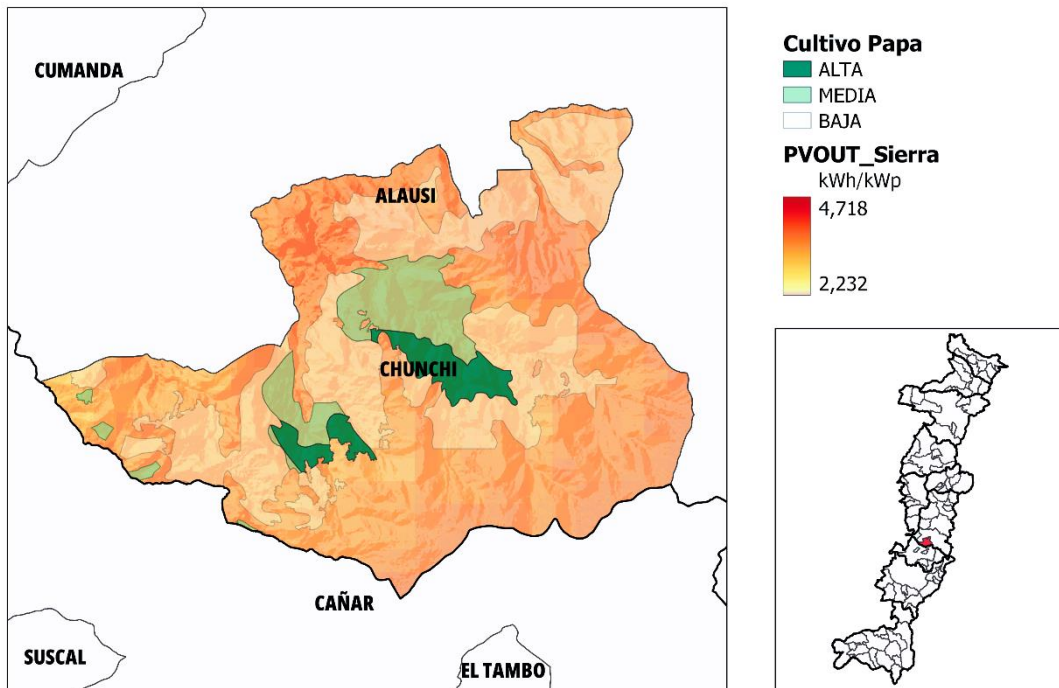


ANEXO IV. PROVINCIA DE CHIMBORAZO Y SUS CANTONES

Cantón: RIOBAMBA

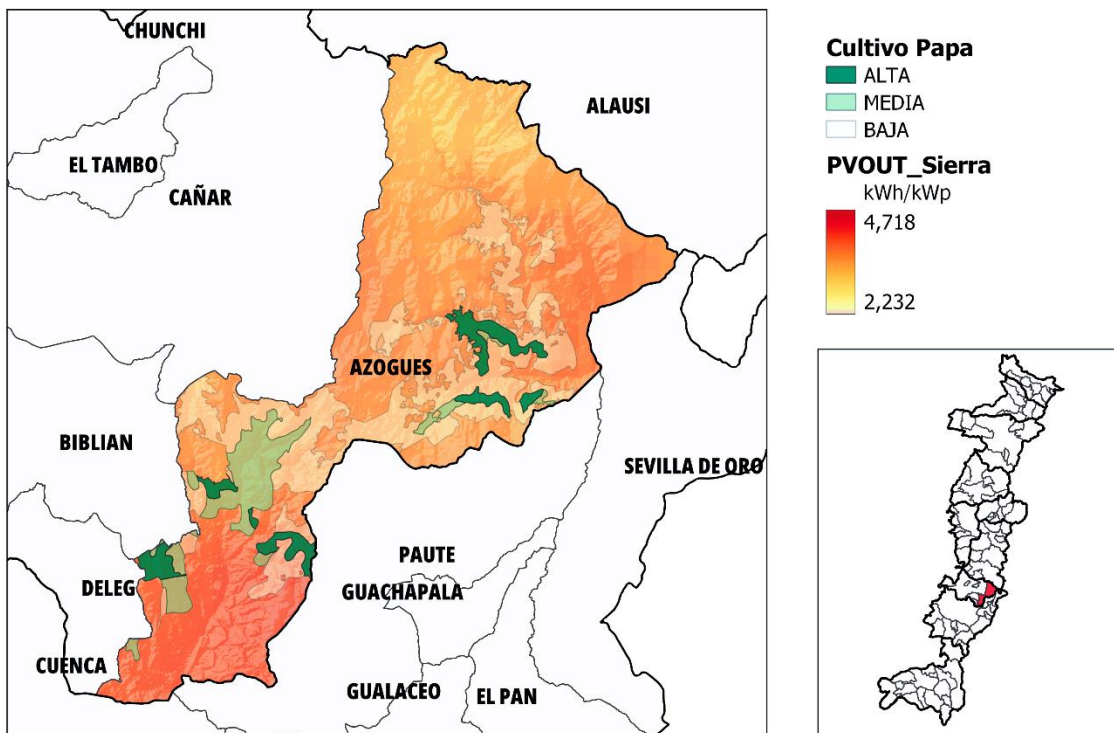


