

Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos naturales (MARN), Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" (UCA), Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET/MARN)

Presentan:

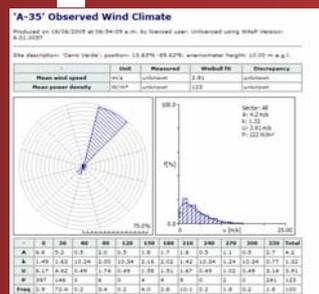
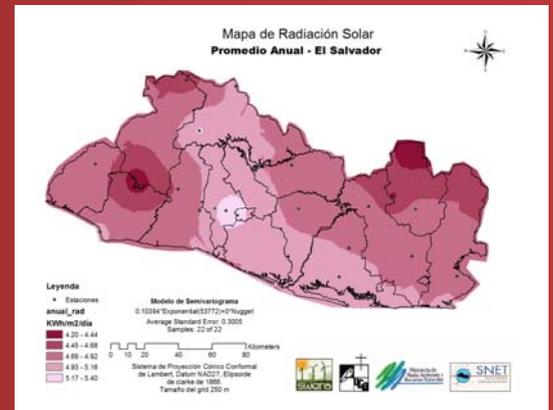
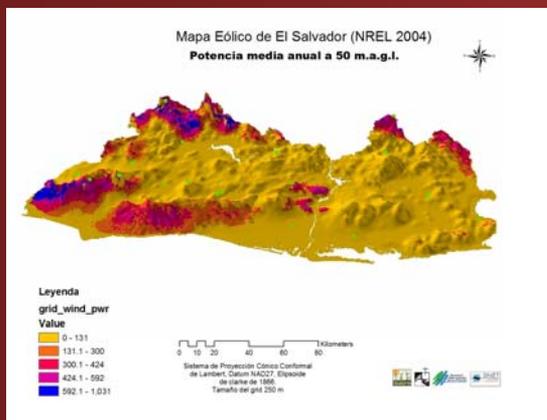
Mauricio Ayala, MARN

Ismael Sánchez, UCA

Arturo Escalante, UCA

Willian Marroquín, UCA

DOCUMENTO PRINCIPAL



PRESENTACIÓN

Este documento de Evaluación del Potencial Eólico y Solar en El Salvador, se enmarca dentro de los esfuerzos que está desarrollando el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), con el apoyo directo de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA), para el cumplimiento de los compromisos adoptados por el país dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, encaminados a la promoción de medidas, programas y proyectos que reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero.

Esta publicación, es uno de los resultados concretos que se han logrado a través del proyecto regional “Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar” (siglas en inglés SWERA), el cual ha sido coordinado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y apoyado financieramente por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF).

El propósito de formular, editar y publicar este documento es contribuir a superar la barrera de ausencia y accesibilidad de información confiable, sobre los recursos de energía solar y eólica en El Salvador; con lo cual se espera apoyar la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- i) Reducir la incertidumbre asociada a las decisiones de inversión y desarrollo para proyectos de energía solar y de viento.
- ii) Evidenciar la abundancia de radiación solar con la que cuenta la mayor parte del territorio nacional, durante los diferentes meses del año, y potenciar su aprovechamiento.
- iii) Facilitar el diseño técnico de proyectos de energía solar.
- iv) Facilitar la identificación de las zonas geográficas del país que cuentan con el mayor potencial eólico, sirviendo de base para que otras entidades y empresas interesadas evalúen la factibilidad de ejecutar en zonas específicas, tanto proyectos a pequeña escala como proyectos comerciales de mayor escala.
- v) Contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, a través de la promoción de fuentes renovables de energía que eviten la quema de combustibles fósiles.
- vi) Fortalecer la estrategia de promoción de las energías renovables ejecutada por el MARN en coordinación con el Ministerio de Economía.

El equipo de trabajo de la UCA que participó directamente en la elaboración de este documento, estuvo conformado por investigadores del Departamento de Ciencias Energéticas y del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Maestría en Gestión del Medio Ambiente (MAGMA/UCA).

AGRADECIMIENTOS

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” (UCA) agradecen el apoyo financiero del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). A la vez agradecen la colaboración de:

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)
El Laboratorio Nacional Riso de Dinamarca (RISO)
El Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (NREL)

Nuestro reconocimiento especial a los ingenieros Willian E. Marroquín y Arturo Escalante de la UCA, por su apoyo técnico para la elaboración del presente documento y al Ing. Oscar Valencia, también de la UCA, por la traducción de esta publicación al idioma inglés.

INDICE

	Pág.
1. Introducción	1-1
1.1. Ubicación geográfica y clima de El Salvador	1-1
1.2. Antecedentes de proyectos solares y mediciones solares	1-3
1.3. Antecedentes de mediciones de viento en el país	1-4
1.4. Objetivos principales de esta investigación	1-7
2. Metodología de la investigación	2-1
2.1. Datos del proyecto solarimetría de la UES	2-1
2.2. Inventario de información solar y eólica de la división de meteorología del (SNET)	2-4
2.3. Procedimiento para recuperación de información solar y eólica	2-8
2.3.1. Sistema automatizado de manejo de datos meteorológicos (Brillo solar, Radiación solar y Viento)	2-11
2.4. Resultados obtenidos del proceso de digitalización de la información en los inventarios	2-13
3. Aplicaciones de la tecnología SIG al modelo de Ångström	3-1
3.1. Conceptos básicos de radiación solar y luz solar	3-1
3.2. Modelo de Ångström	3-3
3.3. Datos de radiación y brillo solar medidos y calculador por el modelo de Ångström para estimación de los mapas de potencial solar	3-11
4. Método de Kriging para estimación de potencial solar en El Salvador	4-1
4.1. Método de interpolación de Kriging	4-1
4.2. Cálculo de los promedios anuales de radiación solar y luz solar usando Kriging	4-10
5. Determinación del potencial eólico en El Salvador	5-1
5.1. Conceptos básicos del viento	5-1
5.2. Clima eólico de las estaciones meteorológicas del país	5-8
5.2.1. Climatología regional	5-10
5.3. Climatología regional en el Cerro Verde	5-13
5.4. Climatología regional en Planes de Montecristo	5-17
5.5. Climatología regional en La Galera	5-21
5.6. Tablas de medición de potencial eólico en las estaciones meteorológicas del país	5-24
6. Conclusiones	6-1
7. Bibliografía	7-1

1. Introducción.

En este documento se presentan las estimaciones de mapas de radiación solar, brillo solar (horas de luz solar) y de potencial eólico para El Salvador. Los mapas de tipo solar han sido generados utilizando tecnología de sistemas de información geográfica y, en el caso del viento se ha utilizado el software WAsP. Para el caso de potencial solar (brillo solar y radiación solar) se ha utilizado la técnica de interpolación de Kriging. Sus estimaciones se han realizado a partir de mediciones en campo en 22 estaciones meteorológicas en las cuales se utilizó el modelo de Ångström y datos de clima (zonas de vida de Holdrige) para estimar datos de radiación solar en estaciones con mediciones únicamente de brillo solar. En el caso de potencial eólico las velocidades promedio, direcciones predominantes del viento, los cálculos de densidades de potencia y estudios de modelaje eólico se han realizado con registros de 18 estaciones meteorológicas. Durante el desarrollo del proyecto SWERA se han actualizado los datos digitales de potencial eólico y solar del país disponibles en la división de meteorología del MARN/SNET, los avances alcanzados en este proceso se presentan en la sección 2 de este documento.

1.1 Ubicación geográfica y clima de El Salvador.

La República de El Salvador está localizada en la parte noroeste de Centroamérica, limita al norte y este con Honduras, en el extremo sureste con el golfo de Fonseca, al sur con el océano pacífico, y al oeste y noroeste con Guatemala. Geográficamente está ubicado entre las siguientes coordenadas:

Latitud 13° 9' N / 14° 26' N
Longitud 87° 43' O / 90° 08' O

El Salvador es el país más pequeño y más densamente poblado de Centroamérica, tiene su meridiano estándar en 89°O (ver Figura 1-1 (a)). Su superficie es de 21,041 Km². El país está formado por una meseta central recortada por valles fluviales, entre los que destaca el valle del río Lempa, su cause fluvial de mayor longitud. Esta meseta está flanqueada por dos cadenas montañosas de origen volcánico: la primera corre paralela al océano pacífico y la segunda constituye la frontera con Honduras. Posee una estrecha llanura costera en el pacífico de menos de 24 Km de anchura. En el extremo norte se localizan altas y escarpadas montañas. La meseta central tiene una altitud promedio de 600 m. El punto más alto del país es el volcán Santa Ana, con 2,385 m, situado en la cadena costera (ver Figura 1-1 (b)).

Desde el punto de vista climatológico, El Salvador se encuentra situado en la parte exterior del Cinturón Climático de los Trópicos, caracterizado por tener unas propiedades térmicas casi constantes durante todo el año y dos estaciones muy marcadas, una lluviosa y otra seca. Las precipitaciones se concentran casi exclusivamente durante la estación lluviosa, si bien, dentro de ella pueden aparecer grandes oscilaciones. Sus valores máximos suelen darse unas semanas después del paso del sol por su cenit.

La estación seca se presenta durante el semestre invernal que comprende los meses de noviembre a abril, presentándose las máximas temperaturas al final de la misma, en el mes de abril, antes del comienzo de la estación lluviosa. Otra característica del clima en este país son los Alisios, vientos predominantes de rumbo aproximando NE y los Nortes, que transportan aire frío procedente del Ártico hacia los trópicos. Se puede observar, también, un buen desarrollo del sistema que lleva aire del mar hacia tierra y sus zonas inmediatas. El viento se genera por el calentamiento desigual de la superficie de la tierra realizado por el Sol (Tabla 1-2).

Ubicación Geográfica de El Salvador



Relieve de El Salvador

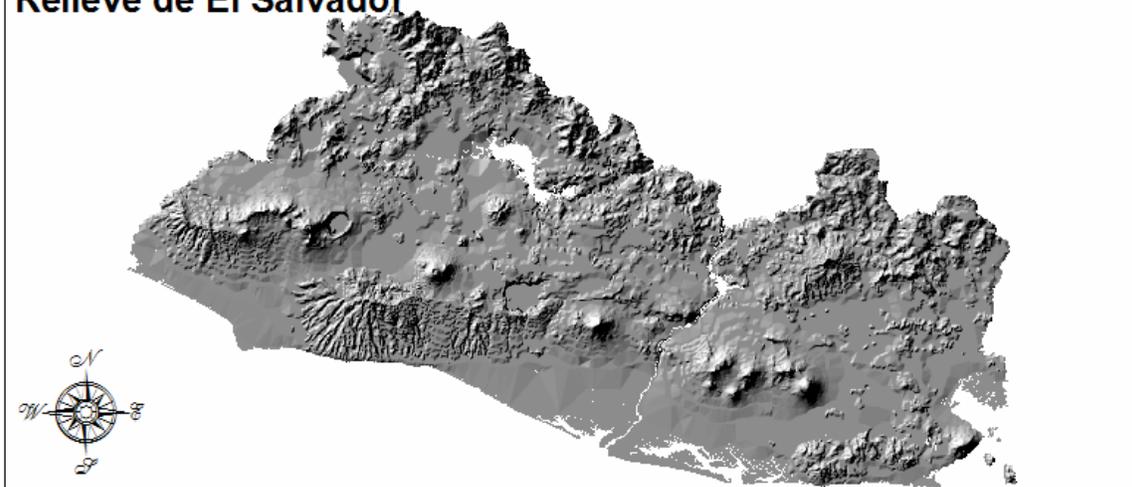


Figura 1-1 (a) Ubicación geográfica de El Salvador; (b) Relieve del país.

Con los datos obtenidos a lo largo de más de 50 años se han podido establecer unas fechas promedio para el comienzo y el final de las dos estaciones, así como para los intervalos de transición que hay entre ellas (Tabla 1-1).

Tabla 1-1 Duración aproximada de las estaciones climáticas en El Salvador.

Época del año	Principio	Final	Días
Estación seca	14 noviembre	19 abril	157
Transición seca-lluviosa	20 abril	20 mayo	31
Estación lluviosa	21 mayo	16 octubre	149
Transición lluviosa-seca	17 octubre	13 noviembre	28

Fuente: Caracterización de los riesgos geológicos y dimensionamiento de los recursos hidrogeológicos de Nejapa realizado por Geólogos del Mundo y la UCA en agosto de 2003.

Tabla 1-2 Régimen de vientos en El Salvador.

Tipo de viento	Descripción
Vientos alisios de carácter regional	El Salvador está sometido a la influencia de los vientos alisios, que constituyen los vientos más constantes de todo el planeta . Estos soplan en la dirección NE desde las regiones de altas presiones de las latitudes medias hacia la zona de calmas ecuatoriales o frente intertropical. Estos vientos afectan con mayor intensidad las zonas de mayores alturas del territorio.
Vientos de carácter local: brisas mar-tierra	Poseen dos direcciones, la primera se produce en sentido mar-tierra durante el día, debido al gran calentamiento que se opera en la superficie terrestre, que provoca una zona de menor presión. Mientras, sobre la superficie del océano Pacífico, que se encuentra más fría, se genera una zona de mayor presión, lo que provoca que el aire circule en sentido océano-tierra. Estas brisas marinas pueden llegar a penetrar hasta unos 100 Km tierra adentro, llegando hasta el valle medio del Río Lempa. Por la noche se produce el fenómeno contrario, debido a la rápida pérdida del calor del continente, y el mayor calentamiento de la masa de agua del océano.
Vientos de carácter local: brisas montaña-valles	Estos vientos poseen dos direcciones en función del momento del día. Durante el día las zonas más altas del país se calientan más rápidamente que los valles y mesetas, por lo que se generan vientos locales que soplan desde los valles y mesetas hacia las zonas montañosas (brisas del valle), suavizando las temperaturas diurnas de las áreas de mayor altura del país. Cuando llega la noche las zonas altas del país se enfrían rápidamente, mientras que las zonas bajas (valles y mesetas) pierden lentamente el calor acumulado durante el día, por lo que las brisas soplan desde las zonas montañosas hacia los fondos de los valles y mesetas (brisas de montaña), suavizando las temperaturas nocturnas de las zonas bajas.

Nota: Adaptado de la sección 1.5 Diagnóstico-Clima del **“Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial”**.

1.2 Antecedentes de mediciones solares y proyectos solares.

El principal antecedente de determinación del potencial solar en el país lo constituye el proyecto de Solarimetría ejecutado por el departamento de Física, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (UES). Este proyecto, financiado por la Organización de Estados Americanos (OEA), fue ejecutado de septiembre de 1986 a enero de 1987 y sus resultados fueron publicados en septiembre de 1989.

La UCA con esta investigación, enmarcada dentro del proyecto SWERA, actualiza con tecnología la recuperación de datos digitales, la estimación del potencial solar del país y amplía la información disponible en la parte eólica. También la UCA ha realizado en los últimos cuatro años instalaciones fotovoltaicas en el área rural (4 en total) y en el campus (principalmente con fines de investigación). Destacan en este esfuerzo el proyecto fotovoltaico de El Alto (financiado por Solidaridad Internacional), que consistió en la electrificación de 27 casas, 1 escuela y 1 iglesia a través de energía solar y el proyecto edificio Martín-Baró ((financiado por UCA) que cubre el 30% de la carga de iluminación del edificio (ver Figura 1-2). El sitio web de la UCA <http://dei.uca.edu.sv/dei/html/proyectos/aulasc/aulac-ano.html?ano=3> presenta datos diarios de mediciones solares en línea, registrados en el campus UCA, para los años 2002 a 2004.

Los datos recopilados en este estudio provienen del Servicio Meteorológico Nacional, ahora conocido como División de Meteorología del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). También se presentan datos de estaciones meteorológicas de la Fundación Salvadoreña para Investigaciones del Café (ProCafé) que mide radiación solar en las principales zonas cafetaleras del país. Los datos de

ProCafé fueron extraídos de los boletines mensuales publicados por esta fundación a través de su sistema de información meteorológica. Es importante mencionar que debido a los pocos años de mediciones realizados por ProCafé sus datos no fueron utilizados para las estimaciones realizadas de potencial solar.

1.3 Antecedentes de mediciones de viento en el país.

Existen pocos estudios sobre la determinación del potencial eólico en el país. Uno de ellos lo constituye **“El viento en Centroamérica”** realizado por NRECA en la década de los años 80. Las principales conclusiones de este estudio para el caso de El Salvador fueron:

- Se seleccionaron 3 sitios para realizar mediciones de potencial eólico: zona sur del departamento de Santa Ana, al este del lago de Coatepeque; zona sur-oeste del departamento de la Libertad; y zona centro-oeste del departamento de San Miguel, limítrofe con el departamento de Usulután. A la fecha de publicación del documento se tenían menos de 6 meses de mediciones con sensores de velocidad y de dirección a 15 y 30 metros de altura en torres de tipo NRG.
- Se obtuvo la información de 71 estaciones meteorológicas de la región centroamericana que medían velocidad del viento. Las alturas se homogenizaron a 30 metros de altura utilizando la ecuación: $v_1 = v_0 * (z/z_0)^a$, en donde a es el coeficiente de rugosidad igual a 1/7. También en algunas estaciones se corrigieron los datos por un factor de deterioro del equipo de medición.
- Se encontró que en el país existe un patrón de viento estacional fuertemente marcado. El primero es el patrón general de vientos de la región (alisios) que tiene su mayor velocidad entre los meses de octubre a febrero. El otro sistema es el de las brisas del mar que se contraponen al sistema general y tiene sus mayores velocidades en los meses de abril a septiembre.
- *El Salvador no cuenta con zonas de altas velocidades de viento*; las más altas estarían en la parte central hacia el norte 5-6 m/s. El resto del país tiene velocidades entre 4-5 m/s con un patrón constante a lo largo del año. Aunque no se hace explícito en el documento, se infiere que estas velocidades se obtendrían a 30 m sobre el nivel de la superficie de la tierra. También concluye que con la información recabada con las mediciones de NRECA más la información meteorológica de las 20 estaciones meteorológicas del servicio meteorológico del país, *la posibilidad de que en El Salvador se pueda instalar un parque eólico es reducida*, no así proyectos de bombeo de agua, telecomunicaciones y/o generación aislada donde si muestra un gran potencial.

En la sección DIAGNOSTICO-clima del **“Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial”** se hace referencia a dos estudios que tratan sobre la determinación del potencial eólico en El Salvador. Las principales conclusiones de cada uno de ellos se presentan a continuación:

(a) **“Extracción de agua subterránea con energía eólica en El Salvador”** realizado en la Universidad Politécnica de El Salvador en 1987.

- El objetivo de este trabajo fue el de determinar el mapa eólico de El Salvador para aprovechar la energía en la extracción de aguas subterráneas.
- Utilizando la información de 20 estaciones meteorológicas con mediciones de velocidades del viento determinó que las velocidades más altas de 15 minutos se observan de noviembre a marzo con valores de 13.9 m/s en la costa, pudiéndose alcanzar los 47.2 m/s en las cimas de las montañas, por encima de la cota de los 1600 msnm.¹

¹ En este proyecto las velocidades instantáneas máximas (ráfagas) registradas en las estaciones del país están en el rango de 4.5 a 7.8 m/s.



Figura 1-2 (a) Instalaciones fotovoltaicas proyecto El Alto (Chalatenango); (b) Instalaciones fotovoltaicas edificio Martín-Baró (UCA).

- Del análisis de los resultados estadísticos se infiere que en la mayoría de las estaciones **el promedio de la velocidad del viento oscila entre los 2.22 – 3.61 m/s**. Las estaciones que presentan las mayores velocidades medias anuales se presentan en la tabla 1-3. Las menores velocidades se presentaron en las estaciones: Estación Matriz (1.56 m/s), Santa Cruz Porrillo (1.5 m/s), Beneficio El Papalón (1.5 m/s), San Andrés (1.5 m/s), Nueva Concepción (1.42 m/s) y Cerrón Grande (1.39 m/s).

Tabla 1-3 Áreas que presentan mayor potencial eólico de acuerdo a estudio UPES.

Código	Nombre y depto.	Velocidad media anual (m/s)	Densidad de potencia media anual (W/m ²)	Densidad de energía media anual (KWh/m ²)
A-35	Cerro Verde (Santa Ana)	4.39	116	1040
A-31	Planes de Montecristo (Santa Ana)	3.14	70	629
Z-4	La Galera (Morazán)	2.86	57	519

Fuente: Tomado del "Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial". Velocidades a 10 metros sobre el nivel del suelo.

(b) **"Primer plan nacional de desarrollo energético integrado 1988-2000"**, publicado en enero de 1988 por la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL).

- Las conclusiones son similares a las obtenidos por el estudio de la UPES. La mayoría de estaciones de medición del viento tienen densidades de energía anual comprendidas entre 100 – 500 KWh/m² y sólo tres de las 20 estaciones están por encima de 500 KWh/m², destacándose Cerro Verde con 1040 KWh/m². Resultados similares a los presentados en la tabla 1-3.

En noviembre de 1994 Alexandre de Lemos Pereira del Centro Brasileiro de Energía Eólica realizó con apoyo de la UCA, MARN y la CEL el estudio **"Site selection for wind power project in El Salvador"**. Este proyecto se ejecutó con fondos del proyecto SWERA-UCA y con el apoyo del laboratorio de SIG de la UCA. El objetivo de este proyecto fue el de seleccionar varios sitios del país para realizar mediciones de viento, hacer recomendaciones para las mediciones a realizar en cada uno de ellos y definir las especificaciones técnicas para el sistema de adquisición de datos de una torre de medición de velocidad y dirección de viento. Las principales conclusiones de este estudio fueron:

- La metodología para ubicación de los sitios consistió en: (a) análisis de la información disponible de viento, en este caso el mapa eólico generado por NREL para el país del año 2004 como parte del proyecto SWERA y la información meteorológica histórica recopilado por la UCA en formato digital; (b) Los criterios para selección del sitio fueron los siguientes: ubicados en regiones de densidades de potencia de al menos 300 W/m² (correspondiente a 7 m/s y a una altura de 50 m) de acuerdo al mapa de NREL, análisis topográfico para identificar características que contribuyeran a mejorar los recursos de viento, tipo de vegetación, exclusión de áreas protegidas, buen acceso y proximidad a la red eléctrica; (c) Con apoyo de personal de la UCA y CEL se visitaron 7 diferentes regiones del país durante 4 días: área a lo largo de la frontera con Guatemala llamada La Hachadura, área al sur del lago de Coatepeque entre Armenia y el cerro San Marcelino, área al noroeste de la ciudad de La Libertad llamada Las Shilas, área al norte de la ciudad de Metapán arriba de la frontera con Guatemala, área alrededor de las ciudades de La Palma y San Ignacio, área entre el río Lempa, San Ildefonso y Santa Clara y área alrededor de la villa de Monteca.
- Después de aplicar los criterios anteriores se ubicaron cuatro sitios: Metapán, se localizó una pequeña cresta en la loma de Santa Cruz, cerca de la ciudad de Metapán a 600 msnm (89.477977 W y 14.345140 N) (*better recommended*); San Isidro, localizado en un valle relativamente plano cerca de la villa de San Isidro a una altitud de 780 msnm (89.559193 W y 13.793907 N) (*good recommended*); La Hachadura localizada cerca de la frontera con Guatemala a lo largo de la carretera CA2 en la costa, a una altitud de 50 msnm (90.082879 W y 13.853474 N) (*best recommended*); y, Monteca localizado a 900 msnm en una planicie cercana a la frontera con Honduras con acceso difícil desde la ciudad de Santa Rosa de Lima (87.85512 W y 13.87799 N) (*recommended*).

A la fecha de elaboración de este documento se tiene conocimiento de un estudio de viento realizado hace varios años en el país por OLADE y datos de viento usados por el consultor colombiano Humberto Rodríguez quien participa en el proyecto *“Implementación de medidas para el desarrollo de un mercado nacional sostenible para servicios de energía en el área rural”* para el Ministerio de Economía.

1.4 Objetivos principales de esta investigación.

El Objetivo principal de esta investigación es la determinación del potencial solar y eólico del país en base a datos registrados en las estaciones meteorológicas de la división de meteorología del SNET. Dado que a la fecha no existía una base de datos digital actualizada, los esfuerzos estuvieron dedicados a cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Actualizar la base de datos digital de datos de radiación y brillo solar (horas de luz solar) y datos de viento (velocidad, dirección y ráfaga). Para esto fue necesario realizar un inventario completo de la información existente en el SNET.
- Diseñar un sistema informático que permita en el futuro la actualización periódica de información registrada por las diferentes estaciones meteorológicas del país. Este sistema a su vez permite generar diferentes consultas y reportes de la información disponible.
- Investigar los diferentes sistemas de interpolación utilizados en Geoestadística (IDW, Spline, Kriging, etc) para generar los mapas de potencial solar. Finalmente, se seleccionó el método de Kriging para generar los modelos de superficies.
- Utilizar el método de Ångström y el mapa de zonas de vida de Holdrige para estimar datos de radiación solar en estaciones con mediciones de luz solar únicamente. El principal aporte en este sentido fue la creación de un modelo cartográfico, propio de un sistema de información geográfica (SIG), para generar los mapas de radiación solar y luz solar.
- Utilizar el software WAsP para hacer estimaciones de potencial eólico en el país y utilizar el mapa eólico desarrollado por NREL para el proyecto SWERA.
- Utilizar WAsP para modelar los sitios de mayor potencial eólico en el país.

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos los cuales se espera sean de mucha utilidad para investigadores y usuarios de información solar y eólica.

2. Metodología de la investigación.

Para determinar el potencial de energía solar y eólica del país los esfuerzos iniciales del proyecto SWERA-El Salvador se concentraron en identificar y completar una base de datos digital del país sobre los parámetros climatológicos de sol y viento registrados por la división de meteorología del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y de otras instituciones nacionales. Este proceso consistió de las siguientes actividades: digitalización de datos existentes, inventario de registros climatológicos del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y ProCafé, creación de interfaz gráfica para la captura de radiación solar en ArcView, creación del Sistema Automatizado de Manejo de Datos Meteorológicos (Luz, Viento y Radiación), uso de SIG y técnicas de interpolación (geoestadística) y uso del software WASP para estimaciones de potencial eólico. La metodología utilizada en esta investigación se ilustra en la figura 2-1.

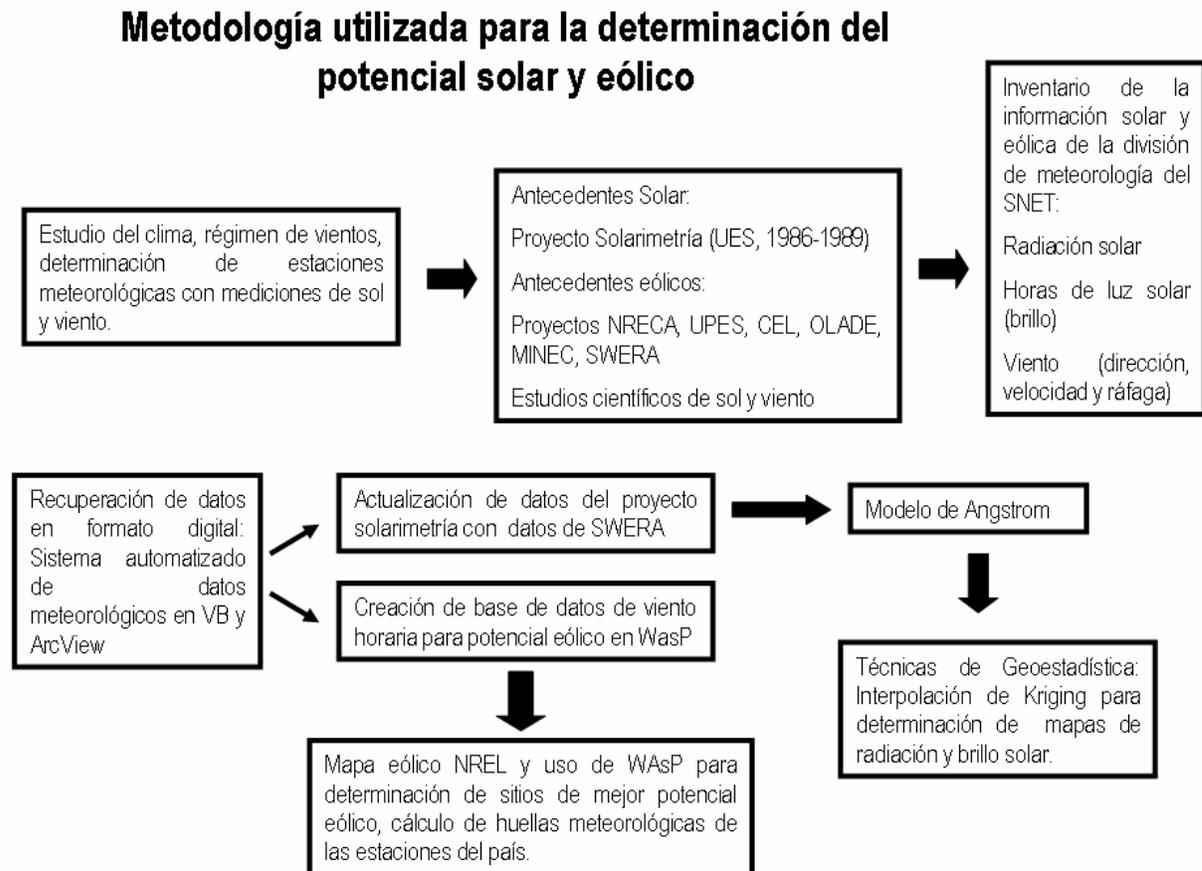


Figura 2-1 Metodología de investigación.

