

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA IDENTIFICAR RECURSOS  
NATURALES DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN BASE AL  
PROYECTO GeVi

MARCO ANTONIO ÁGUILA BUSTOS

Santiago, Chile  
2011

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA IDENTIFICAR RECURSOS  
NATURALES DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN BASE AL  
PROYECTO GeVi

METHODOLOGICAL PROCEDURE TO IDENTIFY NATURAL RESOURCES  
AVAILABLE FOR POWER GENERATION BASED ON THE PROJECT GeVi

MARCO ANTONIO ÁGUILA BUSTOS

Santiago, Chile  
2011

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO PARA IDENTIFICAR RECURSOS  
NATURALES DISPONIBLES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN BASE  
AL PROYECTO GeVi**

Memoria para optar al Título  
Profesional de: Ingeniería en Recursos  
Naturales Renovables

**MARCO ANTONIO ÁGUILA BUSTOS**

<b>Profesores Guías</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Luis Morales S. Prof. de Ciencias Naturales y Física, MSc., Ph.D.	7,0
Sr. Rodrigo Palma B. Ing. Civil de Industrias. Mención en Electricidad, M. Sc., Ph.D.	6,5
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Manuel Paneque C. Bioquímico, Ph.D.	7,0
Sra. María Teresa Varnero M. Química Farmacéutica	6,0
<b>Colaborador</b>	
Sr. Diego Díaz M. Ingeniero en Recursos Naturales Renovables	

**Santiago, Chile**  
**2011**

**"La curiosidad que lleva al hombre a investigar y la que le lleva a viajar son del mismo orden; responden ambas al imperioso deseo de conocer y comprender el mundo."  
(Luis Carandell).**

## **Agradecimientos**

Ante todo agradezco a mis padres Nora Bustos y Claudio Águila quienes me han apoyado de manera incondicional y constante en todas las instancias de mis estudios y en especial en el desarrollo de esta memoria, a mi hermana le agradezco sus consejos y su ejemplo para darme ánimos y seguir siempre perseverando.

Agradezco la paciencia y en el apoyo que me dieron para embarcarme en esta memoria a mis profesores guía Rodrigo Palma y Luis Morales.

En forma especial agradezco la colaboración del profesor Misael Gutiérrez por la orientación en los temas relacionados con biomasa y mecanismos para la utilización de ésta y a mi jefe Cristian Andrade quien me ha dado la posibilidad de tener un horario flexible en los momentos críticos en el desarrollo de esta memoria.

No puedo dejar de mencionar a las personas que en estos años de Universidad me han acompañado y me han apoyado en cada paso, Yessica Zúñiga, Andrea Llanos, Kevin Vázquez, Cecilia Romero, Miguel Cisterna, Fidel Maureira, Cyndi Durán, Romina Chiappe, Daniel Bastías, María de los Ángeles Tapia, Jorge Quinteros, Sebastián Viveros, Jorge Urquieta, Esteban Rivas, Bárbara Canales (quien se ha sumado a mi vida en este último tiempo y me ha dado el último impulso) y cuantos más que se me quedan en el tintero (compañeros garzones, vendedores y cuanto trabajo he ejercido en el periodo Universitario), gracias por las aventuras, consejos, tristezas, alegrías, enseñanzas e historias que hemos compartido, espero seguir compartiendo junto a ustedes por unos cuantos años más.

## I. SIGLAS Y ABREVIACIONES

ERNC	Energía Renovables No Convencional
GD	Generación Distribuida
GeVi	Generador Virtual
SIG	Sistemas de Información Geográfica
WMO	World Meteorological Organization
MH	Energía Mini Hidráulica
DEM	Modelo de Elevación Digital (siglas en Inglés)
FER	Fuente de Energía Renovable
PER	Programa de Electrificación Rural
UE	Unión Europea
DGA	Dirección General de Aguas
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada
DMC	Dirección Meteorológica de Chile
CNR	Comisión Nacional de Riego
PRODESAL	Programa de Desarrollo Local
SERVIU	Servicio de Vivienda y Urbanización
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
CIREN	Centro de Información de Recursos Naturales
ENSO	El Niño/La Niña Southern Oscillation



## II. ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Justificación.....	2
1.2. Objetivo General .....	3
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS Y DEFINICIONES.....	4
2.1. Generación Distribuida .....	4
2.2. Generador Virtual.....	5
2.2.1. Experiencias en Chile.....	6
2.2.2. Experiencias Internacionales.....	6
2.3. Energías renovables No Convencionales en Chile.....	7
2.3.1. Fuentes de energías renovables en Chile .....	8
2.3.2. Energía Solar .....	8
2.3.3. Energía Eólica .....	10
2.3.4. Energía de la Biomasa.....	12
2.3.5. Energía Hidráulica .....	13
2.4. Experiencia internacional en la exploración de FER .....	15
2.5. Sistema eléctrico nacional.....	16
3. REVISIÓN METODOLOGICA.....	19
3.1. Procedimiento para identificar recursos naturales disponibles para la generación de energía.....	20
3.2. Prospección para fuente de energía Solar .....	21
3.3. Prospección para fuente de energía Eólica.....	25
3.4. Prospección para fuente de energía Biomasa.....	30
3.5. Prospección para fuente de energía Hidráulica.....	33
4. PROPUESTA DESARROLLADA.....	36
4.1. Esquema general de la propuesta .....	36
4.2. Información previa para Identificar y sistematizar .....	38
4.2.1. Definición del área de estudio.....	38
4.2.2. Integración del proyecto y la comunidad .....	39
4.2.3. Selección de fuente de información secundaria .....	39
4.3. Etapas de la propuesta metodológica .....	40
4.3.1. Desarrollo de las etapas del proyecto.....	41
4.3.2. Etapa 1.....	41
4.3.3. Etapa 2 y 3.....	45
4.3.4. Etapa 4.....	60
5. CONCLUSIONES .....	63
6. RECOMENDACIONES .....	64
7. TRABAJO FUTURO.....	65
8. BIBLIOGRAFÍA .....	66



### III. ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. CARACTERÍSTICAS DE GENERACIÓN DE LAS ERNC, SEGÚN LEY 20.257.....	7
CUADRO 2. TIPO Y FUENTE DE ENERGÍA RENOVABLES .....	8
CUADRO 3. CLASIFICACIÓN DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	14
CUADRO 4. VALORES PARA EL EXPONENTE P.....	26
CUADRO 5. ESCALA PROPUESTA DE ACUERDO AL ÁREA DE ESTUDIO.....	38
CUADRO 6. PROPUESTA PARA LA GESTIÓN EN LA RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	39
CUADRO 7. INFORMACIÓN DE CARTA BASE .....	43
CUADRO 8. INFORMACIÓN PARA CARTOGRAFÍA DE ENERGÍA SOLAR .....	44
CUADRO 9. INFORMACIÓN PARA CARTOGRAFÍA DE ENERGÍA EÓLICA .....	44
CUADRO 10. INFORMACIÓN PARA CARTOGRAFÍA DE ENERGÍA DE LA BIOMASA .....	45
CUADRO 11. INFORMACIÓN PARA CARTOGRAFÍA DE FUENTE MINI HIDRÁULICA.....	45
CUADRO 12. ÍNDICE DE RESIDUOS POST COSECHA .....	56
CUADRO 13. FACTORES DE CONVERSIÓN UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DEL POTENCIAL DE BIOGAS .....	57

### IV. ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ESQUEMA DE GD INTERACTUANDO CON EL SISTEMA INTERCONECTADO.....	5
FIGURA 2. ESQUEMA DE RADIACIÓN SOLAR DIRECTA Y DIFUSA.....	9
FIGURA 3. ESQUEMA GENERAL DE LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UN SISTEMA FOTVOLTAICO.....	10
FIGURA 4. AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL TRI-PALA (IZQUIERDA) Y AEROGENERADOR DE EJE VERTICAL (DERECHA).....	11
FIGURA 5. ESQUEMA GENERAL DE GENERACIÓN ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE ENERGÍA EÓLICA.....	11
FIGURA 6. ESQUEMA GENERAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA, MEDIANTE CONVERSIÓN TERMOQUÍMICA.....	12
FIGURA 7. ESQUEMA GENERAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE GASIFICACIÓN DE LA BIOMASA, MEDIANTE CONVERSIÓN BIOQUÍMICA.....	13
FIGURA 8. ESQUEMA DE MICRO CENTRAL DE PASADA.....	14
FIGURA 9. POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA ZONA OCCIDENTAL DE ESTADOS UNIDOS.....	15
FIGURA 10. CAPACIDAD INSTALADA POR SISTEMA ELÉCTRICO EN CHILE 2008.....	17
FIGURA 11. ESQUEMA GENERAL DE LA METODOLOGÍA IMPLEMENTADA .....	19
FIGURA 12. ESQUEMA DE METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE POTENCIAL ENERGÉTICO.....	25
FIGURA 13. CICLOS DIARIOS VALLE – MONTAÑA.....	27
FIGURA 14. ESQUEMA DE METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA.....	31
FIGURA 15. ESQUEMA DE METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE POTENCIAL ENERGÉTICO HÍDRICO.....	34
FIGURA 16. ESQUEMA GENERAL DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA PROSPECCIÓN DE FER.....	37
FIGURA 17. CONSTRUCCIÓN DE LA CARTA BASE. VER CUADRO 7 .....	46
FIGURA 18. ESQUEMA. CONSTRUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA POTENCIAL ENERGÉTICO SOLAR. VER CUADRO 8... ..	47
FIGURA 19. CARTOGRAFÍA DE POTENCIAL SOLAR MEDIDO EN $[kWm^2]$ .....	49
FIGURA 20. ESQUEMA. CONSTRUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA POTENCIAL ENERGÉTICO DEL VIENTO .....	51
FIGURA 21. CARTOGRAFÍA DE POTENCIAL EÓLICO MEDIDO EN $[kWm^2]$ .....	52
FIGURA 22. ESQUEMA. CONSTRUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASA.....	54
FIGURA 23. ESQUEMA. GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE CULTIVO Y DE GANADERÍA.....	55
FIGURA 24. CARTOGRAFÍA DE POTENCIAL DE BIOMASA MEDIDA EN $[kW/m^2]$ .....	58
FIGURA 25. ESQUEMA. CONSTRUCCIÓN CARTOGRAFÍA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DEL UN CAUCE DE AGUA..	59
FIGURA 26. ESQUEMA. CONSTRUCCIÓN CARTOGRAFÍA DE POTENCIALES ENERGÉTICOS.....	61
FIGURA 27. CARTOGRAFÍA DE POTENCIAL ENERGÉTICO TOTAL $[kW/m^2]$ .....	62

## V. RESUMEN

Las condiciones actuales de Cambio Climático y escasez nacional de combustibles fósiles, nos indican que Chile debe diversificar la matriz energética y planificar un desarrollo energético a través de energías existentes en el territorio. Esto ha llevado a un grupo de científicos a plantear una solución energética llamada Iniciativa GeVi (Generador Virtual), esta iniciativa utiliza diferentes fuentes de energía, las que en su mayoría son renovables no convencionales (ERNC), generando energía cerca de los lugares de consumo. Para ello se requiere identificar las fuentes de energía renovables y los conflictos que se puedan generar en el territorio la instalación de generadores eléctricos.

La presente memoria de título tiene como objetivo general desarrollar una propuesta metodológica que permita identificar zonas con recursos naturales disponibles para transformarlos en energía eléctrica utilizable para una solución tipo GeVi.

El presente trabajo es una propuesta metodológica dividida en cuatro etapas. Primero, se recopilarán y generará información del territorio y sus recursos naturales. Segundo, se generan capas de información en cartografía digital de acuerdo a la información recopilada. Tercero, en esta etapa la información digitalizada se procesa a través de algoritmos, calculando el potencial energético de las fuentes de energías renovables identificadas, la propuesta se basa en algoritmos y métodos de cálculo para la fuente de energía eólica, solar, biomasa y mini hidráulica ya existentes. Cuarto, se propone fusionar las cartografías de los potenciales energéticos e información base del territorio en una sola imagen. De esta forma se genera una herramienta de apoyo para la planificación territorial y disminuir los conflictos por la competencia del espacio del territorio.

La metodología se aplicó de forma reducida para el poblado de Huatacondo, obteniéndose como resultado cartografías de potenciales energéticos para las fuentes de energía eólica, solar y biomasa, también se generó una cartografía del potencial energético neto de la zona de estudio. Durante la aplicación de la memoria se destaca la importancia de la información base (datos de recursos naturales: viento, biomasa y radiación) para la aplicación de la metodología.

La presente memoria fue generada para ser utilizado en la Iniciativa GeVi, sin embargo por su finalidad puede ser utilizado para cualquier proyecto que necesite generar información de fuentes de energías renovables, dado su carácter recopilatorio en el cual se trabaja con variables generales y que apoyan la toma de decisiones territoriales de cualquier proyecto de generación distribuida a través diversas fuentes de generación que utilicen ERNC presentes en el presente trabajo.

Esta memoria deja abierta la posibilidad de incorporar más fuentes de energías renovables a la metodología, tales como, geotérmica de baja entalpía, mareomotriz y las que se puedan desarrollar en el futuro. En futuras versiones se espera automatizar los procesos para la

generación de cartografía ingresando sólo los datos iniciales y poder generar una plataforma abierta a todo el público (vía web) en la cual se pueda ingresar los datos y generar la cartografía del territorio.

**Palabras clave:** Iniciativa GeVi, generación distribuida, fuentes de energía renovable.

## VI. ABSTRACT

In the current conditions of climate change and national shortage of fossil fuels, we show that Chile should diversify energy sources and energy development plan through existing national energies. This has led a group of scientists to propose an energy solution called GeVi Initiative (Virtual Generator). This Initiative works with different energy sources, which are mostly non-conventional renewable (URE), generating energy close to consumption sites. This requires identifying the sources of renewable energy and conflicts that may arise in the territory, installation of electric generators.

The objective general memory of this title is develop a methodology to identify surfaces with natural resources available to process them into usable electrical energy for a standard solution GeVi.

This paper is a methodology in four stages. First, they collect and generate information of the territory and its natural resources. Second, the layers of information are generated in digital cartography according to information collected. Third, the digital information is processed through algorithms, calculating the potential energy sources renewable energy identified in this proposal are suggested algorithms and calculation methods for wind power, solar, biomass and mini hydro. Fourth, it proposes to merge the maps of potential energy and information base of the territory in a single image. This will generate a support tool for land planning and reducing conflicts over territory space competition.

The methodology used was applied to a reduced form to the village of Huatacondo it has resulted mappings of potentials sources of energy for wind, solar and biomass, also generated a net energy potential mapping of the study area. During the implementation of the reports highlighted the importance of basic information (data of natural resources: wind, biomass and radiation) for the implementation of the methodology.

While this work was generated for use in GeVi Initiative, a project developed and implemented by the Energy Center at the University of Chile, its purpose can be used for any project that needs to generate renewable energy sources, given their patchwork in which we work with general variables and supports the regional decision-making of any distributed generation project through various sources of generation using ERNC present in this paper.

This leaves the open possibility of incorporating more renewable energy sources to the methodology, such as low-enthalpy geothermal, tidal and can be developed in the future. Future versions are expected to automate processes for mapping generation by only entering the initial data and then generate a platform open to everyone (via web) in which to enter the data and mapping the territory

**Keywords:** GeVi Initiative, distributed generation, renewable energy sources

## 1. INTRODUCCIÓN

Los acontecimientos en materia energética y de cambio climático, ocurridos durante los últimos quince años en Chile han puesto en boga la necesidad de diversificar la matriz energética eléctrica.

La energía hidroeléctrica ha sido la principal fuente de energía en Chile hasta hoy, aportando un 36,4% de la capacidad eléctrica instalada. Las plantas que utilizan gas natural o licuado, petróleo, carbón tienen una capacidad instalada de 61% y el 2,6% restante corresponde a fuentes renovables tales como biomasa, eólica y mini hidráulica (Ministerio de Energía, 2010). Este panorama se ha mantenido dado que hace algunos años fueron una solución para dar seguridad energética al país, esta solución se ha visto afectada por las reiteradas crisis internacionales del petróleo, los altos costos ambientales que significa la producción de energía por medio de combustibles fósiles y fenómenos climáticos como el ENSO y cambios climáticos que afectan a las precipitaciones, por ende a los embalses y a los abastecimientos de agua potable. Sin embargo, a partir de la promulgación de la ley chilena 20.257 (marzo, 2008), como parte de las estrategias de gobierno para aumentar la seguridad energética de Chile. Cuya finalidad es contribuir a la diversificación de la matriz energética del país e impulsar la independencia energética de los combustibles fósiles (BCN, 2008).

Las ERNC tienen un comportamiento heterogéneo en la producción de energía, datos escasos de las Fuentes de Energías que las producen y altos riesgos de inversión, las hace hoy un día como una solución parcial y arriesgada para enfrentar los problemas energéticos del País. Sin embargo, tienen un valor agregado al ser fuentes energéticas que no emiten gases de efecto invernadero y al ser recursos energéticos disponibles dentro del territorio nacional (Bravo, 2006).

La iniciativa GeVi (Generador Virtual) es un proyecto que tiene como finalidad el coordinar en forma conjunta la operación de un grupo de unidades de generación eléctrica ubicadas en un área geográfica común. Las instalaciones corresponden a unidades de generación eléctrica de pequeña escala, cercanas a las fuentes de consumo y que se encuentran conectadas a las redes de distribución eléctrica existentes (Palma, 2008).

La misión de los GeVi es “impulsar la introducción masiva de sistemas de generación de energía en base a la operación coordinada de unidades distribuidas de pequeña escala, conectadas a las redes de distribución existentes. Entidades similares a un Centro Económico de Despacho de Carga (CDEC) realizarían, mediante el uso de herramientas de coordinación, funcionalidades que aprovechen al máximo tanto los recursos naturales totales de los cuales se pueda generar energía en una zona geográfica como también las ventajas asociadas a la característica dispersa de las fuentes, aumentando la diversificación,

de fuentes energéticas, al suministro de electricidad ante una alta penetración de este tipo de generadores (GeVi)” (Palma, 2008).

Este proyecto actualmente se encuentra en la etapa de investigación y desarrollo de técnicas para el control y generación. Para validar el concepto de generador virtual se ha construido el primer prototipo del GeVi, el cual se espera que utilice 5 tipos distintos de energía encontradas en el lugar de emplazamiento, tales como, eólica, solar, microhidráulica, geotérmica y biomasa. Estos tipos de energía tienen tecnologías asociadas y que responden a las características de los recursos naturales existentes en el sitio en que se ubicarán. En el caso del primer prototipo se determinó la utilización de energía solar (fotovoltaica), eólica (a través de aerogeneradores tri-pala), biomasa (a partir de biogás) y geotérmica termal de baja entalpía, además en el lugar existe un equipo electrógeno (diesel) de respaldo.

### **1.1. Justificación**

La presente memoria será un apoyo técnico para el desarrollo del GeVi y otras iniciativas similares, ordenando (estandarizando) la información presente disponible, creando una estructura para iniciativas futura sobre fuentes de información de los recursos naturales renovables aprovechables para la generación de energía renovable no convencional (ERNC). El presente documento se plantea como la primera versión de una propuesta metodológica para recolectar, unificar y ordenar la información para cuatro fuentes de energía eléctrica a pequeña escala (micro hidráulica, biomasa, solar y eólica).

La hipótesis planteada para generar este trabajo fue preguntarse si: “es factible generar una propuesta metodológica que permita establecer los recursos de generación de energía eléctrica a partir de recursos naturales existentes en áreas geográficas determinadas”. Con esta reflexión se plantea identificar características básicas del territorio para definir fuentes de energía renovables con potencial energético aprovechable y de esta forma poder definir técnicamente la ubicación de los equipos generadores. Este planteamiento pretende plantear y considerar los posibles conflictos en el territorio debido a la competencia de los espacios utilizados por la vida silvestre, procesos ecosistémicos y la población humana, por ello esta propuesta metodológica debe ser parte de una estrategia de selección y evaluación de los recursos naturales y áreas de emplazamientos de generadores eléctricos que puedan ser utilizados para la generación de ERNC.

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, esta memoria se clasifica como una primera aproximación de una propuesta metodológica, basada en metodologías de selección de recursos naturales utilizadas y validadas en la actualidad. Mediante su aplicación en casos de estudios reales, se evaluará y analizará los procedimientos utilizados, verificando e identificando debilidades y fortalezas de la metodología de acuerdo a la situación y área geográfica aplicada. Además, se debe generar registros y mejoras en la metodología para poder extenderla a todo Chile y a más FER.

## **1.2. Objetivo General**

El objetivo general del trabajo es desarrollar una propuesta metodológica que permita identificar zonas con recursos naturales disponibles para transformarlos en energía eléctrica utilizable para una solución tipo GeVi.

## 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS Y DEFINICIONES

Este capítulo pretende contextualizar e instruir sobre algunos términos y enfoque dado durante el desarrollo de la investigación, ayudando a la comprensión de los resultados obtenidos.

### 2.1. Generación Distribuida

La Comisión de Integración Energética Regional (CIER – Organismo Internacional del Sector Eléctrico de América del Sur) propone tres niveles de generación en los Sistemas Eléctricos de Potencia (González y Moreno, 2003):

- *Generación Centralizada*, que corresponde a la configuración tradicional, con unidades de más de 100 [MW].
- *Generación Descentralizada*, que corresponde a unidades de generación entre 5 [MW] y 100 [MW] conectadas por lo general en media tensión.
- *Generación Distribuida* (GD) que corresponde a pequeñas unidades (< 5 [MW]) conectadas en baja tensión y ubicadas en el punto de consumo.

La GD tiene la opción de interactuar (comprar o vender) con la red eléctrica. La GD, teniendo ventajas tanto para el usuario como para la red eléctrica (Brokering *et al*, 2008). En la Figura 1 1 se esquematiza la GD.

Algunos de los beneficios son:

Beneficios para el usuario

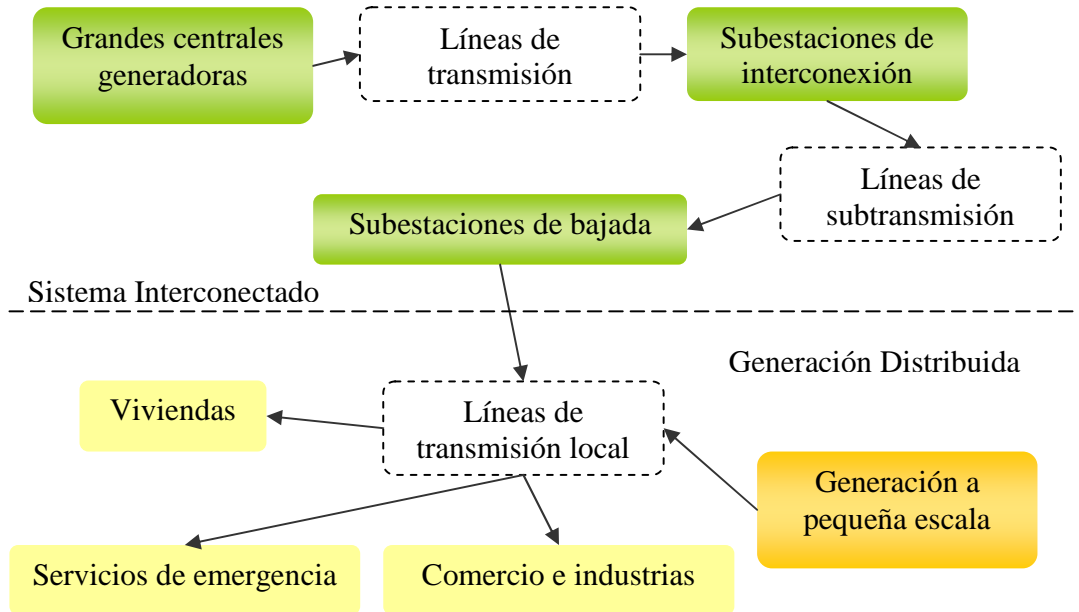
- Incremento en la confiabilidad.
- Aumento en la calidad de la energía.
- Abastecimiento en zonas remotas.
- Disminución en el número de interrupciones.
- Uso eficiente de la energía.
- Uso de energías renovables.
- Facilidad de la captación a las condiciones del sitio.
- Disminución de emisiones contaminantes.