Cantón: CHUNCHI

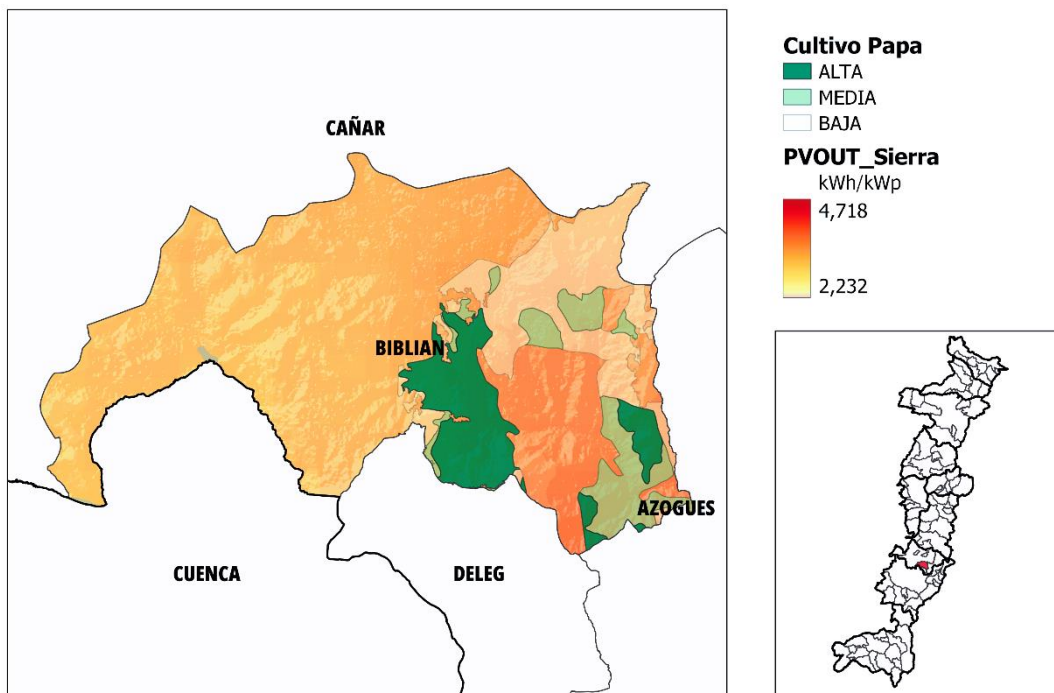


ANEXO V. PROVINCIA DE CAÑAR Y SUS CANTONES

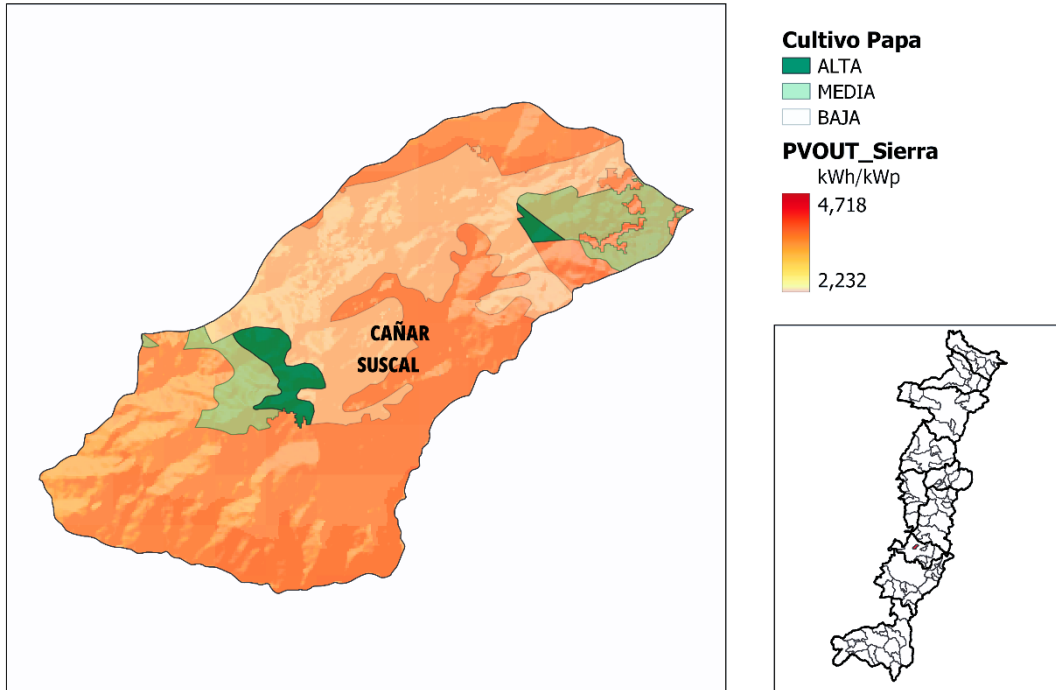