2.1 Datos del proyecto Solarimetría de la UES.

Una primera fuente de información fueron las tablas de radiación solar y brillo solar (horas de luz solar) publicadas en un documento de septiembre de 1989 como resultado del proyecto “Solarimetría” ejecutado por la UES de 1986 a 1987 con el financiamiento de la OEA. En este documento se tenían

registrados datos de radiación solar de 10 estaciones meteorológicas y brillo solar (horas de luz solar) en 21 estaciones. Usando el modelo de Angstrom les fue posible estimar la radiación solar en estaciones que tenían registros de brillo solar únicamente pero no de radiación solar. De esta forma se obtuvieron datos de radiación solar en 22 estaciones del país (10 con mediciones reales). En la tabla 2-1 aparecen las estaciones con mediciones de radiación solar y en la tabla 2-2 se indican los años con mediciones de radiación para cada uno de los meses. De manera similar se presentan las tablas 2-3 y 2-4 para el caso de horas de luz solar o brillo solar.

Tabla 2-1 Registros de radiación solar recopilados por el proyecto de Solarimetría de la UES (Promedios mensuales en KWh/m²/día).¹

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a31	4,5	4,8	4,8	4,2	3,5	3,5	4,7	4,0	3,3	3,8	4,2	4,2
g13	3,9	4,1	4,5	4,3	3,8	3,7	4,1	4,2	3,3	3,6	3,4	3,5
g3	4,8	5,3	5,6	5,5	5,0	5,1	5,4	5,4	5,0	5,0	4,8	4,6
h8	5,1	5,5	5,8	5,6	5,2	4,9	5,6	5,3	4,6	4,8	4,9	4,8
n15	4,8	5,2	5,5	5,3	4,8	5,0	5,3	5,2	4,8	4,7	4,6	4,6
s27	5,0	5,5	6,1	5,8	5,2	5,2	5,9	5,6	4,9	4,8	5,0	4,8
s5	4,8	5,2	5,4	5,4	4,7	5,0	5,5	5,1	4,6	4,6	4,7	4,7
u11	4,9	5,4	5,5	5,2	4,8	4,8	5,4	5,4	5,0	4,8	4,8	4,7
v13	4,6	5,2	5,3	5,1	4,8	4,7	5,1	5,1	4,6	4,5	4,6	4,4
z4	4,3	4,8	5,1	4,5	4,1	4,0	4,5	4,3	3,5	3,7	3,7	3,9

Tabla 2.2 Número de años con registros de radiación solar para cada una de las estaciones (Proyecto Solarimetría).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a31	5	5	5	6	6	6	6	6	5	6	7	7
g13	6	6	6	6	5	5	4	4	4	5	6	6
g3	14	14	14	14	14	14	13	13	12	12	13	13
h8	13	13	13	13	14	14	13	13	13	13	13	13
n15	13	13	13	13	12	12	14	13	13	13	14	13
s27	11	10	11	11	10	10	10	10	10	10	9	10
s5	12	12	12	12	11	13	11	11	11	12	12	12
u11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5
v13	8	8	8	8	8	8	8	9	9	8	8	8
z4	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6

¹ Las mediciones de radiación solar global fueron medidos con Actinógrafos tipo Robitzch también llamado Piranógrafo Bimetálico tipo Robitzch. Los años de registros corresponden al periodo 1969 a 1983, con variaciones en cada una de las estaciones meteorológicas. Según el investigador principal del proyecto de Solarimetría, Sra. Ethelvina Morillo de Escobar los registros diarios para cada una de las estaciones estudiadas se encuentran en los archivos del Departamento de Física de la UES en formato de papel.

Tabla 2-3 Registros de brillo solar recopilados por el proyecto de Solarimetría de la UES (Promedios mensuales en horas de luz solar).²

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a18	7,0	7,9	8,3	7,5	5,5	4,7	6,7	6,0	4,5	4,6	5,5	5,9
a31	8,8	8,5	8,1	6,7	5,3	4,6	7,0	5,9	4,2	6,0	7,7	8,3
a35	7,6	7,3	7,0	5,7	4,9	4,6	7,7	7,0	4,5	5,1	7,0	7,4
b10	8,9	8,9	9,5	8,3	7,1	6,7	8,1	7,9	6,4	7,3	8,3	8,8
g3	9,1	9,6	9,2	8,5	7,5	6,8	7,9	7,4	6,3	7,3	8,2	8,1
h8	9,5	9,7	9,6	9,0	7,5	6,7	8,3	7,4	5,9	7,1	8,6	9,4
l4	9,1	9,1	8,7	7,9	6,9	6,3	8,1	7,4	5,8	6,6	8,2	8,9
l8	9,8	9,8	9,5	8,1	6,7	6,0	8,0	7,4	5,9	6,6	8,6	9,5
m18	9,6	10,0	9,7	8,6	7,3	7,0	8,3	7,6	6,3	7,0	8,4	9,2
m23	8,0	8,6	8,4	6,2	4,5	4,7	7,2	6,6	5,3	5,5	6,9	7,0
m6	9,4	9,8	9,7	8,9	7,7	7,3	8,6	8,6	7,2	7,8	8,5	9,3
n15	9,8	10,0	9,7	8,9	7,4	7,4	8,8	8,5	7,2	8,1	9,1	9,7
s27	8,9	9,6	9,6	8,6	6,8	6,3	8,3	7,9	6,2	7,0	8,5	8,5
s5	9,0	8,7	9,1	7,4	5,5	5,5	7,6	7,3	5,6	7,2	8,3	8,9
t6	9,8	9,9	9,6	8,6	7,3	6,8	8,2	7,7	6,7	7,3	8,9	9,4
u11	9,7	10,0	9,7	8,7	7,0	6,8	8,1	8,2	7,0	7,3	8,9	9,5
u6	9,2	9,4	9,1	7,9	6,4	5,6	7,8	7,4	5,5	6,3	8,0	9,0
v13	9,8	10,0	9,5	8,5	6,9	6,5	8,1	8,0	6,6	7,2	8,9	9,7
v6	9,5	9,8	9,5	8,5	7,4	6,9	8,3	8,2	6,8	7,4	8,5	9,4
z2	9,4	9,8	9,4	8,5	7,0	7,0	8,2	8,0	6,9	7,6	8,6	9,2
z4	7,0	7,9	7,9	7,1	5,6	5,1	7,1	6,2	4,6	4,7	5,7	6,2

Tabla 2-4 Número de años con registros de brillo solar para cada una de las estaciones (Proyecto Solarimetría).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a18	15	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
a31	5	5	5	6	6	6	6	6	5	6	7	7
a35	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
b10	9	9	9	9	9	9	9	9	7	8	10	10
g3	15	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14	14
h8	10	10	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11
l4	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
l8	23	24	23	23	23	24	23	24	24	24	24	24
m18	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
m23	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
m6	21	21	21	21	21	21	21	21	21	20	21	22
n15	13	13	13	13	12	12	13	13	13	13	13	13
s27	11	10	11	11	10	10	10	10	10	10	9	10
s5	5	6	6	6	6	7	6	6	6	6	7	7
t6	16	17	17	17	17	16	17	17	17	16	16	16
u11	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

² Las mediciones de brillo solar global fueron medidos con Heliógrafos tipo Campbell Stokes. Los años de registros corresponden al periodo 1957 a 1984, con variaciones en cada una de las estaciones meteorológicas.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
u6	25	25	25	24	25	25	24	25	25	25	26	25
v13	8	8	8	8	8	8	8	9	9	8	8	8
v6	16	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17	17
z2	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
z4	8	8	8	8	9	9	9	9	9	9	9	9

2.2 Inventario de información solar y eólica de la división de meteorología del (SNET).

Uno de los objetivos principales del proyecto SWERA fue la recuperación de información solar y eólica de los años posteriores al estudio de la UES (de 1984 a 2004). Para este periodo, afectado por la guerra civil del país (1980 a 1992), existían registros sin procesar; sin embargo, no se encontraban en formato digital. La división de meteorología se limitó a archivar únicamente la información. Para la recuperación de la información la UCA realizó, en primera instancia, los inventarios de la información disponible. Estos resultados se presentan en las tablas 2-5 a 2- 8.

Radiación Solar.

Para el caso de la Radiación Solar ésta se captura en bandas que contienen siete días de lectura en periodos de 12 horas por día, de 6:00 a.m. a 6:00p.m., en la figura 2-1 se muestra un ejemplo de estas bandas y en la tabla 2-5 se muestra el inventario total de bandas (2,663).



Figura 2-1 (a) Ejemplo de una banda de radiación solar, (b) Método del planímetro para recuperación de la información de radiación para el proyecto de Solarimetría.

Tabla 2-5 Inventario de información de radiación solar a recuperar en formato digital proyecto SWERA (en número de bandas).

<i>Código</i>	<i>Estación</i>	<i>Departamento</i>	<i>período</i>	<i>Sub-total</i>
A31	Montecristo	Santa Ana	1984-1985, 2000, 2002	120
H8	Ahuachapan	Ahuachapan	1984-1990, 1992	255
G3	Nueva Concepción	Chalatenango	1984-2000, 2002	882
G13	Las Pilas	Chalatenango	1984-1987, 1989-2000, 2002	602
S5	Observatorio	San Salvador	1984-1986, 1996-1998	215
S27	Estación Matriz	San Salvador	1984	26
Z4	La Galera	Morazan	1984	7
N15	La Unión	La Unión	1984, 1986-2000, 2002	556
<i>Total</i>				<i>2663</i>

Brillo Solar (Horas de luz solar)

Para el parámetro de luz solar existen tres tipos de bandas: la curva larga, corta y recta (ver Figura 2-2). Cada una de estas bandas se coloca en el heliógrafo en distintas épocas de año seleccionadas de acuerdo al desplazamiento y orientación del sol. Cada una de las bandas está dividida de manera horaria en el rango de las 6 a las 18 horas. Para digitalizar se tienen 84,809 bandas.

Tabla 2-6 Inventario de información de luz solar a recuperar en formato digital.

Código	Estación	Departamento	Años	Subtotal
A18	Los Andes	Santa Ana	1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	4915
A31	Los Planes de Montecristo	Santa Ana	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	6398
A35	Cerro Verde	Santa Ana	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988	1554
A12	Santa Ana El Palmar	Santa Ana	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 2002	4881
	Santa Ana	Santa Ana	1986	29
H1	Ahuachapán	Ahuachapán	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	6623
H14	La Hachadura	Ahuachapán	1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	2341
H99	San Benito El imposible	Ahuachapán	1995, 1996	577
T6	Acajutla	Sonsonate	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995	2898
L31	Santa Tecla	La Libertad	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998	3942
L4	San Andrés	La Libertad	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	5603
S5	Observatorio	San Salvador	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989	1363
S27	Estación matriz(El Matazano)	San Salvador	1983, 1984, 1995, 1996, 1997, 1998	2600
G3	Nueva Concepción	Chalatenango	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	5724

Código	Estación	Departamento	Años	Subtotal
V6	Santa Cruz Porrillo	San Vicente	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996	3772
B10	Cerrón Grande	Cabañas	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	6122
U11	Beneficio La Carrera	Usulután	1983, 1984, 1985, 1986	761
U6	Santiago de María	Usulután	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998	4739
U99	Laguna de Alegría	Usulután	1998, 1999, 2000, 2001, 2002	866
M6	El Papalón	San Miguel	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	6592
Z2	San Francisco Gotera	Morazán	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	6432
Z4	La Galera	Morazán	1983, 1984	231
M23	Cerro Cacahuatique	San Miguel	1983	23
N3	La Unión	La Unión	1983, 1984, 1985, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002	5823
			Total	84,809

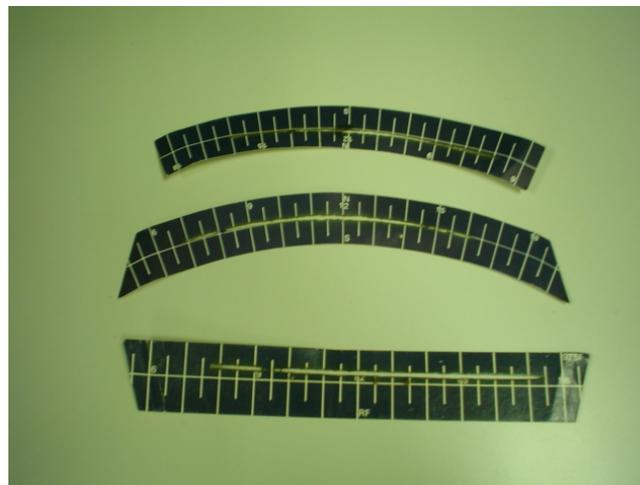


Figura 2-2 Tres tipos de bandas para medir brillo solar (horas diarias de luz solar).

Viento

Para el parámetro viento, los registros se realizan en dos formatos: (a) bandas que son reemplazadas diariamente cubriendo periodos de 24 horas, de las cuales se puede extraer, al post-procesarla, datos horarios de: rumbo, velocidad y ráfaga³ (23,001 bandas diarias) y (b) Cuadros de registros mensuales con información de viento (2,558 cuadros). La figura 2-3 muestra las bandas diarias y los cuadros mensuales. Los inventarios de viento en bandas y cuadros mensuales se muestran en las tablas 2-7 y 2-8.

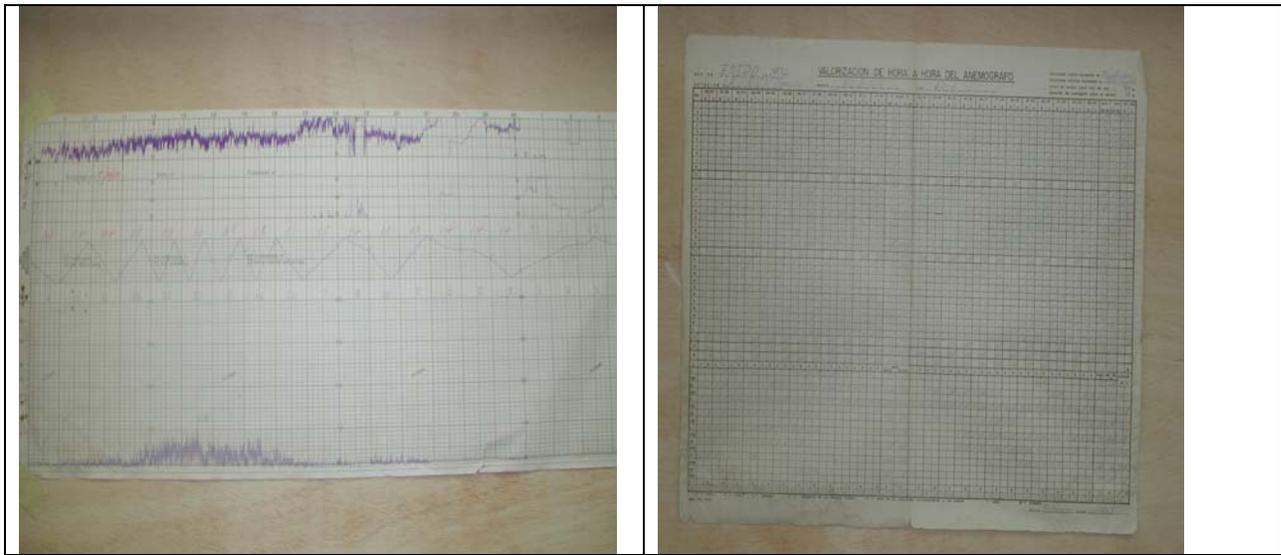


Figura 2-3 (a) Bandas para registro diario de viento; (b) Cuadro mensual de mediciones de viento (se registra velocidad, dirección y ráfaga en forma horaria para cada día del mes).

Tabla 2-7 Inventario total de bandas diarias de viento.

A12	Santa Ana el Palmar	Santa Ana	1984-1986, 1994-2000	2767
A31	Planes de Montecristo	Santa Ana	1983-1985, 2000-2002	1472
H8	Ahuachapan	Ahuachapan	1984-1986, 1994-1996, 1998-2001	2377
T6	Acajutla	Sonsonate	1986, 1991-2002	4194
G3	Nueva concepción	Chalatenango	1984-1986	809
L4	San Andrés	La Libertad	1984, 1990-19997, 1999-2002	4361
S10	Ilopango	San Salvador	1984-2002	6221
V6	Santa Cruz Porrillo	San Vicente	1984	93
N3	La Unión	La Unión	1984-1986	707
			Total	23001

³ Ráfaga es la velocidad instantánea del viento de mayor magnitud en un día determinado.

Tabla 2-8 Inventario de cuadros mensuales de registros de viento.

<i>Código</i>	<i>Estación</i>	<i>Departamento</i>	<i>Periodo</i>	<i>No Cuadros</i>
A-12	Sta. Ana El Palmar	Santa Ana	1959-1986	320
A-31	Planes de Montecristo	Santa Ana	1976-1981	72
A-35	Cerro Verde	Santa Ana	1975-1981, 1983	94
H-8	Ahuachapan	Ahuachapan	1969-1984	184
H-13	Apaneca Sta. Leticia	Ahuachapan	1973-1980, 1982-1984	128
T-6	Acajutla	Sonsonate	1954-1956, 1962-1964, 1966-1968, 1970-1974, 1976	173
L-4	San Andres	La Libertad	1958-1962, 1971-1974, 1976-1984	216
S-10	Aeropuerto-Ilopango	San Salvador	1965-1969, 1976-1979, 1983-1984, 1986	132
S-5	S.S. Observatorio	San Salvador	1955-1974, 1976-1978, 1986	287
S-4	S.S. ITIC	San Salvador	1952-1956	38
L-18	El Boqueron	San Salvador	1973-1974, 1976-1985	140
S-27	Estacion Matriz	San Salvador	1973-1974, 1976-1984	126
V-6	Sta. Cruz Porrillo	San Vicente	1969-1982, 1984	180
V-13	Apastepeque	San Vicente	1973-1980	96
P-11	Hacienda Astoria	La Paz	1970-1975	120
B-10	Cerron Grande	Cabañas	1974-1981	83
G-3	Nueva Concepcion	Chalatenango	1970-1974, 1976-1985	169
Total				2558

2.3 Procedimiento para recuperación de información solar y eólica.

Una vez concluido el inventario de la información solar y eólica a recuperar se inició la creación del sistema automatizado para el manejo de datos meteorológicos en Visual Basic, que servirá en el futuro como medio de almacenaje y consulta de información una vez concluido el proyecto. Dada la cantidad de información a procesar y el tiempo que se requería para hacerlo en la forma tradicional, se optó por desarrollar el sistema informático con una interfaz gráfica en ArcView que permitiera la captura de bandas escaneadas de radiación solar. A continuación se detalla el procedimiento para digitalizar cada una de las variables meteorológicas de interés a este proyecto.

Radiación Solar.

La interfaz gráfica tenía la función de calcular los valores meteorológicos de radiación a partir de las bandas analógicas escaneadas. Fue creada con herramientas del SIG ArcView y fue considerada de carácter temporal mientras esta tarea se incorporaba al sistema en Visual Basic.

La interfaz desarrollada permite manejar los archivos escaneados, calibrar las bandas, cambiar las unidades de píxeles de una imagen escaneada a unidades reales, dibujar puntos, arcos y polígonos o cortar polígonos. Los polígonos posteriormente se convierten a radiación solar. Los datos calculados se almacenaron provisionalmente en Access. A continuación se describe el proceso para “leer” las bandas de radiación (ver figura 2-4 y 2-5):

- 1) Escaneo de las bandas, este paso tiene un doble objetivo, el primero es crear un banco digital de imágenes(en formato JPG para generar archivos de calidad con poco tamaño) de las correspondientes bandas de registro para tener un respaldo si las bandas en papel se deterioran

o extravían; y el segundo, consiste en utilizar esta imagen para la digitalización en pantalla de las áreas a partir de las cuales se calcula la radiación. Cada imagen se identifica a través del código de la estación mas las fechas de inicio y fin de la lectura.

- 2) Digitalización en pantalla, una vez se tiene la imagen, el técnico la carga dentro del Arcview para proceder a dibujar las áreas que no son mas que la cantidad de radiación dividida en los períodos de mañana y tarde. Este proceso genera un Archivo de formato SHP, propio del programa, el cual calcula de forma automática el área bajo la curva del registro. Este dato es almacenado directamente en una base de datos para su consulta posterior.

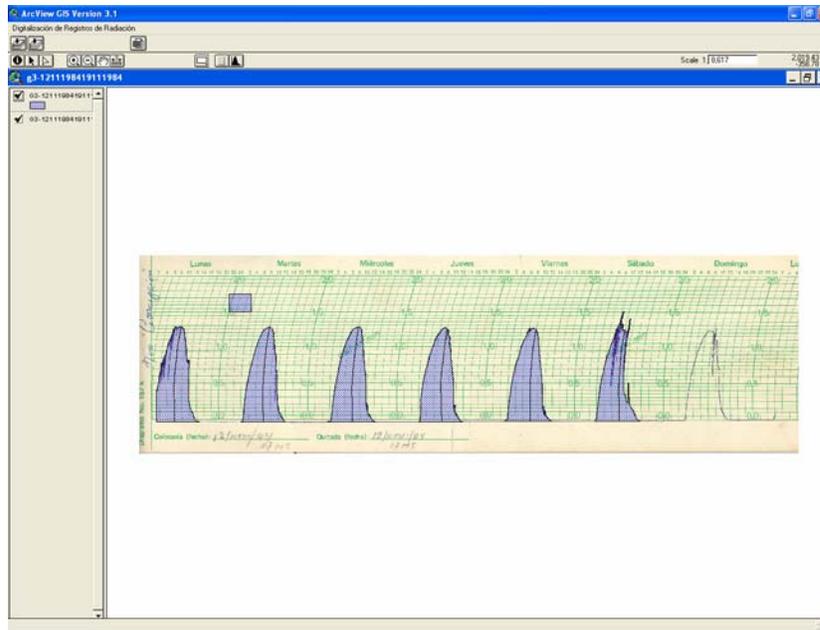


Figura 2-4 Banda de radiación solar escaneada e incorporada en ArcView para su digitalización.

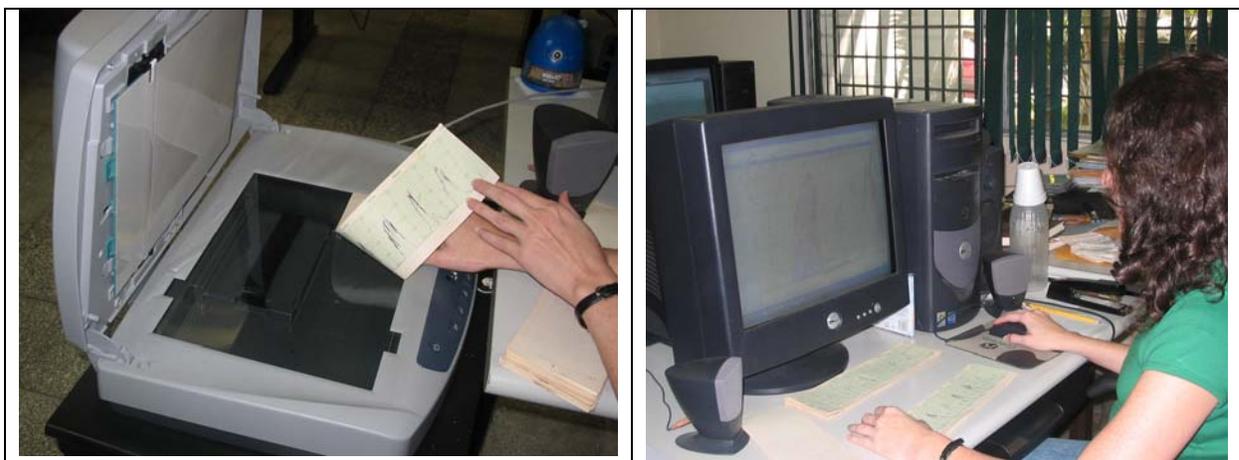


Figura 2-5 (a) Generación del banco de imágenes de bandas de radiación; (b) Cálculo de la radiación solar en el software ArcView.

brillo solar.

El procedimiento para digitalizar las bandas de luz solar es el siguiente: cada espacio de hora se divide mentalmente en 10 zonas para facilitar la estimación de la cantidad de tiempo que el sol perforó la banda, este tiempo se registra de manera horaria en el computador. Luego, cada una de las estimaciones horarias son acumuladas por el software de captura de datos para estimar el número de horas de luz solar en ese día en particular. Antes de leer la banda se crea un registro en la base de datos de la fecha del día y de la estación (ver Figura 2-6).



Figura 2-6 Proceso de captura de luz solar en formato digital.

Viento.

El procedimiento para digitalizar la información de viento sigue dos procesos: lectura de bandas y lectura de cuadros.

Lectura de banda: se escanea la banda en dos partes (debido a su larga longitud) luego se unen mediante software y se identifica el archivo imagen generado con la fecha de registro y el código de la estación. Luego se captura en ArcView la imagen escaneada y se capturan tres tipos de información: dirección del viento, velocidad y ráfaga.

Lectura de cuadro: se digitaliza la información de los tres parámetros (dirección del viento, velocidad y ráfaga) los cuales ya están disponibles en horas, esto debido a que el cuadro es el resultado mensual de las lecturas diarias de las bandas para cada una de las estaciones (ver Figura 2-7).

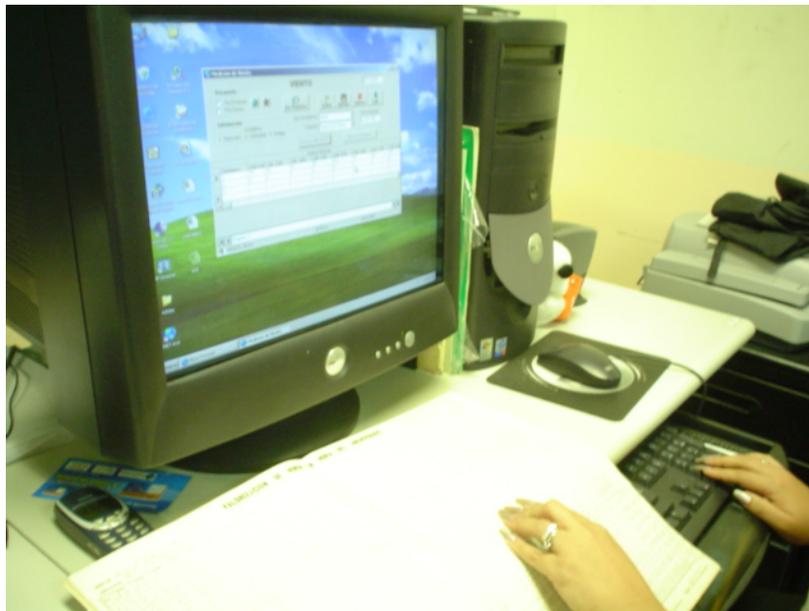


Figura 2-7 Proceso de captura en formato digital de los cuadros mensuales de viento.

2.3.1 Sistema Automatizado de Manejo de Datos Meteorológicos (Brillo solar, radiación solar y Viento.

El Sistema de Captura de Datos, es un software desarrollado a la medida para la recuperación de datos históricos de Viento, Radiación y Brillo Solar, y tiene como objetivo principal brindar una herramienta automatizada para el uso y administración de los datos de potencial solar y eólico del país. Este software ha sido diseñado de la manera mas sencilla, con una interfaz orientada al usuario, permitiendo que la aplicación tenga una interacción agradable, fácil de entender y manejar por cualquier tipo de usuario con conocimientos básicos de computación.

Mediante esta herramienta se obtendrán mayores beneficios en cuanto a las necesidades de información que surjan, como por ejemplo elaboración de informes o reportes, ofreciendo una información veraz y confiable, así como también un análisis de la información.

El Sistema desarrollado facilita el manejo de datos y la obtención de la información a la cual se le da un tratamiento más ágil y efectivo. Ha sido desarrollado en el lenguaje de Programación de Visual Basic 6.0, utilizando una base de datos en Access 2000.

Ventajas del sistema

- Al instalarse una base de datos centralizada y con conexiones de red, se garantiza la unidad de la información, facilitando las labores de mantenimiento, respaldo y consulta.
- El Sistema mecanizado y enlazado por medio de una red con estaciones de usuarios, permite la facilidad de consulta, así, si se necesita algún reporte o información procedente de una consulta, la puede obtener de forma directa sin necesidad de recurrir a recursos adicionales.
- El sistema desarrollado brinda el apoyo necesario para el manejo productivo de la información y la obtención de la misma, aumentando la capacidad de administrar la información.

- La información puede ser accedida y ordenada según los criterios que se estimen convenientes, evitando así, la duplicidad de información.

De manera general la estructura del sistema informático es la siguiente:

Catálogos

Esta parte involucra todos los mantenimientos de la aplicación, algunos de estos mantenimientos dependen de otros, como por ejemplo Estaciones y Categorías o Departamentos y Zona Departamental. Cada uno de estos mantenimientos deberán ser llenados antes de utilizar la parte de Rubros .

- a) Categorías
- b) Rumbos
- c) Tipo de Medición
- d) Zona Departamental
- e) Departamentos
- f) Estaciones

Rubros

Esta parte del menú es prácticamente donde se ingresan los datos de los tres tipos de Medición, para cada uno de los cuales existe una pantalla diferente. Para los rubros de Viento y Luz Solar, la inserción de los datos es prácticamente igual, para el rubro de Radiación el dato se obtendrá de una interfaz gráfica en la cual se escanea la banda y se dibuja sobre ella, realizando una calibración para obtener un factor, el cual se utiliza para el cálculo del área. Sin embargo la pantalla para Radiación es igual que para Viento y Luz Solar. De igual manera el rubro de Viento tendrá una interfaz gráfica, en la cual también se escaneara la banda pertinente.