Beneficios para el suministrador

- Reducción de pérdidas en transmisión y distribución.
- Abastecimiento en zonas remotas.



- Libera capacidad del sistema.
- Proporciona mayor control de energía reactiva.
- Mayor regulación de tensión.
- Disminución de inversión.
- Menor saturación.
- Reducción del índice de fallas.



**Figura 1.** Esquema de GD interactuando con el Sistema interconectado.

**Fuente:** Generación propia de acuerdo al esquema de funcionamiento del Sistema interconectado de Chile.

## 2.2. Generador Virtual

Los Generadores Virtuales son un conjunto de soluciones tecnológicas encargados de establecer una estructura de comercio, control y regulación de la energía utilizada en la localidad a través de la GD. De esta forma los sistemas de GD son controlables para el sistema, logrando un desempeño comparable al de las generadoras convencionales conectadas a las líneas de transmisión (Visscher, *et al.*, 2007).

La iniciativa GeVi en Chile es un proyecto realizado por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Este proyecto se basa en el concepto de generador virtual. El GeVi se basa principalmente en el uso de GD de ERNC, los que serán implementados en un espacio geográfico común. El

funcionamiento de este se puede llevar a cabo con una conexión a la red de suministro eléctrico o en forma de Isla (sin conexión a la red). En el prototipo que se está generando por la iniciativa GeVi cuenta con la característica de funcionar como un sistema eléctrico aislado, esto significa que la energía es almacenada en un banco de baterías y desde este se abastece a la red de suministro local, sin una conexión al sistema interconectado del país.

El control que entregan los GeVi es de gran importancia debido a que las variaciones de frecuencia que generan la ERNC pueden anular la seguridad de la red, provocando desperfectos en el suministro de energía a los usuarios. El control se puede llevar a través de la generación con fuentes mixtas que funcionen bajo el control de un GeVi, tecnología demostrada por Visscher, *et al.* (2007) investigadores del centro de investigación de energía de los Países Bajos. La generación de tecnologías que respalden micro cogeneración de las ERNC es indispensable para lograr una capacidad instalada que sea independiente de los precios de los combustibles de procedencia fósil.

Si bien la tecnología para utilizar las energías renovables existe hoy en día, es necesario disponer de la información base sobre las fuentes de energía renovables y poder tomar decisión sobre el potencial energético existente en el país (Couper, 2008).

### **2.2.1. Experiencias en Chile**

En Chile no existen experiencias relacionadas concretamente con un GeVi. Sin embargo, se ha experimentado con GD a través del Programa de Electrificación Rural (PER), el cual es un programa técnico social del Gobierno de Chile que se ha desarrollado a través del Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR). Adicionalmente se ha establecido un acuerdo entre el Gobierno de Chile y el Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo sobre el proyecto denominado: “Chile: Remoción de barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”, de acuerdo al Decreto 15 del Ministerio de Relaciones Exteriores, publicado el 6 de abril de 2002. El PER apoya proyectos de electrificación de zonas rurales mediante la extensión de redes eléctricas y la utilización de energías renovables en forma de generadores distribuidos. Este programa incluyó la variable de desarrollo humano, mejorando la calidad de vida de las zonas rurales mejorando los sistemas de conservación de vacunas o esterilización de instrumentos. Además, mejoró la conectividad y enseñanza siendo un apoyo al programa Enlaces del Gobierno, el cual invirtió en computadores e Internet para los centros educacionales (CNE, 2006).

### **2.2.2. Experiencias Internacionales**

- **Proyecto Fenix** desarrollado en la Unión Europea (UE) se enfoca en la generación de energía eléctrica eficiente, segura y sustentable. La adición de energía eléctrica es comandada por plantas de GeVi a gran escala (Large Scale Virtual Power Plants). Este proyecto integra varios países de la UE, con unidades de generadoras locales instaladas con anterioridad, las que son coordinadas por medio de Fenix (Martin, 2008).

- **Proyecto Distribución Energética Inteligente – Segura – Eficiente (Denise)** se desarrolla en España y fue presentado el año 2006. Con este proyecto se pretende volver a la senda de un consumo energético responsable, utilizando la gran incorporación de GD que ha presentado el país y que son difíciles de gestionar. Llevándose a cabo con una distribución activa y que este en plena respuesta de la demanda que la población genera.

Otras iniciativas similares se han desarrollado en distintas partes del mundo. Dentro de los proyectos desarrollados se destacan: EncorpVirtual PowerPlant, STEAGProject, Virtual Power Plant NATCON7, NTT research centre, Japan (control-communication) y Decentralized Energy Management System by SIEMENS.

### 2.3. Energías renovables No Convencionales en Chile

Las energías renovables son aquellas que se producen o llegan en forma continua a la Tierra y que a escala de tiempo real parecen ser inagotables. (CCHEN, 2010).

Son fuentes de energía renovable:

- Energía Hidráulica,
- Energía Solar,
- Energía de Biomasa,
- Energía Mareomotriz,
- Energía Geotérmica.

Dentro de las Energías Renovables se encuentran las ERNC, que se definen como todas aquellas que generan energía eléctrica provenientes de fuentes de energías primarias, mediante medios de generación que no han sido explorados masivamente en Chile, los medios de generación deben presentar ciertas características que son resumidas en el Cuadro 1 (Ley 20.257, 2008)

**Cuadro 1.** Características de generación de las ERNC, según Ley 20.257.

Tipo de ERNC de acuerdo a su fuente de energía renovable	Característica
Energía Solar Energía Eólica	Es obtenida de la radiación solar Es obtenida de la energía cinética del viento
Energía de la Biomasa	Es obtenida de materia orgánica y biodegradable, la que puede ser usada directamente como combustible o convertida en otros biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. Se entenderá incluida la fracción biodegradable de los residuos sólidos domiciliarios y no domiciliarios

<b>Tipo de ERNC de acuerdo a su fuente de energía renovable</b>	<b>Característica</b>
Energía Hidráulica	Es obtenida desde la energía producida por la energía cinética del agua y cuya potencia máxima sea inferior a 20.000 kilowatts.
Energía mareomotriz	Es obtenida a través de la energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, de las olas y de las corrientes, así como la obtenida del gradiente térmico de los mares.
Energía Geotérmica	Es obtenida del calor natural del interior de la tierra.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la Ley 20.257, inciso 4, letra aa

### 2.3.1. Fuentes de energías renovables en Chile

Las fuentes de energía renovables son los recursos naturales renovables que se utilizan para la generación de energía como se muestra en el siguiente cuadro:

**Cuadro 2.** Tipo y fuente de energía renovables

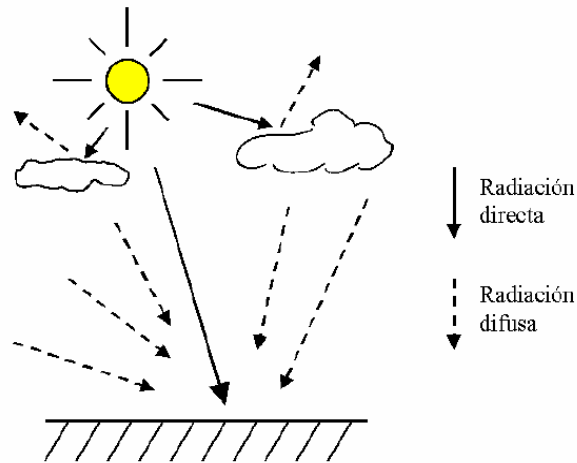
<b>Tipo de Energía</b>	<b>Fuente de Energía</b>
Energía Solar	Sol
Energía Eólica	Viento
Energía Biomasa	Biomasa
Energía Hidráulica	Agua
Energía Mareomotriz	Mares
Energía Geotérmica	Centro de la Tierra

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la Ley 20.257, inciso 4, letra aa

El GeVi pretende utilizar 5 fuentes de energía renovable no convencional, eólica, solar, biomasa, micro hidráulica y geotérmica. En este documento se explorarán sólo las primeras cuatro fuentes de energías mencionadas, las que se definirán en los puntos siguientes.

### 2.3.2. Energía Solar

La energía solar es nuestra mayor fuente de energía., El calor y la luz que produce el Sol provienen de la fusión nuclear que convierte la masa en energía, liberando una enorme cantidad de energía que surge en forma de radiación (Aburto, 2007). La radiación solar que llega al exterior de la Tierra se denomina Radiación Extraterrestre  $R_e$  y la radiación que traspasa la atmósfera de la Tierra se denomina Radiación Global ( $R_g$ ) (Figura 2). Aunque sólo una pequeña parte de la radiación solar llegue a la Tierra, esta afecta a todos los aspectos de la vida en nuestro planeta (Romero, 1985).

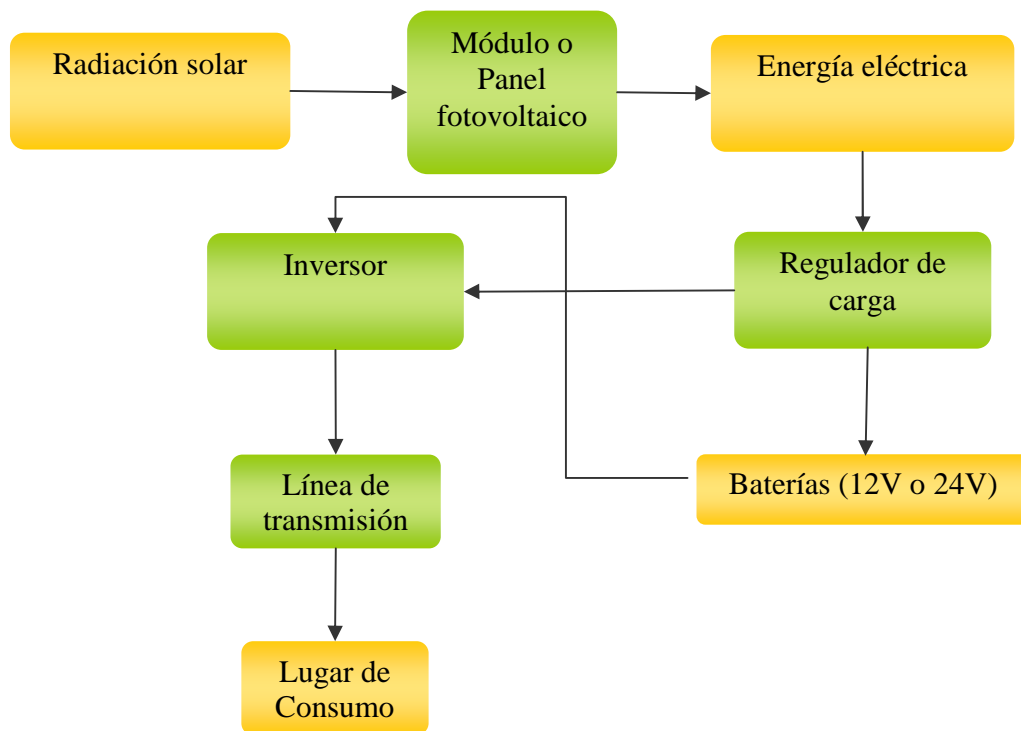


**Figura 2.** Esquema de radiación solar directa y difusa.

**Fuente:** Imagen extraída desde “Energía solar: Aplicaciones e ingeniería”. Sarmiento, 1995.

La energía solar es aprovechada de forma biológica por plantas, utilizando la radiación solar para hacer reaccionar químicamente las moléculas de hidrógeno y carbono presente en el aire para transformarlas en materia orgánica y poder crecer. También es convertida en energía calórica al encontrarse con algún cuerpo que esté en su trayectoria, actualmente esta propiedad se ha aprovechado a través de distintas tecnologías para sistemas de calefacción o generación de electricidad. Estudiando las propiedades de algunas sales se descubrió que se puede aprovechar la radiación solar directamente a través de módulos o paneles solares que son las estructuras que transforman la radiación solar en energía eléctrica, este tipo de tecnología es la que se ha seleccionado para ser aplicada en la Iniciativa GeVi.

En aplicaciones de sistemas aislados, se necesitan de un sistema de acumulación de energía, que permita el almacenamiento de la energía excedente, un sistema de control y acondicionamiento de potencia. Al conjunto de los sistemas mencionados se les denomina sistema fotovoltaico (Román, 2009). En la Figura 3 se presenta el esquema general de la obtención de energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico.



**Figura 3.** Esquema general de la obtención de energía eléctrica a través de un sistema fotovoltaico<sup>1</sup>.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de la Figura. “El sistema fotovoltaico”. Román, 2009.

### 2.3.3. Energía Eólica

La energía eólica es considerada una forma indirecta de energía solar, puesto que es producida por el movimiento de las masas de aire desde zonas cálidas a zonas menos cálidas. Utilizando la energía cinética de la masa de aire que se libera al encontrarse con un obstáculo. De esta forma se utiliza para impulsar unas aspas que a través de engranajes accionan una turbina que genera energía eléctrica. Este tipo de maquinaria se le conoce como aerogeneradores (CERE - UMAG, 2005). Según el tipo de eje del aerogenerador estos pueden ser de eje horizontal o de eje vertical. Los primeros tienen su eje de rotación paralelo al suelo y el segundo tiene el eje de rotación perpendicular al suelo (Kunstmann, 2009). En la Figura 4 se muestran los dos tipos de ejes utilizados en los aerogeneradores.

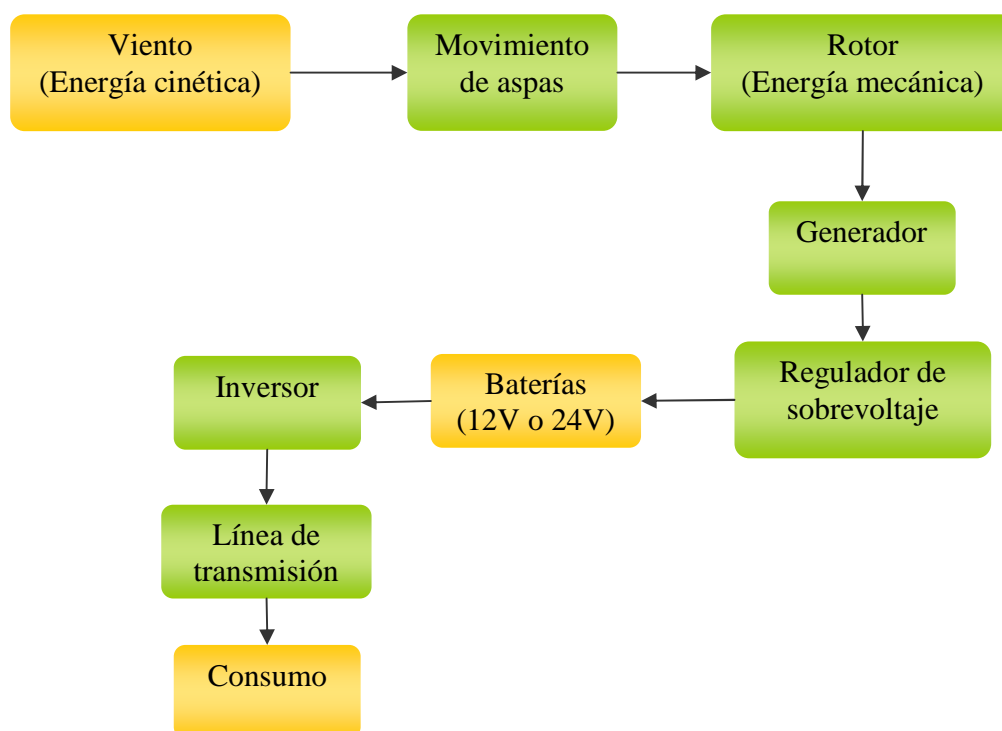
<sup>1</sup> Para equipos tecnológicos iguales en los esquemas de obtención de energía eléctrica para las energías renovables se diferencian los que pueden variar de acuerdo a la potencia inicial de entrada (color naranja) y las componentes que representa a los equipos tecnológicos. Esto es aplicado a todos los esquemas.



**Figura 4.** Aerogenerador de eje horizontal tri-pala (izquierda) y aerogenerador de eje vertical (derecha).

**Fuente:** Imágenes obtenidas desde documento en línea de Alex Fernández.

En la siguiente figura se muestra esquema general de la generación de energía eléctrica a través de aerogeneradores:



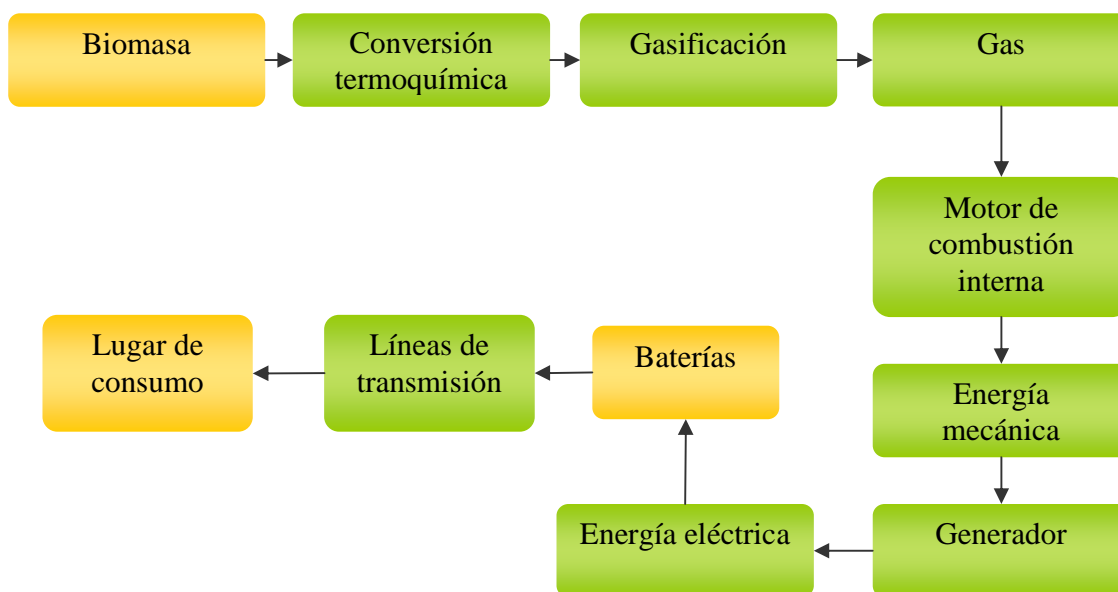
**Figura 5.** Esquema general de generación energía eléctrica a partir de energía eólica.

**Fuente:** Elaboración a partir de “Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical” (Antezana, 2004).

### 2.3.4. Energía de la Biomasa

En la actualidad se acepta el término **biomasa** para denominar al grupo de productos energéticos y materias primas de tipo renovable que se originan a partir de la materia orgánica formada por vía biológica (De Juana, 2003). En la normativa nacional la biomasa para la producción de energía eléctrica se considera como toda la materia orgánica y biodegradable que pueda ser usada directamente como combustible o convertida en sus derivados, tales como biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos domiciliarios y no domiciliarios (Ley 20.257, 2008). Para la producción de energía eléctrica existen dos formas de producción: por conversión termoquímica y por conversión bioquímica.

**Conversión termoquímica:** Este tipo de conversión se hace a través de un proceso de gasificación por pirólisis, donde principalmente se combina el oxígeno con vapor caliente que interactúa con un carburante que puede ser madera, residuos agrícolas, residuos de podas, etc. La pirólisis se efectúa a temperaturas sobre los 1000 °C, con presiones mayores a la atmosférica. En la Figura 6 se muestra un esquema general de generación de energía eléctrica a partir de gasificación de la biomasa, mediante conversión termoquímica (Gutiérrez, 2009).

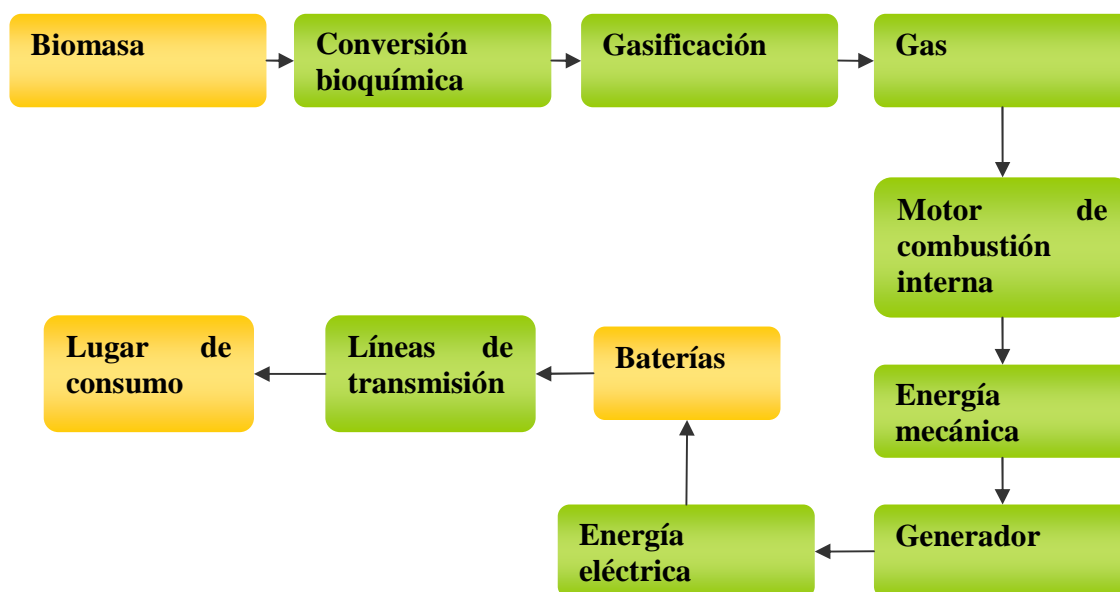


**Figura 6.** Esquema general de generación de energía eléctrica a partir de gasificación de la biomasa, mediante conversión termoquímica.

**Fuente:** Elaboración a partir de la presentación de “Conversión termoquímica de la biomasa” (Gutiérrez, 2009).



**Conversión Bioquímica:** Este tipo de conversión se realiza a través de un proceso de fermentación anaeróbica con el cual se obtiene gas metano. En el proceso se utiliza como materia prima estiércol o aguas residuales que contengan desechos orgánicos, esta es homogenizada en una mezcla que alimenta a un biodigestor con temperatura controlada. El proceso ocurre en un ambiente anaeróbico (sin oxígeno) lo que genera el crecimiento de una bacteria que descompone la materia orgánica hasta producir biogás, el cual es utilizado para motores de combustión interna para impulsar generadores eléctricos. En la Figura 6 se muestra un esquema general de generación de energía eléctrica a partir de gasificación de la biomasa, mediante conversión bioquímica (Larkin *et al*, 2004).



**Figura 7.** Esquema general de generación de energía eléctrica a partir de gasificación de la biomasa, mediante conversión bioquímica.

**Fuente:** Elaboración a partir de la presentación de “Conversión termoquímica de la biomasa” (Gutiérrez, 2009).

### 2.3.5. Energía Hidráulica

La energía hidráulica es una energía primaria y proviene de un recurso natural, como lo es el agua (CNE, 2010). La energía eléctrica a través de la energía hidráulica se produce por el movimiento de agua, producto de una gradiente de altura, a través de una turbina que esta conectada a un generador que produce energía eléctrica.

De acuerdo a la Ley 20.257 la energía hidráulica se clasifica de acuerdo a la potencia máxima de generación. Centrales con potencia máxima mayor a 20 MW se consideran como Energías Renovables Convencionales e inferior a 20 MW se consideran Energías Renovables No Convencional (ERNC). De acuerdo al carácter de la memoria sólo se hará referencia a las ERNC.