Cantón: AZOGUES



Cantón: BIBLIAN

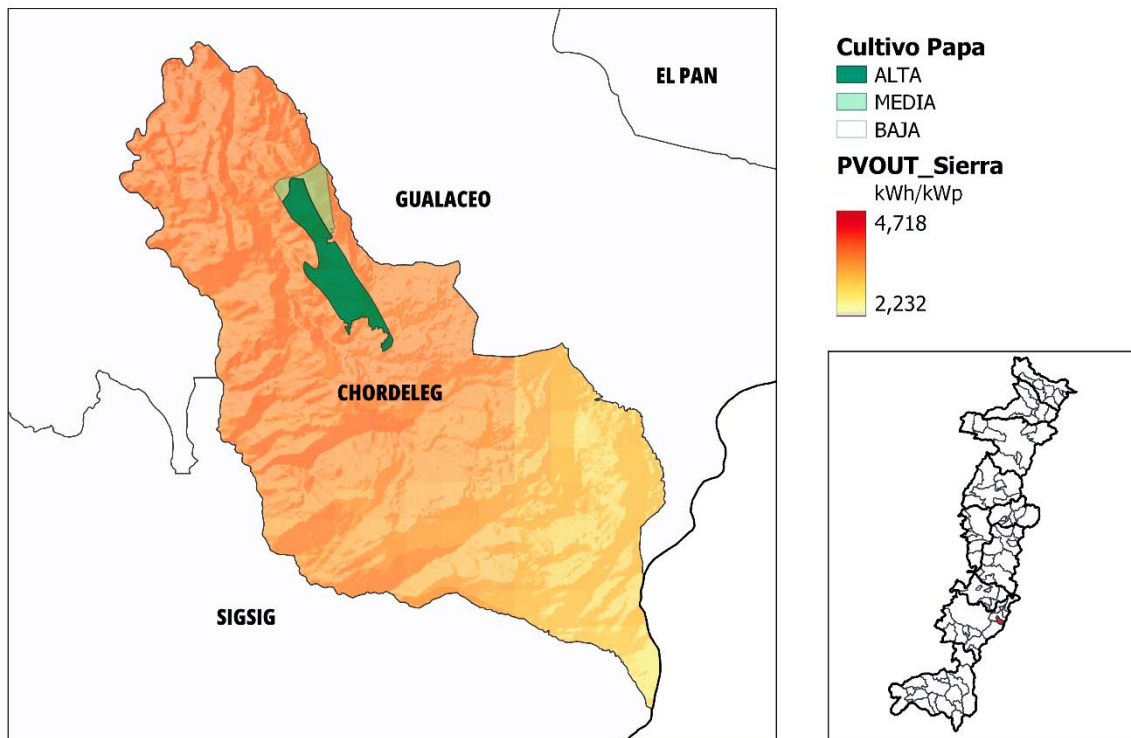


Cantón: SUSCAL

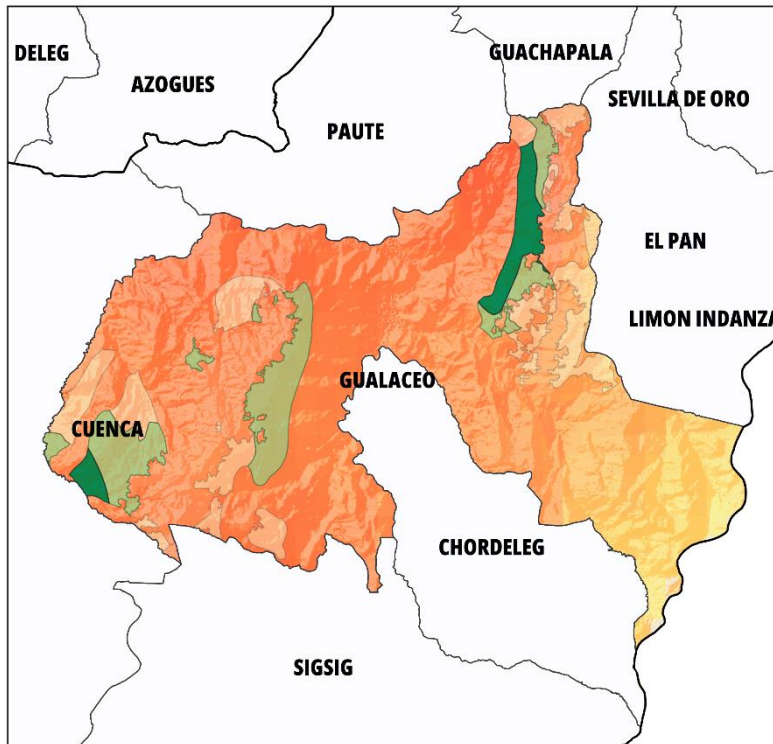


ANEXO VI. PROVINCIA DE AZUAY Y SUS CANTONES

Cantón: CHORDELEG



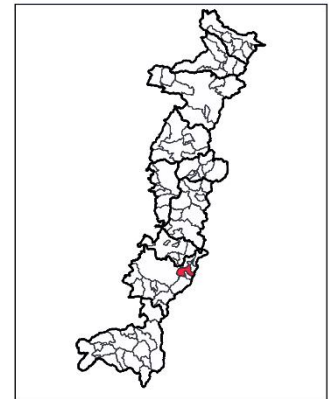
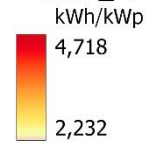
Cantón: GUALACEO