- a) Captura de Datos Manual
 1. Viento
 2. Brillo Solar
- b) Captura de Datos Gráfica
 1. Radiación
 2. Viento

Consultas

- a) Consulta de Radiación
- b) Consulta de Usuarios
- c) Consulta de Estaciones por Categoría

Reportes

- a) Mediciones por Estación
- b) Mediciones por Año
- c) Medición por Rango de Años
- d) Generales
- e) Por Status
- f) Estaciones
 1. Por Categoría
 2. Por Departamento

Algunas de las pantallas principales del sistema informático se presentan en la figura 2- 8 .

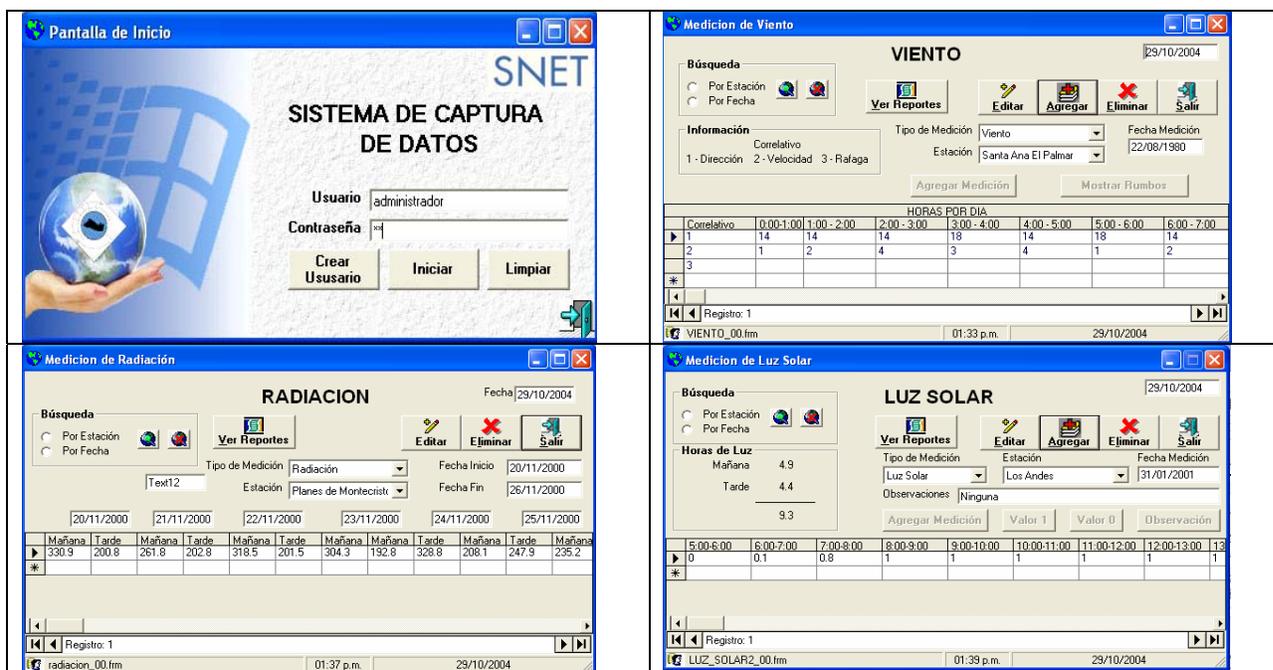


Figura 2-8 Pantallas del sistema informático desarrollado para capturar y almacenar datos de potencial solar y eólico del país.

2.4 Resultados obtenidos del proceso de digitalización de la información en los inventarios.

A la fecha de elaboración de este documento el avance de recuperación de la información digitalizada es la siguiente:

Radiación solar.

En el caso de la radiación solar **se recuperó en formato digital el 100 % de las bandas (2663)**. Los años y las estaciones recuperadas se muestran en la tabla 2-9. De las 10 estaciones con mediciones de radiación solar únicamente se han actualizado 8, completando los años de 1969 a 2002 (en el mejor de los casos) para algunas de las estaciones. En la tabla 2-10 se muestran los valores en KWh/m²/día actualizados con los datos de Solarimetría y SWERA y en la tabla 2-11 se muestra el número de años con mediciones digitalizadas para cada una de las estaciones.

Tabla 2-9 Total de bandas digitalizadas de radiación solar (SWERA).

<i>Codigo</i>	<i>Estación</i>	<i>Departamento</i>	<i>período</i>	<i>Sub-total</i>
A31	Montecristo	Santa Ana	1984-1985, 2000, 2002	120
H8	Ahuachapan	Ahuachapan	1984-1990, 1992	255
G3	Nueva Concepción	Chalatenango	1984-2000, 2002	882
G13	Las Pilas	Chalatenango	1984-1987, 1989-2000, 2002	602
S5	Observatorio	San Salvador	1984-1986, 1996-1998	215
S27	Estación Matriz	San Salvador	1984	26
Z4	La Galera	Morazan	1984	7
N15	La Unión	La Unión	1984, 1986-2000, 2002	556
<i>Total</i>				<i>2663</i>

Tabla 2-10 Radiación solar en KWh/m²/día incluyendo datos de Solarimetría y SWERA.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a31	4.9	5.2	5.0	4.5	3.6	4.1	5.2	4.7	3.8	4.4	4.6	4.6
g13	4.6	5.0	5.6	5.3	5.1	5.0	5.5	5.5	4.8	4.7	4.3	4.3
g3	4.9	5.4	5.7	5.5	5.2	5.2	5.4	5.4	5.0	4.9	4.7	4.6
h8	5.0	5.4	5.7	5.5	5.0	4.7	5.2	5.0	4.3	4.5	4.6	4.5
n15	4.7	5.1	5.4	5.3	4.8	5.0	5.2	5.2	4.8	4.7	4.5	4.4
s27	5.1	5.6	6.2	5.9	5.2	5.3	5.9	5.6	4.9	4.8	5.0	4.8
s5	4.9	5.4	5.7	5.4	4.9	5.1	5.5	5.2	4.6	4.8	4.8	4.8
u11	4.9	5.4	5.5	5.2	4.8	4.8	5.4	5.4	5.0	4.8	4.8	4.7
v13	4.6	5.2	5.3	5.1	4.8	4.7	5.1	5.1	4.6	4.5	4.6	4.4
z4	4.4	4.9	5.1	4.8	4.1	4.0	4.5	4.3	3.5	3.7	3.7	3.9

Tabla 2-11 Número de años de radiación solar digitalizados para las estaciones meteorológicas (SWERA + Solarimetría).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a31	7	7	6	7	7	9	9	9	8	9	10	10
g13	19	18	19	18	18	18	18	17	17	15	16	21
g3	30	31	30	30	30	29	28	30	30	28	28	30
h8	17	18	18	18	19	20	19	19	19	19	19	20
n15	23	23	23	23	22	24	25	26	26	25	25	24
s27	12	11	12	12	11	11	10	10	10	10	9	10
s5	17	17	17	18	17	19	16	15	15	16	16	16
u11	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	5
v13	8	8	8	8	8	8	8	9	9	8	8	8
z4	8	8	7	8	7	6	6	6	6	6	6	6

Para propósitos de consulta se incluyen los datos de radiación solar registrados en estaciones meteorológicas de ProCafé, aun cuando estos datos no se incluyeron para las estimaciones de potencial solar.

Tabla 2-10 (a) Datos de radiación solar KWh/m²/día registrados por estaciones de ProCafé.

Estación	Latitud	Longitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ciudad Barrios	13,44	-88,3	6,6	5,7	5,0		5,5	5,7	5,6	6,9	6,2	5,4	7,5	7,8
Chalchuapa	13,93	-89,67	4,3	4,8	4,5	6,4	5,3	5,2	5,8	6,1	4,8	5,0	5,6	4,4
Chaparrastique	13,76	-88,21	2,4	4,6	4,4	3,6	2,4	3,6	3,8	3,2	2,4	2,3	2,4	2,2
El Boquerón	13,76	-89,29	5,2	5,8	5,2	7,0	4,4	5,0	5,6	5,8	4,7	4,1	5,1	4,9
Jayaque	13,71	-89,45	5,6	5,9	6,2	7,0	4,1	5,1	5,6	5,3	4,3	4,9	5,4	5,8
Juayúa	13,83	-89,74	3,4	3,9	3,9	4,6	3,2	3,5	3,8	3,7	2,8	3,1	3,3	3,1

Tabla 2-10 (b) Número de años de radiación solar digitalizados para las estaciones meteorológicas de ProCafé.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Ciudad Barrios	3	2	1	1	2	2	2	2	2	3	2	
Chalchuapa	2	2	2	1	1	2	3	1	1	1	2	1
Chaparrastique	3	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	2
El Boquerón	3	2	2	1	1	3	3	2	2	3	3	2
Jayaque	2	2	2	1	1	3	3	2	2	2	4	1
Juayua	3	2	2	1	1	3	3	2	2	3	4	2

Brillo solar.

En el caso del brillo solar, dado que la secuencia de datos de solarimetría cubría el rango de años de 1957 a 1984 para 21 estaciones meteorológicas con datos para los diferentes meses desde 5 años de mediciones hasta 25 años, se consideró que era una buena secuencia de datos para la interpolación a realizar (estimación del mapa de Luz Solar). Debido a esto el esfuerzo en tiempo de los técnicos de la UCA se dedicó a obtener un inventario ordenado de las bandas existentes para las diferentes estaciones (84,809 bandas). **A la fecha únicamente se han digitalizado los últimos años de 17 estaciones, es decir, 7,854 bandas que representan un 9.26 % del total** (ver tabla 2-12).

Tabla 2-12 Datos de luz solar digitalizados dentro del proyecto SWERA.

Código	Estación	Departamento	Años	Subtotal
A18	Los Andes	Santa Ana	2001, 2002	508
A31	Los Planes de Montecristo	Santa Ana	2001, 2002	695
A35	Cerro Verde	Santa Ana	1987, 1988	379
A12	Santa Ana, El Palmar	Santa Ana	1998, 2002	432
H14	La Hachadura	Ahuachapán	2001, 2002	726
H99	San Benito, El imposible	Ahuachapán	1995, 1996	577
H8	Ahuachapán	Ahuachapán	2002	214
L4	San Andrés	La Libertad	2001, 2002	695
S27	Estación matriz (El Matazano)	San Salvador	2000, 2001	700
S5	Observatorio	San Salvador	1988, 1989	224
B10	Cerrón Grande	Cabañas	2001, 2002	698
U6	Santiago de María	Usulután	1997, 1998	392
U11	Beneficio La Carrera	Usulután	1985, 1986	357
U99	Laguna de Alegría		2001, 2002	366
V6	Santa Cruz Porrillo	San Vicente	1994	209
V16	Lempa-Acahuapa	San Vicente	2001, 2002	682
			Total	7854

Viento.

La información recuperada a la fecha es de 719 cuadros mensuales, equivalentes a 20,890 registros diarios con información horaria. La información de viento en bandas (23,001) no se han digitalizado.

Tabla 2-13 Cuadros de viento digitalizados en el proyecto SWERA.

Estación	Nombre	Cuadros	Días de medición	Años
a12	Santa Ana El Palmar	68	2014	1980-1986
a31	Los Planes de Montecristo	36	1044	1980-1983
a35	Cerro Verde	33	978	1980, 1981, 1983
M23	Cerro Cahuatique	25	678	1980-1982
M6	El Papalón	48	1450	1980-1984, 1986
N15	La Unión	22	667	1980, 1985
h8	Ahuachapán	50	1429	1980-1984
h13	Apaneca Santa Leticia	35	997	1980, 1982-1984
s10	Aeropuerto Ilopango	53	1491	1980-1984, 1986
s27	Estación Matriz	54	1599	1980-1984
l4	San Andrés	54	1616	1980-1984
l18	Boquerón	60	1756	1980-1985
b10	Cerrón Grande	27	703	1980-1984
g3	Nueva Concepción	61	1818	1980-1984, 1986
v6	Santa Cruz Porrillo	48	1350	1980-1984
v13	Apastepeque	6	177	1980
U11	Beneficio La Carrera	17	505	1980, 1983, 1984
Z4	La Galera	22	618	1980-1982
	TOTAL	719	20,890	

3. Aplicación de Tecnologías SIG al modelo de Angstrom

3.1 Conceptos básicos de Radiación Solar y Luz solar.

El Sol y la Tierra

Se entiende como *radiación solar* a la radiación electromagnética que proviene del Sol¹, la cual se extiende desde los rayos gamma (de longitud de onda 10^{-10} cm e inferiores) hasta las ondas de radio (de longitudes de onda 10^{+5} cm y superiores). La mayoría de la radiación solar cae entre las longitudes de onda de 0.15 a 120 μm (micrómetros), y la radiación de importancia práctica a los usuarios de la energía solar cae entre 0.15 y 3.0 μm . Las longitudes de onda de la radiación visible están entre 0.38 y 0.72 μm (ver Figura 1). La cantidad de energía radiada por el sol se estima a una razón de 3.8×10^{23} kW.

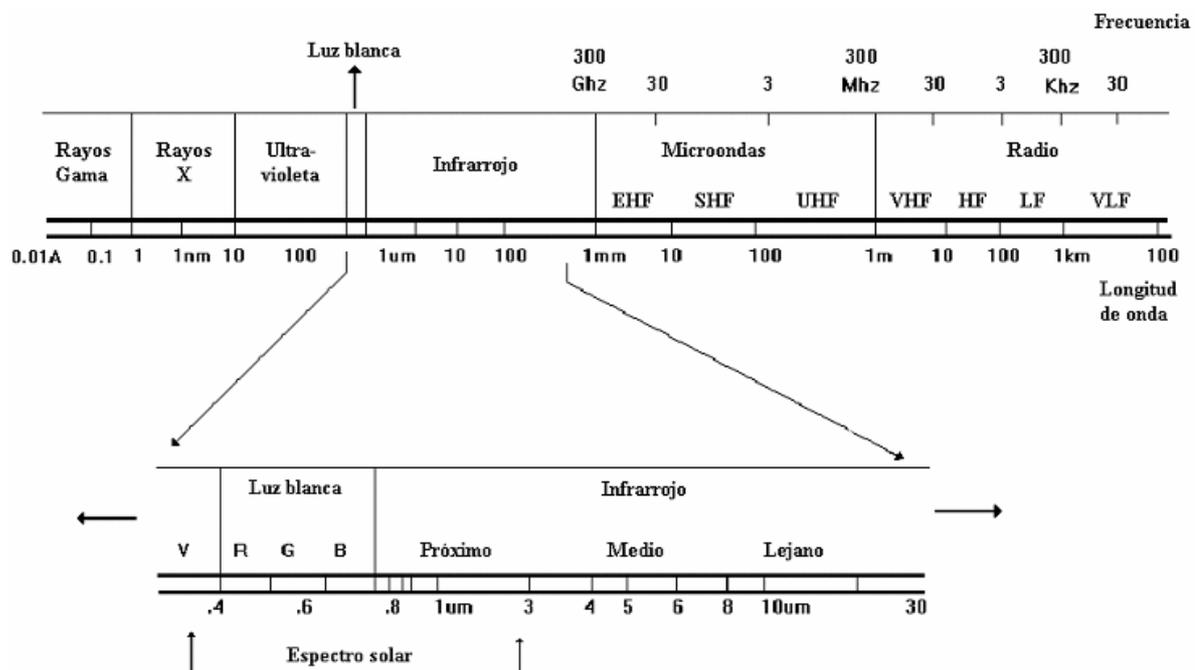


Figura 3-1 Espectro Electromagnético. La radiación de importancia práctica a los usuarios de la energía solar cae entre 0.15 y 3.0 μm .

La Tierra está a 150 millones de km del Sol y tiene un radio de aproximadamente 6360 km. La Tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica a una velocidad media de 30 km/s y al mismo tiempo rota sobre su eje a una velocidad de 0.5 km/s. El eje de rotación de la Tierra está inclinado 23.45° con respecto a su órbita alrededor del Sol. La distribución de la radiación solar sobre la superficie de la Tierra y su variación a lo largo de la duración del día es el resultado de la posición inclinada de la Tierra, su rotación diaria y su traslación anual. Es decir, la radiación solar recibida en la superficie de la Tierra no es constante y para su comprensión es necesario conocer los ángulos entre el Sol y la Tierra.

¹ El sol es una estrella de radio 0.7 millones de Km, tiene una masa de 2×10^{30} kg y su temperatura en la superficie es de aproximadamente de 5760 K.

Ángulos entre el Sol y la Tierra.

La posición de una localidad en la superficie de la Tierra se conoce a través de las coordenadas de latitud y longitud:

- Latitud (φ) se define como la distancia angular de un punto (en la superficie de la Tierra) medida desde el ecuador. Puede ser al norte o al sur del ecuador y nos indica qué tan lejos está la localidad del ecuador.
- Longitud (L) o meridiano son semi círculos que pasan por los polos de la Tierra. El meridiano cero pasa por Greenwich y por acuerdo internacional se le conoce como meridiano principal. La longitud se define como el ángulo entre el meridiano principal y el meridiano que pasa a través de una localidad. Localidades al este del Greenwich se definen como grados Este y localidades al oeste del Greenwich se definen como grados Oeste.

Tiempos de reloj (WT). Se basa en longitudes y depende del meridiano estándar para cada país o región. La diferencia en tiempo del meridiano estándar con el Greenwich se conoce como GMT. La velocidad de rotación de la tierra es de 4 minutos por meridiano (o longitud) o de 15° por hora.

Tiempo solar (TS). Se basa en el día solar que se define como el intervalo de tiempo entre dos pasos sucesivos del Sol a través del meridiano del observador. Todos los cálculos en energía solar se basan únicamente en el tiempo solar. El tiempo solar es diferente del tiempo de reloj por dos razones:

- El tiempo de reloj depende del meridiano estándar del país o región y, por lo tanto, existe una diferencia entre la longitud local y el meridiano estándar delta en minutos:

$$\Delta = 4(L_{es} - L_{Lo}) \quad \text{Ec. 3-1}$$

- Las velocidades de rotación y angular de la tierra no son constantes. Esta corrección se conoce como la Ecuación del Tiempo (EOT). Para calcular EOT se utiliza la siguiente ecuación (en horas):

$$EOT = 0.123 \cos(\varepsilon + 87) - (1/6) \text{sen}[2(\varepsilon + 10)] \quad \text{Ec. 3-2}$$

$$\varepsilon = 0.938[N + 30.3(M - 1)] \quad \text{Ec. 3-3}$$

En donde, N y M representan el número del día en el mes y el número del mes del año.

La diferencia entre el tiempo solar y el tiempo de reloj se relaciona con la EOT de la siguiente manera:

- Para localidades al Este del Greenwich:

$$ST = WT + EOT - \Delta \quad \text{Ec. 3-4}$$

- Para localidades al Oeste del Greenwich

$$ST = WT + EOT + \Delta \quad \text{Ec. 3-5}$$

La posición del sol en el cielo se conoce por los ángulos horarios y la declinación y estos se determinan de la siguiente forma:

- Angulo horario.

Es el desplazamiento del sol Este u Oeste del meridiano de una localidad debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por hora. Al medio día solar (el momento en el cual el sol está sobre el meridiano local) el ángulo horario es cero. En la mañana es negativo, mientras que en la tarde, es positivo. El ángulo horario se calcula por la siguiente ecuación:

$$\omega = 15(ST - 12) \quad \text{Ec. 3-6}$$

En donde ST es el tiempo solar en horas.

- Declinación.

Es la posición angular del sol al medio día solar con respecto al plano del ecuador. También se define como el ángulo formado por la línea que se extiende desde el centro del sol al centro de la tierra y la proyección de esta línea en el plano ecuatorial de la tierra. La máxima declinación se obtiene en el solsticio de verano (junio 22, 23.45°), la mínima en el solsticio de invierno (diciembre 21, -23.45°) y es igual a cero durante los dos equinoccios (marzo 21 y septiembre 22). Esto nos indica que el sol está directamente sobre nuestras cabezas dos veces al año en localidades entre 23.45° N y 23.45° S y el sol nunca está sobre nuestras cabezas a latitudes fuera de este rango.

$$\delta = 23.45 \text{Sen}\{360(284 + N)/365\} \text{grados} \quad \text{Ec. 3-7}$$

3.2 Modelo de Angstrom.

Los datos de radiación registrados por una estación meteorológica son la mejor fuente de información para estimar la radiación solar incidente promedio en una localidad. Cuando estos datos faltan o no hay datos de localidades cercanas, con clima similar, al punto de interés, se utilizan ecuaciones empíricas para estimar la radiación a partir de las horas de luz solar o nubosidad ("cloudiness"). Los datos de horas de luz solar promedio (también llamado brillo solar en este documento) usualmente están disponibles para mayor número de estaciones meteorológicas, para el caso de El Salvador. Uno de los modelos más conocidos para estimar datos de radiación solar es la **ecuación de regresión de Ångström** que relaciona, para una localidad de interés, el cociente de la radiación diaria promedio mensual y la radiación en día despejado ("clear day radiation") (H/H_c), con la fracción de horas de luz solar posibles (n/N):

$$\frac{H}{H_c} = a' + b' \frac{n}{N} \quad \text{Ec. 3-8}$$

En donde,

- H : Radiación diaria promedio mensual en una superficie horizontal.
- H_c : Radiación diario promedio en cielo abierto para la localidad y mes de interés.
- a' y b' : Constantes empíricas.
- n : Promedio mensual de horas diarias de luz solar.
- N : Promedio mensual de las horas máximas de luz solar diarias (es decir, la duración del día del día promedio del mes).

Una dificultad de esta ecuación está en la ambigüedad de los términos n/N y H_c . El primero es un error de tipo instrumental (el registro de luz solar diario está sujeto a la interpretación de la persona que realiza la lectura en la banda), el segundo, resulta de la incerteza en la definición de día despejado ("clear day"). Page y otros autores modificaron la ecuación original de Angstrom por un método basado en la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal en lugar de la radiación diaria promedio en cielo despejado,

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N}$$

Ec. 3-9

En donde H_0 es la radiación fuera de la atmósfera para la misma localidad promediada en el periodo de interés y a y b son las constantes modificadas las cuales, obviamente, dependen de la localidad en estudio.

La metodología empleada para evaluar la energía solar disponible de las estaciones que poseen información básica completa (radiación solar + brillo solar) es la siguiente:

Paso 1.

Cálculo de los promedios mensuales de la duración astronómica del día (longitud del día u horas máximas de luz solar diarias).

La duración astronómica del día N_d , o longitud del día, se calcula mediante:

$$N_d = \frac{2}{15} \omega_s = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi)$$

Ec. 3-10

en donde:

δ : Declinación, es la posición angular del sol al mediodía solar con respecto al plano del ecuador.

$$\delta = \left(\begin{array}{l} 0.006918 - 0.399912 \cos \gamma + 0.070257 \sin \gamma - 0.006758 \cos 2\gamma \\ + 0.000907 \operatorname{sen} 2\gamma - 0.002697 \cos 3\gamma + 0.00148 \operatorname{sen} 3\gamma \end{array} \right) \frac{180}{\pi}$$

Ec. 3-11

En donde:

γ : es el ángulo del día (en radianes) y se representa por:

$$\gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365}$$

Ec. 3-12

Donde d_n es el número del día ($1 \leq d_n \leq 365$).

φ : Latitud, es el ángulo con que se determina el lugar de interés (localidad) sobre la tierra con respecto al plano del ecuador.

ω_s : Angulo horario con que se oculta el sol.

El promedio mensual de la duración astronómica del día N_d puede calcularse, con bastante aproximación, usando en la ecuación 3-10 el valor de la declinación para el día recomendado para cada mes.² En la tabla 3-1 se muestra el cálculo del ángulo de declinación para cada día característico del mes y en la tabla 3-2 se presenta la duración astronómica del día para cada mes y en cada una de las estaciones consideradas.

² El día recomendado de cada mes o día promedio del mes es el día en el cual su radiación extraterrestre es la más cercana al promedio del mes.

Tabla 3-1 Cálculo del ángulo de declinación

d_n	γ	δ (grados)	δ (rad)
17	0.275427945	-20.90354682	-0.364835717
47	0.791855342	-12.60892623	-0.220067278
75	1.273854247	-2.041903131	-0.035637933
105	1.790281644	9.480836087	0.165471806
135	2.306709041	18.67365533	0.325916769
162	2.771493699	23.0378951	0.402087122
198	3.391206575	21.34544923	0.372548369
228	3.907633973	13.98911474	0.244156112
258	4.42406137	3.342793611	0.058342755
288	4.940488767	-8.217977789	-0.14343077
318	5.456916164	-18.04105059	-0.314875733
344	5.904486575	-22.84065258	-0.398644591

Tabla 3-2 Duración astronómica del día para cada estación (en horas).

Código	Latitud	Longitud	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
H-8	13.94	-89.86	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
A-18	13.88	-89.64	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
A-31	14.4	-89.36	11.2	11.6	11.9	12.3	12.7	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
A-35	13.83	-89.62	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
T-6	13.57	-89.83	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
L-4	13.81	-89.41	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
L-8	13.69	-89.29	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
S-5	13.7	-89.2	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
S-27	13.69	-89.14	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
G-3	14.12	-89.29	11.3	11.6	11.9	12.3	12.7	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
G-13	14.36	-89.09	11.3	11.6	11.9	12.3	12.7	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
V-6	13.44	-88.8	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
V-13	13.7	-88.75	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
U-6	13.48	-88.47	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
U-11	13.33	-88.52	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
M-6	13.44	-88.12	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
M-18	13.71	-88.36	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
M-23	13.76	-88.23	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
Z-2	13.7	-88.11	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
Z-4	14.04	-88.09	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
N-15	13.33	-87.88	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2
B-10	13.94	-88.91	11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.7	12.5	12.1	11.7	11.4	11.2

Paso 2.

Cálculo del promedio mensual de la radiación solar extraterrestre en superficie horizontal.

La radiación solar extraterrestre en la superficie horizontal se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$H_0 = \frac{24(3600)}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360d_n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta \right] \quad \text{Ec. 3-13}$$

En donde, I_{sc} = Constante solar y su valor es 1353 watt/m² y los otros valores fueron definidos anteriormente.

La radiación extraterrestre, calculada a partir de la ecuación 3-13, para cada una de las estaciones se presenta en la tabla 3-3, de estas 22 estaciones, solo 9 tienen registros de brillo y radiación como se mencionó en la sección 2 de este documento.

Tabla 3-3 Radiación extraterrestre para cada estación (KWh/m²/día).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a18	8.28	9.13	9.96	10.47	10.55	10.48	10.47	10.44	10.09	9.33	8.46	8.00
a31	8.21	9.07	9.93	10.47	10.57	10.52	10.50	10.45	10.07	9.28	8.39	7.93
a35	8.29	9.13	9.96	10.47	10.55	10.47	10.46	10.43	10.09	9.34	8.46	8.01
b10	8.27	9.12	9.95	10.47	10.55	10.48	10.47	10.44	10.09	9.33	8.45	7.99
g3	8.25	9.10	9.94	10.47	10.56	10.50	10.48	10.44	10.08	9.31	8.42	7.97
h8	8.27	9.12	9.95	10.47	10.55	10.48	10.47	10.44	10.09	9.32	8.45	7.99
l4	8.29	9.14	9.96	10.47	10.54	10.47	10.46	10.43	10.09	9.34	8.46	8.01
l8	8.31	9.15	9.97	10.47	10.54	10.46	10.45	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
m18	8.30	9.15	9.96	10.47	10.54	10.47	10.46	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
m23	8.30	9.14	9.96	10.47	10.54	10.47	10.46	10.43	10.10	9.34	8.47	8.02
m6	8.34	9.17	9.98	10.46	10.53	10.45	10.44	10.43	10.11	9.37	8.51	8.07
n15	8.36	9.18	9.98	10.46	10.52	10.44	10.43	10.42	10.11	9.38	8.53	8.08
s27	8.31	9.15	9.97	10.47	10.54	10.46	10.45	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
s5	8.31	9.15	9.96	10.47	10.54	10.47	10.46	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
t6	8.32	9.16	9.97	10.47	10.53	10.46	10.45	10.43	10.10	9.36	8.49	8.05
u11	8.36	9.18	9.98	10.46	10.52	10.44	10.43	10.42	10.11	9.38	8.53	8.08
u6	8.33	9.17	9.98	10.47	10.53	10.45	10.44	10.43	10.10	9.36	8.51	8.06
v13	8.31	9.15	9.96	10.47	10.54	10.46	10.45	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
v6	8.34	9.17	9.98	10.46	10.53	10.45	10.44	10.43	10.11	9.37	8.51	8.07
z2	8.31	9.15	9.97	10.47	10.54	10.46	10.45	10.43	10.10	9.35	8.48	8.03
z4	8.26	9.11	9.95	10.47	10.56	10.49	10.48	10.44	10.09	9.32	8.43	7.98

Paso 3.
Modelo de Ångström

El modelo parte del supuesto físico que hay una relación directa entre la radiación solar global y el brillo solar, llegando a establecer:

$$Y = a + b x \quad \text{Ec. 3-14}$$

En donde:

$$Y = \frac{H}{H_0} \quad (\text{Radiación medida entre Radiación extraterrestre})$$

$$x = \frac{N_i}{N_d} \quad (\text{Duración medida del día entre duración astronómica del día})$$

a y b: son los coeficientes de regresión, llamados coeficientes de Ångström.