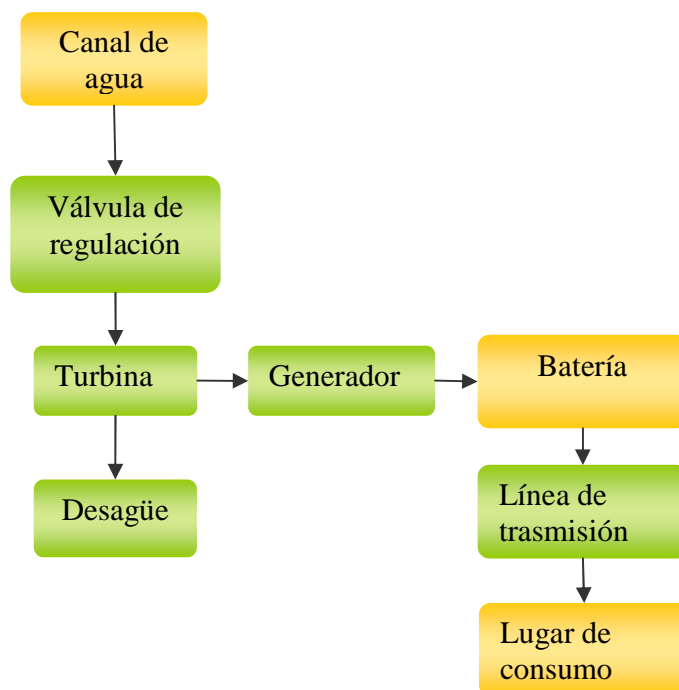
La CNE (2010) se clasificó el tipo de centrales hidroeléctricas de acuerdo al tamaño, como se muestra en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Clasificación de centrales hidroeléctricas.

Tipo de central	Potencia energética
Grandes centrales	Superior a 5 [MW]
Pequeñas centrales	Entre 1 y 5 [MW]
Mini centrales	Entre 100 [kW] y 1[MW]
Microcentrales	Entre 1,5[kW] y 100[Kw]
Hidrocargadores	Menores a 1,5[kW]

**Fuente:** CNE, 2010.

Para efectos de la memoria se considerará la implementación de centrales con potenciales energéticos menores a 5 [MW]. Este tipo de centrales tienen la particularidad de estar operativas entre 1 ó 2 años como máximo, tienen una baja mantención y son de fácil operación (Rolf, 2004). En la Figura 8 se muestra un esquema general de obtención de energía eléctrica a través de una central micro hidráulica.



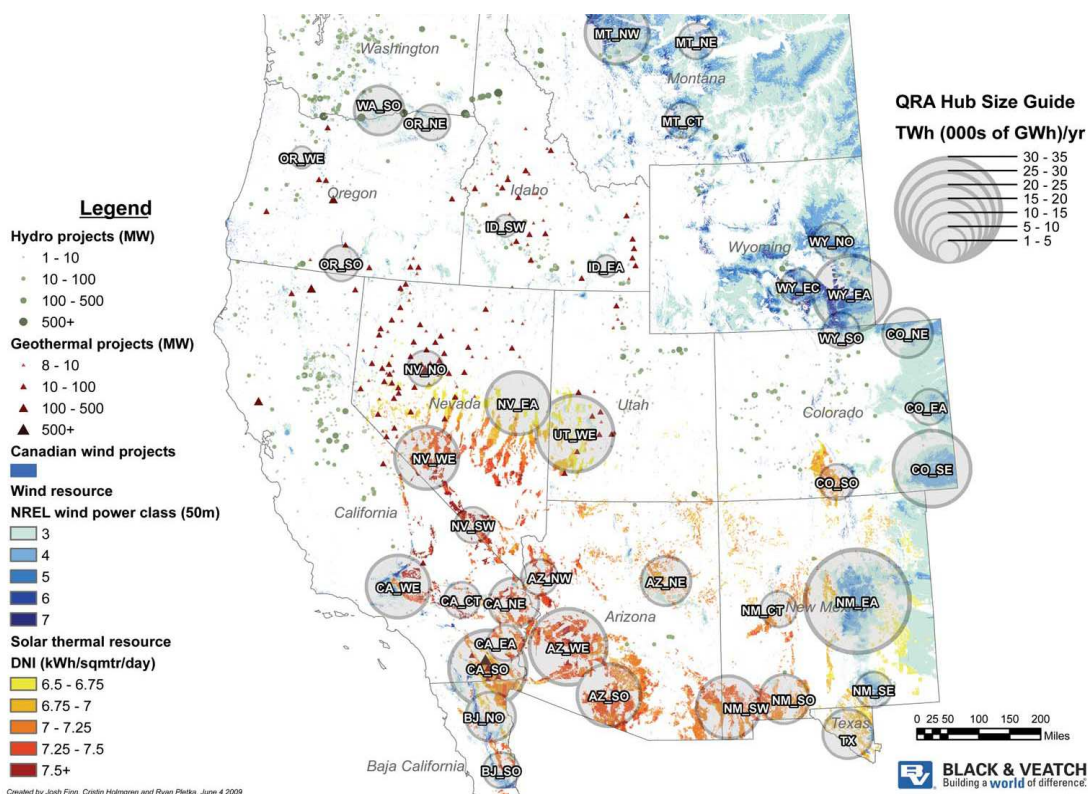
**Figura 8.** Esquema de micro central de pasada.

**Fuente:** Elaboración según “Control electrónico de una central micro-hidráulica para su aplicación en generación distribuida” (Mendoza, 2006).

## 2.4. Experiencia internacional en la exploración de FER

Los centros de investigación han generado la información necesaria para dar soporte técnico a proyectos de generación eléctrica que utilicen fuentes de energías renovables. Un ejemplo de ello es el **Natural Resources Canada (NRCan)**. Proyecto Canadiense que a elaborado una recopilación de información del potencial energético de los Recursos Naturales que existen en el país, con el objetivo de desarrollar proyectos de energía renovables. Esto ha generado un programa que fue lanzado el año 1998 llamado RETScreen™ el cual sirve para evaluar económicamente proyectos de acuerdo a el emplazamiento y a los recursos naturales que se encuentran en el sitio escogido (Alward, 2000).

En Estados Unidos la Asociación de Gobernadores del Oeste en conjunto con el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha elaborado propuestas locales de desarrollo en cuanto a la base de información necesaria para apoyar el desarrollo de las energías renovables dentro de los trabajos se destaca el **Western Renewable Energy Zones – Phase 1 Report**. El que entrega una cartografía (Figura 9) con los recursos de alta calidad que puedan satisfacer la demanda en el mercado de las zonas distantes a las zonas de interconexión.



**Figura 9.** Potencial energético de la zona occidental de Estados Unidos.  
**Fuente.** Western Governors' Association and U.S. Department of Energy.

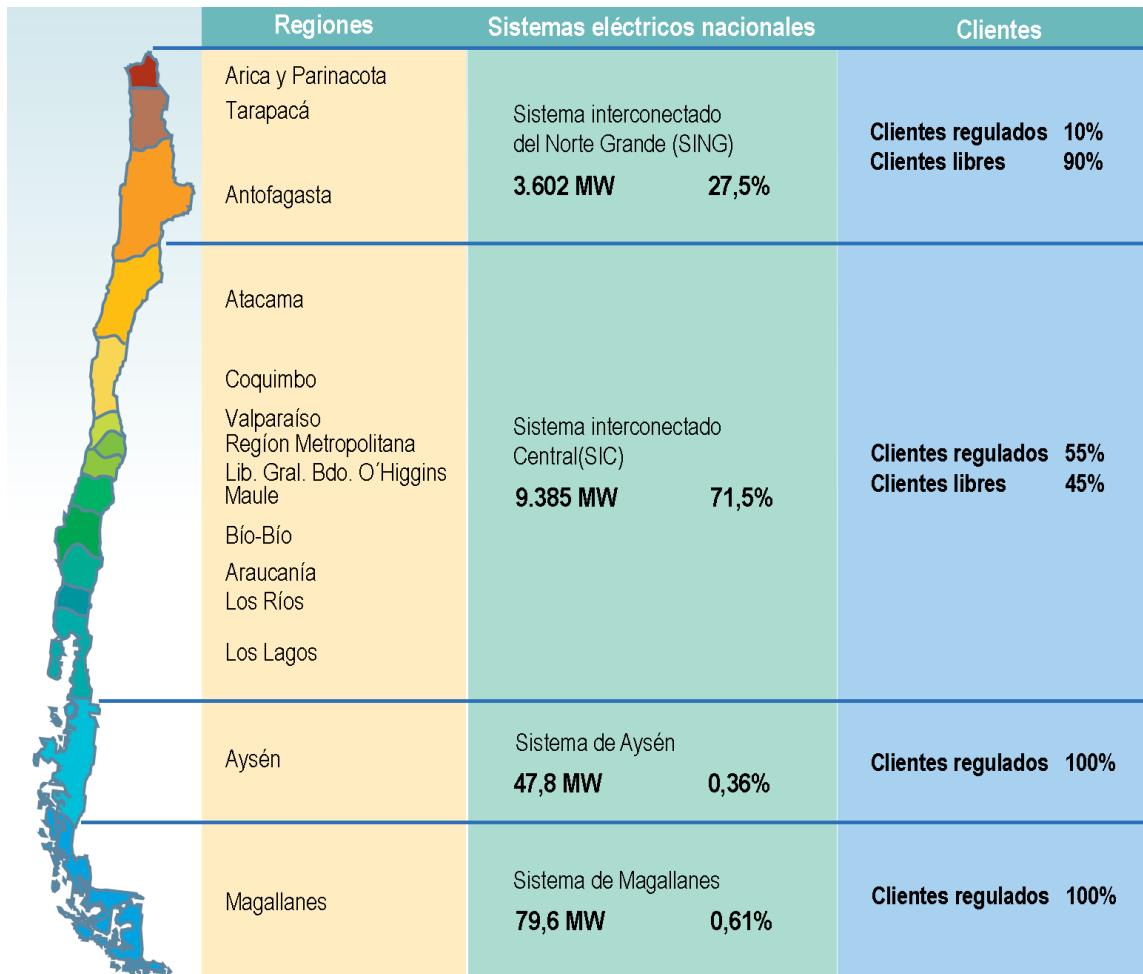
El proyecto excluyó ciertas áreas que no eran compatibles con el desarrollo de proyectos energéticos, tales como:

- Humedales/cuerpos de agua,
- Superficies de minas,
- Zonas urbanas,
- Aeropuertos,
- Tierras militares (espacio aéreo militar y áreas de operación no fueron considerados para la exclusión debido a que son un requisito de revisión a nivel de proyecto ya que fueron considerados en la disminución de la capacidad de desarrollo).
- Zonas con excesote inclinación (mayor que 2 por ciento para la energía solar y 20 por ciento para la energía eólica).

## **2.5. Sistema eléctrico nacional**

El sistema eléctrico en Chile se establece según la estructura del mercado eléctrico de Chile desde 1982 de acuerdo al DFL 1 del Ministerio de Minería, es abierto y está compuesto por las actividades de generación, transmisión y distribución. Estas actividades son ejecutadas como un sistema conjunto, permitiendo generar, transportar y distribuir energía eléctrica, ya que se encuentran interconectadas entre sí (Galaz, 2008). La regularización, fiscalización y planificación indicativa de expansiones es ejercida por el Estado, en temas de planificación se dividió el territorio en cuatro zonas cada una controlada por un sistema interconectado independiente, recibiendo los nombres de: Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), Sistema Interconectado Central (SIC), Sistema Interconectado de Aysén y Sistema Interconectado de Magallanes.

Los sistemas eléctricos nacionales se encuentran distribuidos en el territorio como se muestra en la Figura 10.



**Figura 10.** Capacidad instalada por sistema eléctrico en Chile 2008.

**Fuente:** CNE, 2009.

La estructura de precios de mercado eléctrico se genera a través de tres mercados en los que se realizan transferencias de Energía y Potencial, con sus respectivos precios (Galaz, 2008):

- Mercado Spot → Precio Spot o Costo Marginal
- Mercado Regulado → Precio Nudo (Estabilizado por norma)
- Mercado Libre → Precio Libre

Los actores que interactúan el sistema eléctrico corresponden al tipo privado y público. Los actores privados se componen de las empresas generadoras, de transmisión, distribución y los clientes. Los clientes se clasifican según la magnitud de su demanda en (Galaz, 2008):

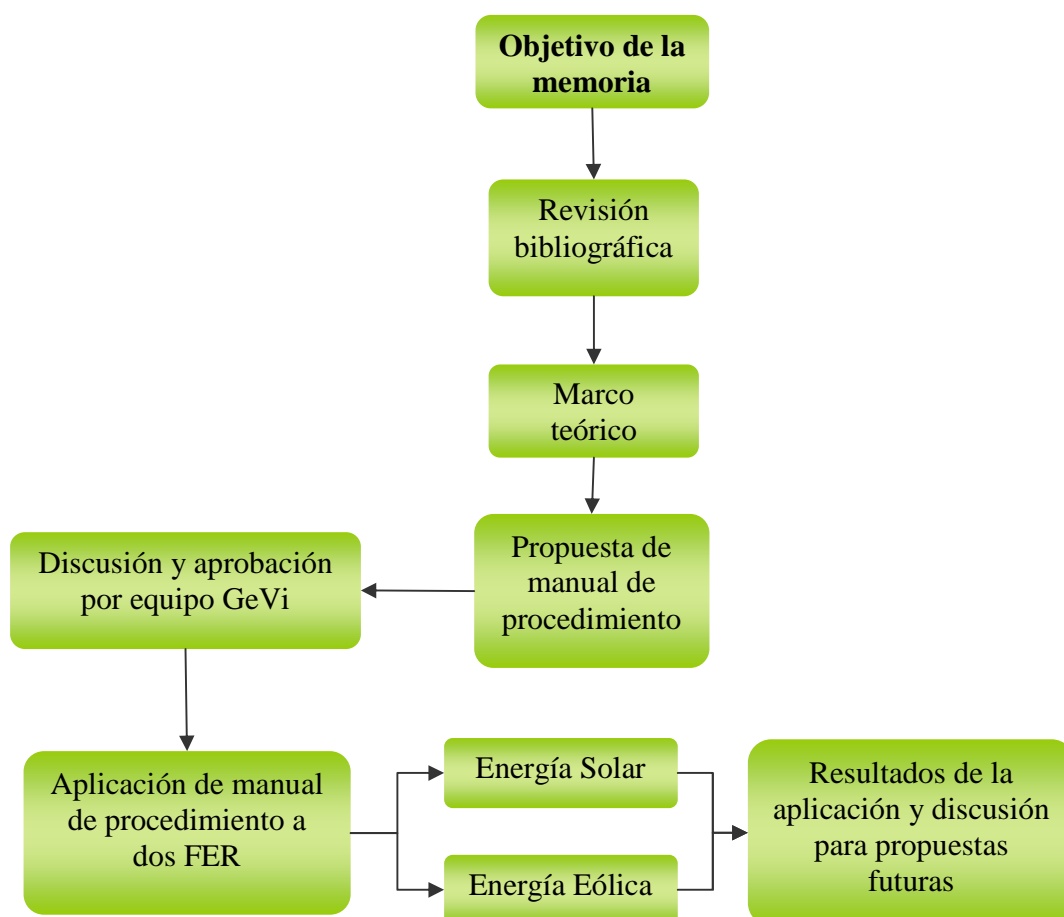
- Clientes sometidos a regulación de precios a través de normas (Clientes regulados): Consumidores cuya potencia conectada es inferior igual a 500 kW.
- Clientes con opción de ser sometidos a regulación de precios o no: Consumidores cuya potencia conectada es superior a 500 kW e inferior a 2.000 kW.

- Clientes no sometidos a regulación de precios y pueden negociar el precio de la energía: Consumidores cuya potencia conectada es superior a 2.000 kW.

Como se muestra en la Figura 10, una alta demanda de energía por parte de los clientes libres en el SING se debe a la presencia de grandes compañías mineras que requieren gran cantidad de energía para sus operaciones. En el resto del país los clientes regulados son mayores que los clientes libres, es decir aquellos consumidores que su potencia conectada es menor a 2.000 kW, este panorama puede ser una oportunidad para desarrollar fuentes aisladas de generación en base a un GeVi (CNE, 2009).

### 3. REVISIÓN METODOLOGICA

Para el desarrollo de la memoria se utilizaron principalmente fuente de datos secundarios, los cuales están compuestos por revisión de artículos especializados, estudios existentes, informes técnicos, metodologías validadas de prospección de energías renovables y libros relacionados con el tema. Además, se utilizó el software de SIG para la generación de cartografía de acuerdo a la aplicación de la metodología, a modo de ejemplo, utilizando el método propuesto. A continuación, en la Figura 11 se muestra un esquema general de las etapas seguidas para la realización de esta investigación.



**Figura 11.** Esquema general de la metodología implementada

El estudio se lleva a cabo, principalmente con el apoyo de material bibliográfico sobre las ER y metodologías de prospección de FER. Una vez analizados los antecedentes se estructuró esta propuesta metodológica de acuerdo a la metodología de análisis multicriterio (AHP, por sus siglas en inglés) y la Planificación Ecológica del Territorio (guía metodológica) que nació del proyecto de Ordenamiento Territorial Ambiental Sustentable (OTAS). En la estructuración de esta propuesta se rescataron puntos importantes en cuanto a los criterios seleccionados para la generación de cartografías digitales como una herramienta de ayuda para tomas de decisiones en torno a un territorio.

### **3.1. Procedimiento para identificar recursos naturales disponibles para la generación de energía.**

Un proyecto de generación eléctrica depender de su factibilidad técnica y económica. Los estudios realizados a priori son de gran importancia para disminuir los riesgos y los errores en la ejecución (CNE, 2007).

Esta propuesta metodológica pretende forjar una herramienta metodológica y propositiva para la generación de cartografía de las diferentes fuentes de energías renovables y una cartografía que contenga la adición de todas las fuentes existentes en la zona de estudio, esto con el objeto de crear un catastro y una base sólida para la toma de decisiones en la planificación del territorio.

Para establecer la propuesta metodológica primero se escogieron cuatro FER que fueran relevantes para la Iniciativa GeVi y que tuvieran un cierto desarrollo en el ámbito nacional, es así como se escogió la fuente de generación eólica, solar, biomasa y mini hidráulica. Luego se buscó información bibliográfica sobre cada una de las fuentes de energía seleccionadas, generando un marco teórico, el cual se utilizó para lograr establecer los criterios que modifican el potencial energético del recurso e identificar la información mínima que se requiere para la generación de la cartografía de potenciales energéticos de las FER.

A partir de los antecedentes obtenidos en el marco teórico se procedió a establecer formas de prospecciones para cada una de las FER, dejando las bases e información necesaria para desarrollar un análisis multicriterio (AHP) en el futuro, en el cual se deberían considerar las “estrategias para la intervención tecnológicas de energías renovables no convencionales en comunidades rurales”. En Chile existe una experiencia similar en el ámbito de la planificación territorial, al incorporar la Planificación Ecológica del Territorio como una herramienta propositiva en la toma de decisiones.

Determinar el potencial energético de una zona geográfica para la instalación de un GeVi es de gran importancia para priorizar el tipo de ER que se instalará para la generación de energía eléctrica, lo cual genera diferentes tipos de inversiones y costos en la ejecución del proyecto. Por ello el generar estrategias de selección, intervención y prospección de las



FER, el igual que los lugares de instalación deben ser evaluados a priori y en conjunto con la comunidad que habita el territorio.

Para el tratamiento de los datos recopilados en la elaboración de la cartografía de potencial energético se utilizan tradicionalmente soluciones geostadísticas ya que se ha encontrado la forma de cumplir con uno de los principios de la estacionaridad en los casos en que no existe a través de la aplicación de modelos de regresión múltiple de carácter global o local (Fotheringham *et al.*, 2000). De igual manera, la adecuación de muchos de estos modelos a plataformas SIG ha permitido aplicaciones a grandes matrices de datos, hecho que resulta valioso en aplicaciones de modelación topo climática y potencial energético de fuentes de energías renovables, a su vez toda magnitud adquirida de un modelamiento debe ser corroborada a través de mediciones In situ (CNE, 2009).

### **3.2. Prospección para fuente de energía Solar**

Las relaciones astronómicas y trigonométricas que existen entre el Sol y la superficie terrestre, además de los factores topográficos y atmosféricos característicos de la Tierra, son las principales variables que modifican la radiación solar que ingresa a la Tierra. La influencia de cada una de estas variables se obtiene a través de la utilización de fórmulas matemáticas generalizadas para cualquier ubicación geográfica en la Tierra. En este sentido, la evaluación de ciertas variables que modifican la radiación solar estarán dirigidas al análisis de los principales factores atmosféricos que varían de acuerdo a los fenómenos meteorológicos que ocurren a lo largo de la zona central de Chile, considerando los métodos empíricos más apropiados para estimar la cobertura nubosa de la atmósfera y el coeficiente de transparencia de la atmósfera (Aburto, 2007).

La metodología escogida para estimar la radiación solar y el potencial energético en esta investigación, considera principalmente un análisis estadístico y análisis espacial, clasificando y evaluando las variables necesarias y relevantes.

#### **Fuentes de datos**

Los datos requeridos para las estaciones en tierra son: latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar y localidad donde se encuentran emplazadas geográficamente cada una de las estaciones de medición clasificadas. Además, se consideran valores medios mensuales diarios de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, nubosidad, radiación solar global sobre una superficie horizontal, radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y coeficiente de transparencia de la atmósfera.

Las variables solarimétricas necesarias tales como la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y el coeficiente de transparencia de la atmósfera, fueron obtenidas a través de la utilización las siguientes fórmulas matemáticas, señaladas en la revisión bibliográfica:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_n}{365}\right) \quad \text{ec. 1}$$

$$\delta = \sin^{-1}\left[0,4 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365}\right)\right] \quad \text{ec. 2}$$

$$\omega_h = \pm \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad \text{ec. 3}$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[ \text{sen} \delta \cdot \text{sen} \phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180} + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen} \omega_h \right] \quad \text{ec. 4}$$

$$K = \frac{R_g}{R_e} \quad \text{ec. 5}$$

Con estas ecuaciones empíricas se pueden obtener valores medios mensuales o diarios. Para los valores de nubosidad de la zona de estudio se plantea expresarlo a partir del ciclo anual que presenta el Lugar de Presión Máxima (LPM) en Chile y la nubosidad promedio a través de una relación lineal que se expresa de la siguiente forma:

$$C = A + B \cdot (LPM - LAT) \quad \text{ec. 6}$$

Donde C es la nubosidad media mensual en porcentaje respecto del máximo teórico, las variables A y B corresponden a constantes relacionadas con la regresión lineal, LPM es la latitud correspondiente al Lugar de Presión Máxima en Chile para cada mes y LAT representa la latitud del lugar donde se quiere estimar la cobertura nubosa. Los coeficientes A y B que aparecen en la ecuación mencionada anteriormente (ec. 6) se estimaron a través de un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Stepwise.

Para introducir las variables astronómicas, trigonométricas y topográficas en el cálculo de la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, se considera la rutina PINSOL.BAS publicada por la United States Department of Agriculture (2003). Mientras que, el método empleado para incorporar la variable atmosférica en el modelo de estimación de la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, se basa en incluir los valores medios mensuales o diarios de la nubosidad de la atmósfera, el coeficiente de transparencia de la atmósfera, el espesor atmosférico, la transmisividad atmosférica, la radiación solar difusa y la radiación solar directa. Esto se realiza a través del “modelo de estimación gráfica de la distribución espacial de la radiación solar global” (ver Anexo 2), el procedimiento es un extracto del texto de Aburto (2007).

Una vez obtenidos los valores correspondientes a la irradiación solar global media mensual estimada sobre una superficie horizontal para una serie de estaciones de monitoreo ubicadas

dentro de la zona de estudio, se procede a validar estos resultados a través de un análisis de regresión. Este procedimiento permitirá evaluar estadísticamente el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación solar global estimada y medida sobre una superficie horizontal para una serie de estaciones de medición incluidas en la base de datos de esta investigación. En este caso, el grado de explicación del modelo matemático utilizado para estimar la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal se obtuvo a través del error cuadrado medio. Para incorporar la variedad de altitudes, pendientes y orientaciones que caracterizan la topografía del territorio chileno, se utiliza un modelo matemático capaz de representar la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre correspondiente a la zona de estudio (Aburto, 2007).