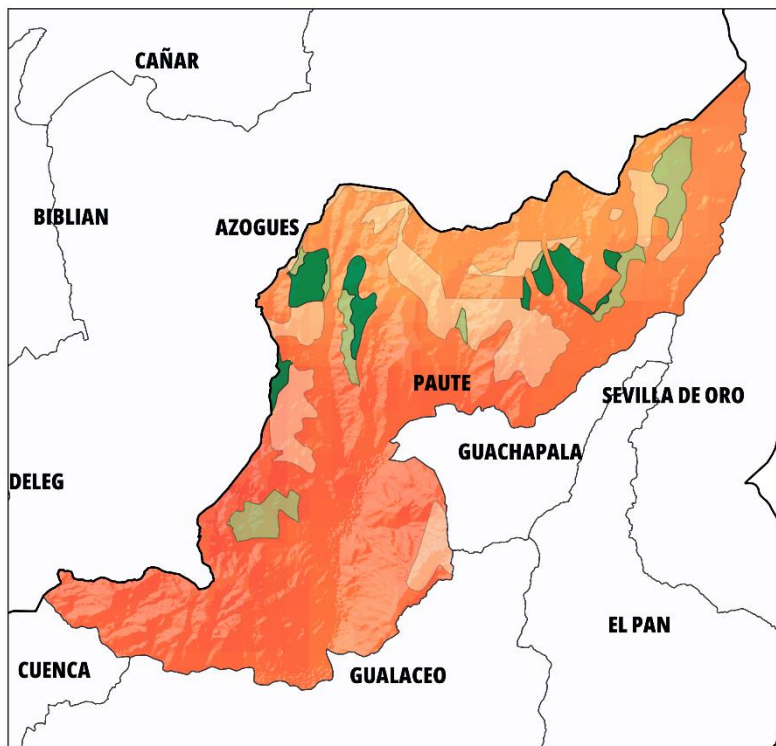
Cultivo Papa

- ALTA
- MEDIA
- BAJA

PVOUT_Sierra



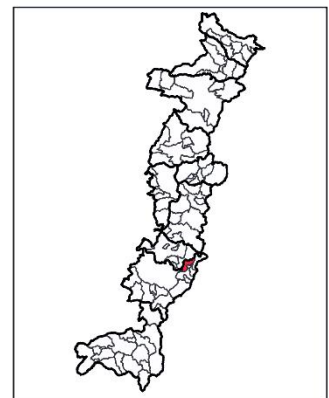
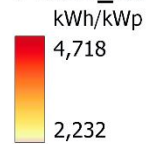
Cantón: PAUTE



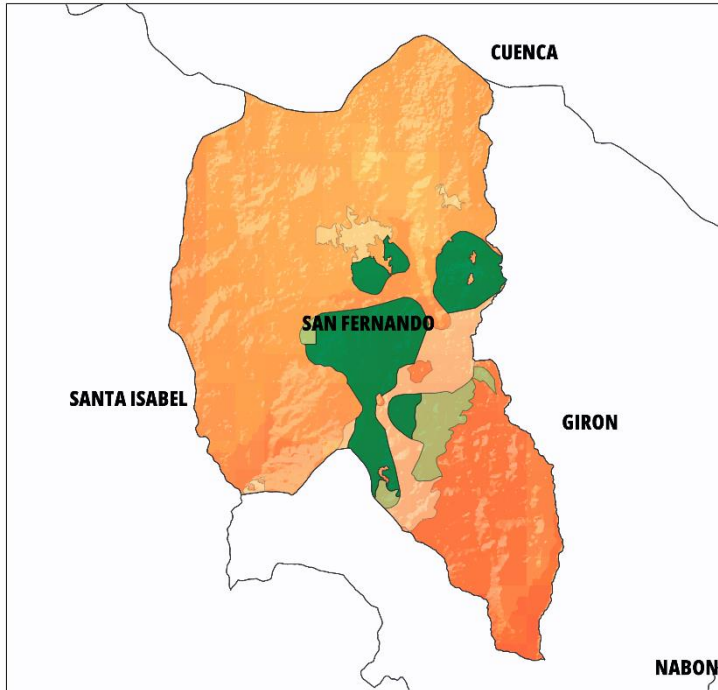
Cultivo Papa

- ALTA
- MEDIA
- BAJA

PVOUT_Sierra



Cantón: SAN FERNANDO



Cultivo Papa

- ALTA
- MEDIA
- BAJA

PVOUT_Sierra