Para una estación determinada se tienen los valores H y N_i (promedios mensuales obtenidos mediante mediciones históricas de campo). N_d se calcula mediante la ecuación 3-10 y H_0 se calcula mediante la ecuación 3-13. Con todos los pares ordenados H , H_0 , N_i y N_d para los diferentes meses, para cada estación meteorológica se realiza un ajuste lineal para encontrar los coeficientes a y b . La ecuación a resolver por mínimos cuadrados es:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{N_i}{N_d} \quad \text{Ec. 3-15}$$

Por ejemplo, para la estación de Ahuachapán calculamos los pares ordenados (X, Y) para cada uno de los meses del año, ver tabla 3-4, posteriormente hacemos una regresión lineal de los datos para encontrar las constantes a y b , como se muestra en la figura 3-2, los valores determinados son: $b = 0.418$ y $a = 0.252$.

Tabla 3-4 Cálculo de constantes de Ångström para la estación H-8.³

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
H	5.1	5.5	5.8	5.6	5.2	4.9	5.6	5.3	4.6	4.8	4.9	4.8
N	9.5	9.7	9.6	9.0	7.5	6.7	8.3	7.4	5.9	7.1	8.6	9.4
Ho	8.27	9.12	9.95	10.47	10.55	10.48	10.47	10.44	10.09	9.32	8.45	7.99
Nd	11.27	11.56	11.92	12.31	12.65	12.81	12.74	12.45	12.07	11.68	11.35	11.19
Y	0.6139	0.6009	0.5843	0.5365	0.4904	0.4718	0.5309	0.5079	0.4570	0.5138	0.5832	0.6046
X	0.8426	0.8388	0.8054	0.7308	0.5931	0.5230	0.6517	0.5942	0.4887	0.6079	0.7578	0.8399

³ El procedimiento de cálculo ilustrado en la tabla 3-4 es correcto; sin embargo, las estimaciones para H8 no incluyen el estado actual de la base de datos digitalizada de radiación solar y brillo solar. Los valores correctos de a y b , con la información actualizada, para la estación H8 se presentan en la tabla 3-5.

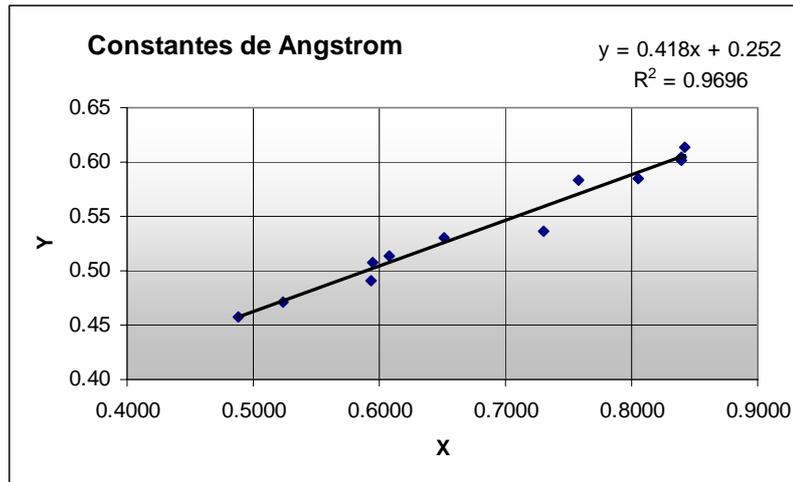


Figura 3-2 Regresión por mínimos cuadrados para los datos de Ahuachapán.

El procedimiento se repite para las nueve estaciones que tenemos mediciones de radiación solar y brillo solar, obteniendo los valores mostrados en la tabla 3-5. Para comprobar los cálculos se sumaron las constantes “a” y “b” y estos valores oscilan alrededor de 0.65 como recomienda la literatura para estas latitudes y climas tropicales como el nuestro.

Tabla 3-5 Constantes “a” y “b” de Ångstrom y su coeficiente de correlación “r”

Estación	b	a	'a+b'	r
a31	0.524	0.182	0.706	0.942
g3	0.351	0.303	0.654	0.952
h8	0.445	0.213	0.658	0.966
n15	0.304	0.290	0.594	0.981
s27	0.449	0.266	0.715	0.973
s5	0.351	0.308	0.659	0.964
u11	0.359	0.273	0.632	0.959
v13	0.309	0.287	0.596	0.985
z4	0.567	0.147	0.714	0.938

Paso 4.

Evaluación de la energía solar disponible para lugares que poseen o sólo brillo solar o sólo radiación solar global.

De las 22 estaciones meteorológicas 12 poseen registro de brillo solar únicamente y 1 tiene sólo registro de radiación solar global. Para evaluar el potencial solar en estos casos se asignaron a estos lugares las constantes Ångstrom de las otras estaciones que si poseían registros de radiación y brillo. El criterio utilizado se basó en los siguientes aspectos:

- Zona de vida en que estaban situadas las estaciones con información incompleta.
- La elevación sobre el nivel del mar.

La cartografía de zonas de vida de El Salvador⁴ describe zonas ecológicas basadas en las elevaciones, microclimas y temperaturas promedio, registrándose en nuestro país 10 zonas de vida, así como se muestra en la tabla 3-6 y figura 3-3.

Si las estaciones sin registros de radiación se encuentran en la misma zona de vida, ver figura 3-4, que otra estación cuya disponibilidad de energía solar se conoce y sus elevaciones sobre el nivel del mar son comparables, se aplicarán los coeficientes *a* y *b* conocidos. Los resultados se muestran en la tabla 3-7.

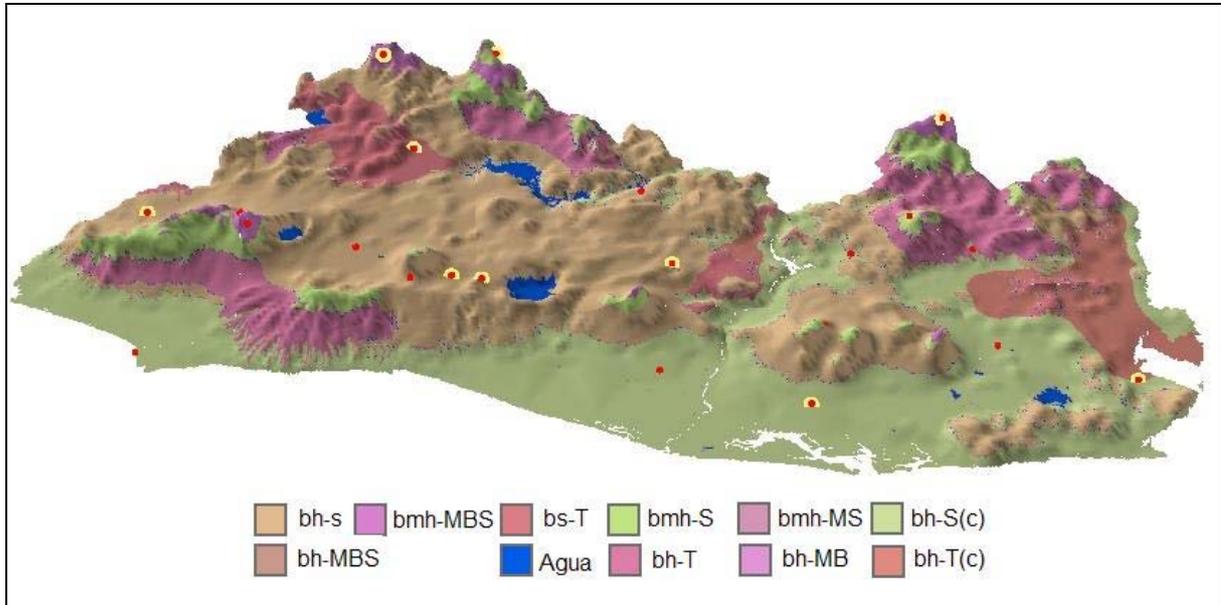


Figura 3-3 Mapa de Zonas de Vida de El Salvador. Puntos rojos muestran estaciones con registros de radiación y los verdes con registro de brillo.

Tabla 3-6 Zonas de Vida de El Salvador

Símbolo	Descripción
bh-MB	Bosque húmedo Montano Bajo
bh-MBS	Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical
bh-S	Bosque húmedo Subtropical
bh-S(c)	Bosque húmedo Subtropical
bh-T	Bosque húmedo Tropical, transición a Subtropical
bmh-MBS	Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical, transición a húmedo
bmh-MS	Bosque muy húmedo Montano Subtropical
bmh-S	Bosque muy húmedo Subtropical, transición a húmedo
bs-T	Bosque seco Tropical
bs-T(c)	Bosque seco Tropical, transición a Subtropical (con biotemperatura < 24°C.)

⁴ La zona de vida elaborado por L. R. Holdridge y ampliado por Joseph Tosi y Gary Hartshorn, CATIE y la Dirección General de Recursos Naturales Renovables del Ministerio de Agricultura y Ganadería. Este mapa se encuentra disponible en el Sistema Ambiental de El Salvador, publicado por el MARN.

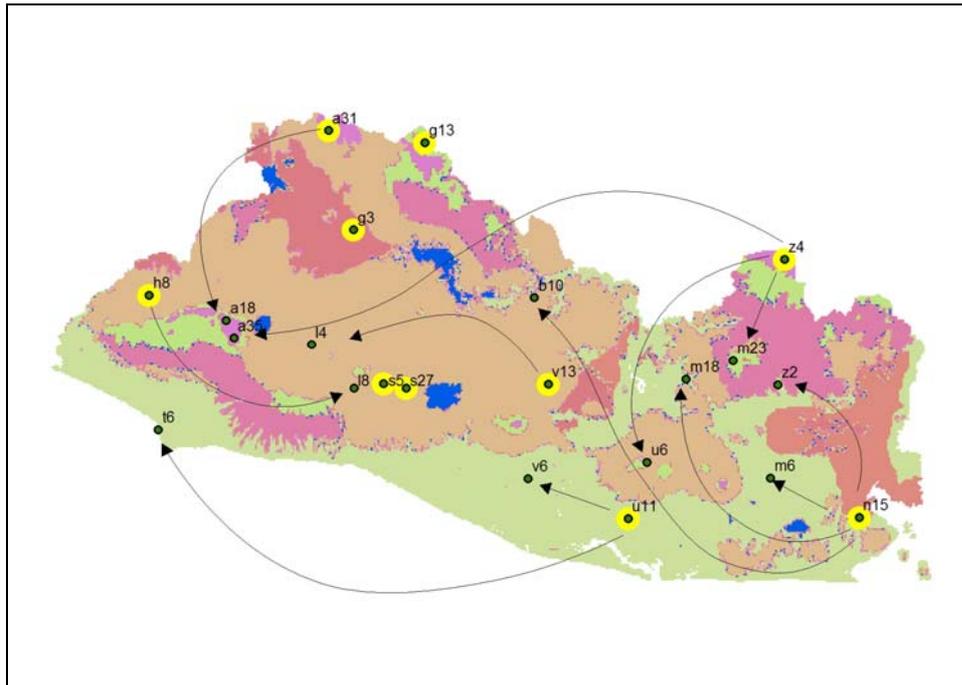


Figura 3-4 Ubicación de las estaciones con respecto a las zonas de vida. Los puntos en amarillo son aquellas estaciones con coeficientes a y b según el modelo de Ångström, los verdes los que no lo poseen y las flechas denotan la asignación realizada.

Tabla 3-7 Coeficientes del modelo de Ångström. Datos del tipo 1 ya poseen registros de radiación y los del tipo 2 se les asignado las a y b de las estaciones mostradas en la columna fuente.

Estación	Tipo	Elevación msnm	Fuente
H-8	1	725	
A-18	2	1770	A-31
A-31	1	1851	
A-35	2	2027	Z-4
T-6	2	15	U-11
L-4	2	460	V-13
L-8	2	960	H-8
S-5	1	700	
S-27	1	650	
G-3	1	320	
G-13	1	1960	(A-31)
V-6	2	30	U-11
V-13	1	570	
U-6	2	920	Z-4
U-11	1	75	
M-6	2	80	N-15
M-18	2	195	N-15
M-23	2	1370	Z-4
Z-2	2	250	N-15
Z-4	1	1900	
N-15	1	95	
B-10	2	245	N-15

N_d y H_0 se calculan en la forma ya explicada anteriormente y a y b se obtienen de acuerdo a los criterios anteriores, de manera que la radiación solar disponible será la calculada por la ecuación 3-16, en el caso en que la estación no posea registro de brillo (como la G-13) la ecuación a utilizar es la 3-17.

$$H = a + b \left(\frac{N_i}{N_d} \right) H_0$$

Ec. 3-16

$$N_i = \left(\frac{H - a}{H_0} \right) \frac{N_d}{b}$$

Ec. 3-17

En donde los diferentes términos fueron descritos anteriormente.

3.3 Datos de radiación y brillo solar medidos y calculados por el modelo de Angstrom para estimación de los mapas de potencial solar.

Tabla 3-8 Datos utilizados para estimación del mapa de radiación solar (KWh/m²/día) (Datos de Solarimetría + SWERA) .

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a18	4.2	4.9	5.4	5.3	4.3	3.9	4.8	4.6	3.7	3.6	3.7	3.6
a31	4.9	5.2	5.0	4.5	3.6	4.1	5.2	4.7	3.8	4.4	4.6	4.6
a35	4.4	4.7	4.7	4.4	4.0	3.7	5.1	5.0	3.7	3.7	4.2	4.2
b10	4.4	4.8	5.3	5.2	4.9	4.7	5.1	5.1	4.5	4.5	4.3	4.2
g13	4.6	5.0	5.6	5.3	5.1	5.0	5.5	5.5	4.8	4.7	4.3	4.3
g3	4.9	5.4	5.7	5.5	5.2	5.2	5.4	5.4	5.0	4.9	4.7	4.6
h8	5.0	5.4	5.7	5.5	5.0	4.7	5.2	5.0	4.3	4.5	4.6	4.5
l4	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.6	5.1	4.9	4.4	4.3	4.3	4.3
l8	5.0	5.4	5.7	5.3	4.7	4.4	5.2	5.0	4.4	4.4	4.7	4.7
m18	4.6	5.1	5.4	5.3	4.9	4.8	5.1	5.0	4.6	4.4	4.4	4.3
m23	4.6	5.2	5.4	4.5	3.7	3.7	4.9	4.7	4.0	3.9	4.2	4.0
m6	4.5	5.0	5.4	5.4	5.0	4.9	5.2	5.2	4.8	4.6	4.4	4.4
n15	4.7	5.1	5.4	5.3	4.8	5.0	5.2	5.2	4.8	4.7	4.5	4.4
s27	5.1	5.6	6.2	5.9	5.2	5.3	5.9	5.6	4.9	4.8	5.0	4.8
s5	4.9	5.4	5.7	5.4	4.9	5.1	5.5	5.2	4.6	4.8	4.8	4.8
t6	4.9	5.3	5.6	5.5	5.1	4.9	5.3	5.2	4.8	4.7	4.7	4.6
u11	4.9	5.4	5.5	5.2	4.8	4.8	5.4	5.4	5.0	4.8	4.8	4.7
u6	5.0	5.6	5.8	5.4	4.6	4.2	5.2	5.1	4.1	4.2	4.6	4.8
v13	4.6	5.2	5.3	5.1	4.8	4.7	5.1	5.1	4.6	4.5	4.6	4.4
v6	4.8	5.3	5.6	5.5	5.1	4.9	5.3	5.3	4.8	4.7	4.6	4.6
z2	4.5	5.0	5.3	5.2	4.8	4.8	5.1	5.1	4.7	4.6	4.4	4.3
z4	4.4	4.9	5.1	4.8	4.1	4.0	4.5	4.3	3.5	3.7	3.7	3.9

Tabla 3-9 Datos utilizados para estimación del mapa de brillo solar (horas de luz solar) (Datos Solarimetría + SWERA).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a18	6.9	7.8	8.2	7.6	5.5	4.7	6.7	6.0	4.3	4.6	5.4	5.8
a31	8.7	8.5	8.1	7.1	5.0	4.8	6.7	6.2	4.0	5.9	7.7	8.0
a35	7.7	7.5	6.9	5.9	5.1	4.7	7.6	7.2	4.6	5.2	7.0	7.5
b10	8.9	9.0	9.4	8.5	7.0	6.7	8.1	8.0	6.2	7.3	8.3	8.7
g13	8.2	8.0	8.6	7.6	7.1	7.2	8.4	8.2	6.8	7.1	7.1	7.6
g3	9.1	9.6	9.2	8.5	7.5	6.8	7.9	7.4	6.3	7.3	8.2	8.1
h8	9.1	9.4	9.4	9.0	7.4	6.6	8.2	7.4	5.9	7.1	8.6	9.4
l4	9.2	9.2	8.8	8.0	6.8	6.4	8.1	7.4	5.7	6.7	8.3	8.9
l8	9.8	9.8	9.5	8.1	6.7	6.0	8.0	7.4	5.9	6.6	8.6	9.5
m18	9.6	10.0	9.7	8.6	7.3	7.0	8.3	7.6	6.3	7.0	8.4	9.2
m23	8.0	8.6	8.4	6.2	4.5	4.7	7.2	6.6	5.3	5.5	6.9	7.0
m6	9.4	9.8	9.7	8.9	7.7	7.3	8.6	8.6	7.2	7.8	8.5	9.3
n15	9.8	10.0	9.7	8.9	7.4	7.4	8.8	8.5	7.2	8.1	9.1	9.7
s27	8.5	9.1	9.2	8.5	6.4	6.4	8.2	7.7	5.9	6.9	7.9	8.2
s5	9.1	8.7	9.2	7.5	5.6	5.5	7.6	7.3	5.6	7.3	8.3	9.0
t6	9.8	9.9	9.6	8.6	7.3	6.8	8.2	7.7	6.7	7.3	8.9	9.4
u11	9.7	9.9	9.7	8.6	7.0	6.9	8.2	8.2	7.0	7.3	8.9	9.5
u6	9.1	9.4	9.1	7.9	6.5	5.6	7.8	7.5	5.5	6.2	7.9	8.9
v13	9.8	10.0	9.5	8.5	6.9	6.5	8.1	8.0	6.6	7.2	8.9	9.7
v6	9.4	9.7	9.5	8.5	7.4	6.9	8.3	8.2	6.8	7.4	8.5	9.4
z2	9.4	9.8	9.4	8.5	7.0	7.0	8.2	8.0	6.9	7.6	8.6	9.2
z4	7.0	7.9	7.9	7.1	5.6	5.1	7.1	6.2	4.6	4.7	5.7	6.2

4. Método de Interpolación de Kriging para estimación del potencial solar en El Salvador.

Una vez aplicado el modelo de Ångström a las estaciones meteorológicas del país se obtuvo un total de 22 estaciones con datos calculados y estimados de radiación solar y brillo solar para cada uno de los meses del año y un promedio anual para cada uno de estos dos parámetros. Los valores de radiación y brillo solar se muestran en las tablas 3-8 y 3-9 respectivamente.

Luego se evaluaron diferentes métodos de interpolación con los datos obtenidos descartando el Inverse Distance Weighted (IDW) principalmente por el patrón de forma “duck-egg” (huevo de pato) que genera alrededor de puntos de datos solitarios cuyos valores difieren grandemente del de sus vecinos. También este método de interpolación (IDW) trabaja mejor cuando los datos muestreados son numerosos y están distribuidos uniformemente lo cual no era nuestro caso. Además se analizó el método de interpolación de Spline y se descartó por la siguiente razón: el método asume que una función aproximada debe pasar tan cerca como sea posible de los puntos de datos y a su vez sea lo más suave posible; esto produce que algunos puntos estimados queden muy por arriba o por debajo de la función suave estimada. En ambos casos los pesos asignados para calcular la combinación lineal de la aproximación no son óptimos. Debido a estas razones y dado que en el método de interpolación de Kriging asigna pesos de manera óptima se optó utilizarlo para el caso del mapa de brillo solar y radiación solar.

4.1 Método de interpolación de Kriging.

Para propósitos académicos se describe a continuación el método de interpolación de Kriging. Cuando se comparan los métodos de interpolación IDW y Spline se observa que retornan modelos con grandes diferencias en los patrones globales, en la cantidad de detalle local y en las predicciones de los valores máximos y mínimos interpolados. En estos métodos, la única manera de determinar “lo bueno” de las predicciones es calcular estimados para un conjunto extra de puntos de validación que no hayan sido usados en la interpolación original. Otra desventaja de estos métodos es que no hay un método a priori para saber si se han seleccionado los mejores valores para los pesos o si el tamaño para la búsqueda de los vecinos es la apropiada. Estas desventajas motivaron al geomatemático Francés Georges Matheron y al ingeniero de minas sudafricano D.G. Krige a desarrollar métodos óptimos de interpolación para uso en la industria de minas. Estos métodos de interpolación óptima basados en **Geoestadística** se usan ampliamente para modelar agua subterránea y mapeo de suelos.

Los métodos Geoestadísticos para interpolación comienzan con el reconocimiento de que la variación espacial de cualquier atributo continuo es a menudo demasiado irregular para ser modelada por una simple función matemática suave. En lugar de esto, la variación puede describirse de mejor manera por medio de una **superficie estocástica**. El atributo es conocido entonces como una **variable regionalizada**; el término se aplica por igual a la variación de la presión atmosférica, a la elevación sobre el nivel del mar o a la distribución de indicadores continuos demográficos. **La interpolación con Geoestadística es conocida como Kriging** en honor de D.G. Krige. Este método es óptimo en el sentido de que los pesos de la interpolación se seleccionan de tal forma que optimicen la función de interpolación.

Teoría de variable regionalizada.¹

La teoría de variable regionalizada asume que la variación espacial de cualquier variable puede expresarse como la suma de tres componentes principales. Estos son: (a) un componente estructural, que tiene una media o tendencia constante; (b) Un componente aleatorio, pero espacialmente correlacionado conocido como la variación de la variable regionalizada, y (c) ruido aleatorio no correlacionado espacialmente también llamado término de error residual.

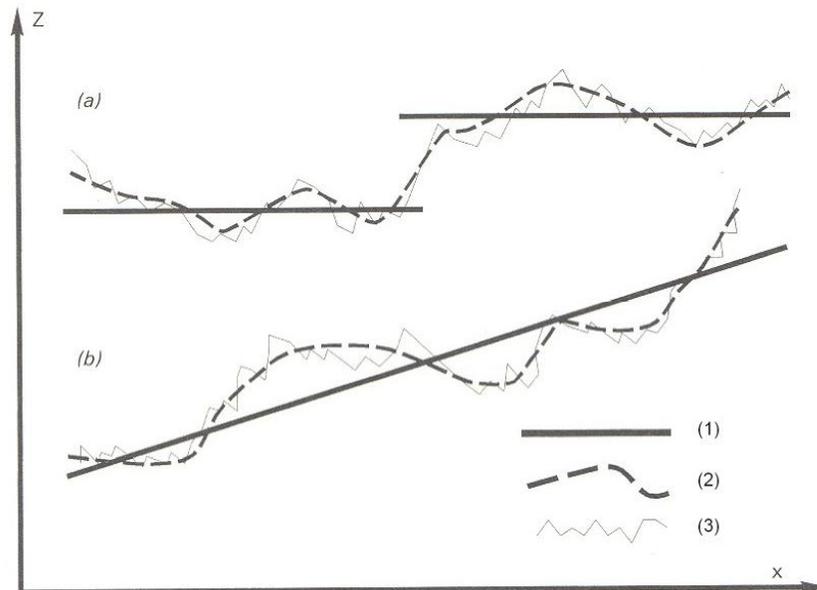


Figura 4-1 Teoría de variable regionalizada: (1) diferencias en niveles promedio (a) y tendencia o drift (b); (2) espacialmente correlacionada pero variación irregular (aleatoria); (3) variación local no correlacionada y aleatoria.

Sea \mathbf{x} una posición en tres dimensiones. Entonces el valor de una variable aleatoria Z en \mathbf{x} se expresa como:

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + \varepsilon'(\mathbf{x}) + \varepsilon'' \quad (\text{A})$$

en donde $m(\mathbf{x})$ es la función determinística que describe el componente “estructural” de Z en \mathbf{x} , $\varepsilon'(\mathbf{x})$ es el término que denota el componente estocástico de $m(\mathbf{x})$ - la variable regionalizada -, y ε'' es un ruido Gaussiano independiente espacialmente que tiene media cero y varianza σ^2 . Note que el uso de la mayúscula Z indica que es una función aleatoria y no un atributo medido z .

El primer paso es decidir en una función apropiada para $m(\mathbf{x})$. En el caso más simple, en donde no existe tendencia o “drift”, $m(\mathbf{x})$ es igual al valor medio en el área de muestreo y el promedio o diferencia esperada entre cualquiera dos lugares \mathbf{x} y $\mathbf{x} + \mathbf{h}$ separados por una distancia vectorial \mathbf{h} , será cero:

$$E[Z(\mathbf{x}) - Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})] = 0$$

en donde $Z(\mathbf{x})$, $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ son los valores de variable aleatoria Z en los lugares \mathbf{x} y $\mathbf{x} + \mathbf{h}$. También se asume que la varianza de las diferencias depende únicamente de la distancia entre los sitios, h , tal que:

¹ La teoría de variable regionalizada y las gráficas de esta sección han sido adaptadas del libro “Principles of Geographical Information Systems” de Peter Burrough y Rachael McDonell, Oxford University Press, 1998.

$$E\left[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2\right] = E\left[\{\varepsilon'(x) - \varepsilon'(x+h)\}^2\right] = 2\gamma(h)$$

En donde $\gamma(h)$ es conocida como la semivarianza.

Las dos condiciones, estacionaridad de diferencias y varianza de diferencias, definen los requerimientos para la **hipótesis intrínseca** de la teoría de variable regionalizada. Esto significa que una vez los efectos estructurales han sido tomados en cuenta, la variación restante es homogénea en su variación de tal forma que las diferencias entre sitios son sencillamente una función de la distancia entre ellos. Reescribimos la ecuación (A) como:

$$Z(x) = m(x) + \gamma(h) + \varepsilon''$$

Para mostrar la equivalencia entre $\varepsilon'(x)$ y $\gamma(h)$ se hace la consideración siguiente: Si las condiciones especificadas por la hipótesis intrínseca se cumplen, la semivarianza puede ser estimada de los datos muestreados por:

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_i+h)\}^2 \quad \text{Ecuación 4.1.A}$$

en donde n es el número de pares de puntos de observaciones de los valores del atributo z separados por una distancia h .

Al gráfico de $\bar{\gamma}(h)$ en función de h es conocido como el “variograma experimental”.

El variograma proporciona información útil para la interpolación, muestreo optimizado y para determinar patrones espaciales. Para hacer esto, sin embargo, debemos primero ajustar un modelo teórico al variograma experimental.

Ajustando modelos de variogramas

La figura 4-2 muestra un variograma experimental típico. Para valores grandes de “lag”, h , la curva se nivela. Esta parte horizontal es conocida como el “sill”; implica que en estos valores del lag no hay dependencia espacial entre los puntos de datos, debido a que todos los estimados de las varianzas de las diferencias serán invariantes con la distancia de separación de las muestras.

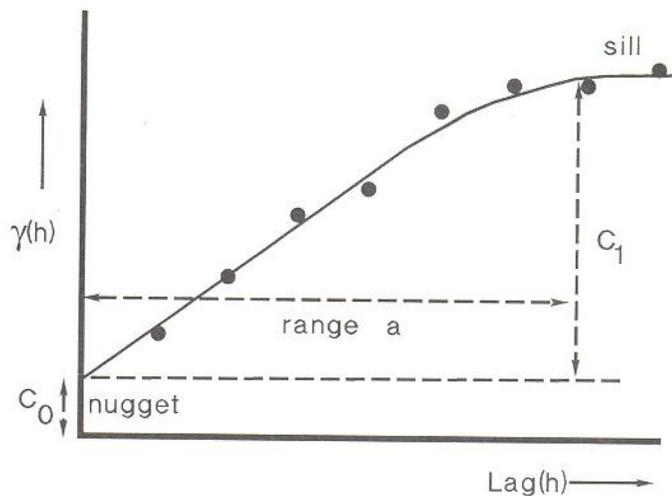


Figura 4-2 Ejemplo de variograma.

La curva crece de un valor bajo de $\gamma(h)$ hasta el **sill**, alcanzándolo a un valor de h conocido como el **rango**. Esta es la parte crítica e importante del variograma debido a que describe cómo las diferencias entre sitios son dependientes espacialmente. **El rango responde a la pregunta de qué tan grande debe ser la ventana de interpolación. Claramente, si la distancia que separa a un sitio no visitado de un punto de datos es mayor que el rango, entonces el punto de datos no hace una contribución útil a la interpolación.** El tercer punto mostrado en la figura es el que en el modelo ajustado no pasa a través del origen, sino que corta el eje Y en un valor positivo de $\gamma(h)$ cuando h tiende a 0 es un estimado de ε'' , el residual o ruido espacialmente no correlacionado. ε'' es conocido como el “**nugget**”.

La forma del variograma es bastante reveladora acerca de la clase de variación espacial presente en un área, y puede ayudar a decidir cómo proceder con la interpolación. Cuando la varianza del nugget es considerable pero no demasiado grande y hay claridad en el rango y en el sill, una curva conocida como el modelo esférico se podría ajustar al variograma observado.

Modelo esférico

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\} \text{ para } 0 < h < a$$

$$= C_0 + C_1 \quad \text{para } h \geq a$$

$$\gamma(0) = 0$$

en donde “ a ” es el rango, h es el lag, C_0 es la varianza del nugget y $C_0 + C_1$ es igual al sill.