Considerando los métodos empíricos más apropiados desarrollados en la investigación de Aburto (2007) para estimar los valores medios mensuales de la cobertura nubosa de la atmósfera, el coeficiente de transparencia de la atmósfera y la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, junto con la rutina PINSOL.BAS, se recomienda utilizar el método computacional de simulación gráfica de la radiación solar global a partir de los atributos de programación que ofrece el programa Qbasic. La rutina de programación se puede ver en Anexo 2. El resultado de esta metodología se presenta en unidades de  $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ . Para la transformación de unidades debemos recordar que  $1[\text{J/s}]$  equivale a  $1 [\text{W}]$ , de esta forma podemos relacionar  $1[\text{MJ/s}]$  equivale a  $11,574074074074 [\text{W}]$ .

Los programas de GIS pueden calcular la Radiación global ( $R_g$ ) a través de la suma de la Radiación directa ( $R_{dir}$ ) y la Radiación difusa ( $R_{dif}$ ), este mecanismo se realiza a través de las siguientes expresiones:

La **radiación directa** en un punto del espacio es la que atraviesa la atmósfera y llega a la superficie terrestre sin haber sufrido desviación alguna, se calcula con la siguiente fórmula (Rich, 1989 y Rich 1990):

$$R_{dir} = WRR T^{m(\theta)} \text{Tray}_s \cos(\text{AngIn}_{(\theta,\alpha)}) \quad \text{ec. 7}$$

donde:

$R_{dir}$  es la Radiación directa

$WRR$  es la constante solar ( $1.367[\text{W}/\text{m}^2]$ )

$T$  es la transmisividad de la atmósfera (con la longitud media de todas las ondas) para la ruta más corta

$m(\theta)$  es la longitud relativa del recorrido del sol, medido como el porcentaje de la longitud del trayecto de este al cenit

$\text{Tray}_s$  son las horas de sol de un día

$\text{AngIn}_{(\theta,\alpha)}$  es el ángulo de incidencia entre el cenit y el azimut

El  $m(\theta)$  se determina por el ángulo cenit ( $\theta$ ) y la elevación sobre el nivel del mar ( $\beta$ ). La expresión esta dada por:

$$m(\theta) = \exp(-0,000118 \beta - 1,638 \times 10^{-9} \beta^2) / \cos(\theta) \quad \text{ec. 8}$$

Esto significa que principalmente el cálculo de la radiación directa depende de:

- La posición del sol.
- Orientación del superficie terrestre
- Atenuaciones atmosféricas (densidad del aire)
- Radiación solar fuera de la atmósfera en ese lugar

Dentro de los factores más relevantes que modifican la trayectoria de la radiación están las nubes, las cuales se presentan la mayor parte del tiempo en el cielo provocando que la radiación se refleje y se disperse, de esta forma se genera la radiación difusa.

La **radiación difusa** en un punto del espacio es la cantidad de energía solar que incide sobre una superficie horizontal desde todos los lugares de la atmósfera, es así como la radiación difusa se calcula de la siguiente forma (Percy, 1989):

$$R_{\text{dif}} = R_g P_{\text{dif}} D \cos(\text{AngIn}_{(\theta, \alpha)}) \quad \text{ec. 9}$$

donde:

**R<sub>g</sub>** es la radiación global

**P<sub>dif</sub>** es la proporción de la radiación global que se difunde por obstáculos, con valores de 0,2 para cielos despejados y 0,7 para cielos nublados

**D** Es el tiempo en minutos para el análisis

**AngIn<sub>(θ,α)</sub>** es el ángulo de incidencia entre el cenit y el azimut

En términos generales los factores que alteran la radiación difusa son:

- Altura del sol sobre el horizonte
- Cantidad de partículas en la atmósfera
- Nubosidad
- Altura sobre el nivel del mar

A través del cálculo de la radiación directa y de la radiación difusa se puede obtener la radiación global total (**R<sub>g</sub>**) que esta expresada por:

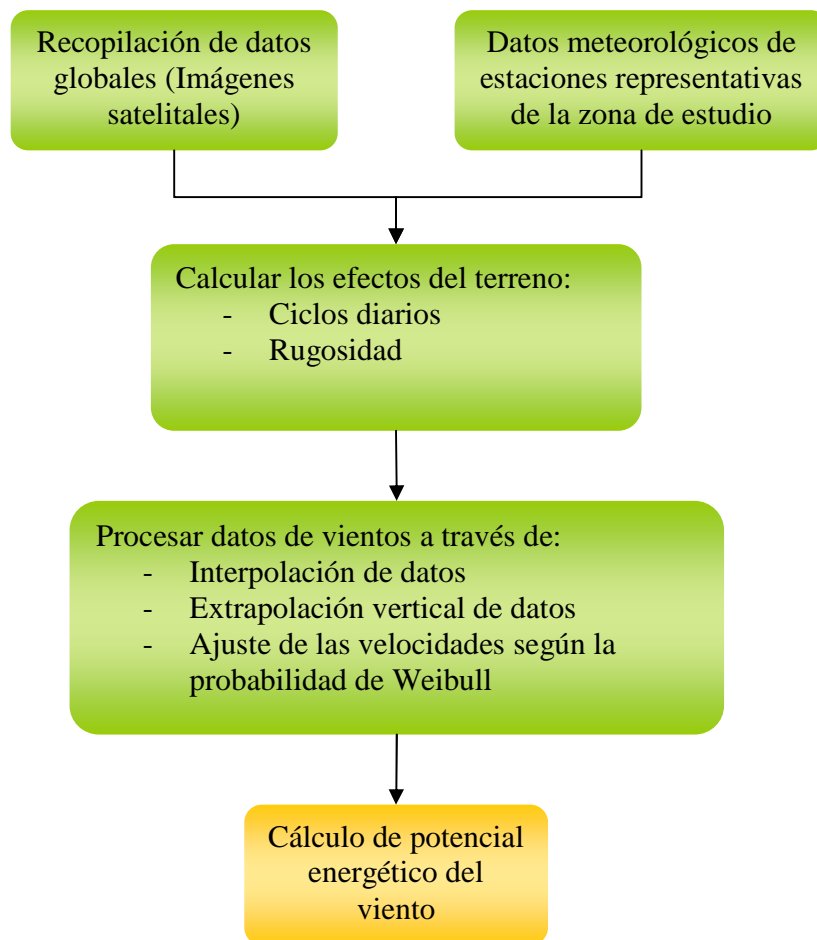
$$R_g = R_{\text{dir}} + R_{\text{dif}} \quad \text{ec. 10}$$

A través de estos cálculos se obtiene el potencial energético que llega a la superficie de la tierra [**W/m<sup>2</sup>**]. Sin embargo, el cálculo final del potencial energético que podemos extraer de la radiación solar estará dado por la eficiencia de conversión de las celdas fotovoltaicas, por lo que debemos multiplicar este porcentaje por el potencial energético de la radiación solar entregado por la metodología expuesta.

### 3.3. Prospección para fuente de energía Eólica

La metodología propuesta para calcular el potencial energético del viento se basa en propuestas realizadas por: Aceituno *et al* (1996), CNE (2009), Lang (2010) y LeGac (2010). Las cuales se muestran en la Figura 12 en forma esquemática. Esta propuesta consta de 2 procesos:

- 1.- Caracterización del viento según la topografía del lugar de estudio.
- 2.- Cálculo del potencial energético de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia.



**Figura 12.** Esquema de metodología para cálculo de potencial energético.

**Fuente de datos:** Esquema trabajo Calmet ajustado de acuerdo a Lang (2010).

Se requiere localizar y caracterizar el viento (intensidad y dirección) en la zona que se desea estudiar, revisando datos de estaciones meteorológicas e imágenes satelitales. Dentro de los datos se considera, modelos de elevación digital, velocidades de viento horarias, usos de suelo y datos meteorológicos en general. Las fuentes de datos recomendadas con

información necesaria son de la Dirección meteorológica de Chile, Centro de Información de Energías Renovables, Dirección General de Aguas, Servicio Meteorológico de la Armada y todas las fuentes privadas y públicas que se pueda obtener acceso<sup>2</sup>.

### Análisis de datos de viento

Primero se deben normalizar los datos de viento observados de la superficie, esto se realiza a través de la extrapolación a las capas superiores que deseamos estudiar (altura del aerogenerador que instalaremos). Para ello se utilizará la ecuación de ley de potencia, la cual es una de las más utilizadas en los estudios de potencial de energía eólica (Zhou et al, 2006).

$$u_z = u_m \left( \frac{z}{z_m} \right)^P \quad \text{ec. 11}$$

Donde  $z$  es la altura (m) a la que queremos extrapolar,  $z_m$  es la altura de medición (10 m normalmente),  $u_m$  es la velocidad de viento (m/s) a la altura  $z_m$ ,  $u_z$  es la extrapolación de la velocidad de viento  $u_m$  a la altura  $z$  y  $P$  es el exponente de la ley de energía, que está dado por la rugosidad del terreno (ver Cuadro 4).

Los valores para el exponente  $P$  están dados por un modelo específico, según Douglas y Kessler (1988).

**Cuadro 4.** Valores para el exponente  $P$ .

Tipo de obstáculo (Rugosidad)	Valor del coeficiente $P$
Lugares llanos con hielo i hierba	0,08 - 0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,13 - 0,16
Zonas rústicas	0,2
Terrenos accidentados, bosques	0,2 - 0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0,25 - 0,4

**Fuente:** Douglas y Kessler, 1988.

\* El coef  $P = 0,143$  se utiliza la tierra y el  $0,286$  se utiliza en agua.

<sup>2</sup> Comunicación personal de Luis Morales, 2010. Profesor Asociado / Jornada Completa del Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile.

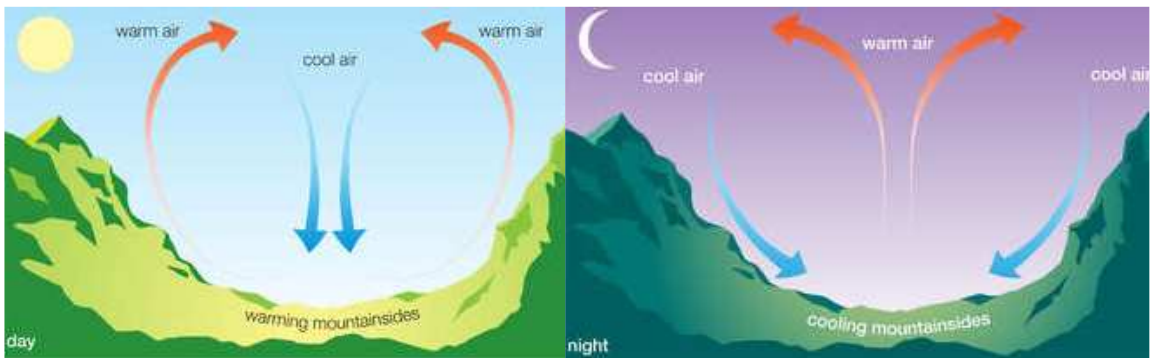
## Ajuste de registros de datos

Los análisis de los datos de viento para la generación de energía eléctrica se realizarán con rapidez media mensual ( $\bar{V}$  [m/seg]), la desviación estándar e intensidad de la turbulencia ( $I_t$ , en %) de los datos normalizados del viento (a la altura que se instalarán las turbinas de viento) se calculan utilizando las siguientes ecuaciones (Villarrubia, 2004):

$$v_m = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - v_m)^2}, \quad I_t = \frac{\sigma}{v_m} \cdot 100$$

De esta forma se determinarán los parámetros de la distribución estadística (log-normal o Weibull) que mejor se ajuste a los datos de potencia eólica media y la potencia generable a 25 m sobre el suelo, realizando correcciones por efecto acelerador y efecto bloqueo.

Ciclos diarios de viento: Es el fenómeno conocido como brisa de montaña o brisa del valle. Durante el día la radiación solar calienta rápidamente el aire del valle. Provocando una expansión y desplazándolo cuesta arriba de las montañas. En la noche el efecto es inverso, en la montaña el aire se enfría rápidamente aumentando su densidad y cayendo por las laderas de las montañas hasta el valle (Chapra y Canale, 1999). En la Figura 13 se muestra gráficamente el fenómeno



**Figura 13.** Ciclos diarios valle – montaña.

**Fuente:** Enciclopedia Británica, 2010.

El efecto de los ciclos diarios del viento se calcula utilizando el método de Liu (1991). La velocidad cartesiana vertical  $w$ , se calcula a través de la siguiente expresión:

$$w = (V \cdot \nabla h_t) \exp(-kz) \quad \text{ec. 12}$$

Donde  $V$  es la velocidad del viento dominante media (m/s),  $h_t$  es la altura del terreno (m),  $k$  es un coeficiente que depende de la estabilidad de la atmósfera (condiciones de noche, condición de día o neutro) y  $z$  es la coordenada vertical (m).

**Efecto de roce:** Este efecto tiene como objetivo poder modelar la energía cinética que pierde una partícula de aire al pasar un obstáculo, relacionando la energía cinética que lleva la partícula de aire debido a su velocidad y la energía potencial necesaria para superar el obstáculo.

Con los datos del campo de viento modelados de acuerdo a los efectos propuestos anteriormente se procede a seguir con los siguientes pasos:

- Interpolar datos observados.
- Extrapolación vertical de los datos de viento observados de la superficie.
- Suavizar el campo de viento resultante.
- Ajuste de las velocidades verticales.
- Divergencia minimización (conservación de la masa)

**Interpolar datos observables:** El método de interpolación utilizado es el inverso de la distancia, desde el valor del viento observado se realiza una interpolación espacial horizontal de los vientos de acuerdo a la siguiente expresión:

$$(u, v)_2' = \frac{(u, v)_1 + \sum_k \frac{(u_{obs}, v_{obs})_k}{R_k^2}}{\frac{1}{R^2} + \sum \frac{1}{R_k^2}} \quad \text{ec. 13}$$

Donde  $(u_{obs}, v_{obs})_k$  son las componentes del viento observado en la estación  $k$ ,  $(u, v)_1$  son las componentes dentro del campo de viento,  $(u, v)_2'$  es el componente de viento inicial,  $R_k$  es la distancia del punto de observación en la estación  $k$  para un punto de la grilla y  $R$  es de uso específico

### Suavizar el campo de viento resultante

Este proceso se realiza para reducir la discontinuidad de los resultados en los campos de viento, el proceso se realiza con una ponderación simple de los vientos calculados en las células adyacentes, esto se explica en la siguiente ecuación:

$$(u_{ij})_2'' = 0,5 \cdot u_{ij} + 0,125 \cdot [u_{i-1,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j-1} + u_{i,j+1}] \quad \text{ec. 14}$$



Donde  $(u_{ij})_2^n$  es la componente del viento en el punto  $(i, j)$  de la grilla después de suavizar y  $u_{ij}$  es la componente del viento antes de suavizar.

### Potencial energético del viento

Una vez que la velocidad y la dirección del viento de la red de información obtenida han sido descritas completamente a la altura deseada, se procede a estimar el potencial energético del viento en la zona de estudio.

En el cálculo del potencial energético debemos modelar su comportamiento y distribución espacial, para ello se utiliza la distribución estadística de Weibull, esta función es utilizada, ya que se ajusta a la distribución observada a largo plazo de las velocidades del viento promedio para una serie de puntos (Gökçek *et al*, 2007) y esta dada por la siguiente ecuación:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad \text{ec. 15}$$

Donde,  $V$  es la velocidad del viento (m/s),  $c$  (m/s) es el parámetro de escala de Weibull y  $k$  (adimensional) es el parámetro de forma que caracteriza a la asimetría de la función de probabilidad. Hay varios métodos para calcular estos parámetros. En este documento se explicará el más simple que utiliza la media y la desviación estándar de la velocidad del viento para determinar los parámetros  $k$  y  $c$  (ver ec. 16 y ec. 17).

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^{-1,086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad \text{ec. 16}$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{ec. 17}$$

Donde  $\bar{V}$  (m/s) es la velocidad del viento,  $\sigma$  es la desviación estándar y  $\Gamma$  es la función Gamma, que se define en la siguiente expresión:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad \text{ec. 18}$$

Una vez identificados los parámetros de la función de distribución de Weibull, se procede a estimar el potencial energético del viento de la zona de estudio. El potencial energético del viento se define como la máxima potencia que se puede ser extraída del viento, es decir se

considera transformar toda la energía cinética del viento en energía eléctrica útil (Villarrubia, 2004). La energía eólica por unidad de superficie ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) está dada por la ec. 19. Las unidades de área se dan para la superficie expuesta perpendicular al flujo del viento:

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad \text{ec. 19}$$

Donde,  $V$  (m/s) es la velocidad del viento y  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) es la densidad del aire. La densidad del aire varía de acuerdo a la altitud, gracias a la siguiente fórmula en condiciones de atmósfera adiabática:

$$\rho = \rho_0 \left( 1 - \frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{ec. 20}$$

Donde,  $\rho_0$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) es la densidad del aire, a la altura  $h_0 = 2.928$  [m] la densidad es  $\rho_0 = 1,23$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $h$  (m) es la altitud a la que queremos calcular la densidad  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y  $k$  es el índice adiabático del aire seco,  $k=1,402$ .

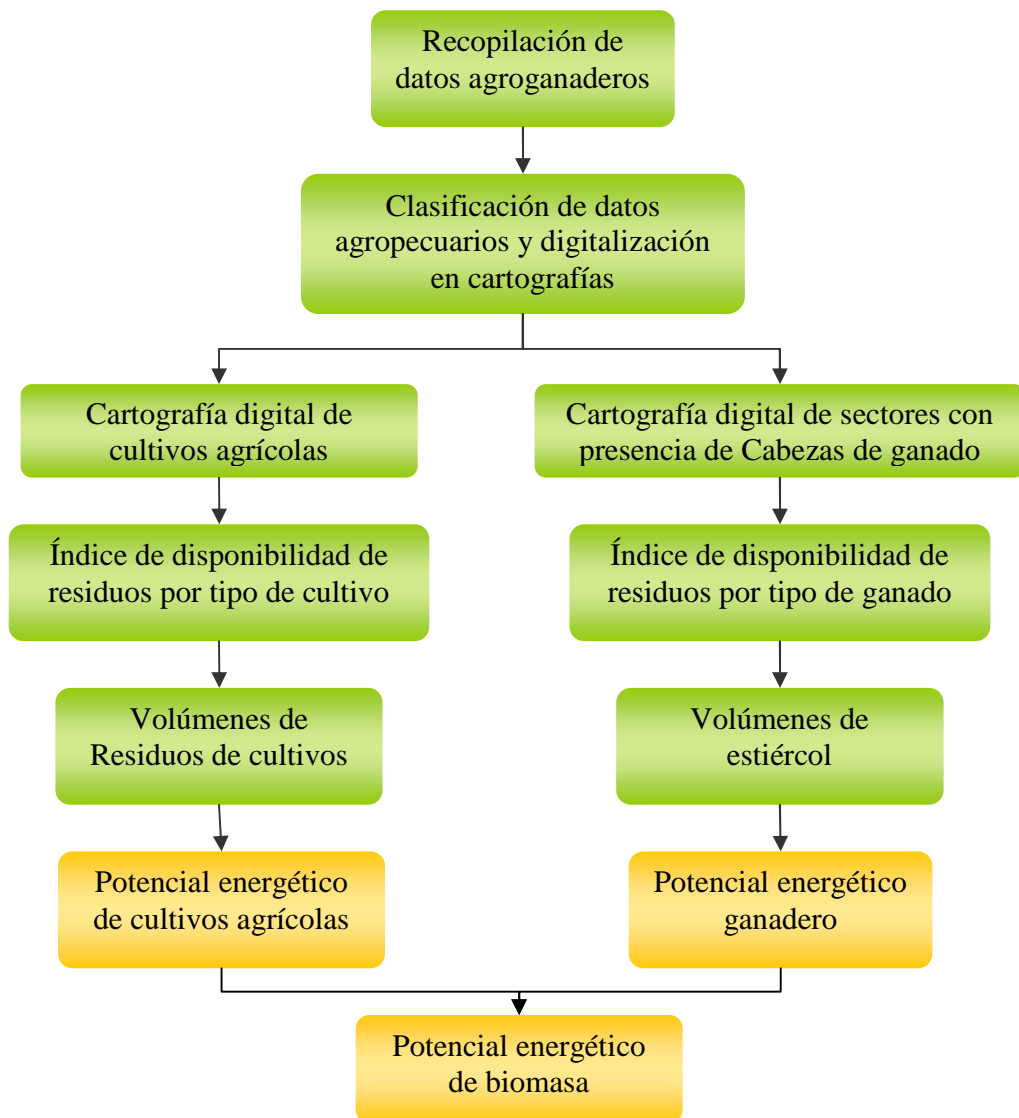
Para caracterizar el potencial energético del viento adecuadamente, se debe tener en cuenta que la velocidad del viento varía en el tiempo, por ello se considerará la energía eólica de cada valor de la velocidad del viento. Siendo necesario integrar las diferentes densidades de energía eólica en un periodo determinado (Villarrubia, 2004):

$$P(V) = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} V^3 f(V) dV \quad \text{ec. 21}$$

Donde,  $f(V)$  es la función de distribución de Weibull (ec. 15)

### 3.4. Prospección para fuente de energía Biomasa

En este apartado se describe la metodología para el cálculo de potencial energético y generación de cartografía de biomasa. Este mecanismo es una síntesis de los artículos publicados por Dominguez *et al* (2003) y CNE/GTZ (2008). En la Figura 14 se presenta un esquema de la metodología para el cálculo del potencial energético:



**Figura 14.** Esquema de metodología para cálculo de potencial energético de biomasa.

### Fuentes de datos

Se requiere identificar, localizar y caracterizar las fuentes que originan biomasa disponible (residuos) revisando datos geoestadísticos generales y fuentes de información propia del territorio referente a la producción agropecuaria en la zona de estudio. Dentro de los datos se considera, el inventario de superficie agrícola y ganadera a través de fuentes bibliográficas y corroboración de los datos in situ de la información. Las fuentes de datos recomendadas con información necesaria es el censo agropecuario, que se realiza cada 10 años, con su última versión realizada el año 2006 (INE) o puentes sectoriales, por ejemplo, para caracterizar actividad avícola se consulta a la asociación de productores agrícolas

(APA), para plantaciones forestales al instituto forestal (INFOR) y a los pequeños propietarios que puedan hacer un aporte (Pontt, 2008).

### **Selección de cultivos y registro ganadero**

La información se clasifica por actividad y tipo de biomasa disponible y según su distribución en el territorio, para cumplir esto se debe identificar y cartografiar de cultivos agrícolas (según el tipo de cultivo) y de sectores agro ganaderos (según la especie ganadera que se esté desarrollando), recopilando esta información a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y generando capas de información para las zonas de cultivo agrícola y para sectores agro ganaderos (Domínguez *et al*, 2003).

La principal dificultad para identificar los cultivos agrícolas temporalmente y de distribución de las tierras dedicadas a cada cultivo es que depende de las decisiones del agricultor y puede variar anualmente, sin embargo, la distribución de las superficies de la industria ganadera es mucho más estable en el tiempo (Domínguez *et al*, 2003).

### **Evaluación de los residuos de biomasa**

Una vez que se conoce la distribución espacial de los diferentes cultivos, sectores agro ganaderos, se aplican los índices de residuos específicos para cada una, de esta forma se puede calcular la producción potencial de biogás de estos residuos por metro cuadrado. Los índices para cada uno de los cultivos agrícolas y ganaderos se deben evaluar de forma individual y por especie (CNE/GTZ, 2008). De acuerdo a la siguiente expresión se calcula la cantidad de biogás generado:

$$E_b = \frac{V_p \cdot \delta \cdot H_b}{S} \quad \text{ec. 22}$$

donde:

$E_b$  es la cantidad de biogás producido por la biomasa en metros cuadrados. [ $\text{m}^3$  de biogás/ $\text{m}^2$ ].

$S$  es la superficie del cultivo [ $\text{m}^2$ ].

$V_p$  es el volumen de la plantación.

$H_b$  es el factor de conversión de residuos.

$\delta$  es el factor de conversión de biogás de los residuos.