Si hay un claro nugget y sill, pero únicamente una aproximación gradual al rango, el modelo exponencial es la mejor selección:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right]$$

Si la variación es muy suave y la varianza del nugget ε'' es muy pequeña comparada con la variable aleatoria $\varepsilon''(x)$, entonces el variograma se ajusta mejor a una curva que tiene una inflexión tal como el modelo Gaussiano.

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)^2 \right]$$

Todos estos modelos son conocidos como variogramas transitivos debido a que la correlación espacial varía con h . Los variogramas no transitivos no tienen sill dentro del área muestreada y podrían ajustarse al modelo lineal.

$$\gamma(h) = C_0 + bh$$

Ecuación 4.1.B

en donde b es la pendiente de la recta.

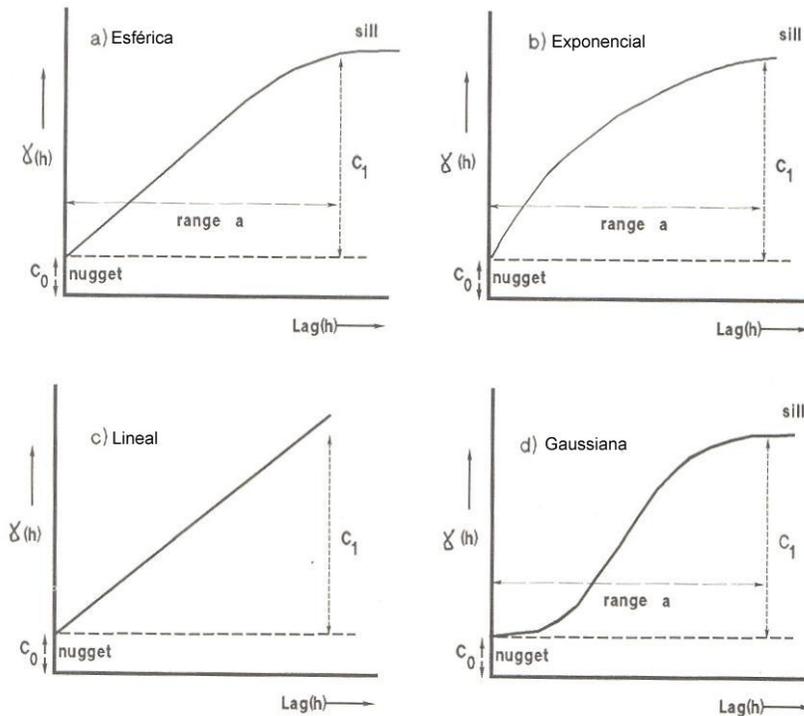


Figura 4-3 Ejemplos de modelos de variogramas.

Usando el variograma para interpolación : Kriging Ordinario

El variograma ajustado se puede usar para determinar los pesos λ_i necesarios para la interpolación local en un punto desconocido \mathbf{x}_0 .

$$\bar{Z}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(\mathbf{x}_i) \quad \text{con} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{Ecuación 4.1.C}$$

Los pesos λ_i se seleccionan de tal forma que el estimado $\bar{Z}(\mathbf{x}_0)$ sea no sesgado (“ unbiased”) y que la varianza de la estimación $\bar{\sigma}_e^2$ sea menor que cualquier combinación lineal de los valores observados. La mínima varianza de $\bar{Z}(\mathbf{x}_0)$, esta dada por:

$$\bar{\sigma}_e^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0) + \phi \quad \text{Ecuación 4.1.D}$$

y se obtiene cuando :

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \phi = \gamma(\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_0) \quad \forall j \quad \text{Ecuación 4.1.E}$$

La cantidad $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ es la semi-varianza de z entre los puntos de datos \mathbf{x}_i y \mathbf{x}_j ; $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_0)$ es la semi-varianza entre el punto de datos \mathbf{x}_i y el punto no visitado \mathbf{x}_0 . Ambas cantidades se obtienen del

variograma ajustado. La cantidad ϕ es un multiplicador de Lagrange requerido para la minimización. Este método es conocido como **Kriging Ordinario**. Es un interpolador exacto en el sentido que los valores interpolados coinciden con los valores en los puntos de datos.

La estimación del error σ_e^{-2} conocido como varianza de Kriging, también se puede mapear y proporcionar información acerca de la confiabilidad de los valores interpolados en el área de interés. A menudo la varianza de Kriging se mapea como desviación estándar Kriging (o error Kriging) debido a que tiene las mismas unidades que las predicciones.

Ejemplo de interpolación de Kriging.

Procedimiento de Kriging en términos matriciales.

La ecuación 4.1.E pueden escribirse en términos matriciales como sigue:

$$\Gamma * \lambda = g$$

$$\begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \dots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{pmatrix}$$

La matriz gamma Γ contiene los valores del semivariograma modelado entre todos los pares de localizaciones con valores conocidos. Los γ_{ij} denotan los valores del semivariograma modelado calculados en base a la distancia entre las localizaciones i y j. El vector g contiene los valores del semivariograma modelado entre cada localización conocida la localización a predecir (N indica el número de localizaciones con valores conocidos y 0 es la localización a estimar su valor). Durante los cálculos matriciales se estima el valor de ϕ que surge como resultado de la restricción de que los pesos son no

sesgados ($\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$). El objetivo de la interpolación de Kriging es resolver la ecuación $\lambda = \Gamma^{-1} * g$ para luego estimar el valor en la localización a predecir, usando la ecuación 4.1.C.

Ejemplo numérico.

En la tabla 4-1 aparecen las estaciones con valores conocidos (radiación promedio anual del mes de enero) y su ubicación geográfica en el país. Se desea estimar el valor en el punto descrito en la tabla 4-2.

Tabla 4-1 Cuadro de Coordenadas y Valores conocidos.

Estación	Coordenada X	Coordenada Y	Valor de Radiación de Enero
m18	568868.255	288152.772	4.6
m23	583095.785	293725.708	4.6
m6	594472.182	257998.802	4.5
u6	557209.568	262868.473	5.0
z2	596640.804	286393.651	4.5

Tabla 4-2 Coordenada del punto de Interés a estimar por el método de Kriging

Punto de Interés	X	Y
A	585548	280009

Paso 1. El primer paso para crear el semivariograma empírico es calcular la distancia y la diferencia al cuadrado entre cada par de localizaciones conocidas. La distancia entre dos localizaciones se calcula por la fórmula $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$. La semivarianza empírica se calcula por la ecuación 4.1.A, es decir, $0.5 * promedio(valor_en_i - valor_en_j)^2$. Los resultados se presentan en la tabla 4-3.

Tabla 4-3 Cuadro de distancias y cálculos del paso 1.

Est1	Est2	Distancia (m)	Diferencias al cuadrado	Semi-varianza
m18	m23	15280.06	0	0
m18	m6	39557.84	0.01	0.005
m18	u6	27842.79	0.16	0.08
m18	z2	27828.20	0.01	0.005
m23	m6	37494.46	0.01	0.005
m23	u6	40277.35	0.16	0.08
m23	z2	15402.16	0.01	0.005
m6	u6	37579.46	0.25	0.125
m6	z2	28477.54	0	0
u6	z2	45915.75	0.25	0.125

Paso 2. Usando un tamaño de lag de 9000 metros se ubican las distancias y los pares de puntos conocidos dentro de cada lag. Se estima el promedio de las distancias entre pares y el promedio de las semivarianzas de la tabla 4-3. Los resultados se presentan en la tabla 4-4.

Tabla 4-4 Cuadro de Lags y cálculo se semivariograma empírico (técnica de Binning).

# Lags	Distancia (m)		Vectores en el rango de distancia	Distancia promedio de los pares	Semi-varianza promedio
	Desde	Hasta			
1	9000	18000	(m18,m23),(m23,z2)	15341.11	0.0025
2	18000	27000			
3	27000	36000	(m18,u6),(m18,z2),(m6,z2)	28049.51	0.02833
4	36000	45000	(m18,m6),(m23,m6),(m23,u6),(m6,u6)	38727.28	0.05375
5	45000	54000	(u6,z2)	45915.75	0.125

Paso 3. Se grafica los pares (distancia promedio de pares, semivarianza promedio) y se ajusta un modelo lineal de semivariograma (ver ecuación 4.1.B). **El modelo a utilizar es $0.000002 * h$** , en donde h es la distancia entre pares de puntos.

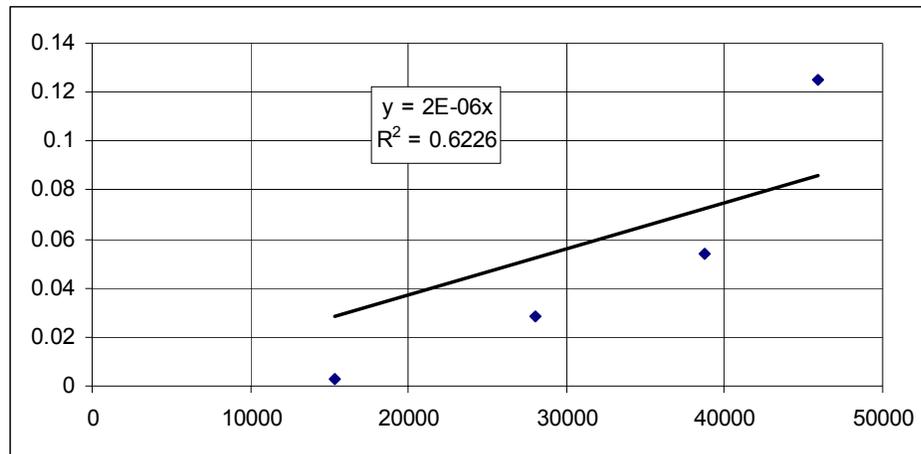


Figura 4-3-a Gráfico de Semivariograma empírico y modelo ajustado.

Paso 4. Cálculo de la matriz gamma. Para ello primero se calcula la matriz de distancias y se evalúa cada elemento de la matriz con el modelo de semivariograma ajustado, en nuestro caso $0.000002 * h$.

Tabla 4-5 Matriz de Distancias.

	m18	m23	m6	u6	z2
m18	0.0	15280.1	39557.8	27842.8	27828.2
m23	15280.1	0.0	37494.5	40277.4	15402.2
m6	39557.8	37494.5	0.0	37579.5	28477.5
u6	27842.8	40277.4	37579.5	0.0	45915.8
z2	27828.2	15402.2	28477.5	45915.8	0.0

Tabla 4-6 Construcción de Matriz Gamma.

	m18	m23	m6	u6	z2	Lagrange
m18	0.0000	0.0306	0.0791	0.0557	0.0557	1
m23	0.0306	0.0000	0.0750	0.0806	0.0308	1
m6	0.0791	0.0750	0.0000	0.0752	0.0570	1
u6	0.0557	0.0806	0.0752	0.0000	0.0918	1
z2	0.0557	0.0308	0.0570	0.0918	0.0000	1
Lagrange	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0

Paso 5. Se encuentran los pesos λ usando la ecuación $\lambda = \Gamma^{-1} * g$.

Tabla 4-7 Matriz Inversa de Gamma.

	m18	m23	m6	u6	z2	Lagrange
m18	-23.7931	15.9513	-0.1574	8.3011	-0.3019	0.0795316
m23	15.9513	-30.0111	-0.8328	-0.7631	15.6556	0.1541849
m6	-0.1574	-0.8328	-11.8958	5.0383	7.8476	0.2492623
u6	8.3011	-0.7631	5.0383	-11.4389	-1.1374	0.3249942
z2	-0.3019	15.6556	7.8476	-1.1374	-22.0640	0.1920267
Lagrange	0.0795	0.1542	0.2493	0.3250	0.1920	-0.0532174

Tabla 4-8 Cálculo del vector g.

Punto	Distancia con el punto de interés	gVector
m18	18561.65	0.0371233
m23	13934.18	0.02786836
m6	23750.58	0.04750115
u6	33118.94	0.06623789
z2	12798.99	0.02559797
		1

Tabla 4-9 Vector de pesos λ : Inversa de Gamma * Vector g.

Estación	Pesos (λ)
m18	0.1754
m23	0.2206
m6	0.1898
u6	0.0644
z2	0.3498
ϕ	-0.008

Paso 6. Se calcula el valor a estimar usando la ecuación 4.1.C y el error estándar de Kriging (tablas 4-10 y 4-11).

Tabla 4-10 Predicción de Kriging para el punto A.

Estacion	Radiación del mes de Enero	Aporte de cada estación
m18	4.6	0.807
m23	4.6	1.015
m6	4.5	0.854
u6	5.0	0.322
z2	4.5	1.574
Valor estimado		4.572

Tabla 4-11 Varianza y error estándar de Kriging.

Pesos (λ)	Vector g	$g * \lambda$
0.17543	0.03712	0.00651
0.22064	0.02787	0.00615
0.18976	0.04750	0.00901
0.06441	0.06624	0.00427
0.34976	0.02560	0.00895
-0.00769	1.00000	-0.00769
Varianza de Kriging		0.02721
Error estándar de Kriging		0.16495

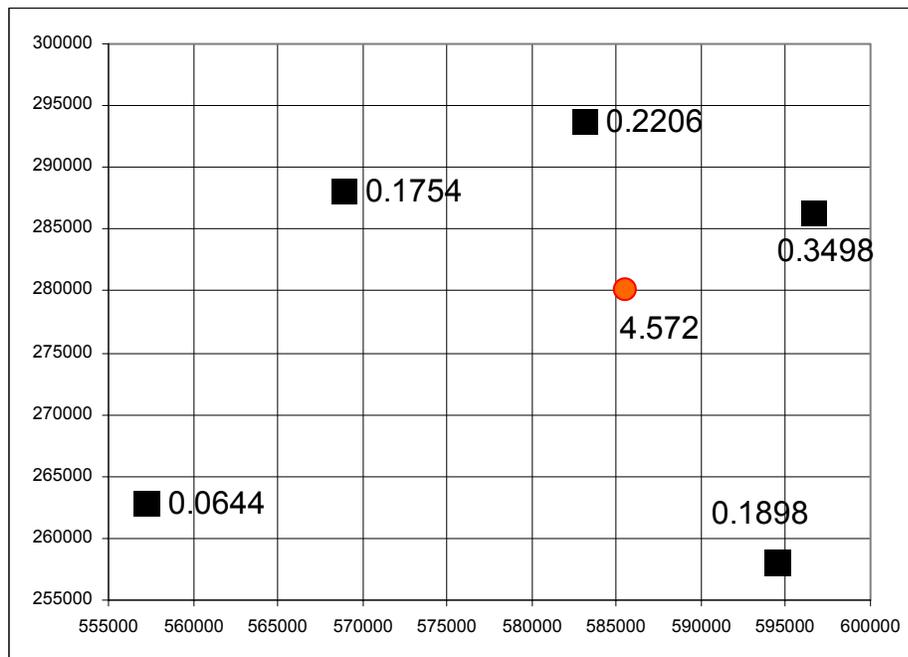


Figura 4-3-b Resultados de la estimación de Kriging.

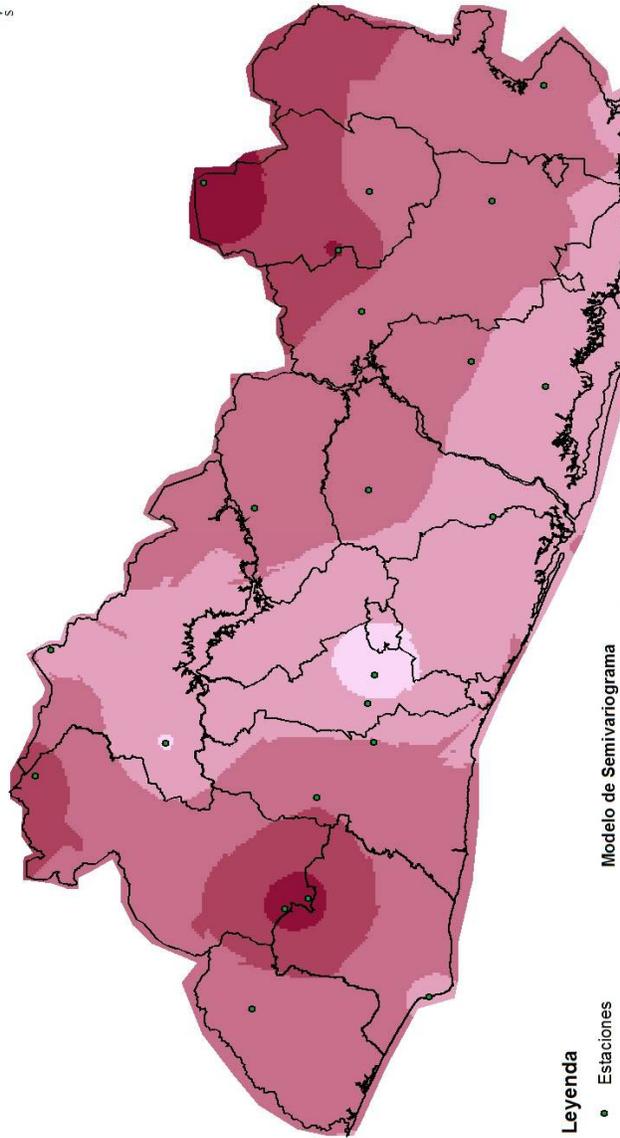
El punto en anaranjado con valor 4.572 es el valor estimado en esa localización. En cada uno de los puntos conocidos se indican los pesos con los que contribuyen a la estimación: m18 (0.1754), m23 (0.2206), m6 (0.1898), u6 (0.0644) y z2 (0.3498). De la figura 4-3-b es claro que el punto que más contribuye a la estimación es z2 con un valor de 4.5 y el punto que menos contribuye es u6 con un valor de 5.0.

4.2 Cálculo de los promedio anuales de radiación solar y brillo solar usando Kriging ordinario.

Para el cálculo de los mapas de promedios anuales de radiación y brillo solar y sus respectivos mapas mensuales se utilizaron los siguientes parámetros en el módulo de análisis geostatístico de ArcGis:

- Tamaño del lag igual a 9000 metros. Para ello se utilizó la regla empírica de que el lag size * # de lags $\approx 0.5 * \text{distancia máxima entre las estaciones a interpolar}$, es decir lag size $\approx 0.5 * 225 \text{ Km} / 12 \approx 9.375 \text{ Km}$. Se seleccionó como número de lags el valor de 12, el cual sugiere ArcGis por defecto.
- Como modelo de semivariograma se utilizó el tipo exponencial ya que experimentalmente arrojó los valores más bajos del promedio de error estándar.
- Para el caso del promedio anual de radiación solar el promedio del error estándar está en el rango de 0.07 a 0.36. El valor promedio del valor del error fue de 0.3005. Si se asume que los errores están normalmente distribuidos, los intervalos de predicción del 95% se calculan por la fórmula *valor estimado por Kriging* $\pm 1.96 * \text{error estándar de Kriging}$. Por ejemplo, si el valor y error estándar estimado por Kriging en un punto de interés son 4.45 y 0.21 respectivamente, entonces con un 95% de probabilidad el valor de radiación en ese punto se encuentra en el rango [4.04, 4.86].
- Para el caso del promedio anual de brillo solar el promedio del error estándar está en el rango de 0.68 a 0.86.

Mapa de Radiación Solar Promedio Anual - El Salvador



Leyenda

● Estaciones

● anua_rad

KWh/m²/día

4.20 - 4.44

4.45 - 4.68

4.69 - 4.92

4.93 - 5.16

5.17 - 5.40

Modelo de Semivariograma

$$0.10394 * \text{Exponential}(53772) + 0 * \text{Nugget}$$

Average Standard Error: 0.3005

Samples: 22 of 22

0 10 20 40 60 80 Kilometers

Sistema de Proyección Cónico Conformal
de Lambert, Datum NAD27, Elipsoide
de Clarke de 1866.

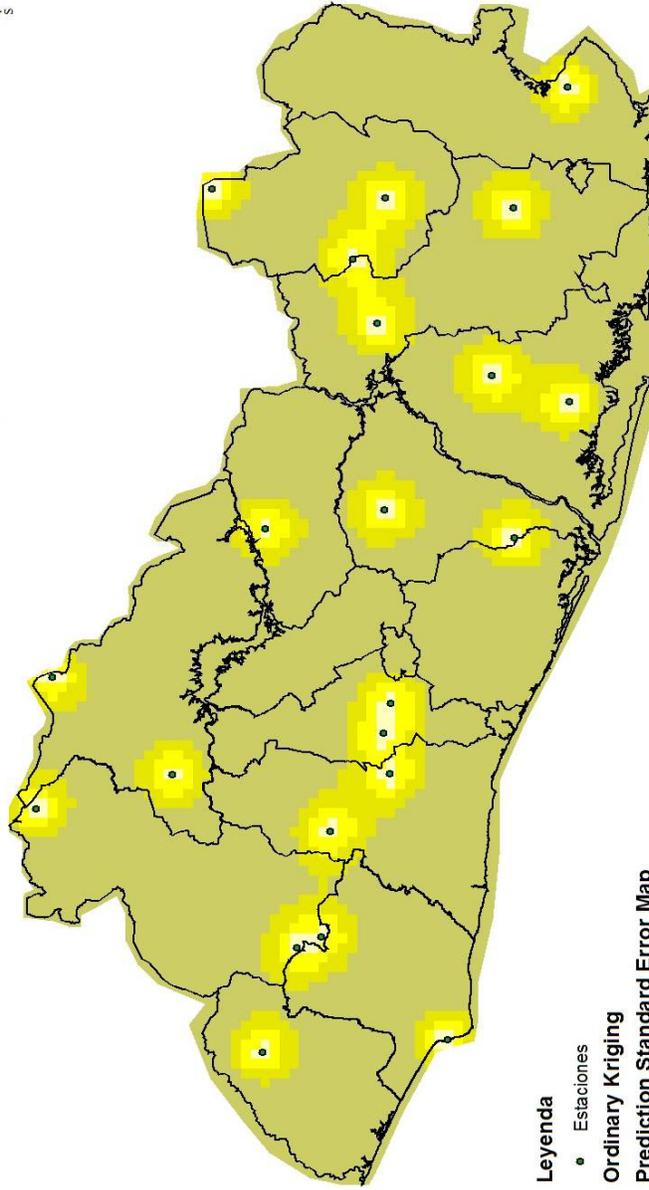
Tamaño del grid 250 m



Figura 4-5 (a) Mapa de radiación (promedio anual) en KWh/m²/día para El Salvador. Interpolación de Kriging.



Mapa de Radiación Solar
 Promedio Anual - El Salvador
 Prediction Standard Error



Leyenda
 • Estaciones
 Ordinary Kriging
 Prediction Standard Error Map

[radiacion_lam_v2].[Promedio]

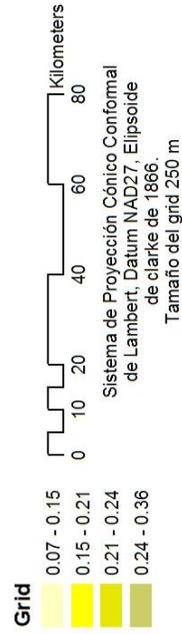


Figura 4-5 (b) Mapa del error promedio estándar en radiación (promedio anual) en KWh/m²/día para El Salvador. Interpolación de Kriging.

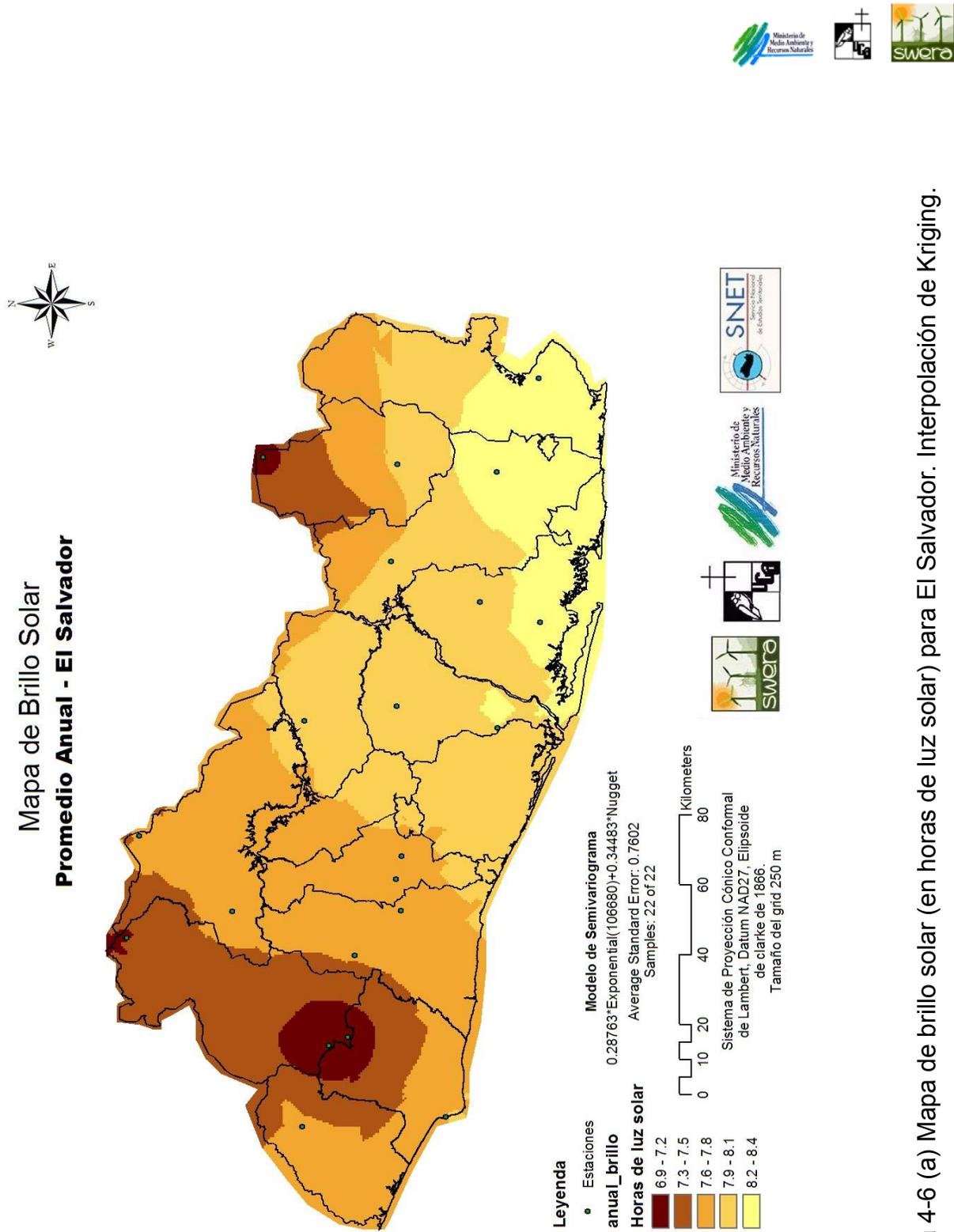
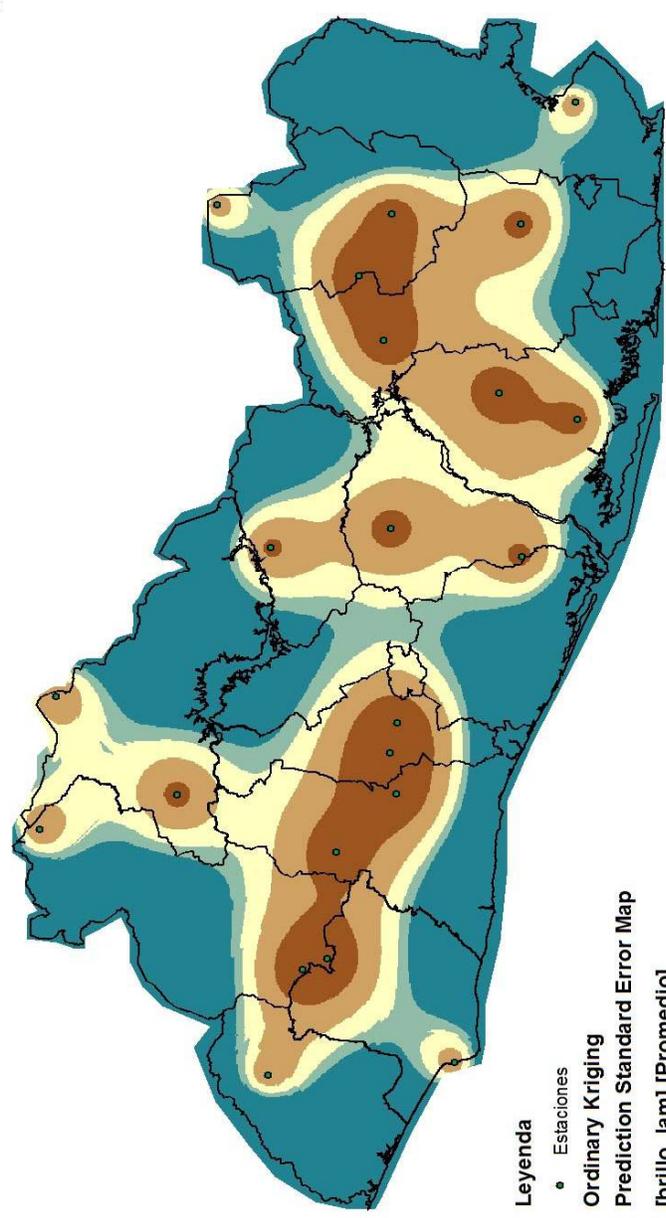


Figura 4-6 (a) Mapa de brillo solar (en horas de luz solar) para El Salvador. Interpolación de Kriging.