### **Cálculo de la energía potencial de la biomasa**

El cálculo del potencial energético, se basa en la cantidad de biogás extraíble por metro cuadrado y el poder calorífico del biogás, considerando el porcentaje de metano que tiene cada una de las especies evaluadas. , de esta manera obtenemos las unidades de Watts/metro cuadrado [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. El cálculo se puede llevar a cabo a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de esta manera quedan inmediatamente representados

cartográficamente, generando las primeras capas de información (Domínguez *et al*, 2003). La información espacial debe corresponder a la distribución de las especies caracterizada, generadas en imágenes visuales continuas (raster), manteniendo una resolución espacial de acuerdo a la superficie estudiada. De esta forma se homogeniza la información existente y se calcula el potencial energético de los residuos de cultivos agrícolas y residuos ganaderos. La potencia de energía por metro cuadrado depende: del consumo de biogas ( $R=0,0012$  [ $m^3$ ] de biogas) que se utiliza para generar 1 W y los metros cuadrados de cultivo o utilizado por las cabezas de ganado que se necesitan para generar 1  $m^3$  de biogás (Gómez, 2009). El cálculo se genera a través de la siguiente fórmula:

$$P_b = \frac{E_b}{R} \quad \text{ec. 23}$$

donde:

$P_b$  Es la potencia de la biomasa [ $W/m^2$ ]

$E_e$  es la energía de la biomasa [ $m^3$  de biogas/ $m^2$ ]

$R$  es el factor de conversión de  $m^3$  de biogas para generar 1[W]

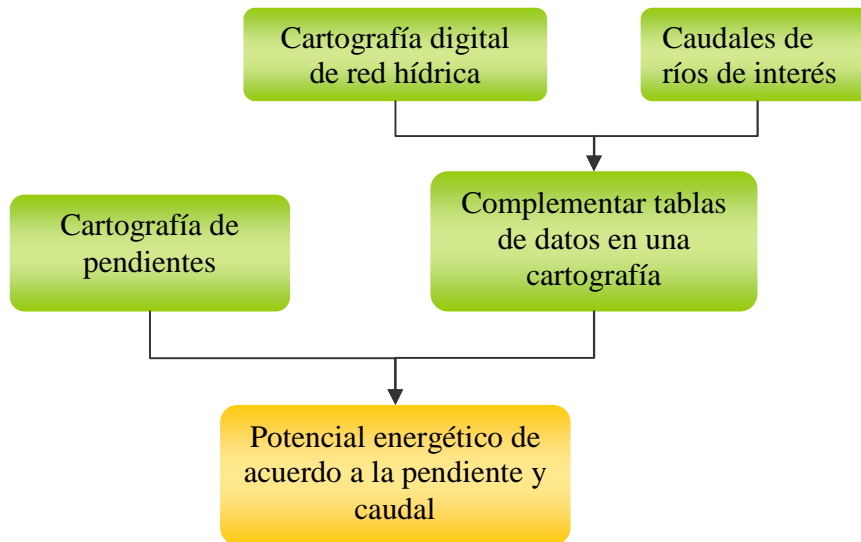
La disponibilidad y tipo de biomasa depende de las fluctuaciones climáticas, tipo de actividades económicas, tipos de suelos, aptitudes del suelo, etc. De esta forma es importante contar con algunos parámetros que caractericen la zona de estudio generando información representativa de la biomasa que se utilizará. Dentro de los parámetros se destacan los siguientes:

- Tipos de biomasa
- Composición físico químico
- Contenido de humedad
- Porcentaje de cenizas
- Contenido de sólidos
- Poder calorífico
- Densidad aparente
- Recolección, transporte y manejo
- Materia orgánica total obtenida
- Tiempo de retención
- Temperatura de retención

### 3.5. Prospección para fuente de energía Hidráulica

Un país largo y angosto con la presencia de la imponente Cordillera de los Andes a lo largo, son las principales características geográficas de Chile. Esto es una ventaja al momento de generar electricidad a través de la energía cinética del agua. Ya que principalmente para

generar electricidad a través del agua se necesita que esta tenga una pendiente y un caudal de agua. La cordillera de los andes por su altura es una reserva natural de agua al mantener por mayor periodo de tiempo el agua en estado de nieve o hielo (Ferrando, 2010). En la Figura 15 se muestra un esquema para obtener potencial energético, propuesto a partir de leyes físicas.



**Figura 15.** Esquema de metodología para cálculo de potencial energético hídrico.

Para calcular la potencia energética de una caída de agua se utiliza la ecuación de Bernoulli (ec. 24) que describe el movimiento de un fluido a lo largo de una línea corriente:

$$P = Q \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot H \quad \text{ec. 24}$$

donde:

**P** es la potencia calculada expresada en [kW]

**Q** [m<sup>3</sup>/s] es el caudal

**H** [m] es la caída neta, que es la diferencia de altura entre la bocatoma y la turbina de generación

**g** [m/s<sup>2</sup>] es la aceleración de gravedad

**ρ<sub>agua</sub>** [Kg/m<sup>3</sup>] es la densidad del agua.

Los componentes básicos de una micro central de pasada se muestran en la son:

- Canal o tubo de conducción: Este lleva el agua a la presa, que debe estar situado en un lugar estratégico para maximizar la seguridad y rendimiento del sistema.
- Válvula de regulación: En este punto se regula la entrada de agua a la turbina

- Casa de máquinas: Es el lugar donde se convierte la energía cinética del agua en energía eléctrica a través de la turbina, el generador, sistema de control y accesorios.
- Desagüe: Canal que devuelve el agua al cauce del que se sacó.

La generación de electricidad a través de micro centrales de pasada considera una eficiencia del conjunto turbina-generador de aproximadamente 87 % (Mendoza, 2006). De esta forma a la ecuación de Bernoulli se le agrega un factor de eficiencia ( $\eta$ ), quedando de la siguiente manera:

$$P = Q \cdot \eta \cdot \rho_{agua} \cdot g \cdot H \text{ ec. 25}$$

## **4. PROPUESTA DESARROLLADA**

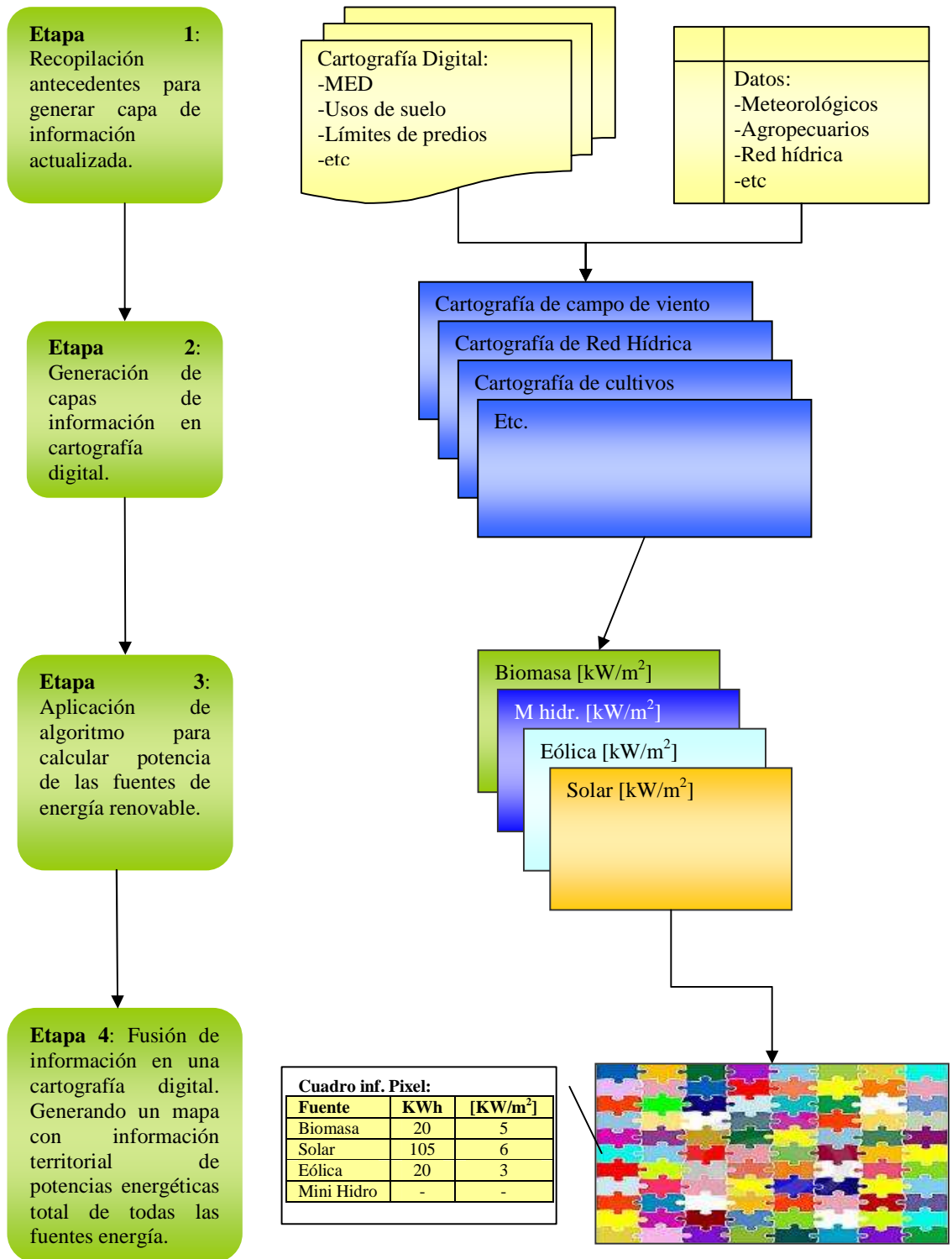
En este capítulo se presenta el resultado de este trabajo de investigación, el cual se desarrolla de acuerdo al análisis e implementación de las metodologías presentadas en el capítulo anterior. El presente producto es, una propuesta metodológica para la prospección de FER que se utilicen en un GeVi. Primero se presenta un esquema general de la propuesta y posteriormente se desarrolla cada uno de los pasos.

### **4.1. Esquema general de la propuesta**

Antes de aplicar la propuesta se deben realizar unos pasos previos, los que son independientes de la cantidad de FER que se evalúen y se especifican en los siguientes párrafos donde se presenta el esquema general de la propuesta metodológica para la prospección de FER, esta se presenta en la Figura 16 16. Se dividió en cuatro pasos, ordenados jerárquicamente y replicable para la prospección y generación de cartografía digital de las FER. Cada uno de los pasos de la metodología es explicado en detalle para cada uno de los factores que se aplican para la obtención final de cartografías del potencial energético de cada una.

La propuesta metodológica fue probada en forma sencilla y resumida con datos de la comunidad de Huatacondo, para la Fuente de energía (Solar, Eólica y Biomasa). En la implementación de la metodología se utilizaron supuestos que permitieron desarrollar en el menor tiempo la cartografía deseada y se utilizó principalmente para mostrar gráficamente los resultados que se esperan obtener al aplicar la metodología propuesta en este trabajo.





**Figura 16.** Esquema general de la propuesta metodológica para la prospección de FER.

## 4.2. Información previa para Identificar y sistematizar

Los pasos previos pretenden determinar y clasificar la información necesaria para la aplicación de la metodología propuesta.

### 4.2.1. Definición del área de estudio

En primer lugar se debe definir y caracterizar el área de estudio. De acuerdo al área de estudios que se desea explorar, son las escalas y tipos de fuentes de energía renovables que se recomendará utilizar para la generación de energía eléctrica con un GeVi. La escala para la cartografía estará dada según la extensión del área de estudio. La escala propuesta para toda la cartografía generada se muestra en el Cuadro 5 establecido de acuerdo a la división política administrativa.

**Cuadro 5.** Escala propuesta de acuerdo al área de estudio

Área de estudio	Escala propuesta	Unidad cartográfica mínima (UCM)
Provincia - Intercomunal	1:50.000 – 1:100.000	50 – 200 há
Comuna	1:10.000 – 1:50.000	10 – 50 há
Localidad/Poblado	1:500 – 1:5.000	5 – 10 há

**Fuente:** Salas, 2002.

La caracterización del territorio debe hacerse en una escala adecuada al área que se desee estudiar para ello se debe definir la Mínima Unidad Cartografiable (MUC) que para este tipo de proyectos debe ser mayor a 1:100.000 para tener una visión global del espacio a intervenir. Varios autores recomiendan que la MUC no sea inferior a 4 mm<sup>2</sup> medidos a escala de mapa (Anderson *et al*, 1976 y Campbell, 1996). De acuerdo a la Asociación Cartográfica Internacional, las escalas límites más idóneos para algunos sensores son (López, 1989 y SAF, 2009):

NOAA - AVHRR	1:2.000.000
Landsat – MSS	1:200.000
Landsat – TM	1:100.000
Spot – HRV (Pan)	1:50.000
IRS – 1C (Pan)	1:25.000
Ikonos (XS)	1:25.000
Ikonos (P)	1:25.000
Fotografía aérea (zonas urbanas)	1:5.000
Fotografía aérea (zonas agrícolas)	1:20.000
Fotografía aérea (zonas forestales y mineras)	1:30.000

#### 4.2.2. Integración del proyecto y la comunidad

Para lograr un compromiso con el proyecto energético GeVi se recomienda involucrar en la definición del área donde se aplicará el protocolo a los siguientes actores:

- La población directamente beneficiada y comprometida con el proyecto GeVi.
- Las autoridades locales y ONG's que se encuentren trabajando en temas de eficiencia energética y energías renovables.
- Entidades privadas y públicas que quieran patrocinar el proyecto GeVi.

Esta tarea se puede llevar a cabo a través de distintas estrategias, un set de ellas fue seleccionada y probadas en la comunidad de Huatacondo por Álvarez (2010) en el desarrollo de su memoria de título. Dentro de las propuestas se destaca la “estrategia para determinar atributos de la comunidad a intervenir”, “estrategia de definición de sitios de emplazamiento de unidades generadoras de electricidad” y “estrategia de acercamiento de la comunidad a la Iniciativa GeVi”. Las cuales tienen como objeto integrar el proyecto a la comunidad y evaluar los impactos ambientales que este puede tener.

#### 4.2.3. Selección de fuente de información secundaria

En la generación de cartografía para las FER y zona de estudio se requiere información secundaria, seleccionada y clasificada de acuerdo a las necesidades del proyecto. En países desarrollados existen cuerpos legales que aseguran el acceso gratuito a la información pública. Sin embargo, en Chile no existen tales cuerpos legales y las instituciones públicas administran la información de los recursos naturales de manera restrictiva o como un bien privado, que se comercializa a precios de mercado. Esto provoca una dificultad en el fluido desarrollo del trabajo y conlleva efectos indeseados tales como la duplicidad de información y de esfuerzos, como también una elevación en los costos iniciales del proyecto (OCDE, 2005). En el Cuadro 6 se presenta una propuesta para la gestión en la recopilación de información secundaria del territorio, donde se desea efectuar un proyecto.

**Cuadro 6.** Propuesta para la gestión en la recopilación de información.

Propuesta	Conveniencia	Fortalezas	Inconveniencias
Ley de Acceso Libre a la Información	Mejor solución	Solución estructural al problema que garantiza transparencia en el manejo y calidad de la información a través del control público	Procesos legislativos son generalmente largos y una iniciativa de este tipo enfrentará fuertes resistencias de parte de instituciones que sustentan su poder / influencia en el manejo restrictivo de la información

Propuesta		Conveniencia	Fortalezas	Inconveniencias
Acuerdo de cooperación voluntaria (informal)	de Segunda solución	mejor	Esta solución no provoca resistencias institucionales y permite gran agilidad en el traspaso de información	Es una solución casuística (caso a caso), bilateral y requiere de muy buenas relaciones interpersonales
Convenios intercambio información	de de Tercera solución	mejor	Los convenios de intercambio tienen en la actualidad un alto grado de aceptabilidad en Chile	Es una solución casuística bilateral que involucra altos niveles de burocracia y requiere recompensa en ambas partes
Orden de máxima autoridad facilitar información	de la de Cuarta solución	mejor	Es un tipo de solución usual en sistemas institucionales centralistas y jerárquicos como Chile	Es una solución casuística que involucra un alto grado de burocratización y puede crear fuertes resistencias institucionales hacia la iniciativa beneficiada
Compra de información pública	Quinta solución	mejor	Permite gran agilidad en el acceso a la información	Es una solución casuística, que requiere de amplios recursos financieros

**Fuente:** Departamento de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile, 2002.

En contribución al desarrollo de nuevos proyectos y estudios en torno a energías renovables con sistemas de generación distribuida, se propone generar una base de datos, adquiridos o de generación propia para el proyecto GeVi. Esta se recomienda compartir en forma gratuita con otras iniciativas de FER, GD, con la comunidad beneficiada y autoridades locales. Generando una plataforma de información de fuentes de energías renovables para generación eléctrica de pequeña y micro escala.

### 4.3. Etapas de la propuesta metodológica

La metodología consta de 4 etapas. Cada etapa tiene como objeto ordenar y sistematizar la información sobre FER en el territorio. En esta investigación se utiliza [kW/m<sup>2</sup>] como unidad de medida homogénea. El esquema general de las etapas (Figura 16) muestra el orden de la metodología propuesta.

Se destaca que esta propuesta metodológica es una primera aproximación para el desarrollo de cartografías digitales para proyectos de pequeña escala, basada en distintas metodologías de prospección de FER. Con la cartografía obtenida se espera facilitar y mejorar toma de

decisiones sobre el uso del territorio, involucrando a pobladores, autoridades y profesionales que desarrollen el proyecto. En cada una de las versiones se deben verificar los datos de los modelos propuestos con registros de estaciones meteorológicas locales, evaluando posibles correcciones que se deban realizar a la metodología propuesta.

#### **4.3.1. Desarrollo de las etapas del proyecto**

En este capítulo se presenta en detalle cada una de las etapas propuestas para la generación de cartografía del potencial energético de las FER presentes en el territorio que se desea explorar.

**Etapla 1 (recopilación de datos).** Los datos pueden ser recolectados in situ a través de estaciones meteorológicas, encuestas agrícolas y forestales, estaciones de monitoreo de la DGA o ex situ de acuerdo a imágenes satelitales, fotografías aéreas, ortofotos. Para la recopilación se debe tener en cuenta las recomendaciones descritas anteriormente, tales como: la escala espacial que se desea trabajar, la selección de fuente secundaria, etc. La información recopilada debe ser representativa al menos de las 4 estaciones del año, además se deben identificar datos que se vean influenciados por eventos climáticos anómalos (Ej: ENSO, erupciones volcánicas, tsunamis, etc).

**Etapla 2 (generación de capas de información).** La información obtenida tiene como función describir y caracterizar el territorio en la zona de estudio. Cada antecedente obtenido debe tener asociado una ubicación geográfica nos ayuda a describir el territorio. Posteriormente esta información será utilizada en forma de cartografía digital para el calcular del potencial energético de las FER.

**Etapla 3 (calculo de potenciales energéticos).** Las capas de información son procesadas por a través de software de SIG, aplicándose algoritmos y relaciones estadísticas de acuerdo a las metodologías planteadas el capítulo anterior para obtener el potencial energético de las FER.

**Etapla 4 (cartografía final).** Esta etapa tiene como objetivo unificar la cartografía general con los potenciales energéticos de cada una de las fuentes de energía renovables, obteniendo una cartografía digital (vectorial) dirigida a tomadores de decisiones con información de energía potencial teórica sobre el área del territorio que se estudio.

#### **4.3.2. Etapa 1**

##### **Recopilación de datos**

Una vez definida el área de estudio, la escala de trabajo y disposición de fuentes para la obtención de información secundaria, comienza un inventario sobre las fuentes de energías renovables (biomasa, eólica, solar y mini hidráulica). Esta etapa se orienta a filtrar y

ordenar la información disponible para evaluar los recursos como generadores de FER en el marco de un GeVi.

La propuesta metodológica pretende generar una cartografía que contenga la información base de la zona de estudio y cartografías de las fuentes de energías presentes en el lugar, tales como:

- Fuente de energía Solar
- Fuente de energía Eólica
- Fuente de Biomasa
- Fuente de energía Mini Hidráulica

### **Fuentes de información**

Las fuentes de información pueden provenir de fuentes públicas o privadas.

- **Pública:** Las capas de información se deben obtener a partir de fuentes oficiales (CIREN, DGA, CONAMA, Municipalidad, últimos CENSOS, etc) y diagnósticos que se hayan hecho con anterioridad para la zona de estudio. La información que se espera recopilar es de tipo raster y vectorial o tablas de información que puedan ser traspasadas a una cartografía para facilitar el uso de criterios que nos permitirán identificar los recursos naturales y realizar los algoritmos planteados.

- **Privado:** Se refiere a la información que el ejecutor del proyecto deba generar o que se haya generado con anterioridad por algún particular o empresa no gubernamental. Se busca obtener mediciones en terreno para validar los valores obtenidos al aplicar la metodología.

### **Clasificación de información**

Para cada una de las fuentes de energía renovables se requieren distintos tipos de información, sin embargo, existe información básica que es recolectada en terreno por expertos o por organismos locales pertinentes (DGA, SHOA, Dirección Meteorológica de Chile, CNR, PRODESAL, SERVIU, Municipio). Por este motivo una de las primeras actividades es visitar el área de ejecución del proyecto, esta actividad pretende establecer contactos con las autoridades de la comunidad y administrativas locales. En la visita se debe tener claro lo que se busca en terreno y fortalecer el conocimiento sobre el territorio, para ello la información se agrupa por factores que componen el territorio (Zelaya, 2007), tales como:

### **Factores Humanos**

- **Idiosincrasia:** tienen relación con la identidad local de la comunidad.
- **Necesidades:** las cuales pueden ser sanitarias, energéticas o agua.
- **Recursos disponibles de tipos económicos:** materiales de construcción, mano de obra, utilización de producto y área disponible para generar el proyecto.

- Disponibilidad de materia prima: si se cuenta con sectores con buena exposición al sol, agua disponible para la generación eléctrica, buena zona de viento, desechos pecuarios, desechos domésticos, desechos urbanos, desechos industriales.

### **Factores Físicos**

- Centros poblados (número de habitantes y número de viviendas).
- Localización: ubicación si es zona urbana, rural o semi rural y la geografía aspectos como la latitud, longitud y altitud.
- Climáticos: dentro del cual esta la temperaturas máximas y mínimas, precipitación, humedad ambiental, radiación solar, los vientos (intensidad y dirección).
- Vías de acceso, distancia a ciudad y puerto más cercano, cercanía a la frontera.
- Topografía: identificando el declive del suelo, si es plano, ondulado, o con acantilados.
- Áreas silvestres protegidas (privadas o del estado).
- Sitios prioritarios.
- Relieves a través de modelos de elevación digital (DEM).

Los factores mencionados anteriormente son los más recurrentes, esto no significa que se utilicen todos, en algunos casos se utilizan más de los mencionados o puede que solo algunos de ellos sean pertinentes para la generación de criterios de evaluación de los recursos existentes (Zelaya, 2007). En nuestro caso habrá una mayor presencia de Factores Físicos, ya que a través de ellos se realizan los cálculos necesarios para el potencial energético.

### **CAPAS DE INFORMACIÓN**

Las capas de información permiten realizar composiciones entre diferentes fuentes de energías, superponiéndolas sobre la cartografía general del territorio. Las capas de información y la cartografía base deben contener como mínimo la siguiente información:

**Cuadro 7.** Información de Carta Base

<b>Carta Base</b>		
<b>Factores</b>	<b>Temas</b>	<b>Información a incluir</b>
Físicos	Límites	Área de estudio político administrativos
	Relieve	DEM
	Hidrografía	Ríos, esteros, lagos, lagunas, glaciares, canales intercomunales
	Toponimia	En lo posible completa, incluyendo denominaciones locales a quebradas, ríos, etc
	Asentamientos	Ciudades, comunas, pueblos, aldeas, villorrios, localidades

<b>Carta Base</b>		
<b>Factores</b>	<b>Temas</b>	<b>Información a incluir</b>
	Red Vial	Autopistas, carreteras, caminos intercomunales, huellas, rutas peatonales, vías férreas y aeropuertos
Humanos	Infraestructura técnica	Vertederos, rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de agua, obras de riego, centrales eléctricas, etc.
	Accesibilidad a energía	Red de tendido eléctrico, subestaciones, etc.

**Cuadro 8.** Información para cartografía de energía solar

<b>Fuente de energía Solar</b>		
<b>Factores</b>	<b>Tema</b>	<b>Información a incluir</b>
Físicos	Radiación	Radiación extraterrestre, Directa y Difusa
	Ángulo de incidencia	Latitud, Longitud, azimuth
	Meteorológicos	Temperatura máximo, mínima, nubosidad
	Rugosidad	Morfología del lugar

**Cuadro 9.** Información para cartografía de energía eólica

<b>Fuente de energía Eólica</b>		
<b>Factores</b>	<b>Temas</b>	<b>Información a incluir</b>
Físicos	Información meteorológica	Medias horarias de: Presión atmosférica, temperatura, humedad específica.
	Velocidades viento	Velocidades medias horarias, diarias a 10 m sobre el suelo, magnitudes del viento, variaciones diarias, rosa de vel. de viento
	Posición geográfica	Latitud y longitud
	Geomorfología	Usos de suelo, distancia de la costa, altura sobre nivel del mar



**Cuadro 10.** Información para cartografía de energía de la biomasa

<b>Fuente de energía Biomasa</b>		
<b>Factores</b>	<b>Tema</b>	<b>Información a incluir</b>
Físico biológico	Época de cosecha	Meses en los que se cultiva cada especie y meses de cosecha de cada cultivo
Físicos	Territorio	Uso de Suelo, divisiones prediales
	Socio Económico	Actividades productivas, principales tipo de cultivo.
Humanos	Desechos orgánicos	Cuantificar por tipo de desecho (agrícola o forestal), lugar de generación de desecho y lugar de acopio

**Cuadro 11.** Información para cartografía de fuente mini hidráulica

<b>Fuente energía mini Hidráulica</b>		
<b>Factores</b>	<b>Tema</b>	<b>Información a incluir</b>
	Límite hidrográfico	Delimitación de la cuenca hidrográfica
Físicos	Caudales	Caudales (medias horarias)
	Pendientes	Diferencia de altura por sección del río

#### 4.3.3. Etapa 2 y 3.

#### **Generación de capas de información y calculo de potenciales energéticos respectivamente**

Una vez recopilada la información necesaria para cada una de las fuentes de energía renovables se procede a digitalizar en cartografías la información censal. Posteriormente se ordena la información digital adquirida y generada, asegurando la estandarización de la información y no generar conflicto en los cálculos de cada uno de los potenciales energéticos y de las fusiones de las imágenes. Los cálculos de las imágenes se llevarán a cabo en unidad de potencia por metro cuadrado [kW/m<sup>2</sup>]. Los resultados esperados se ejemplificarán con imágenes desarrolladas para el poblado de Huatacondo en las fuentes de energía solar, eólica y biomasa, de acuerdo a la disponibilidad del recurso existente en el sector para el mes de febrero.

#### **Carta Base**

La carta base está orientada a proporcionar la información básica que permite localizar espacialmente la información temática de las diferentes etapas del protocolo.

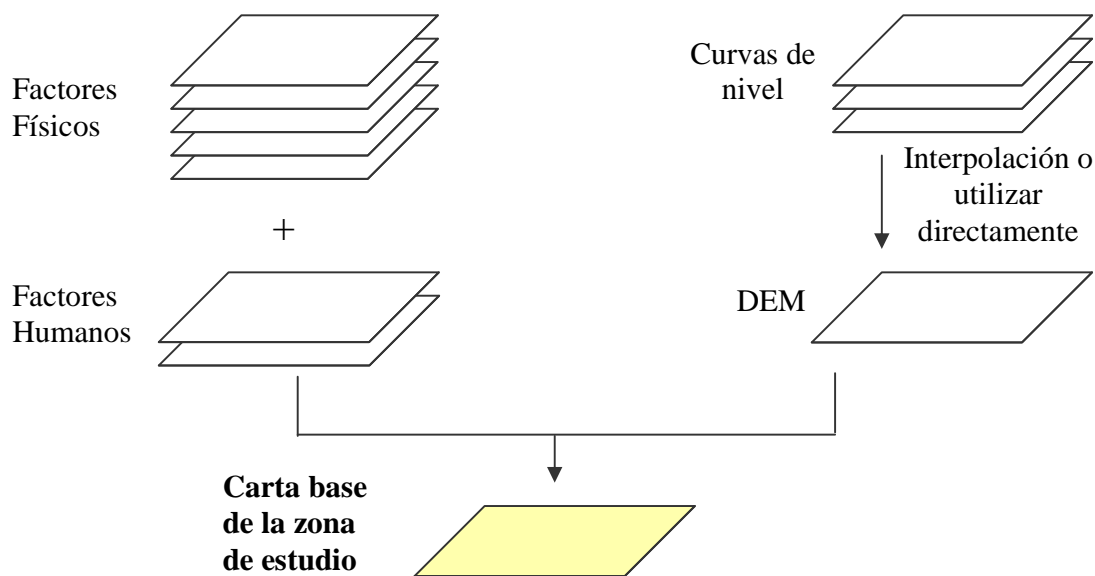
En la generación de la carta base se utiliza la cartografía topográfica oficial del país. En el caso de Chile la cartografía está en escala de 1:50.000 y 1:250.000 que es generada por el Instituto Geográfico Militar (IGM). Al considerar esta cartografía oficial hay que considerar 3 aspectos:

1.- La cartografía tiene imperfecciones técnicas que no afectan a los objetivos principales de la creación de la carta base del protocolo.

2.- La cartografía oficial se debe complementar con información actualizada de la zona de estudio, obtenida desde la información municipal o con datos catastrados por el demandante o el equipo del GeVi.

3.- Se debe expresar la información cartográfica recopilada en la misma escala espacial que se va a evaluar la zona de estudio. Generalmente esto debe ser de una escala de mayor detalle a una de menor detalle. Debido al nivel de la propuesta de los GeVi se debe complementar la información oficial del IGM con información de mayor detalle que pueda entregar la municipalidad y la catastrada en terreno por el equipo GeVi o el demandante del proyecto.

Toda la información recopilada debe ser digitalizada en capas de información, representando cada uno de los factores que componen la Carta Base. En esta etapa se debe terminar de homogenizar la información y traspasar la información levantada en cartografías digitales. En la Figura 17 se presenta un ejemplo (Carta base) donde se crea una capa de información con bases de datos cartográficas.



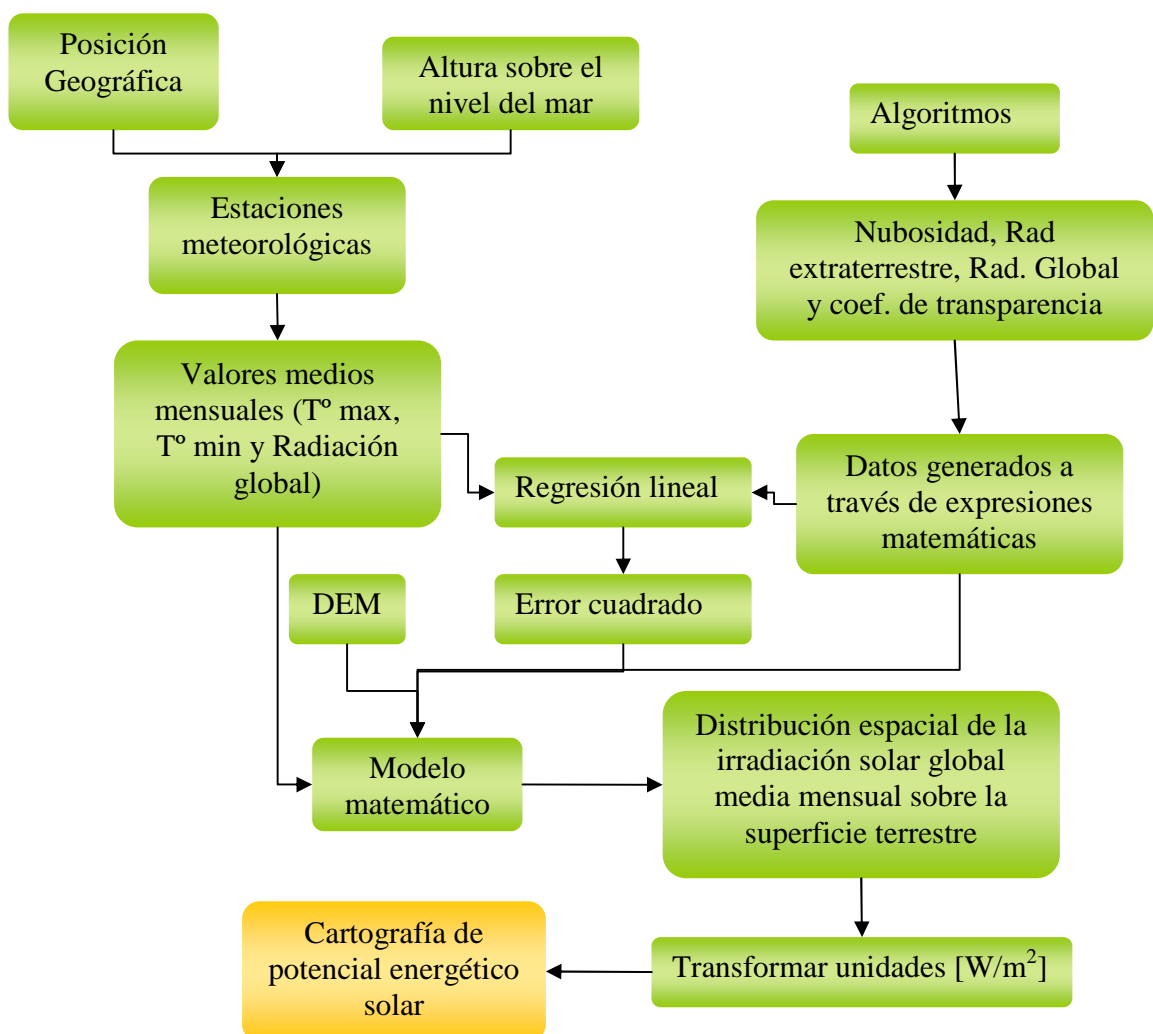
**Figura 17.** Construcción de la Carta base. (Ver cuadro 7)

Un factor relevante, para levantarlo como información en la zona de estudio es la población existente, el consumo de energía per cápita, consumo de energía por casa, planes reguladores (comunal y regional si existen) e identificar las problemáticas y proyecciones que la población a intervenir tenga del territorio.

### 4.3.3.1. Fuente de energía Solar

La información requerida para crear una capa de información que contenga la información sobre la energía solar disponible, es de tipo físico. Para ello se utilizan datos medios mensuales de radiación global y extraterrestre, nubosidad, coeficiente de transparencia, temperatura máxima y temperatura mínima. Entre los datos se encuentran los obtenidos en forma directa por las estaciones meteorológicas y los obtenidos en forma indirecta por relaciones matemáticas. A través de una regresión lineal se calcula el error generado por el cálculo de relaciones matemáticas para corregir los datos calculados.

El siguiente esquema muestra la creación de la cartografía de la potencia de energía solar:



**Figura 18.** Esquema. Construcción de cartografía potencial energético solar. (Ver cuadro 8)

La radiación solar a nivel global varía de acuerdo al ángulo en el que llegue a la Tierra y este es dado por la latitud. En una escala local la altura sobre el nivel del mar, la nubosidad, el coeficiente de transparencia y la topografía son los principales factores que determinan el nivel de radiación en un punto específico. La topografía, se relaciona con las otras variables través de la geoestadística, la cual nos permite realizar análisis de datos puntuales (estaciones meteorológicas o datos en terreno) para generar expresiones matemáticas que nos permitan extrapolar la información y generar una información continua sobre la superficie, permitiendo generar una simulación del comportamiento de la radiación.

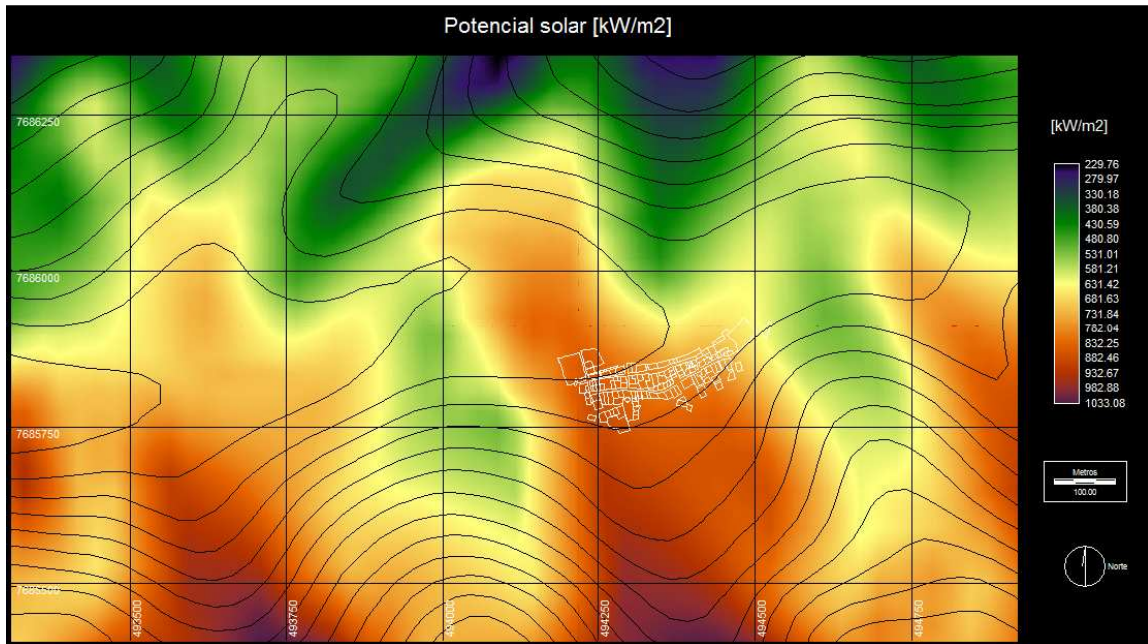
**Coefficiente de transparencia:** Este coeficiente esta dado por el espesor de la atmósfera en el lugar de la medición, el cual e calcula como la diferencia entre el espesor teórico de l atmósfera en la latitud que se desea calcular y la altura sobre el nivel del mar del lugar (Liou, 1980).

**Nubosidad:** Corresponde al porcentaje de cielo cubierto a causa de la presencia de nubes en la atmósfera (Iqbal, 1983).

De acuerdo al nivel de análisis o zona estudiada es el nivel de complejidad y número de variables que se utilizarán, en zonas andinas del norte del país la nubosidad es despreciable, sin embargo en las zonas costeras la nubosidad matinal es un factor relevante para el análisis y simulación. Por otra parte hacia las zonas australes la nubosidad es un factor relevante a lo ancho del territorio y en cualquier época del año, estos criterios deben ser considerados por un experto al momento de aplicar la presente metodología.

### **Metodología aplicada**

La aplicación del esquema propuesto se puede ver en la Figura 19 donde se representa con líneas blancas la trama urbana del poblado, en líneas negras se trazaron las curvas de nivel cada 25 metros y en degradación de colores entre colores fríos (azules) y cálidos (rojos) se expresa desde las zonas de menor a mayor potencial energético. De acuerdo a la figura, que es una estimación promedio para el mes de febrero, se aprecia la influencia de las exposiciones de los cerros en la conformación de la distribución espacial de la energía, siendo las zonas con exposición norte y zonas abiertas las que captan una mayor radiación y por ende obtienen un mayor potencial energético.



**Figura 19.** Cartografía de potencial solar medido en [kWm<sup>2</sup>]

#### 4.3.3.2. Fuente de energía Eólica

La información requerida para el estudio de las velocidades del viento son principalmente factores físicos, medibles por estaciones meteorológicas. Dentro de los factores necesarios se encuentran:

**Velocidades de viento:** En el modelo la velocidad se evalúa en tres componentes Magnitud, dirección y densidad.

**Presión atmosférica:** Este tipo de factor esta dirigido a representar el movimiento de masas de aire que se rigen por los cambios de presión, desplazándose desde los lugares de mayor presión a los de menor presión.

**Temperatura:** Esta variable afecta a las masas de aire a escala regional, ya que a este nivel las masas de aire se mueven por diferencia de temperaturas, desde zonas de menor temperatura a zonas de mayor temperatura.

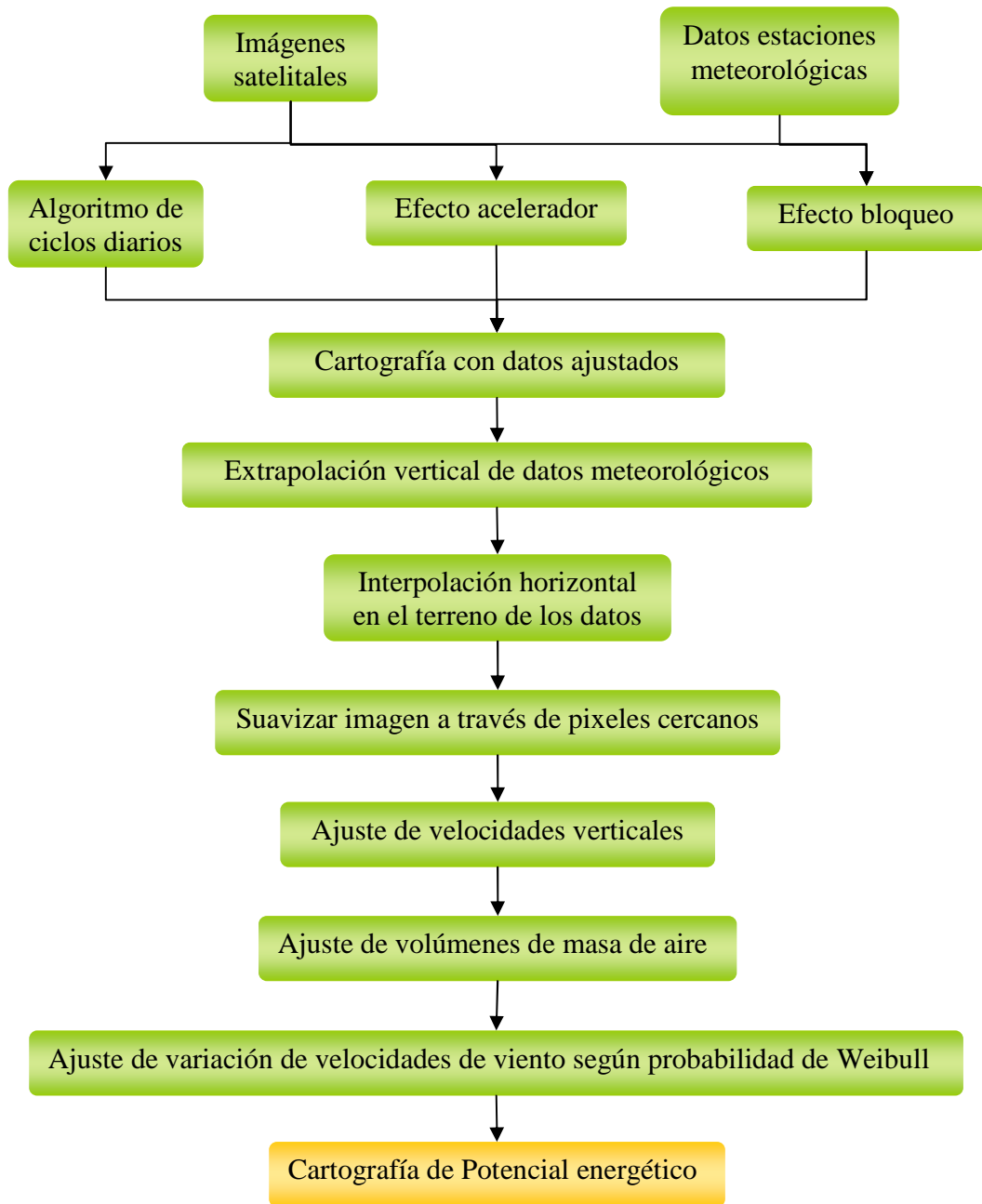
**Humedad específica:** Esta variable tiene la importancia de poder cambiar la densidad del aire y de poder determinar la rapidez con que se desplazan las masas de aire desde un punto a otro.

Dentro de los datos que se pueden obtener desde las imágenes satelitales y de DEM son:

**Distancia de la costa:** La distancia de la costa es un factor importante al momento de comprender la diferencia de densidades entre las zonas costeras y las zonas interiores. Siendo en forma general las zonas de mayor densidad de aire las que se encuentran en la costa y las de menor densidad las que encuentran en las zonas cordilleranas.

**Uso de suelo:** El efecto que contiene el uso del suelo sobre la aceleración y desaceleración de la intensidad del viento se puede calcular a través de los obstáculos que debe enfrentar este.

**DEM:** A través del Modelo de elevación Digital se establecen geformas del área de estudio.



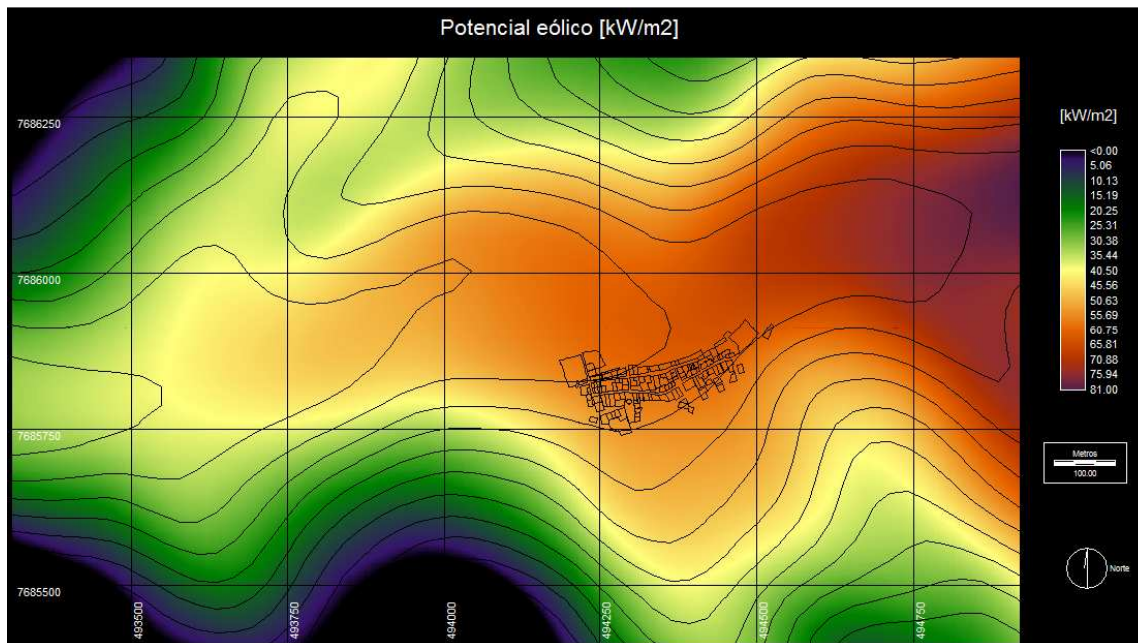
**Figura 20.** Esquema. Construcción de cartografía potencial energético del viento. (Ver cuadro 9)

Los ajustes de las velocidades del viento en relación a los distintos factores del terreno se realizan a través de relaciones estadísticas (ec. 11, ec. 12, ec. 13, ec. 14) expresadas en el capítulo 3.3. Las velocidades de viento varían en un periodo de tiempo, comportándose según la función estadística de probabilidad Weibull (ec. 15). Luego de ajustar el

comportamiento de las velocidades de viento según la curva de Weibull se procede a calcular el potencial energético que el viento de la zona de estudio puede generar. Esto se realiza de acuerdo a la ec. 21, donde se considera la distribución del viento en forma espacial y temporal. Los resultados de los cálculos se deben presentar en unidades de  $[\text{kW}/\text{m}^2]$ .