Mapa de Brillo Solar
 Promedio Anual - El Salvador
 Prediction Standard Error



Leyenda
 • Estaciones
Ordinary Kriging
Prediction Standard Error Map
[brillo_lam].[Promedio]

Grid

0.68 - 0.71
0.71 - 0.73
0.73 - 0.74
0.74 - 0.74
0.74 - 0.86

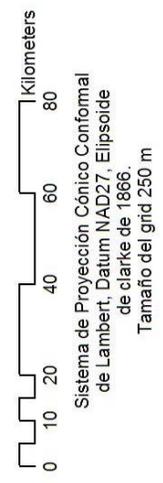


Figura 4-6 (b) Mapa del error promedio estándar en brillo solar (en horas de luz solar) para El Salvador. Interpolación de Kriging.

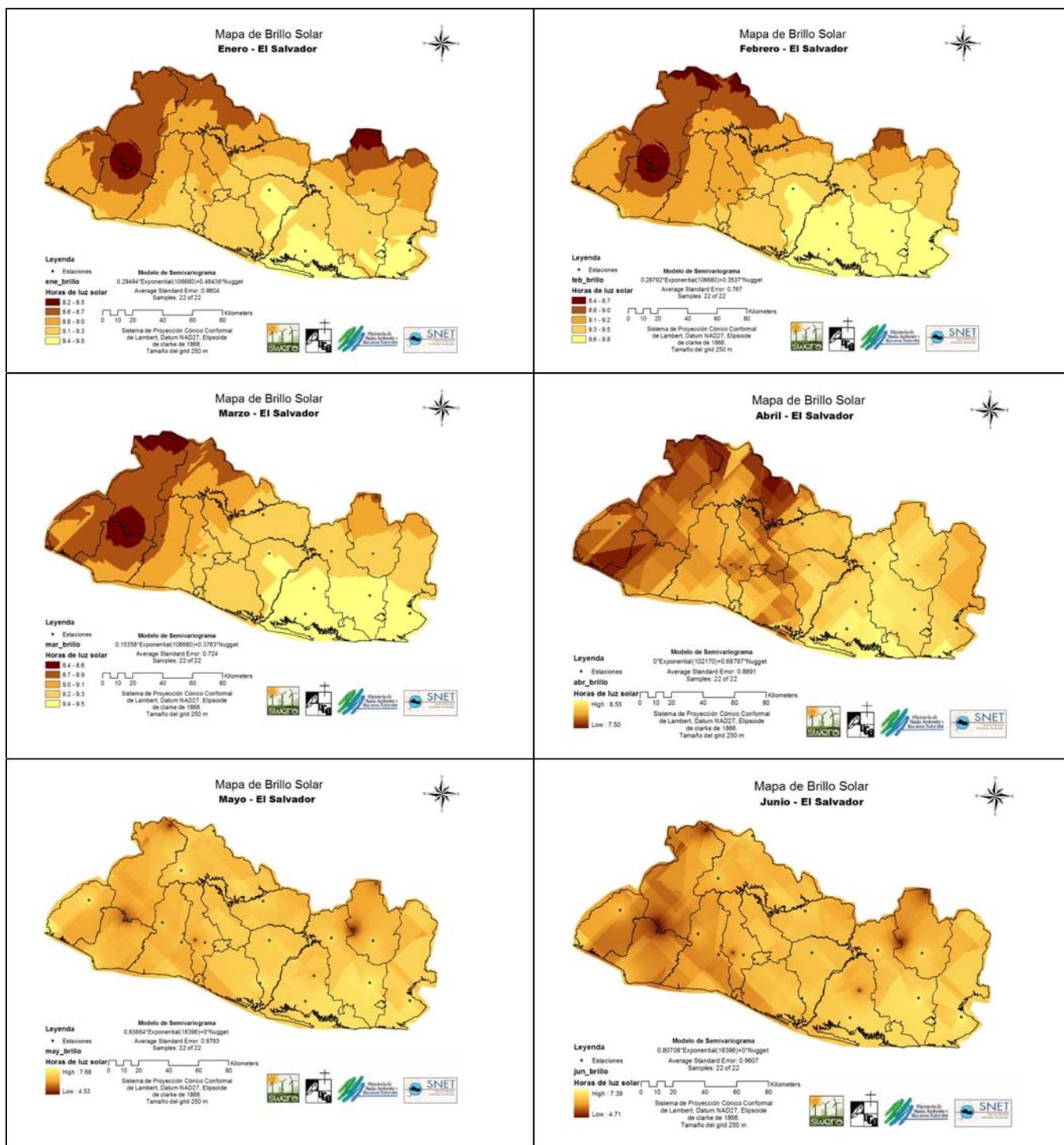


Figura 4-7 (a) Horas de luz solar mensuales (enero a junio).

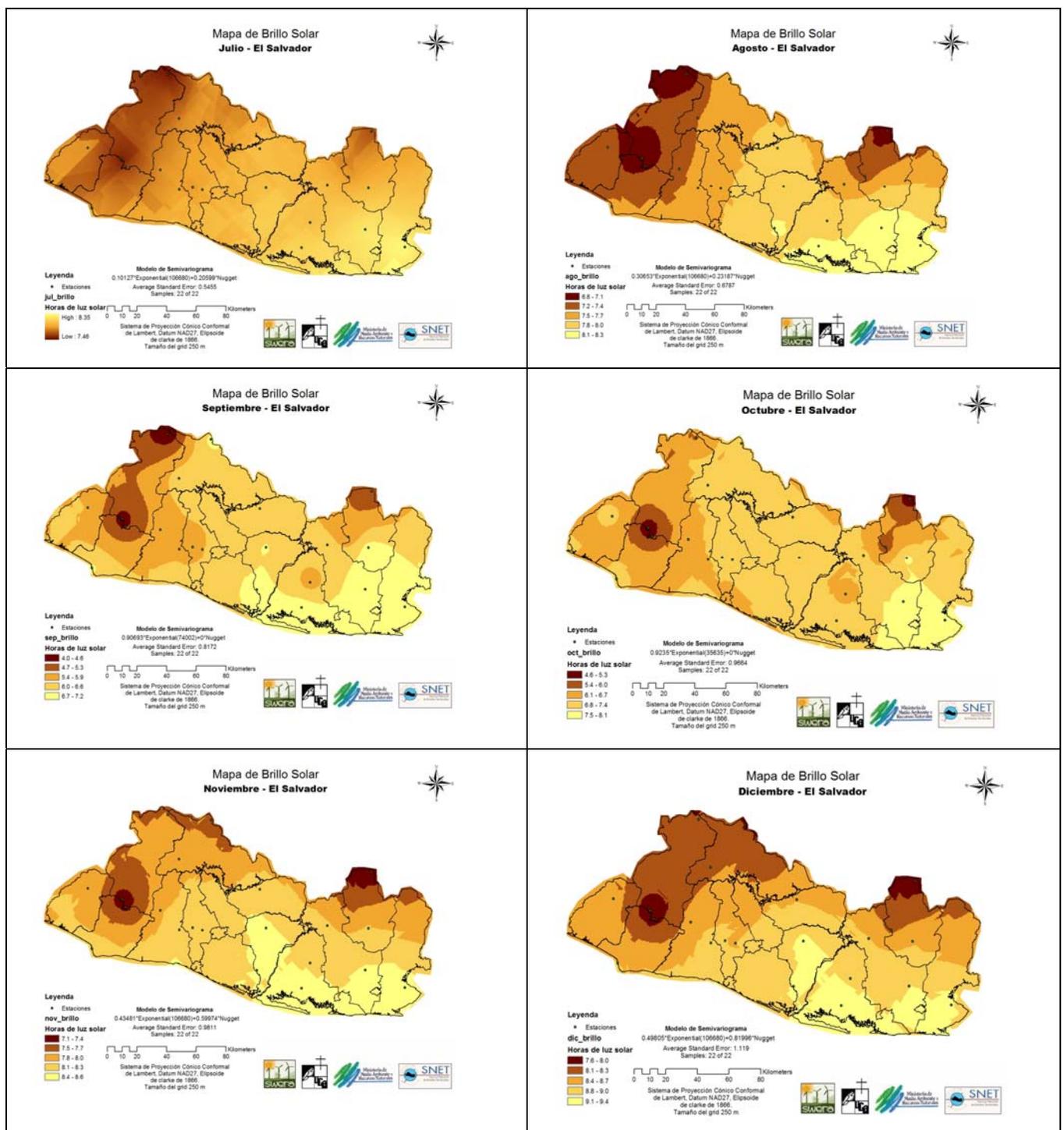


Figura 4-7 (b) Horas de luz solar mensuales (julio a diciembre).

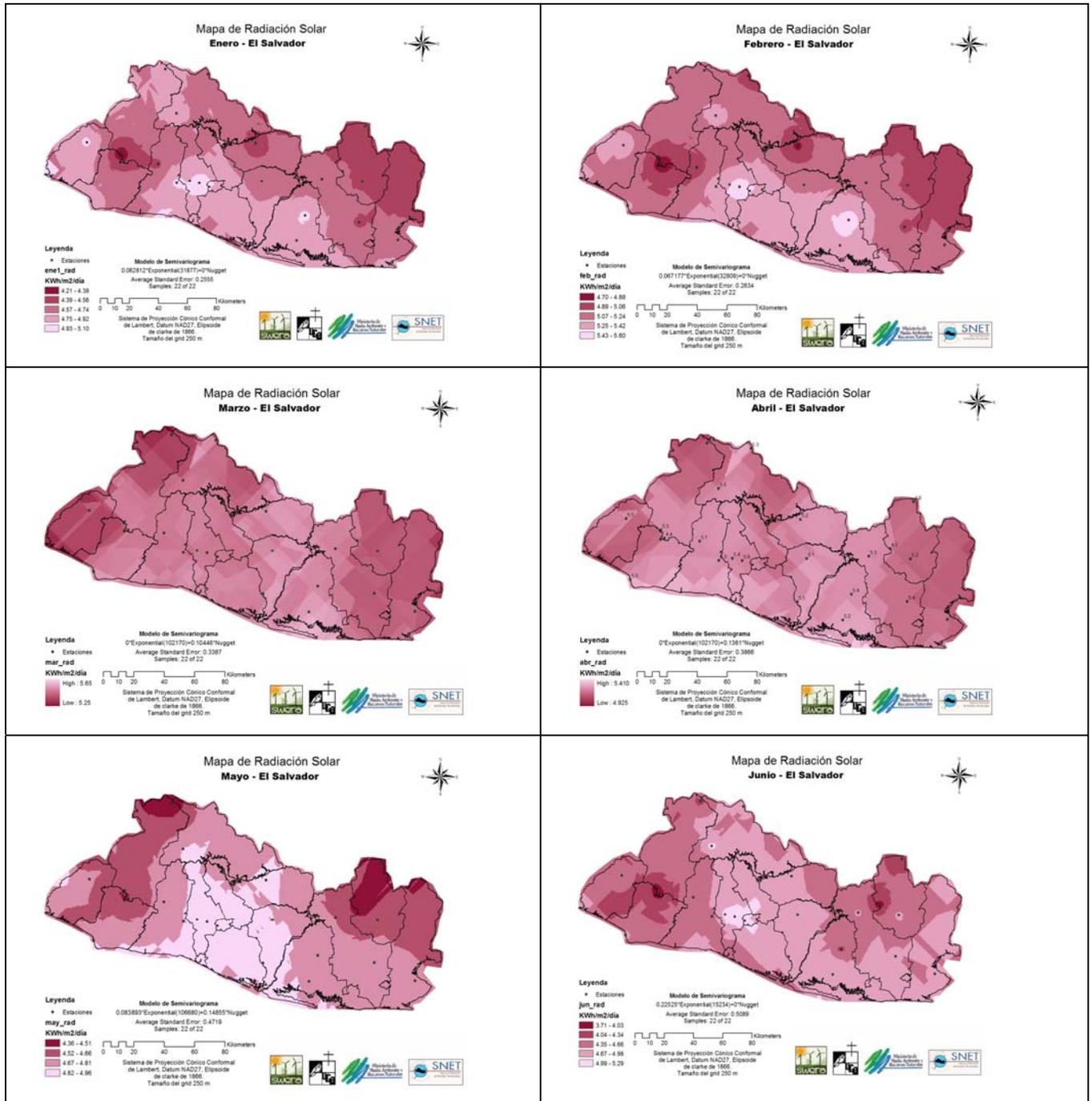


Figura 4-8 (a) Radiación solar mensual (enero a junio).

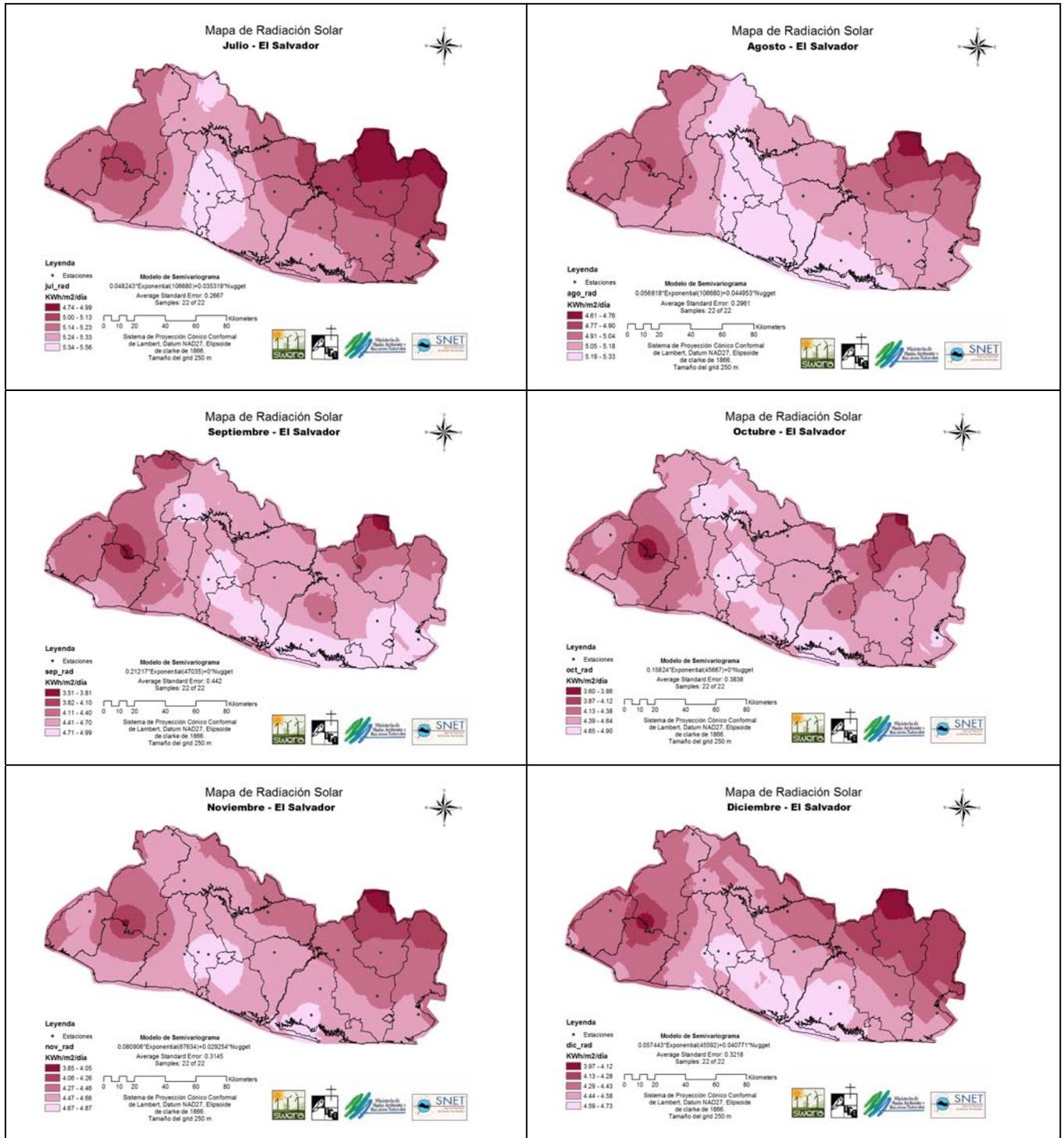


Figura 4-8 (b) Radiación solar mensual (julio a diciembre).

Tabla 4-1 Tabla de interpolación de kriging para la radiación solar en El Salvador.

Period	Sill	Nugget	Range	Lag Size	Equation	Average Standard Error
Anual	0.10394	0	53772	9000	0.10394*Exponential(53772)+0*Nugget	0.3005
Enero	0.062812	0	31877	9000	0.062812*Exponential(31877)+0*Nugget	0.2555
Febrero	0.067177	0	32809	9000	0.067177*Exponential(32809)+0*Nugget	0.2634
Marzo	0	0.10446	102170	9000	0*Exponential(102170)+0.10446*Nugget	0.3387
Abril	0	0.1361	102170	9000	0*Exponential(102170)+0.1361*Nugget	0.3866
Mayo	0.083893	0.14855	106680	9000	0.083893*Exponential(106680)+0.14855*Nugget	0.4719
Junio	0.22525	0	15234	8000	0.22525*Exponential(15234)+0*Nugget	0.5089
Julio	0.048243	0	106680	9000	0.048243*Exponential(106680)+0.035319*Nugget	0.2667
Agosto	0.056818	0.044953	106680	9000	0.056818*Exponential(106680)+0.044953*Nugget	0.2961
Septiembre	0.21217	0	47035	9000	0.21217*Exponential(47035)+0*Nugget	0.442
Octubre	0.15824	0	45667	9000	0.15824*Exponential(45667)+0*Nugget	0.3838
Noviembre	0.080906	0.029254	67634	9000	0.080906*Exponential(67634)+0.029254*Nugget	0.3145
Diciembre	0.057443	0.040771	45592	9000	0.057443*Exponential(45592)+0.040771*Nugget	0.3218

Tabla 4-2 Tabla de interpolación de kriging para el brillo solar en El Salvador.

Period	Sill	Nugget	Range	Lag Size	Equation	Average Standard Error
Anual	0.28763	106680	0.34483	9000	0.28763*Exponential(106680)+0.34483*Nugget	0.7602
Enero	0.29494	106680	0.48436	9000	0.29494*Exponential(106680)+0.48436*Nugget	0.8604
Febrero	0.28792	106680	0.3537	9000	0.28792*Exponential(106680)+0.3537*Nugget	0.767
Marzo	0.15358	106680	0.3763	9000	0.15358*Exponential(106680)+0.3763*Nugget	0.724
Abril	0	102170	0.68797	9000	0*Exponential(102170)+0.68797*Nugget	0.8691
Mayo	0.83864	16396	0	9000	0.83864*Exponential(16396)+0*Nugget	0.9793
Junio	0.80708	16396	0	9000	0.80708*Exponential(16396)+0*Nugget	0.9607
Julio	0.10127	106680	0.20599	9000	0.10127*Exponential(106680)+0.20599*Nugget	0.5455
Agosto	0.30653	106680	0.23187	9000	0.30653*Exponential(106680)+0.23187*Nugget	0.6787
Septiembre	0.90693	74002	0	9000	0.90693*Exponential(74002)+0*Nugget	0.8172
Octubre	0.9235	35635	0	9000	0.9235*Exponential(35635)+0*Nugget	0.9664
Noviembre	0.43481	106680	0.59974	9000	0.43481*Exponential(106680)+0.59974*Nugget	0.9811
Diciembre	0.49805	106680	0.81996	9000	0.49805*Exponential(106680)+0.81996*Nugget	1.119

5. Determinación del potencial eólico en El Salvador.

El viento se genera por el calentamiento desigual de la superficie de la tierra realizado por el Sol. En el caso de El Salvador predominan tres sistemas de vientos: vientos alisios de carácter regional, vientos de carácter local brisas mar-tierra y vientos de carácter local brisas montaña-valles. Estos sistemas de viento fueron explicados en detalle en el capítulo 1 de este documento. Según los resultados de este estudio las velocidades instantáneas máximas (ráfagas) registradas en las estaciones meteorológicas del país están en el rango de 4.5 a 7.8 m/s. Según la escala de velocidades de la tabla 5-1 estas velocidades máximas corresponden a vientos de tipo 3 y 4, es decir, moderados. En general las velocidades de vientos promedios anuales registrados por el proyecto SWERA-UCA oscilan entre 1.12 a 3.91 m/s¹, lo que equivale a vientos de tipo 1 a 3 entre ligeros y moderados.

Tabla 5-1 Escala de velocidades de viento.

Velocidades del viento en m/s	Tipo	Descripción
0.0 - 0.4	0	Calma
0.4 - 1.8	1	Ligero
1.8 - 3.6	2	
3.6 - 5.8	3	
5.8 - 8.5	4	Moderado
8.5 - 11.0	5	Fresco
11.0 - 14.0	6	
14.0 - 17.0	7	
17.0 - 21.0	8	Temporal
21.0 - 25.0	9	
25.0 - 29.0	10	Fuerte temporal
29.0 - 34.0	11	
> 34.0	12	Huracán

Nota: Velocidades de viento a 10 m de altura Escala Beaufort (anticuada) Viento.

5.1 Conceptos básicos de viento.

De los estudios de potencial eólico realizados en el país se concluye que existe gran potencial para el desarrollo de sistemas pequeños de energía. La implementación de granjas y/o parques eólicos requiere de mediciones más precisas. Las instalaciones eólicas pequeñas evitan los altos costos de extender la red eléctrica a localidades remotas, evitan cortes de energía y son no contaminantes. De hecho el nivel del ruido en el ambiente de la mayoría de turbinas de viento residenciales es de alrededor de 52 a 55 decibelios. En otras palabras no son tan ruidosas como un refrigerador promedio.

¹ Datos registrados en estaciones meteorológicas a 10 magl (meters above ground level). Es decir, metros sobre el nivel del suelo.

Las turbinas de viento convierten la energía cinética del viento en potencia mecánica que mueve a un generador para que produzca electricidad limpia. Un sistema básico de turbina aparece en la figura 5-1 (a) y un sistema eólico aparece en la figura 5-1 (b).

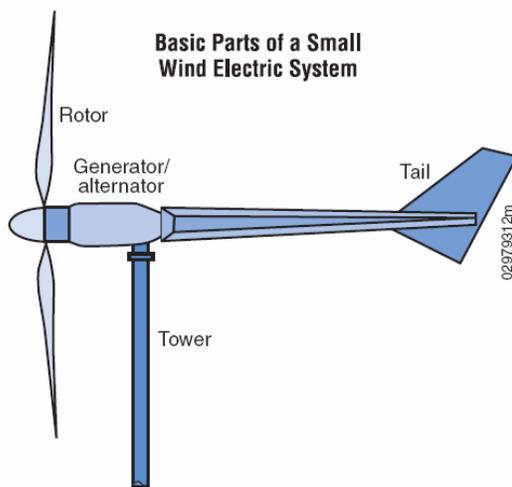


Figura 5-1 (a) Sistema básico de una turbina eólica y (B) Ejemplo de sistema eólico.

La mayoría de turbinas fabricadas son máquinas de eje horizontal con dos o tres aspas de fibra de vidrio. La cantidad de potencia que una turbina produce depende principalmente del diámetro de su rotor. El diámetro del rotor define el “área de barrido” o la cantidad de viento interceptada por la turbina. En la estructura de la turbina se instala el rotor, generador y la cola. La cola mantiene a la turbina frente al viento. **Debido a que la velocidad se incrementa con la altura, la turbina se monta en una torre. En general, entre más alta sea la torre más potencia produce el sistema de viento.** La fórmula para calcular la potencia de una turbina de viento es :

$$P = \frac{1}{2} k C A \rho V^3$$

P = potencia de salida en Kilowatts

C = Máximo coeficiente de potencia, es un valor adimensional que varía de 0.25 a 0.45 (Su máximo valor teórico es de 0.59 de acuerdo a la Ley de Betz).

ρ = densidad del aire en lb/ft³

A = Area de barrido del rotor en ft². $\pi D^2/4$, en donde D es el diámetro del rotor en ft.

V = velocidad del viento en mph.

K = 0.000133 una constante para que el valor de P sea en kilowatts.

La torre también sube a la turbina sobre la turbulencia del aire que existe cerca de la tierra debido a obstrucciones tales como montañas, edificios y árboles. Una regla empírica consiste en instalar una turbina de viento en una torre con la parte inferior de las aspas del rotor al menos 9 m sobre cualquier obstáculo que esté a 90 m de la torre (Vea figura 5-2). Subir un generador de 10 KW de una torre de 18 m de altura a una torre de 30 m implica un incremento del 10% en el costo del sistema, pero se logra producir 29% de más potencia.

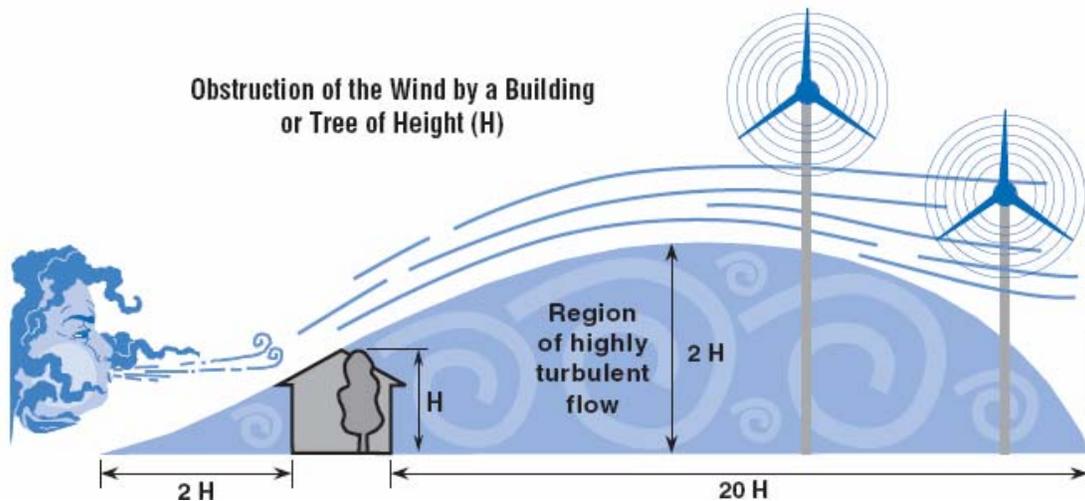


Figura 5-2 Efecto de los obstáculos sobre la velocidad del viento en un sitio. Observe la ubicación de las aspas de las turbinas para no ser afectadas por la turbulencia.

Las velocidades del viento se incrementan al subir las alturas de las torres sobre el nivel de la tierra en los sitios de viento. Este fenómeno, conocido en la industria del viento como “wind shear”, presenta una oportunidad para mejorar la parte económica de una inversión eólica al disponer de turbinas de viento en torres más altas. Por años, los diseñadores de instalaciones de viento han usado la regla empírica de que la velocidad del viento en un sitio se incrementa con la ley de potencia de 1/7. La ecuación matemática para esta regla empírica es $v_1 = v_0 * (z/z_0)^a$, V_0 es la velocidad del viento a la altura del anemómetro, V_1 es la velocidad del viento a la altura de la torre, Z_1 es la altura de la torre, Z_0 es la altura del anemómetro, a es el coeficiente de rugosidad con valores típicos de 1/7, 1/9 y 1/5.

Rangos de turbinas eólicas.

Las pequeñas turbinas están en el rango de 20 W a 100 KW. Las micro turbinas (10 a 500 watts) se usan en una variedad de aplicaciones tales como carga de baterías de vehículos de recreación y lanchas. Las turbinas de 1 a 10 KW se usan en aplicaciones para bombeo de agua. Las turbinas para uso residencial varían en tamaño de 400 W a 100 KW dependiendo de la electricidad que se quiera generar. Una turbina de viento de 1.5 KW llenaría las necesidades de un hogar que requiera de 340 KWh por mes en un lugar como en El Salvador con una velocidad media anual de 6.25 m/s.

El fabricante provee información sobre la máxima velocidad a la que la turbina opera adecuadamente. La mayoría de turbinas tiene sistemas automáticos de control de sobre velocidad que hacen que el rotor no gire fuera de control en situaciones de viento muy altas.

La potencia en el viento en W/m^2 es el parámetro fundamental que determina el éxito en un proyecto de viento. **La producción de energía del viento a partir de una turbina cambia en proporción al cubo de la velocidad del viento.**

¿Cómo determinar si el potencial eólico de un sitio es adecuado?

En este documento se sugiere un procedimiento estándar para determinar la capacidad de un sitio para ser explotado por un proyecto eólico. El procedimiento tiene 5 pasos y se basa en el embudo mostrado en la figura 5-3.

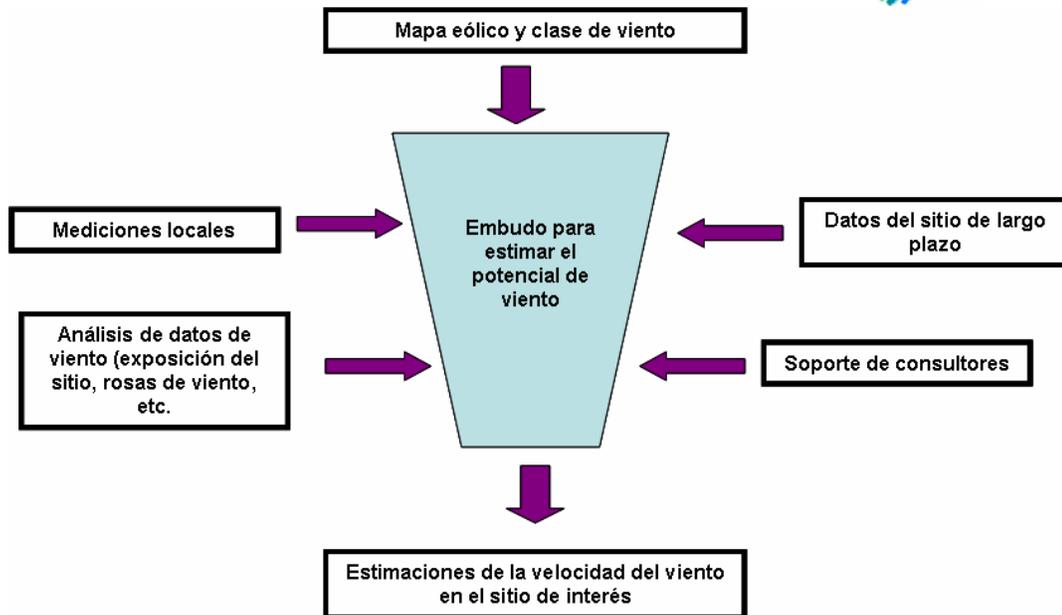


Figura 5-3 Procedimiento para selección de un sitio con potencial eólico.