### Metodología aplicada

De acuerdo al esquema planteado, se aplicó esta metodología para la localidad de Huatacocondo. Como se muestra en la Figura 21 se logra representar de forma espacial y continua el potencial energético de la energía eólica para el mes de febrero. En colores fríos (azules) se representa las zonas con potenciales energéticos bajos dentro de la imagen y en colores cálidos (rojos) se representan los potenciales energéticos altos dentro de la imagen, además se presentan las curvas de nivel cada 25 metros y el trazado urbano de la localidad estudiada.



**Figura 21.** Cartografía de potencial eólico medido en  $[\text{kWm}^2]$

En la Figura 21 se aprecia la influencia de la topografía en la distribución de los potenciales energéticos, concentrándose en la zona alta del valle.

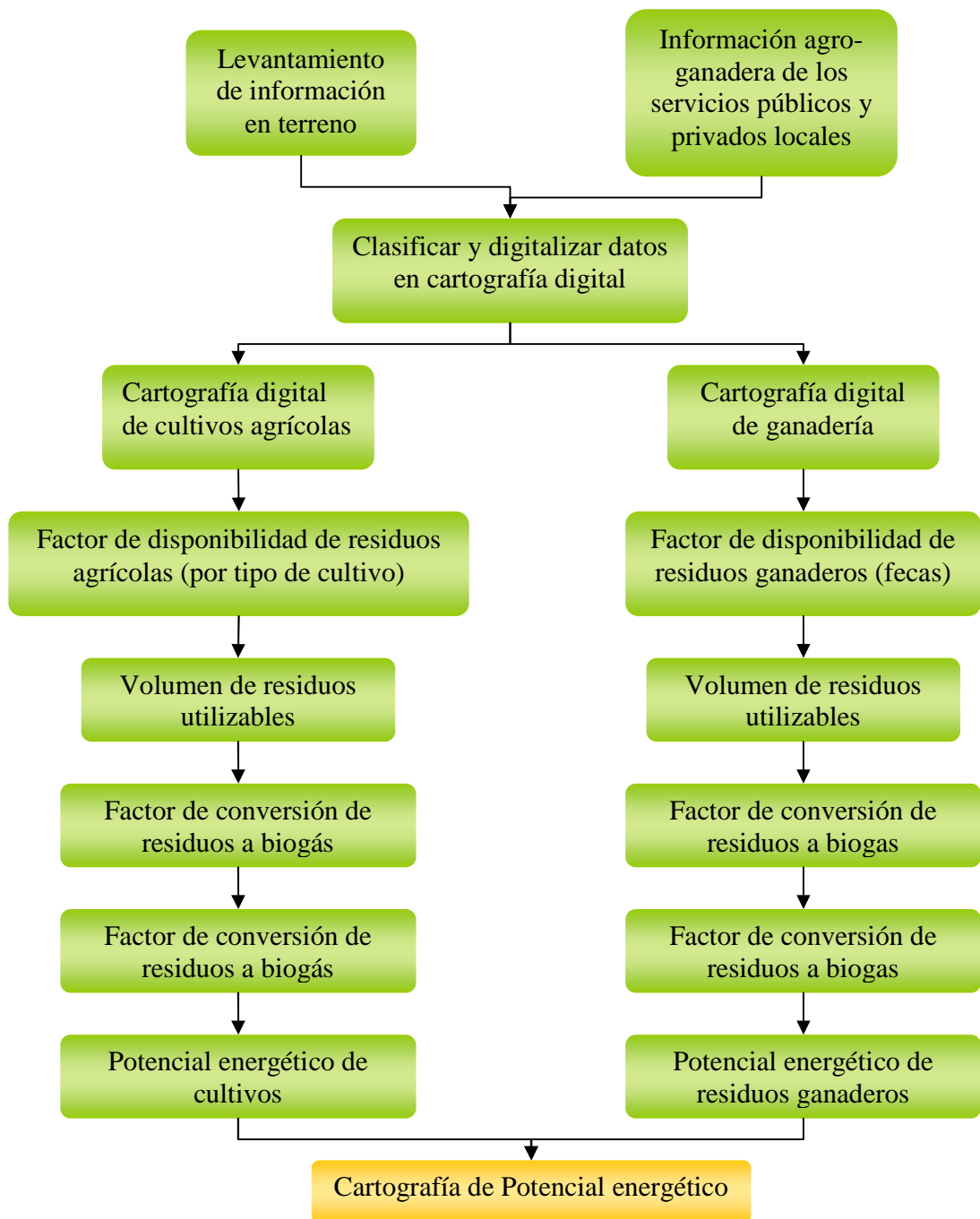


#### **4.3.3.3. Fuente de energía Biomasa**

La generación de cartografía para la fuente de energía a través de biomasa se realiza con información levantada en terreno e información agro-ganadera de servicios locales (Municipio, Censo agropecuario, PRODESAL, etc). En la Figura 22 se representan los pasos a seguir para la generación de la cartografía del potencial energético de la biomasa:

La generación de información en terreno es la que nos proporcionará una base estadística para aproximarnos teóricamente al potencial energético aportado por la biomasa generada en la zona de estudio en los meses que cosechan cada una de las especies. Se sugiere recopilar la información a través de fichas uniformes, que homogenicen la recopilación de la información.

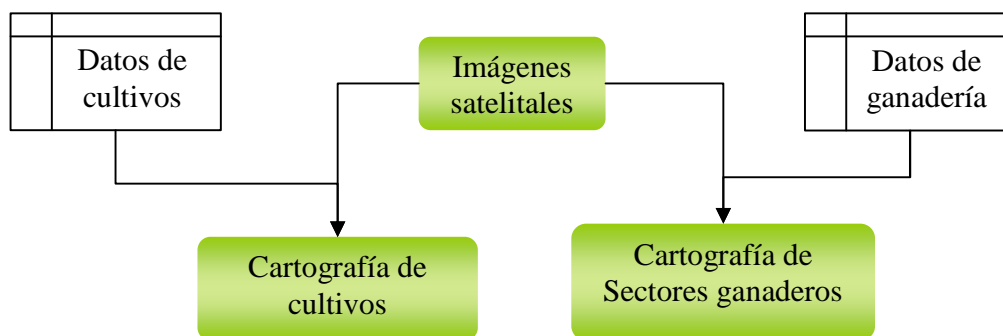
Los antecedentes recopilados se deben representar en cartografías digitales para posteriormente hacer un análisis espacial de la biomasa disponible en el área de estudio.



**Figura 22.** Esquema. Construcción de cartografía potencial energético de Biomasa. (Ver cuadro 10)

### Selección de cultivos y residuos ganaderos

Una vez clasificada la información en terreno y de acuerdo a los servicios públicos que dispongan de información, se debe digitalizar y representar en cartografía digital para su posterior análisis. La clasificación se debe realizar con cultivos agrícolas (según el tipo de cultivo) y de sectores ganaderos (según la especie ganadera que se esté desarrollando) emplazados en el área geográfica que se va a evaluar por el proyecto, utilizando como apoyo los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y generando tres capas de información, como se explica en el capítulo anterior. En el caso de no poder realizar una aproximación con percepción remota, se debe catastrar la zona con datos de las zonas de cultivo y ganadera.



**Figura 23.** Esquema. Generación de cartografía de cultivo y de ganadería. (Ver cuadro 11)

### Volumen de residuos

El volumen de residuo de cultivos y de ganadería, se obtiene a través de índices de residuos post cosecha y de estiércol producido por los distintos tipos de ganado. Para aquellos casos en que los índices no se encuentren pre establecidos se sugiere realizar cálculos en forma empírica de acuerdo a los cultivos y ganado que se establezcan en la zona de estudio.

**Residuos de cultivos y especies arbóreas:** De acuerdo a diversos estudios se ha logrado determinar índices de residuos para diversos tipos de cultivos y de especies arbóreas. Este índice se aplica sobre el rendimiento del cultivo (ver anexo 3) (volumen de masa cosechada por área cosechada [ $\text{Kg}/\text{m}^2$ ]) y entrega el volumen de la masa de residuo post cosecha incluyendo raíz, hojas y rastrojos [Kg] Cuadro 12.

**Cuadro 12.** Índice de residuos post cosecha

Tipo de Cultivo	Índice*
Maíz	0,43 <sup>3</sup>
Cebada	0,34 <sup>4</sup>
Avena	0,45
Papa	0,8
Arroz	0,48 <sup>5</sup>
Sorgo	0,24 <sup>4</sup>
Remolacha	0,75
Tomate	0,75
Maravilla	0,28 <sup>6</sup>
Alfalfa	0,1
Trigo	0,37 <sup>4</sup>
Lolium	0,5
Olivar	0,09
Viñedo <sup>7</sup>	0,075
Frutales	0,03
Especies arbóreas <sup>8</sup>	0,02

**Fuente:** Modificado a partir del texto de Domínguez y Marcos, 2007.

\* Este factor se aplica sobre el rendimiento productivo por área cultivada.

### Residuos de producción ganadera y avícola

En el ámbito ganadero se considera el estiércol generado por las cabezas de ganado como materia orgánica disponible para la generación de biogas. En el siguiente cuadro se presenta el factor de residuos (estiércol) generado por el ganado bovino y avícola:

Para el cálculo del **factor de estiércol de aves (gallinas)** se utilizaron datos de la Asociación de Productores Avícolas de Chile A.G. (APA) publicados el año 2010 y del texto de Chamy (2007). Dentro de los cálculos se consideró un peso promedio de las aves de 2,7 Kg., una densidad de 5 aves por metro cuadrado (en corrales) y que cada ave produce 0,00822 [Kg de estiércol/día], es decir, se producen 0,0411 Kg de estiércol por metro cuadrado.

El **estiércol de vacuno**, según datos estadísticos generados por Chamy *et al* (2007) indican que un vacuno de beneficio (450-635 Kg) genera entre 38 y 53 [Kg/día de estiércol], considerando que la densidad de 1 Vacuno por hectárea.

<sup>3</sup> Bellocchi *et al*, 2002.

<sup>4</sup> Kemanian *et al*, 2007.

<sup>5</sup> Confalonieri *et al*, 2006.

<sup>6</sup> Kaya *et al*, 2004.

<sup>7</sup> Generación de residuos sólidos de producción de vino. Chamy *et al*, 2007.

<sup>8</sup> Se consideran podas

### **Conversión de residuos en metano**

En esta etapa se estimará el potencial teórico de biogas, que corresponde a la metanización de toda la materia orgánica disponible en los residuos según los cálculos anteriores, descontando la humedad. Para realizar la conversión se utilizan los valores del Cuadro 13

**Cuadro 13.** Factores de conversión utilizados en el cálculo del potencial de biogas

<b>Tipo de biomasa</b>	<b>Productividad</b>	<b>Unidades</b>	<b>% Metano en biogás</b>
Desmalezado y poda	0,27	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	70
Trigo	0,50	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Maíz	0,70	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Papa	0,70	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Raps	0,20	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Alfalfa	0,30	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Remolacha	0,50	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	60
Vitivinícola	0,70	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	62
Mataderos	0,43	m <sup>3</sup> biogás/Kg residuo	65
Estiércol vacuno	0,50	m <sup>3</sup> biogás/Kg DQO degradado	60
Estiércol avícola	0,52	m <sup>3</sup> biogás/Kg DQO degradado	58
Estiércol porcino	0,48	m <sup>3</sup> biogás/Kg DQO degradado	62

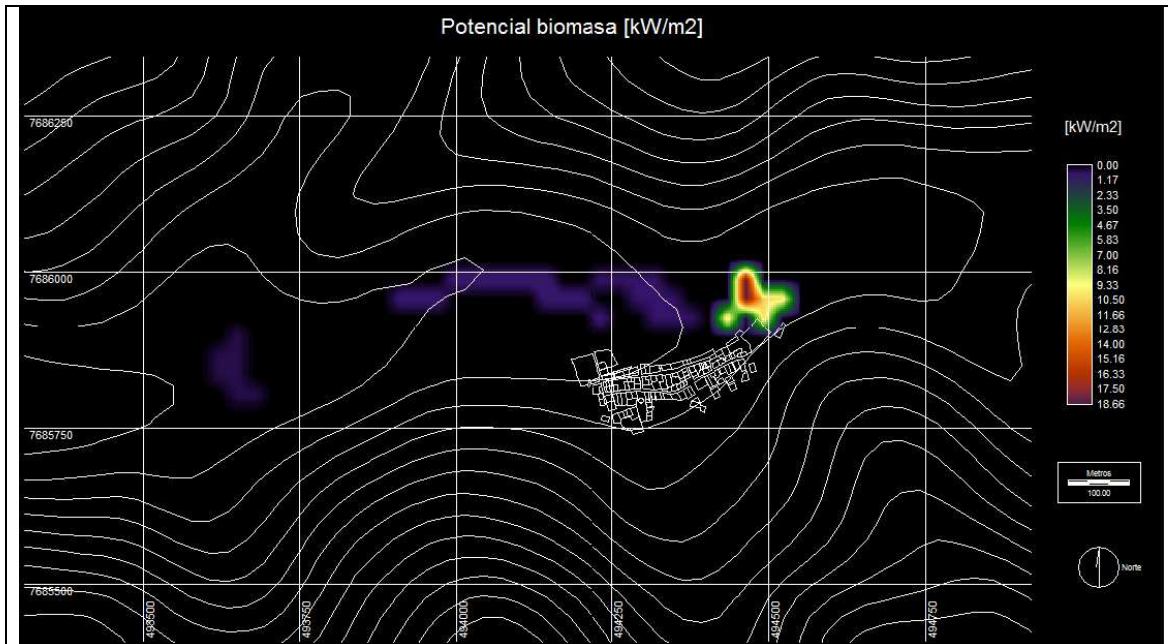
**Fuente:** Chamy *et al*, 2007.

### **Potencia energética**

El potencial energético teórico que se puede obtener del biogás generado a partir de la materia orgánica de los residuos estará dado por su poder calorífico. Para efectuar los cálculos se considerará un poder calorífico del biogás de 5.750 kcal/m<sup>3</sup> de biogás (60% de metano), para generar una potencia energética de 1 [kW] durante todo 1 mes (30 días) en forma constante se utilizan 619.088,5656 [kcal]. En la cartografía de potencial energético de biomasa se expresaran los kW generados por metro cuadrado de cultivo al mes.

### **Metodología aplicada**

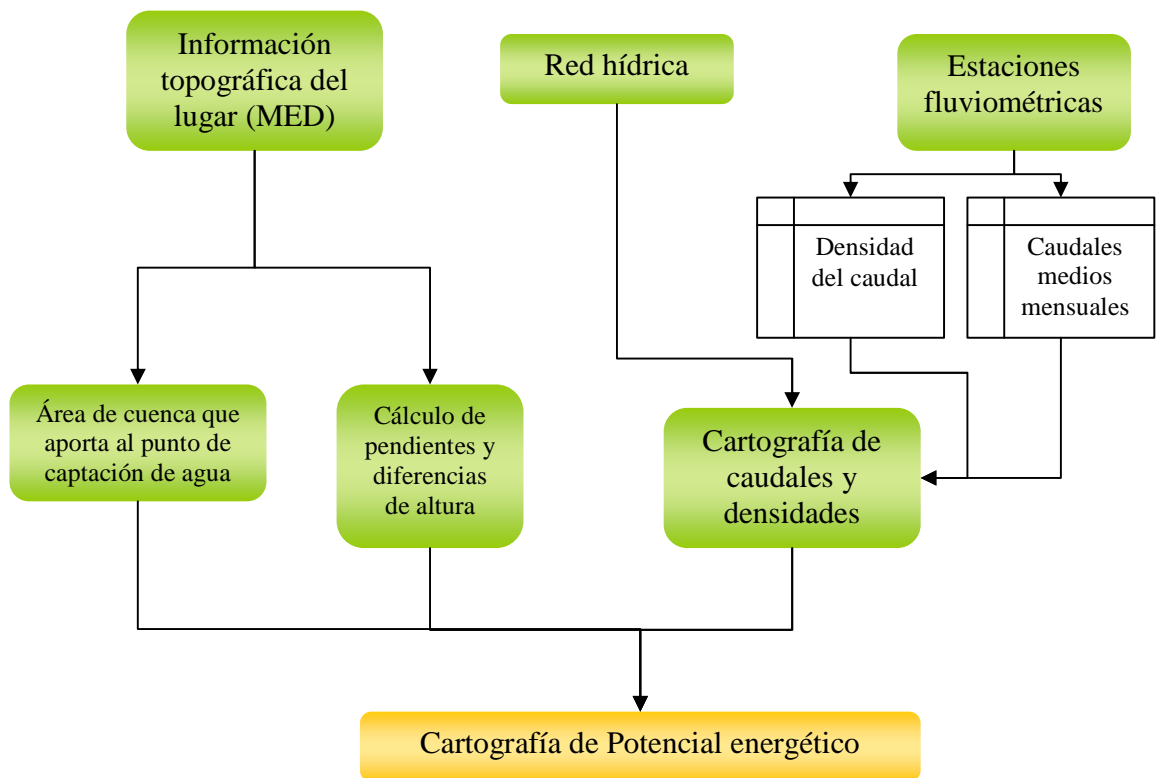
Para el caso de Huatacondo a través de la información de los cultivos que se encuentran en la zona se obtuvo la siguiente imagen de la Figura 24 donde los colores fríos (azules) representan un menor potencial energético y las zonas de colores cálidos (rojizos) representan un mayor potencial energético de la zona de cultivo, esto se genera por la densidad y tipo de cultivo presente en cada una de las zonas plantadas. Además se incluye las curvas de nivel y la trama urbana de la localidad.



**Figura 24.** Cartografía de potencial de biomasa medida en [kW/m<sup>2</sup>].

#### 4.3.3.4. Fuente de energía Mini Hidráulica

Los factores que se requerirán en esta fuente de energía renovable son de carácter Físico utilizándolos para los cálculos del potencial energético teórico y la energía mecánica de la fuente de energía mini hidráulica (MH). El cálculo de esta última nos proporciona información para elaborar la cartografía de potencial energético el cual es expresado en la ecuación de Bernoulli (ver ec. 24). En la Figura 25 se presenta el esquema para la construcción de una cartografía de potencial energético del un cauce de agua.



**Figura 25.** Esquema. Construcción cartografía de potencial energético del un cauce de agua

En un primer nivel se necesita recopilar información sobre los cauces disponibles, topografía del lugar e información física del agua. Esta información la podemos obtener a través de la red hídrica, datos de estaciones fluviométricas y modelos de elevación digital. Estos factores son explicados a continuación:

**Red Hídrica:** Es conformada por los cursos de agua naturales (ríos, esteros, lagos, lagunas, etc.) o artificiales (canales de regadío, tranques, etc.). Los cuales son importantes para determinar los cauces existentes en el área de estudio, se debe verificar o actualizar la información en terreno, a esta red hídrica se le debe complementar los datos de caudales medios diarios oficiales entregados por alguna estación de la DGA cercana a el área de estudio, red de regantes en el caso que se desee utilizar algún canal de regadío o requerir la información de caudal al responsable de la toma de agua que se requiere aprovechar. Como información para la toma de decisiones se agrega una columna con el régimen fluvial o disponibilidad del recurso.

Para el caso de los cauces naturales se distinguen 3 categorías:

Pluvial: Caudal generado sólo por las precipitaciones.

Nival: Caudal generado por el derretimiento de las nieves.

Mixto: Cuando su origen es por el derretimiento de nieves o por las precipitaciones del sector.

En el caso de canales de regadío se describen 2 categorías:

Temporales: Traen agua sólo una temporada.

Permanentes: Si traen agua todo el año.

**DEM:** Es el modelo de elevación digital, el cuales una representación continua de la topografía de la superficie de la tierra. Se utiliza para conocer la diferencia de alturas en la sección de río o del canal de regadío que deseamos utilizar. Además, a través del DEM y de la Red Hídrica se puede delimitar la **cuenca hidrográfica** del área de estudio.

**Estaciones fluviométricas:** Son estaciones de monitoreo de los cauces, en ellas se miden distintos parámetros físico químicos de los ríos, como también datos hidrológicos. Principalmente se utilizaran datos de caudales medios mensuales y si es posible datos densidad del agua. Si bien este último parece no tener un rol principal en el cálculo del potencial energético este puede indicarnos de forma indirecta una alta presencia de sales que pueden afectar la vida útil de la maquinaria y la potencia media generada, esto es muy probable en zonas del norte grande del país.

La información proveniente de las estaciones fluviométricas se agrega a las tablas de datos de la red hídrica para tener una visión de los caudales que fluyen por cada uno de los cauces y de esta forma estimar en términos absolutos la energía cinética que estos cauces pueden aportar.

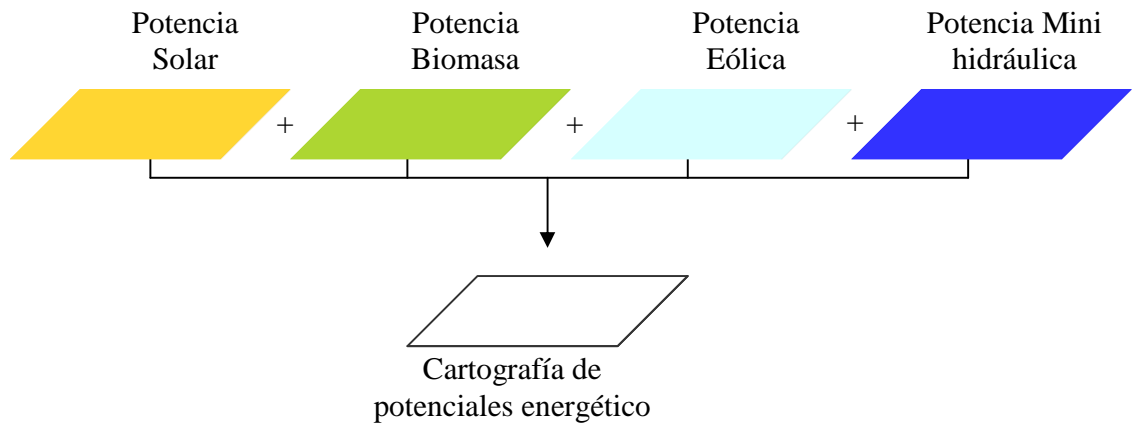
Los DEM nos entregarán información sobre el área que influye sobre el punto en el que queremos captar agua para la generación de energía. Además, entrega información sobre las diferencias de altura entre el lugar que captamos el agua y el lugar que la liberamos para la generación de energía.

Aplicando el algoritmo de la ecuación de Bernoulli podemos estimar en términos absolutos el potencial energético hídrico, proveniente de canales de regadío, cauces naturales, tranques, etc.

#### **4.3.4. Etapa 4**

En esta etapa las cartografías digitales se adicionan (ver Figura 26) generando un mapa con información territorial del potencial energético de las fuentes de energías renovables, analizadas y disponibles en la zona de estudio. El mapa tiene como objetivo espacializar los potenciales energéticos que tiene el territorio en términos absolutos. Entregando una herramienta para la toma de decisiones para los actores involucrados y equipo técnico evaluador. Con la cartografía de potenciales energéticos podemos generar cluster de acuerdo a los niveles de producción de potencia energética que necesitemos.