Los pasos son los siguientes:

Paso 1. Usar mapas de recursos de viento (mapas eólicos) y tablas de clases de viento.

La clase de potencia de viento se define como el rango de densidades de potencia del viento (en watts por metro cuadrado de área barrida por el rotor, es decir, un área perpendicular al flujo de viento) a una altura dado sobre el nivel del suelo. NREL produce estos mapas utilizando un sistema computarizado de mapeo analítico y empírico que combina con modelos matemáticos una variedad de conjuntos de datos de clima. El mapa eólico de El Salvador desarrollado por NREL en el 2004 aparece en la figura 5-4 y en la tabla 5-2 aparecen las clases de viento de NREL

Tabla 5-2 Definiciones estándar de clases de viento (utilizado en EE.UU. por NREL)

Clase	Potencial del Recurso	Velocidad del viento m/s 30 m de altura	Densidad de potencia del viento W/m^2 30 m de altura	Velocidad del viento m/s 50 m de altura	Densidad de potencia del viento W/m^2 50 m de altura
1	Pobre	0.0 - 5.1	0 - 160	0 - 5.6	0 - 200
2	Marginal	5.1 - 5.9	160 - 240	5.6 - 6.4	200 - 300
3	Considerable	5.9 - 6.5	240 - 320	6.4 - 7.0	300 - 400
4	Bueno	6.5 - 7.0	320 - 400	7.0 - 7.5	400 - 500
5	-	7.0 - 7.4	400 - 480	7.5 - 8.0	500 - 600
6	-	7.4 - 8.2	480 - 640	8.0 - 8.8	600 - 800
7	-	8.2 - 11.0	640 - 1600	8.8 - 11.9	800 - 2000

Nota : La densidad de potencia se expresa en watts por metro al cuadrado (W/m^2) de área barrida perpendicular al flujo del viento.

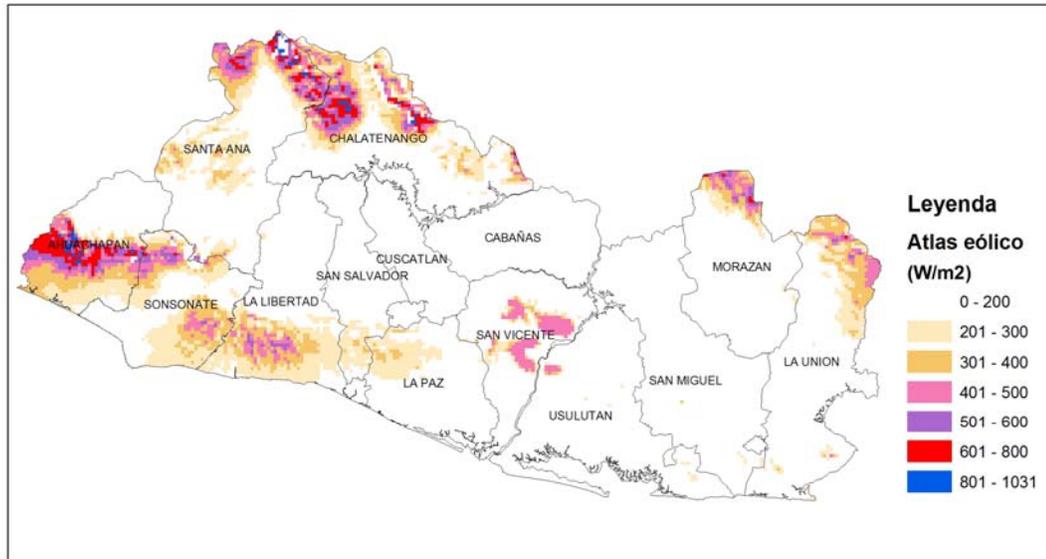


Figura 5-4 Mapa eólico de El Salvador elaborado por NREL.

Paso 2. Indirectamente cuantificar el recurso de viento a partir de información de viento de estaciones meteorológicas cercanas.

Datos deseables de mediciones de viento cercanas al sitio de interés son:

- Elevación del sitio.
- Promedio mensual de la velocidad del viento.
- Rosa de viento (dato de la frecuencia de la velocidad y dirección del viento, que muestran direcciones en las que el viento es más fuerte y más débil). Las rosas de viento son una especie de huella meteorológica. Un vistazo a la rosa de vientos es extremadamente útil para situar aerogeneradores (turbinas eólicas).
- Exposición del sitio (terreno local- montañas, valles, etc.- cobertura vegetativa y estructuras construidas por el hombre). Un sitio bien expuesto es aquel que no tiene influencias de árboles o edificios.
- Rugosidad de la superficie (ver tabla 5-3).
- Alturas sobre el nivel del suelo.
- Recuperación de datos (número de horas de datos válidos versus total de horas posibles).
- Localización del sitio con respecto a su propiedad.

Una vez validados los datos los puede usar para estimar el recurso viento en su propiedad.

Tabla 5-3 Tabla de clases y de longitudes de rugosidad.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad en m	Tipo de paisaje
0	0.0002	Superficie del agua
0.5	0.0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas .
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad en m	Tipo de paisaje
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2.5	0.2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.4	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3.5	0.8	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Nota: Definiciones de acuerdo con el Atlas Eólico Europeo, WAsP.

Paso 3. Otra manera indirecta de cuantificar el recurso es observar la vegetación del área. Los árboles, especialmente, las coníferas pueden deformarse permanentemente por vientos fuertes. Esta deformación se conoce como “flagging” y ha sido utilizada para estimar la velocidad del viento promedio en un área (ver figura 5-5).

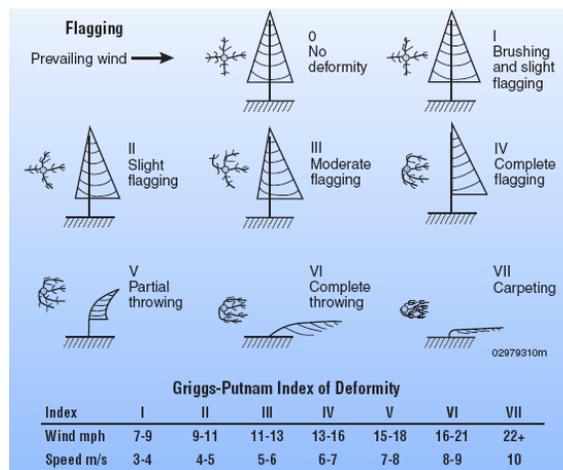


Figura 5-5 Índice de deformidad (“flagging”) de Griggs-Putnam.



Figura 5-6 Ejemplos de “flagging”. (a) Clase II correspondiente a velocidades de 4 a 5 m/s; (b) Clase VI correspondiente a velocidades de 8 a 9 m/s.

Paso 4. Monitoreo directo por un sistema de medición del recurso de viento da una idea clara del recurso disponible.

Las estimaciones más confiables se obtienen a través de mediciones en el sitio específico. Esto puede ser un poco costoso y requiere de 6 meses a varios años para completarse.

Paso 5. Además de medir o estimar la velocidad media anual en el sitio se necesita conocer las direcciones de viento que más prevalecen en su sitio.

El conjunto ideal de datos para un proyecto de viento consistiría de una década de mediciones de velocidad y dirección del viento junto con la temperatura y presión tomada sobre, abajo y a la altura exacta (sobre la superficie de la tierra) de la torre de la turbina de viento seleccionada.

Distribución de Weibull y Rosa de los vientos.

Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento. Los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costos de generación. Los inversores necesitan la información para estimar sus ingresos por producción de electricidad. La variación del viento en un emplazamiento típico (estación meteorológica) suele describirse utilizando la llamada **Distribución de Weibull**, como la mostrada en la figura 5-7 para el caso de la estación A35 del Cerro Verde. Esta estación en particular tiene una velocidad media del viento de 3.91 metros (parámetro U) por segundo, y la forma de la curva está determinada por un parámetro de forma de 1.32 (parámetro k). El gráfico muestra una distribución de probabilidad. El área bajo la curva siempre vale exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquiera de las velocidades, incluyendo el cero, debe ser del 100 %.

Como se podrá observar, la distribución de las velocidades del viento es sesgada, es decir, no es simétrica. A veces tendrá velocidades de viento muy altas, pero son muy raras (en este caso de 6.17 m/s). Por otro lado, las velocidades del viento de 1.5 m/s son las más comunes. Los 1.5 metros por segundo es el llamado valor modal de la distribución. Si multiplicamos cada diminuto intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y los sumamos todos, obtenemos la velocidad del viento media.

La distribución estadística de las velocidades del viento varía de un lugar a otro del globo, dependiendo de las condiciones climáticas locales, del paisaje y de su superficie. Por lo tanto, la Distribución de Weibull puede variar tanto en la forma como en el valor medio. Si el parámetro de forma es exactamente 2 la distribución es conocida como distribución de Rayleigh. En el caso de El Salvador la estación más cercana a una distribución de rayleigh es Z-4 la Galera en Morazán que tiene un factor de forma de 1.73.

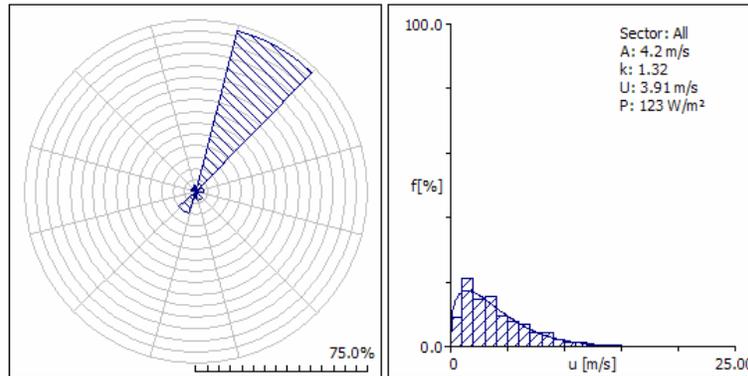
La rosa de los vientos muestra información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento. La rosa se divide en 12 sectores cada uno de 30° del horizonte. Un vistazo a la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar un aerogenerador. Si una gran parte de la energía del viento viene de una dirección en particular la turbina eólica se ubicará en esa dirección, asegurando que en esa dirección exista la menor cantidad de obstáculos y que el terreno sea lo más liso posible.

'A-35' Observed Wind Climate

Produced on 16/06/2005 at 06:54:09 a.m. by licenced user: Unlicenced using WAsP Version: 8.01.0057

Site description: 'Cerro Verde'; position: 13.83°N -89.62°E; anemometer height: 10.00 m a.g.l.

	Unit	Measured	Weibull fit	Discrepancy
Mean wind speed	m/s	unknown	3.91	unknown
Mean power density	W/m ²	unknown	123	unknown



	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
A	6.8	5.2	0.5	2.0	0.5	1.8	1.7	1.8	0.5	1.1	0.5	2.7	4.2
k	1.49	1.63	10.34	2.00	10.34	2.16	2.02	1.42	10.34	1.24	10.34	0.77	1.32
U	6.17	4.62	0.49	1.74	0.49	1.58	1.51	1.67	0.49	1.02	0.49	3.14	3.91
P	397	146	0	6	0	4	4	9	0	2	0	241	123
Freq	2.9	72.4	0.2	3.4	0.2	4.0	2.8	10.1	0.2	1.8	0.2	1.8	100

Figura 5-7 Huella meteorológica de la estación A-35 Cerro Verde, Santa Ana. Muestra la rosa de los vientos a la izquierda y la distribución de Weibull a la derecha.

5.2 Clima eólico de las estaciones meteorológicas del país.

La base de datos del clima eólico del proyecto SWERA-UCA posee un total de 20890 horas de registros de velocidad y dirección del viento en 18 estaciones meteorológicas, ver figura 5-8. Se encuentra compuesta de datos digitalizados a partir de los cuadros mensuales de anemómetros de la división de Meteorología de SNET, y corresponden a los registrados durante los años de 1980-1986. Cada registro corresponde a la medición horaria de la velocidad y dirección del viento durante un día de medición más el valor de dirección y hora en la que ocurrió la máxima velocidad instantánea del día.

Los datos se encuentran almacenados en una base de datos de Microsoft Access y básicamente se pueden describir en dos de sus tablas: medidas y detalles de las medidas, como se muestra en la figura 5-9. La primera tabla registra la fecha de medición y por medio de la llave primaria "banda" se relaciona con la segunda tabla. Por ejemplo el registro de viento de la estación L4 del día 18 de marzo de 1983 le corresponde una llave primaria 17058 y buscando este número en la segunda tabla se encuentran tres registros, el primero de la dirección del viento en decenas de grados, el segundo de velocidad en km/h para cada una de las horas del día y el tercero el valor de la máxima velocidad instantánea del viento (ráfaga) detectada en el día. Para este mismo día (18 de marzo) le corresponde a las 10 de la mañana (columna h10) una dirección de viento predominante de 28 decenas de grado, es decir 280 grados de acimut y una velocidad de 40 km/h. La máxima velocidad instantánea registrada ese día fue de 6.9 m/s a las cuatro de la tarde (columna h16) y corresponde a una dirección de viento predominante de 22 decenas de grados (columna rumbo_r) que equivale a un acimut de 220 grados.

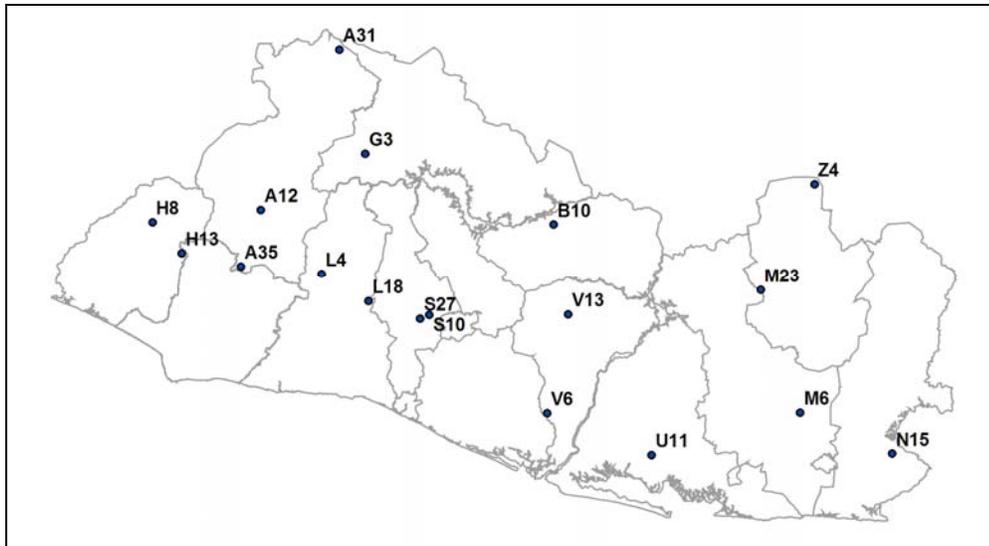


Figura 5-8 Estaciones meteorológicas que poseen registros horarios de viento.

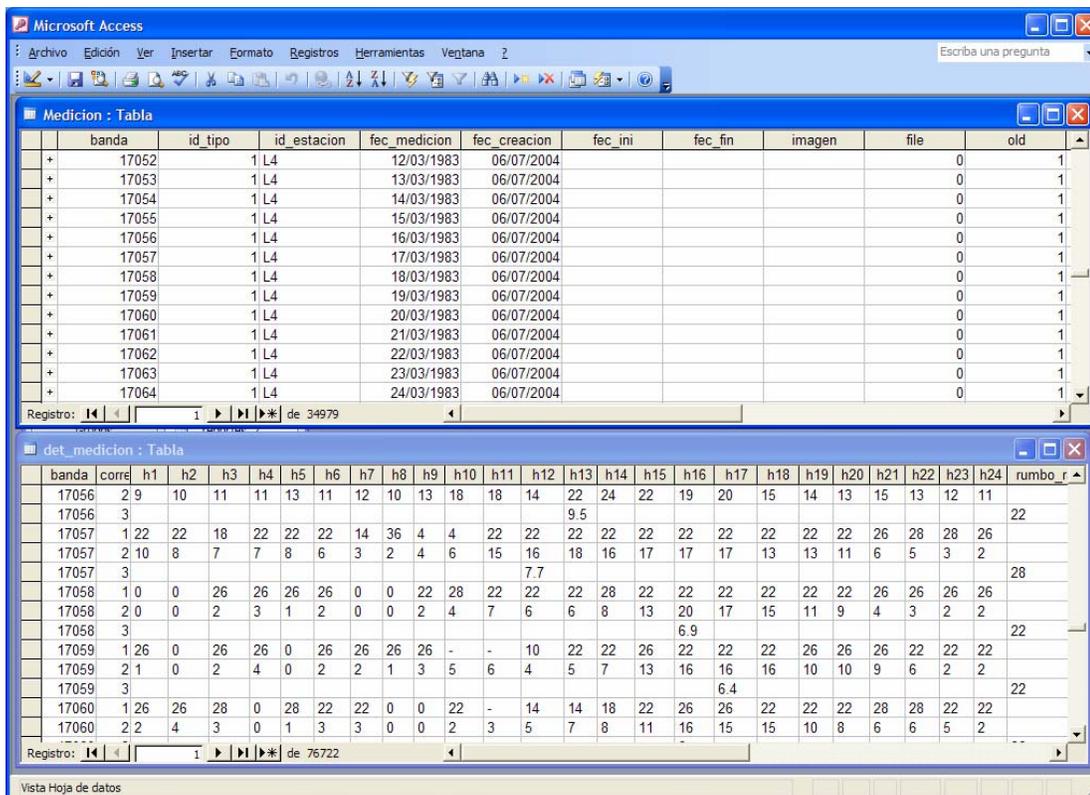


Figura 5-9 Estructura de las tablas principales de la base de datos.

Para la determinación de la velocidad y la potencia media mensual, anual y por temporada (estaciones climáticas: lluviosa, seca y sus transiciones) se utilizó el cálculo de la densidad de probabilidad por medio de la función de Weibull utilizando el programa WAsP. Los datos para el cálculo en WAsP fueron obtenidos por medio de consultas SQL a la base de datos de viento de tal manera que se dispusiera de pares ordenados de velocidades y direcciones para cada hora durante periodos de tiempo determinados.

Llagándose a obtener el clima eólico en cada una de las estaciones meteorológicas para cada mes, año y temporada de cada una de las 18 estaciones meteorológicas. Los valores calculados corresponden a: factores de forma y escala de Weibull, velocidad media y potencia media (utilizando la función) y distribución de velocidades por sector de medición en porcentaje en base al millar. En la figura 5-10 se muestra el clima eólico anual de la estación S-10 en la cuál la velocidad media fue de 2.44 m/s y la potencia 22 W/m², adicionalmente se espera una potencia de 30 W/m² del viento procedente del sector 1 es decir del Norte.

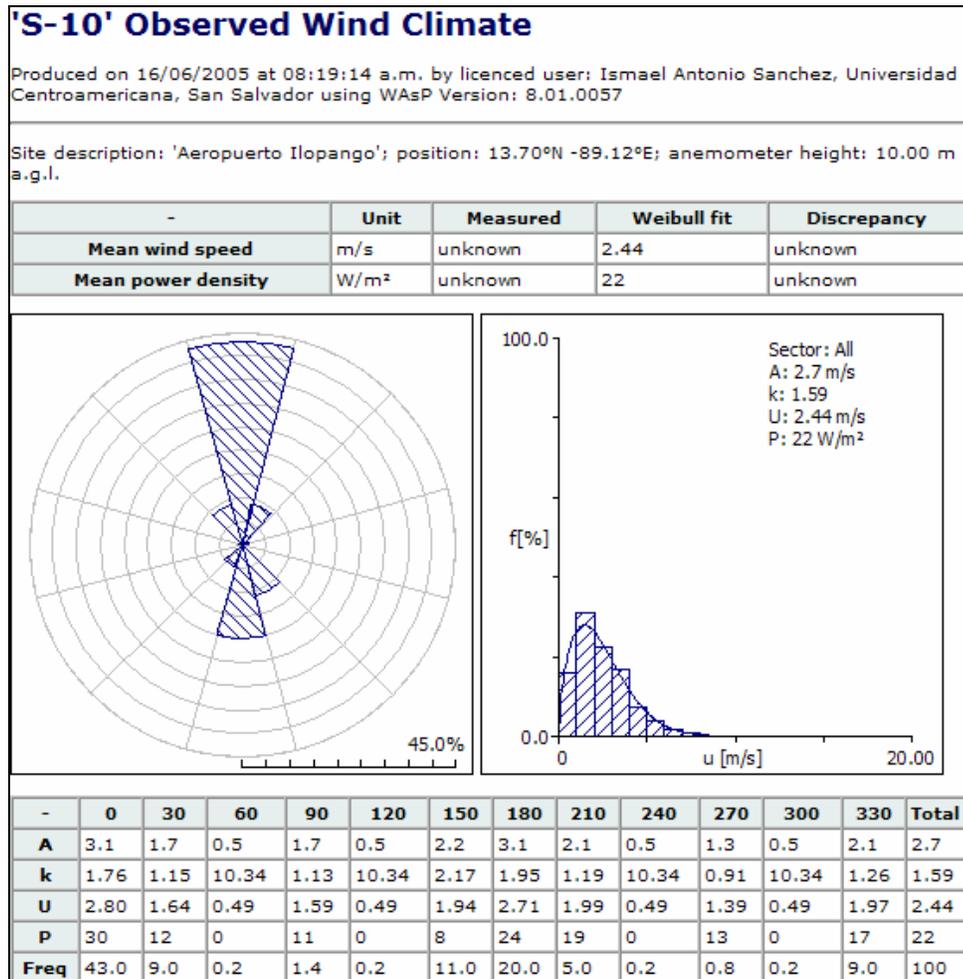


Figura 5-10 Datos principales del clima eólico de la estación meteorológica, calculado en WASP.

5.2.1 Climatología regional

A partir del clima eólico e información de la topografía de aquellos lugares que presentaran los mayores valores de potencias medias se determinó la climatología regional a 50 m.a.g.l. Como se muestra en la figura 5-11 los sitios de mayor potencial eólico fueron: **Cerro Verde, Planes de Montecristo y La Galera.**

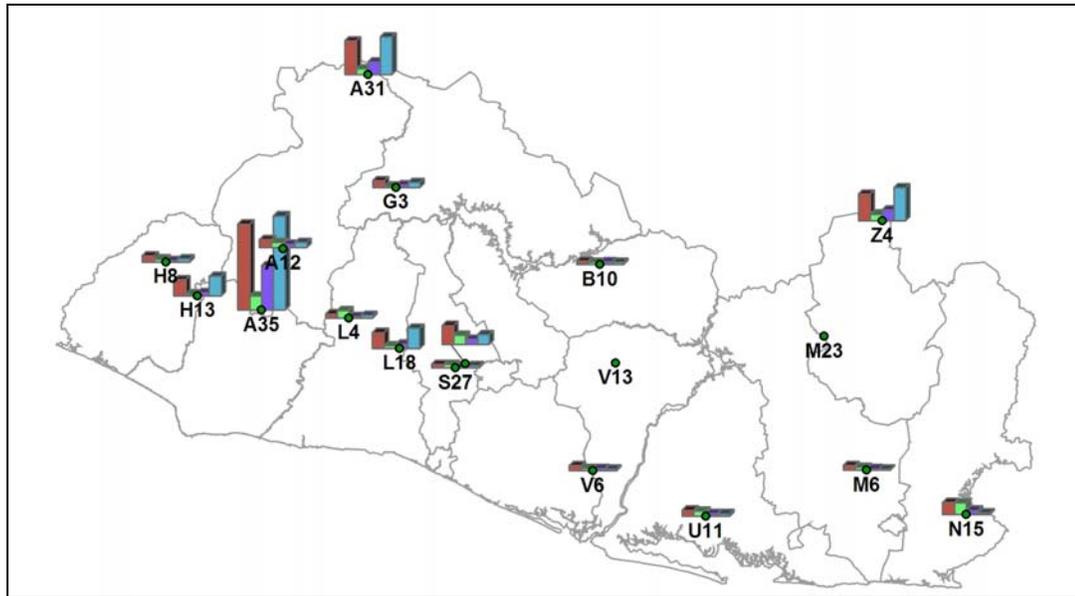


Figura 5-11 Potencia media registrada, la primera columna corresponde a la temporada seca, la segunda a la seca-lluviosa, la tercera a la lluviosa y la cuarta a la lluviosa seca .

La extensión territorial alrededor de cada uno de los lugares evaluados fue aproximadamente de cuadros de 10 km por lado centrados en la ubicación de las estaciones, a excepción de la estación que registro el mayor potencial eólico (Cerro Verde) que se tomo un sector mayor con el objeto de abarcar al lago de Coatepeque.

La rugosidad del lugar fue calculada a partir del mapa de uso de suelo de El Salvador de 1996, publicado en el Sistema de Información Ambiental de El Salvador; al reclasificar los diferentes usos de suelo en la zona. El mapa de uso de suelo fue creado al georeferenciar y clasificar las bandas 3, 4 y 5 de imágenes Landsat – TM tomadas entre 1993 y 1994; trabajo realizado por el Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza CATIE y la dirección de economía agropecuaria DGEA del Ministerio de Agricultura y Ganadería MAG. Los valores utilizados para la rugosidades son presentados en la tabla5-4 y corresponden a valores recomendados por Humberto Rodríguez² en el proyecto de Implementación de medidas para el desarrollo de un mercado nacional sostenible para servicios de energía en el área rural.

Tabla 5-4 Asignación de rugosidades en base a los tipo de uso de suelo usado para el modelaje eólico en WASP.

Uso de suelo	Rugosidad
Areas urbanas	0.32
Bosques naturales	0.24
Café	0.24
Caña de azúcar	0.18
Cuerpo de agua	0.1
Lava	0.14
Pastos y granos básicos	0.1

² Consultor colombiano del MINEC en los temas solar y eólico.

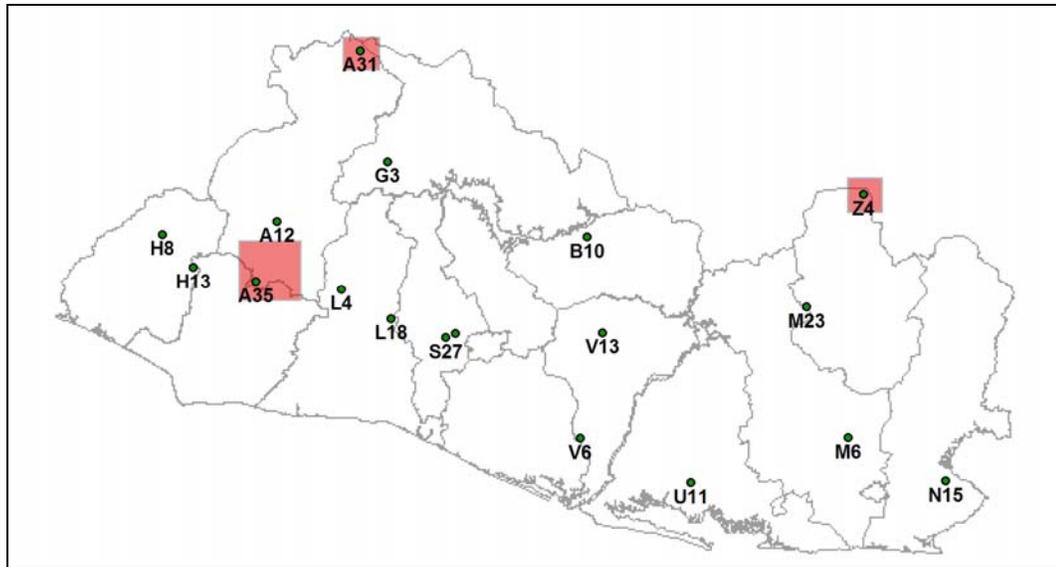


Figura 5-12 Zonas seleccionadas para evaluar la climatología regional

La orografía del lugar fue obtenida por medio de la digitalización de las curvas de nivel a cada 20 m de cartas topográficas a escala 1:50,000. Las cartas fueron escaneadas y georeferenciadas para su posterior digitalización en el laboratorio de sistemas de información geográfica de la UCA. El procedimiento seguido para la creación de las capas temáticas consistió en el escaneo de mapas a escala 1:50,000 publicados por el Centro Nacional de Registros y su posterior georeferenciación. Posteriormente se procedió a realizar una digitalización de las curvas de nivel y de los puntos de elevación conocidos. Este trabajo fue realizado en el sistema de información geográfico ArcGIS de ESRI.