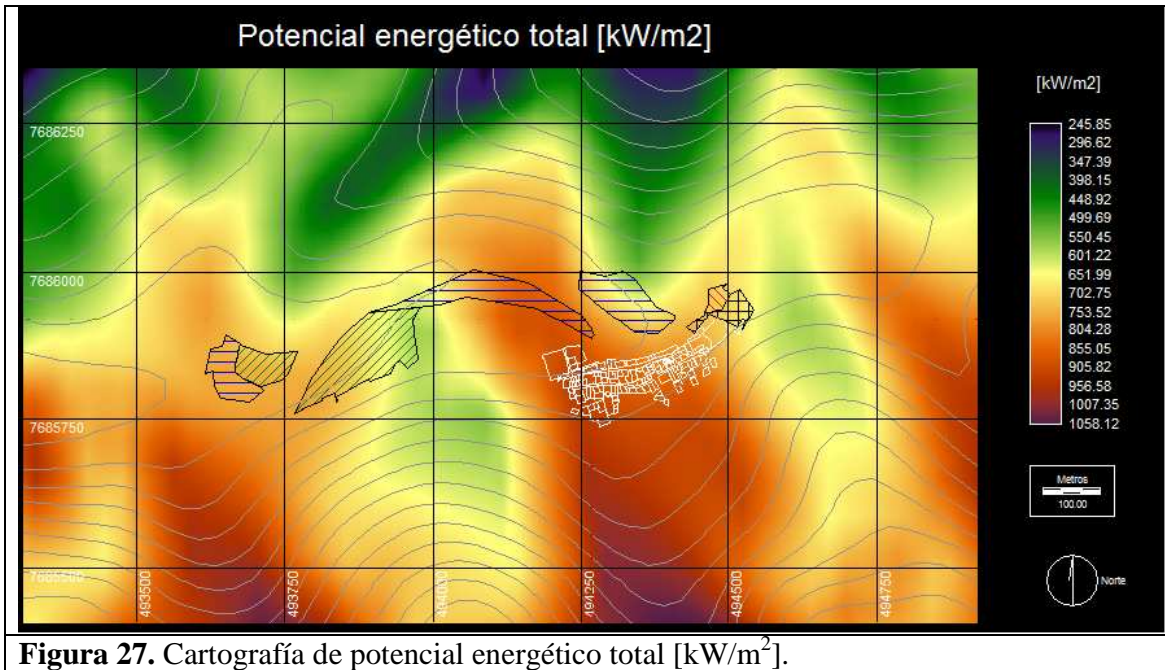
**Figura 26.** Esquema. Construcción cartografía de potenciales energéticos.

Esta nueva cartografía nos permite realizar un rápido análisis sobre la productividad energética del territorio, a esto se le debe sumar una identificación de las demandas actuales de energía y realizar cartografía de demandas futuras, considerando una proyección en al menos dos escenarios. Un escenario sin proyectos energéticos (GeVi) y otro escenario considerando el proyecto energético (GeVi).

### **Metodología aplicada**

En la cartografía de la Figura 27 se fusionó los resultados obtenidos en las cartografías para la fuente en energía solar (Figura 19), eólica (Figura 21) y biomasa (Figura 24). Agregando en líneas blancas la trama urbana del poblado de Huatacondo, las curvas de nivel cada 25 metros y el área de los cultivos principales presentes en la zona. Esta última se diferencia en líneas de color rojo zona de cultivos de papas, en negro el maíz, verde se destacan las tunas y azul la alfalfa.

De esta forma se puede observar de forma gráfica el uso del territorio y la distribución de los potenciales energéticos en el mismo.



**Figura 27.** Cartografía de potencial energético total [kW/m<sup>2</sup>].

## 5. CONCLUSIONES

Tras la recopilación de antecedentes sobre las fuentes de energías renovables se logra confirmar la necesidad de reestructurar y diversificar la matriz energética. Concluyendo que el desarrollo de energías en el país, debe ser a través de fuentes de energías existentes en el territorio. Sin embargo, la deficiente información sobre los Recursos Naturales existentes en Chile para la generación de electricidad produce un alto grado de incertidumbre sobre las inversiones en ellas en todas las escalas. Por ello, el desarrollo de trabajos relacionados con la búsqueda de de datos existentes son necesarios y acordes a las necesidades del país.

La propuesta metodológica presentada, genera antecedentes para debatir sobre el manejo de información y escala espacial a la que se deben generar los datos sobre recursos naturales en el presente y el futuro. Se logró estandarizar las metodologías existentes para prospecciones de diversas fuentes de energías renovables, logrando generar una herramienta concreta para la toma de decisiones sobre el territorio. Esta metodología se debe complementar con otras cartografías territoriales (demanda presente y futura de energía en diferentes escenarios, análisis temporal (futuro) de los potenciales energéticos en diferentes escenarios, uso del suelo presente y futuro, hábitat natural y silvestre) para realizar una planificación energética del territorio.

Se ha logrado establecer una propuesta metodológica. Identificar áreas geográficas con potenciales energéticos de acuerdo a los recursos naturales existentes en el área de estudio, como se muestran en las cartografías resultantes para las fuentes de energía de biomasa, eólica y solar y una cartografía de potencial energético neto para las fuentes de energías renovables evaluadas.

Si bien, la generación de datos sobre fuentes de energías renovables y de recursos naturales es un tema fuera del alcance de la memoria, se debe destacar y sugerir una mayor preocupación, tanto a nivel político como empresarial. Proponiendo en esta conclusión, crear algún mecanismo que proporcione una mayor accesibilidad a bases, tanto para descargar como para subir datos sobre recursos naturales.

En el desarrollo de la memoria se ha identificado una deficiente información sobre los recursos de biomasa disponibles para su uso energético. En localidades aisladas como Huatacondo se desarrollan diversos tipos de cultivos que generan residuos orgánicos utilizables para la generación de biogás. Esta generación, en un poblado con poblaciones menores a 500 habitantes, puede ser suficiente para satisfacer parte de la demanda.

Finalmente se destaca el constante avance de las ERNC en el país, siendo necesario un mayor aporte del Estado para el desarrollo de éstas, en distintas escalas productivas beneficiando a diversas localidades aisladas.

## 6. RECOMENDACIONES

Este capítulo se enfoca a dar sugerencias al lector para la utilización de esta metodología:

- Tener presente al inicio de los proyectos de Generación Virtual el nivel de información de los recursos energéticos presentes en el sector donde se desarrollará el estudio y datos disponibles para la generación de cartografía de las fuentes de recursos naturales.
- Si bien esta propuesta metodológica pretende determinar la disponibilidad energética de los recursos, esto no es determinante para la toma de decisiones per se, el análisis de esta información debe ser realizada en conjunto con la comunidad y tomar en cuenta su percepción sobre los mejores sitios para instalar unidades generadoras de electricidad, estas intenciones se consideran dentro de estrategias sociales de intervención con nuevas tecnologías en zonas aisladas, rurales o que nunca han tenido un uso intensivo de la electricidad.
- Se debe mejorar la propuesta metodológica a través de su aplicación completa en posteriores proyectos, intentando mantener la sencillez de los esquemas y procedimientos para explorar las fuentes de energía.
- Esta propuesta debe ser utilizada de forma exploratoria y como una herramienta propositiva en los análisis territoriales.
- Los datos generados deben ser de libre acceso para propuestas similares a un GeVi o proyectos locales de Generación energética a pequeña escala.

## 7. TRABAJO FUTURO

Si bien este trabajo fue generado para ser utilizado en la Iniciativa GeVi, proyecto elaborado y ejecutado por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, en su finalidad puede ser utilizado para cualquier proyecto que necesite generar información de fuentes de energías renovables, dado por su carácter recopilatorio y trabajar con variables generales y que sirven para la toma de decisiones de cualquier proyecto de generación distribuida a través diversas fuentes de generación que utilicen ERNC que estén presente en el presente trabajo.

Como trabajos futuros se espera generar nuevas versiones de esta propuesta metodológica y ampliar las fuentes de energías renovables que se puedan identificar, tales como, geotérmica de baja entalpía, mareomotriz y las que se puedan desarrollar en el futuro y además poder validarla con nuevas experiencias en el área de las energías renovables.

Como trabajos complementarios futuros se espera automatizar estos procesos de generación de cartografía ingresando sólo los datos iniciales. Posteriormente se espera generar una plataforma abierta a todo el público (vía web) en la cual se pueda ingresar los datos y generar la cartografía deseada. Para esta operación se recomienda que sea gratuita previa aceptación de que esos datos entregados por el usuario formen parte de una base de datos nacionales.

La metodología propuesta en esta memoria, junto a otras que consideren las proyecciones de generación y demanda futura en el territorio, deberían ser la base para una planificación energética del territorio. Por lo anterior se recomienda trabajar en estudios que den cuenta de los efectos que tiene el implementar un proyecto energético (como el GeVi) que asegure el continuo suministro energético en poblados aislados y con baja densidad poblacional, para poder realizar las proyecciones de demanda y como afecta a la economía y desarrollo social local.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Aburto, C. 2007. Elaboración de un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global mensual para Chile central. Memoria de Título. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile, 223 h.

Aceituno, P., Santana, Ch. y Ulriksen U. 1996. Evaluación del potencial de energía eólica en Chile: Resultados Generales. Exp. Long-lead Forecast Bulletin, 5(2), 37-40 h.

Alward, R. 2000. Remote community renewable energy technology Project identification initiative. CANMET. Quebec. Canada, 6 h.

Álvarez, M. 2010. Estrategias para la intervención tecnológica de energías renovables no convencionales en comunidades rurales, bajo el Marco de la Iniciativa GeVi (Generador Virtual). Tesis para optar al título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile. Facultad de ciencias agronómicas. Santiago, Chile, 91 h

Amon y Boxberger. 2006. Danish Institute of Agricultural Sciences. Dias Report N1, 123 h.

Anderson, J.R; Hardy,E; Roach, J y Witmer, R. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. US Geological Survey, Prof. Paper, Washington, DC, 964 h.

Antezana, J. 2004. Diseño y construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. Tesis para optar al título de Ingeniero Civil electricista. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Santiago, Chile, 120 h.

Bellocchi, G, N. Silvestri, M. Mazzoncini, S. Menni. 2002. Using the CropSyst Model in Continuous Rainfed Maize (*Zea mais L.*) under Alternative Management Options. J. Agron., 6 (1): 43-56 h.

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN). 2008. Historia de la Ley N° 20.257, 20 h.

Blarke, H. Lund. 2008. The effectiveness of storage and relocation options in renewable energy Systems. Renewable Energy, 33(7), 1499- 1507 h.

Boyle, G. 2004. Renewable energy. Power for a sustainable future. Oxford University Press, 452 h.

Bravo, Juan. 2006. Apuntes curso EL67F. Gestión de la distribución de la energía eléctrica, 5 h.

Brokering, W., R. Palma Y L. Vargas. 2008. Los sistemas eléctricos de potencia. Santiago, Chile, Editorial Pearson, 504 h.

Campbell, J. 1996. Spatial correlation effect upon accuracy of supervised classification of land cover. Photogrammetric engineering and remote sensing, 47 h.

CDEC-SIC (Centro de Despacho y Carga- Sistema Interconectado Central). 2010. [En línea]. Información técnica del SIC. Disponible en: [https://www.cdec-sic.cl/contenido\\_es.php?categoria\\_id=6&contenido\\_id=000044](https://www.cdec-sic.cl/contenido_es.php?categoria_id=6&contenido_id=000044). Leído: 25 de Febrero de 2010.

Centro de Estudio de los Recursos Energéticos de la Universidad de Magallanes (CERE – UMAG). 2005. Mejoría del conocimiento y administración de la información eólica en Chile. Segunda etapa, 74 h.

Chamy R., E. Vivanco y Escuela de Ingeniería de Bioquímica (PUCV). 2007. Potencial de Biogás. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. CNE/GTZ, 80 h.

Chapra, S. y Canale, R. 1999. Métodos numéricos para ingenieros, 3ª ed. Mexico: MacGraw-Hill, 981 h.

CNE (Comisión Nacional de Energía) y GTZ (Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit). 2008. Potencial de Biomasa Forestal. Santiago, Chile, 56 h.

CNE (Comisión Nacional de Energía). 2007. Proyectos de Biomasa. Guía para Evaluación Ambiental Energías Renovables No Convencionales. CNE. Santiago, Chile, 102 h.

Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). 2010. [En línea]. Fuentes de energía renovables. Disponible en: [http://www.cchen.cl/index.php?option=com\\_content&task=view&id=167&Itemid=86](http://www.cchen.cl/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=86). Leído: 14 de Noviembre de 2010.

CNE (Comisión Nacional de Energía). 2006. Plan de Seguridad Energética (PSE). Santiago, Chile, 7 h.

Comisión Nacional de Energía (CNE). 2009. Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno. Figura 5: Capacidad instalada por sistema eléctrico en Chile 2008. (Página 28), 124 h.

Comisión Nacional de Energía. 2010. [En línea]. Energía hídrica. Disponible en: [http://www.cne.cl/fuentes\\_energeticas/e\\_renovables/hidrica.php](http://www.cne.cl/fuentes_energeticas/e_renovables/hidrica.php). Leído: 14 de Noviembre de 2010.

Confalonieri, R., M. Acutis, G. Bellocchi, C. Iacopo, S. Tarantola, M. Donatelli y G. Genovese. 2006. Exploratoru sensitivity analysis of cropsyst, warm and wofost: a case – study with rice biomass simulations. *Italian Journal of Agrometeorology*. (3): 17-15 h.

Couper, C. 2008. The Virtual Generator. *Revista. The Utilities Project*, (8), 126 -129 h.

De Juana, J. 2003. Energías renovables para el desarrollo. International Thompson Editores Spain. Madrid, España. 311 h.

De Juana, J. M. 2003. Energías Renovables para el Desarrollo, Paraninfo - Thomson Learning. 45 h.

Decreto Supremo 15 (DS 15). : "Promulga Acuerdo entre el Gobierno de la República de Chile y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo sobre el proyecto denominado ""Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables"". *Diario Oficial*. Santiago, Chile, 06 de abril de 2002. 1 h.

Departamento de Investigación y Desarrollo de la Universidad de Chile. 2002. Planificación ecológica del Territorio. Guía metodológica. 93 h.

Domínguez, J. Marcos, M. 2007. Análisis de la producción potencial de energía con Biomasa en la región de Andalucía (España) utilizando Sistemas de Información Geográfica, *Cybergeo : European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, article 142. 14 h.

Domínguez, J., P. Ciria, L. Esteban, D. Sánchez y P. Lasry. 2003. Evaluación de la biomasa Potencial como recurso energético en la región de Navarra (España). *Geo Focus (Informes y comentarios)*, (3), 1-10 h.

Douglas, S y R. Kessler. 1988. User's guide to the diagnostic wind field model (version 1.0). Systems Applications, Inc., San Rafael, CA, 48 h.

Driesen, J., K.Visscher. 2008. Virtual Synchronous Generators. *IEEE*. 3 h.

Electropedia. 2010. [En línea]. Wind power. Disponible en: [http://www.mpoweruk.com/wind\\_power.htm](http://www.mpoweruk.com/wind_power.htm). Consultado: 13 de diciembre de 2010.  
Enciclopedia Británica – Valley breeze. Disponible en: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/622325/valley-breeze>. Leído: 10 de Diciembre de 2010.

Ferrando Acuña, F. 2010 [En línea]. Expansión urbana, PRMS y el corredor fluvial del Rio Mapocho inferior *Revista de Urbanismo, Norteamérica*. Disponible en: <http://www.revistas.uchile.cl/index.php/RU/article/viewArticle/8840/8662>. Leído: 13 de Diciembre 2010.



Fotheringham, A., C. Brundson y M. Charlton. 2000. Quantitative Geography. London. SAGE Publications. 270 h.

Galaz, R. 2008. Marco Legal y condiciones del mercado eléctrico nacional para el desarrollo de las energías renovables. [Diapositivas]. Santiago, Chile. ECOFYSVALGESTA – Corfo. 82 h.

Gómez, A. 2002. Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. España, Mc Graw Hill, 792 h.

Gómez, T. 2009. [En línea]. Factibilidad biogas vertedero LH-MZA. Disponible en: <http://www.estrucplan.com.ar/articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=2206>. Leído: 27 de Diciembre de 2010.

González, R. y Moreno, R. 2003. Generación distribuida. Departamento de ingeniería eléctrica. Pontificia Universidad Católica. Santiago, Chile. 47 h.

Gutiérrez, M. Conversión termoquímica de la biomasa. En: Seminario estado Actual y desarrollo futuro de las tecnologías de energías renovables. 21 de diciembre de 2009. Santiago. Universidad de Chile. 78 h.

INE (Instituto Nacional de Estadística). 2010. [En línea]. Censos agropecuarios. Disponible en: [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/censos\\_agropecuarios/censos\\_agropecuarios.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/censos_agropecuarios/censos_agropecuarios.php). Leído: 27 de Diciembre 2010.

Iqbal, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press. 390 h.

Jaramillo, O.A., R. Saldaña y U. Miranda. 2004. Wind power potencial of Baja California Sur, México. Renewable Energy (29): 2087 – 2100 h.

José M<sup>a</sup> Cuadrat y M<sup>a</sup> Fernanda Pita. 2000. Climatología, 2<sup>a</sup> Edición. Editorial Cátedra (Geografía). 10 h.

Kassam, A.H. 1977. Net biomass production and yield of crops. Present and Potential Land Use by Agro-ecological Zones Project. AGLS, Roma, FAO. 30 h.

Kaya, Y., D. Baltensperger, L. Nelson y J. Miller. 2004. The determining physiological maturity time in sunflower. Trakya Univ. J. Sci, 5 (1): 1- 10 h.

Kemanian, A., C. Stöckle, D. Huggins y L. Viega. 2007. A simple method to estimate harvest index in grain crops. 44 h.

- Ketter, J. 2009. Metodología básica para la definición de la ubicación óptima de un Generador Virtual. Tesis (Memoria para optar al título de Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. 126 h.
- Kunstmann, A. 2009. El recurso eólico en Magallanes y en Chile: Rol de UMAG. [Diapositivas]. Universidad de Magallanes (UMAG), Punta Arenas, Patagonia Chile. 57 h.
- Lang, F. 2010. Estimación del potencial eólico de la región del Maule, Chile. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. 68 h.
- Larkin, S., Ramage, J. y Scurlock, J. Bioenergy. 2004. En: Boyle, G (Ed.). Renewable energy, power for a sustainable future. 2° ed. Nueva York, Estados Unidos, Universidad de Oxford. 106 – 146 h.
- Le Gac, M. 2010. Wind power potential modeling of the San Jose de Maipo Region, Chile. Proyecto final de quinto año. 58 h.
- Leiva, R.; Herrera, C. 2008. Estudio de contribución de las ERNC al SIC al 2025. Informe final: Energía Renovable No Convencional – Energía eólica en Chile. UTFSM. 87 h.
- Ley N° 20.257. Introduce modificaciones a la ley general de servicios eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Diario Oficial. Santiago, Chile, 21 de abril de 2008. 6 h.
- Liou, K. 1980. An introduction to atmospheric radiation. Academic Press. 392 h.
- Liu, H. 1991. Wind Engineering. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 25 h.
- López, J. 1989. Aplicaciones del tratamiento de imágenes espaciales de alta resolución a los estudios de ordenación del territorio en Galicia. Tesis Doctoral, Santiago de Compostela. 60 h.
- Martin, H. 2008. [Diapositivas]. Proyecto Fenix. Conversión internacional Matriz energética Unión Europea, Marzo 2007. 7 h.
- Mendoza, P. 2006. Control Electrónico de una central Micro-Hidráulica para su aplicación en generación distribuida. Tesis (Memoria para optar al título de Ingeniería Civil Electricista). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. 110 h.
- Ministerio de Energía. 2010. [En línea]. Estadísticas Energéticas. Talleres de Estadísticas energéticas en Chile, septiembre de 2010. Disponible en: [http://www.minenergia.cl/minwww/opencms/05\\_Public\\_Estudios/estadisticas\\_energeticas/estadisticas\\_energeticas.html](http://www.minenergia.cl/minwww/opencms/05_Public_Estudios/estadisticas_energeticas/estadisticas_energeticas.html). Leído: 20 de Diciembre de 2010.

- Muñoz, R.; R. Garreaud; L. Gallardo, A. Cabello y B. Rosenbluth. 2003. Estudio: Mejoría del conocimiento del recurso eólico en el norte y centro del país. 131 h.
- Mur, J. 2008. Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética. Cursos de energía eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza. 7 h.
- Nussbaumer, T. 2002. [Diapositivas]. Combustion and Co-Combustion of biomass, 12th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Amsterdam, Alemania. June 2002. 20 h
- OCDE. 2005. Evaluación del desempeño ambiental. Chile. Edición Naciones Unidas, CEPAL. 246 h.
- ONU (Naciones Unidas). 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. ONU. 25 h.
- Palma, R. La iniciativa GeVi: El primer generador virtual para Chile. En Seminario: Estado Actual y desarrollo futuro de las tecnologías de energías renovables. 12 de Agosto de 2008. Santiago. Universidad de Chile. 31 h.
- Pearcy, R.W. 1989. Radiation and light measurements. In: R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney, and P.W. Rundel (eds). Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation. Chapman and Hall. New York, 95 – 116 h.
- Pereda, I. 2005. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Tesis título de Ingeniero civil Industrial, Mención Electricidad. Pontificia Universidad Católica. Facultad de Ingeniería. Santiago, Chile. 173 h.
- Pontt, J., Staff C, Staff N. 2008. Estudio de contribución de las ERNC al SIC al 2025. Potencial de biomasa en Chile. UTFSM. 74 h.
- Pudjianto, C. Ramsay, G. Strbac. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. IEE Renewable Power Generation, (1): 16 h.
- Rahmann, C. 2006. Análisis dinámico de la operación de parques eólicos interconectados al SIC. Memoria de título de Ingeniero Civil Electricista, Universidad de Chile. 80 h.
- Rich, P.M. 1989. A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory Report. 30 h.
- Rich, P.M. 1990. Characterizing plant canopies with hemispherical photography. In: N.S. Goel and J.M. Norman (eds). Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. Remote Sensing Reviews. (5):13–29 h.

Rolf, F. 2004. Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): Una alternativa energética a desarrollar. En: Aedo, M. P. y Larraín, S. (Eds.). Seminario Latinoamericano sobre energías renovables: Hacia la Conferencia mundial de Bonn. Abril de 2004. Santiago, Chile. 119 – 130 h.

Román, R. Energía solar activa. [Diapositivas] En: Talleres regionales sobre energías renovables no-convencionales: 25 de noviembre de 2009. Chile. Gobierno Regional de la Región de los Ríos, Universidad de Chile y Comisión Nacional de Energía. 25 h.

Romero, H. 1985. Geografía de Chile Tomo XI: Geografía de los climas. Editorial Instituto Geográfico Militar, Chile. 243 h.

Salas, E. 2002. Guía Metodológica. Planificación ecológica del territorio. Santiago, Chile. 93 h.

Sarmineto, P. 1995. Energía solar: Aplicaciones e ingeniería. Ediciones Universitarias de la Seguro JV, Lambert TW. 2000. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. J Wind Eng Ind Aerodynam. 85(1). 75–84 h.

Servicio Aerofotogramétrico (SAF). 2009. [En línea]. Fotografía Aérea Digital una nueva herramienta para los S.I.G. Disponible en: [www2.saf.cl/nuevo/acerca/historia.htm](http://www2.saf.cl/nuevo/acerca/historia.htm). Leído el 20 de Diciembre de 2009.

Ubilla, G., M. Orellana, N. Faúndez y J. Espinoza. 2008. Estudio de contribución de las ERNC al SIC al 2025. Informe final: Energía Renovable No Convencional Hidroeléctrica en Chile. UTFSM. 76 h.

Undén, P., L. Rontu y H. Järvinen. 2002. HIRLAM-5 Scientific Documentation. HIRLAM-5 project, c/o Per Undén SMHI, S-601 76 Norrköping Sweden. 144 h.

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). 2003. Formulación de un programa Básico de normalización para aplicaciones de Energías alternativas y difusión. Guía para la utilización de la Energía Eólica para generación de Energía Eléctrica. Bogotá, Colombia. 52 h.

Villarrubia, M. 2004. Energía eólica. Ediciones Ceac, Barcelona España. 323 h.

Visscher, K. y de Haan, S. 2008. Virtual synchronous machines for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralised generation, 2008, Proceedings of the CIRED SmartGrids conference, June 2008, Frankfurt.

Visscher, K., J. Kester, G. Schaeffer, M. Hommelberg y F. Nieuwenhout. 2007. Feasibility of distributed electricity storage. Journal of distributed energy resources. (2): 4 h.

Walker J. y Jenkins N. 1997. Wind energy technology. England: Chichester. 70 h.

Zelaya, C. 2007. Evaluación de suelos y del territorio para la ubicación y diseño de plantas bioenergéticas en Nicaragua. Universidad de Lleida. 186 h.

Zhou, W., H. Yang y Z. Fang. Wind Power Potential and Characteristic Analysis or the Pearl River Delta Region, China. *Renewable Energy*. 2006. 31(6): 739-753 h.