La rugosidad y la orografía obtenida en formatos de sistemas de información geográficas fueron convertidas a archivos MAP de WASP por medio de la modificación de un Script programado en Avenue por Javier González y publicado en la web de los fabricantes del software de sistemas de información geográfica, ArcView.

Los resultados obtenidos del modelaje en WASP consistieron en información de la función de Weibull para cada localidad del área de estudio y para cada sector de dirección de viento. Se exportaron a un archivo ASCII de extensión WRG (ver la tabla 5-5 para el contenido del archivo generado) para su posterior incorporación a los sistemas de información geográfica y comparación con el atlas eólico de Centro América.

Tabla 5-5 Descripción del archivo WRG de intercambio.

Columns	Width	Description
01-10	10	GridPoint
11-20	10	X-coordinate (easting) of the site [m]
21-30	10	Y-coordinate (northing) of the site [m]
31-38	8	Z-coordinate (elevation) of the site [m]
39-43	5	Height above ground level [m a.g.l.]
44-48	5	Weibull A-parameter for the total distribution [ms^{-1}]
49-54	6	Weibull k-parameter for the total distribution
55-69	15	Power density [Wm^{-2}] or power production [Why^{-1}]

Columns	Width	Description
70-72	3	Number of sectors
73-76	4	Frequency of occurrence for sector #1 [%·10]
77-80	4	Weibull A-parameter for sector #1 [$\text{ms}^{-1} \cdot 10$]
81-85	5	Weibull k-parameter for sector #1 [$\cdot 100$]
86-98	13	As columns 73-85, but for sector #2
...
216-228	13	As columns 73-85, but for sector #12

5.3 Climatología Regional en el Cerro Verde (A-35)

Descripción general

La región de estudio en Cerro Verde consiste en un cuadro de 16 km de lado que se encuentra, aproximadamente, delimitado por las faldas del volcán de Santa Ana e Izalco al norte y oeste, por la carretera de Sonsonate al sur y por el límite de la cuenca de Coatepeque al este. En el cerro verde se encuentra una estación meteorológica con 978 registros de viento diarios y utilizando la función de Weibull se ha determinado valores de velocidades y potencias medias anuales de 3.91 m/s y 123 W/m² al año con una dirección de viento predominante NNE, en la figura 5-13 se presenta, por medio de la rosa de vientos, la dirección de viento predominante y la distribución de frecuencias de las velocidades y los factores de la función de Weibull. En las tablas 5-6 y 5-7 se muestran los factores de Weibull, velocidad y potencia media para otros períodos de tiempo. En los períodos de tiempo evaluados la dirección predominante del viento es siempre NNE.

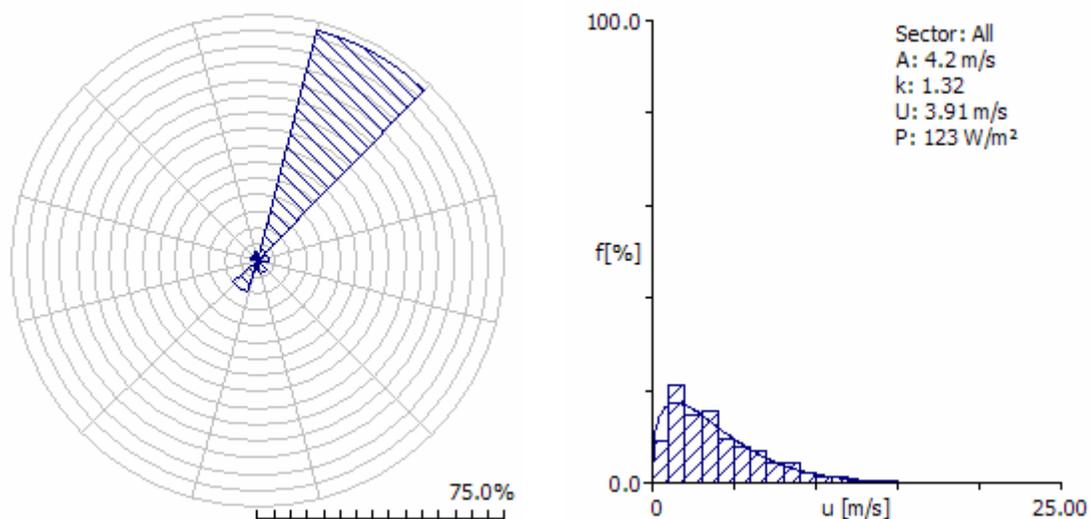


Figura 5-13 Rosa de los vientos y distribución de velocidades para la estación A-35 (Cerro Verde).

Tabla 5-6 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada uno de los meses del año.

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A	5		3.3	3.8	2.5	2.8	5.6	4.4	4	4.7	5.7	6
K	1.46	1.26	1.21	1.24	1.22	1.1	2.04	1.61	1.83	1.4	1.6	1.59
U	4.55	4.76	3.09	3.55	2.35	2.67	5	3.95	3.55	4.28	5.08	5.38
P	163	241	71	103	31	56	143	93	58	145	200	238

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m^2)

Tabla 5-7 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada temporada del año.

Parámetros	Temporada				Anual
	1	2	3	4	
A	4.7	2.6	4.2	5	4.2
k	1.29	1.31	1.54	1.36	1.32
U	4.31	2.41	3.8	4.57	3.91
P	170	29	88	186	123

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m^2)
Temporada: s, seca; s-ll, seca lluviosa; ll, lluviosa y ll-s, lluviosa seca.

Rugosidad

La rugosidad de la región varía de 0.1 en el lago hasta 0.32 en zonas urbanas, siendo el valor predominante en el 77% de la región la rugosidad de 0.24, asignada a los bosques naturales y los cafetales. La estación de medición se encuentra ubicada en el cerro verde en una zona de vegetación espesa con valores de rugosidad de 0.24, así como se muestra en la figura 5-14.

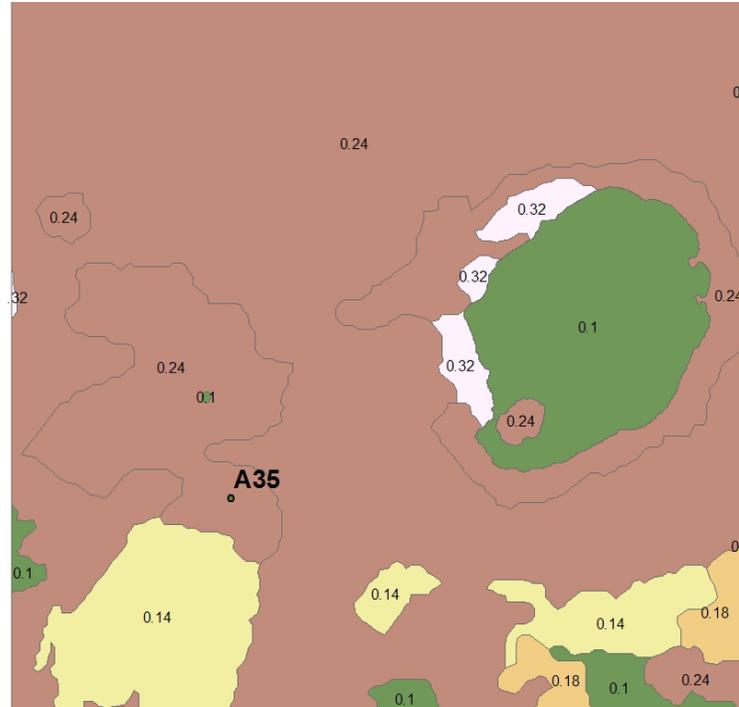


Figura 5-14 Mapa de uso de suelo reclasificado con valores de rugosidad en los alrededores de la estación Cerro Verde (A-35).

Orografía

El relieve en la zona es de tipo montañoso con alturas máximas de 2370 y mínimas de 560 msnm en distancias cortas. Existen tres puntos de mayor elevación en la zona de los cuales dos de ellos son volcanes y el otro es un cerro. Los volcanes dentro de la zona son el Lamatepec o volcán de Santa Ana y el volcán de Izalco. El cerro es conocido como Cerro Verde y es en él que se encuentra ubicada la estación meteorológica a una altura de 2030 msnm. Al este de la zona montañosa se ubica el lago de Coatepeque a una altura de 750 msnm, rodeado el lago en casi toda su totalidad por una cordillera con amplia vegetación, ver figura 5-15.

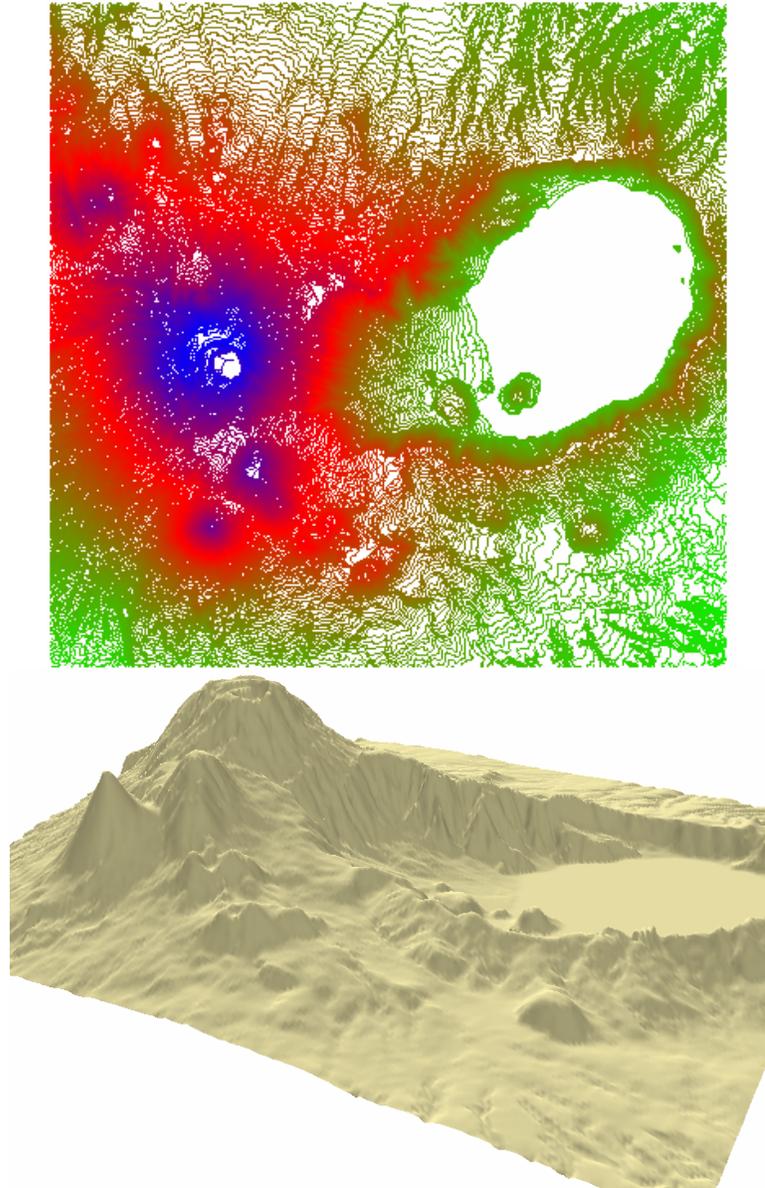


Figura 5-15. Orografía de la región “Cerro Verde”. (a) Curvas de nivel de la zona; (b) Modelo de elevación digital.

Estimación del potencial eólico de la zona Cerro Verde

La velocidad media de la región a 50 m.a.g.l. es mostrada en la figura 5-16, identificándose cuatro lugares con las magnitudes mayores de velocidades: Cerro Verde y Cerro Mala Cara, Volcanes de Izalco y de Santa Ana. Las menores velocidades de viento se presentan en zonas bajas o en aquellas que el efecto topográfico les ha afectado grandemente. La figura 5-17 muestra el potencial eólico a 50 m.a.g.l. de la zona “Cerro Verde” obtenido por medio del modelo realizado en WASP y el atlas eólico de Centro América. La diferencia en las magnitudes de potencia se puede atribuir a que el modelaje realizado en WASP utiliza datos a 10 m.a.g.l. de estaciones de larga duración, por lo que es posible obtener en dicha zona una mayor potencia energética que la calculada. Es importante señalar la existencia de sitios energéticos en el Cerro Mala Cara y la zona del cerro Mascarón que no quedaban definidos en el Atlas eólico de NREL.

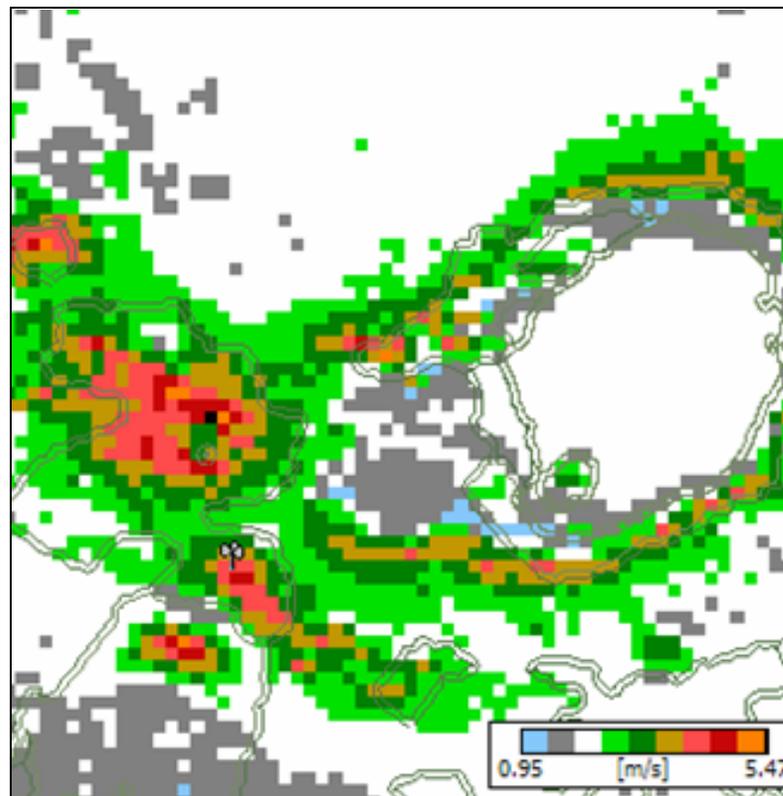


Figura 5-16 Clima regional de la zona “Cerro Verde” (Velocidades a 50 m.a.g.l.).

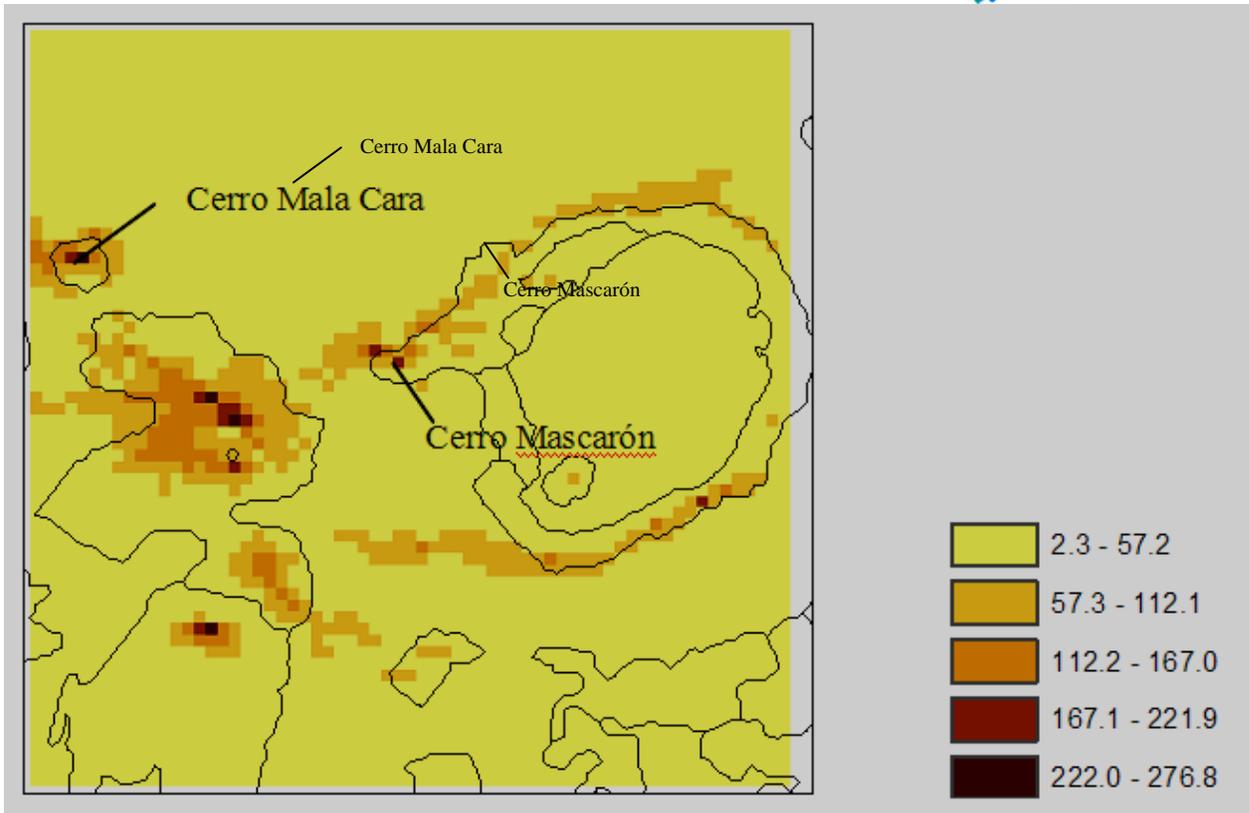


Figura 5-17 Mapas de potencial eólico a 50 m.a.g.l. en W/m^2 obtenido por medio del modelaje de la región “Cerro Verde”.

5.4 Climatología Regional en Planes de Montecristo (A-31).

Descripción general

La región de estudio consiste en un cuadro de 10 km de lado que se encuentra, aproximadamente, delimitado por la frontera de Honduras al norte, por la quebrada la Chicotera al este y por la carretera que conduce de Metapán a la Hacienda El Pinar al sur y por los cerros Copacho, Carrapinga y Anona. Al centro de la región, en la Loma Las Toreras se encuentra una estación meteorológica (Planes de Montecristo) con 1044 registros de viento diarios y utilizando la función de Weibull se han determinado valores de velocidades y potencias medias anuales de 2.65 m/s y 45 W/m^2 al año con una dirección de viento predominante NNE todo el año y en algunos meses SSW y E, en la figura 5-18 se presenta por medio de la rosa de vientos la dirección de viento predominante y la distribución de frecuencias de las velocidades y los factores de la función de Weibull. En las tablas 5-8 y 5-9 se muestran los factores de Weibull, velocidad y potencia media para otros períodos de tiempo.

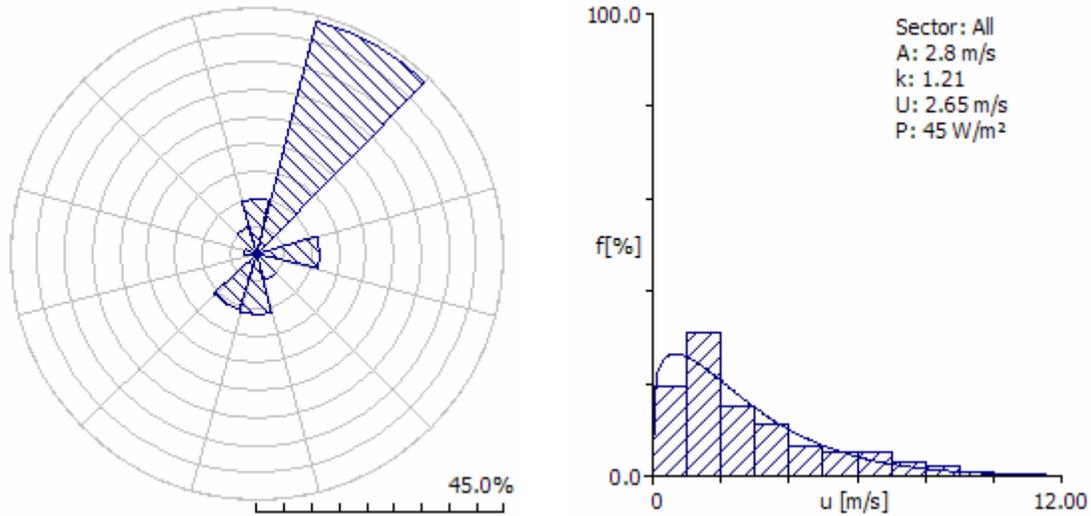


Figura 5-18 Rosa de los vientos y distribución de velocidades para la estación A-31.

Tabla 5-8 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada uno de los meses del año.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A	3	4.2	2.6	3	1.8	1.7	3.2	2.9	1.9	3.3	4	4
k	1.23	1.44	1.21	1.15	1.41	1.03	1.41	1.41	1.39	1.45	1.53	1.44
U	2.8	3.83	2.4	2.83	1.64	1.71	2.92	2.65	1.77	3	3.57	3.61
P	51	100	33	60	8	17	46	34	10	47	74	83

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m^2)

Tabla 5-9 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada temporada del año.

	Temporada				Anual
	1	2	3	4	
A	3.4	1.9	2.3	4.4	2.8
k	1.28	1.33	1.2	1.91	1.21
U	3.12	1.78	2.17	3.93	2.65
P	66	11	25	74	45

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m^2)
Temporada: s, seca; s-ll, seca lluviosa; ll, lluviosa y ll-s, lluviosa seca.

Rugosidad

La rugosidad de la región es de dos tipos: 0.1 en pastos y granos básicos que cubre el 25% de la región y de 0.24 a los bosques naturales y a los cafetales cubriendo el resto del territorio. La estación de medición se encuentra ubicada en Loma las Toreras, zona de vegetación espesa con valores de rugosidad de 0.24, así como se muestra en la figura 5-19.

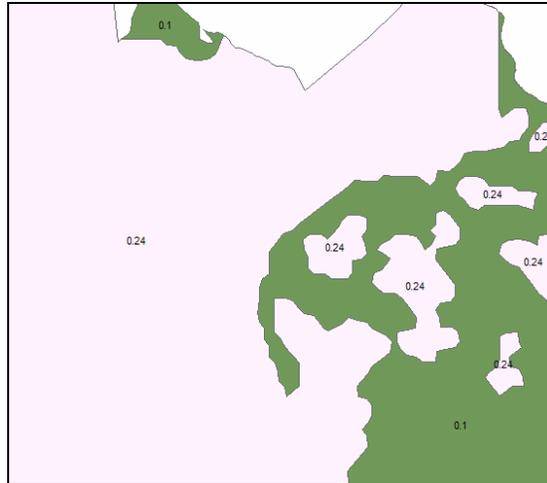


Figura 5-19 Mapa de uso de suelo reclasificado con valores de rugosidad.

Orografía

El relieve en la zona es de tipo montañoso con alturas máximas de 2400 y mínimas de 800 msnm en distancias cortas, como se muestra en la figura 5-20. La estación meteorológica se encuentra a una altura de 1831 msnm. La región se encuentra en una zona montañosa con grandes pendientes en cortas distancias, con abundante vegetación de tal manera que la parte oeste es una zona nacional protegida llamada “Montecristo”.

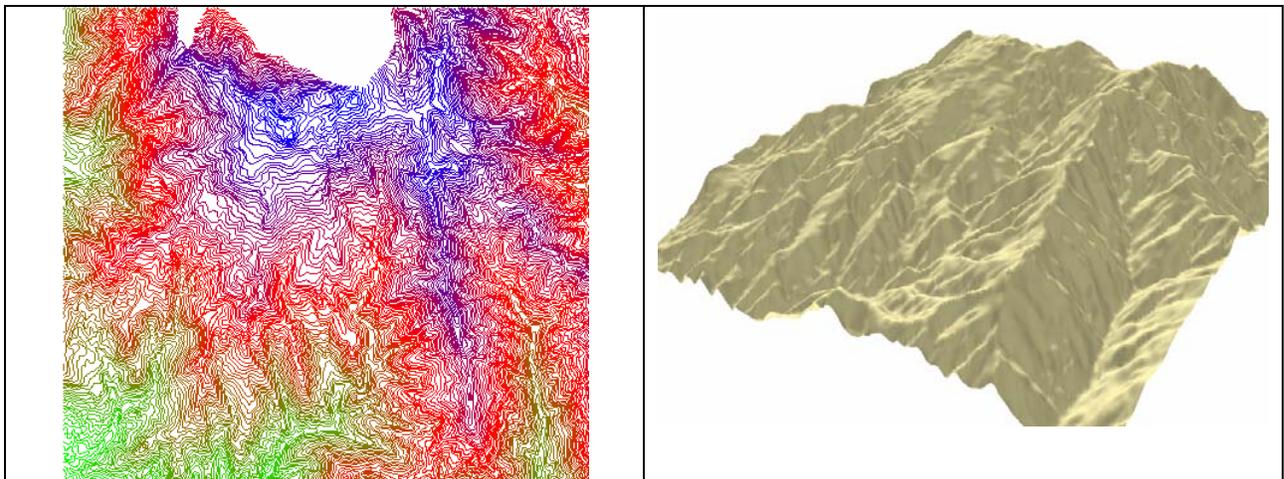


Figura 5-20 Orografía de la región Planes de Montecristo (Metapán). (a) Curvas de nivel; (b) Modelo de elevación digital.

Estimación del potencial eólico de la zona Planes de Montecristo.

La velocidad media de la región a 50 m.a.g.l. es mostrada en la figura 5-21, identificándose cinco lugares con las magnitudes mayores de velocidades: la zona de Miramundo y El Cerro Los Cántaros (ubicados en la zona protegida), Cerro Redondo, Loma El Malcotal y Cerro Guamilar. Las menores velocidades de viento se presentan en zonas bajas o en aquellas que el efecto topográfico les ha afectado grandemente. La figura 5-22 muestra el potencial eólico a 50 m.a.g.l. de la zona, obtenido por medio del modelo realizado en WAsP y el atlas eólico de NREL para Centroamérica. Existen zonas al sur de la región que el Atlas de NREL las establece con alto potencial energético que no aparecen en el modelo realizado, en las cuales se requiere de ubicar una estación de corta duración en la zona para evaluar su potencial energético. La diferencia en las magnitudes de potencia se puede atribuir a que el modelaje realizado en WAsP utiliza datos a 10 m.a.g.l. de estaciones de larga duración, por lo que es posible obtener en dicha zona una mayor potencia energética que la calculada.

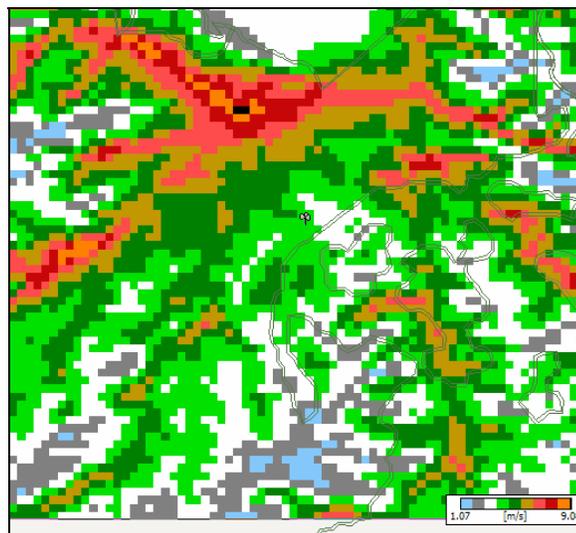


Figura 5-21 Clima regional de la zona Planes de Montecristo (Velocidades a 50 m.a.g.l.)

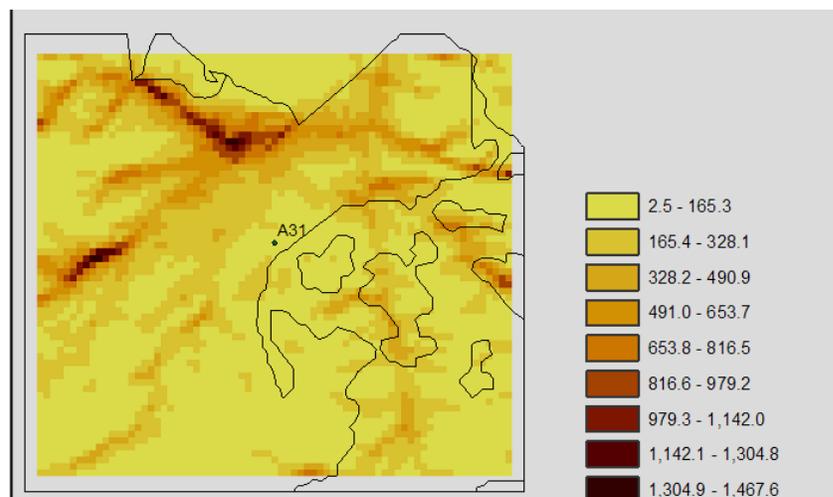


Figura 5-22 Mapas de potencial eólico a 50 m.a.g.l. en W/m^2 obtenido por medio del modelaje de la región Planes de Montecristo.

5.5 Climatología Regional en La Galera (Z-4).

Descripción general

La región de estudio consiste en un cuadro de 10 km de lado que se encuentra, aproximadamente, delimitado por la frontera de Honduras al norte, por el Cerro Bailaderos y Las Cumbres del Cerro Verde al este y por los Cerros Las Crucitas y El Colorado al sur y por los cerros El Infernal y La Ardilla. Al centro de la región, en Las Galeras se encuentra una estación meteorológica con 618 registros de viento diarios y utilizando la función de Weibull se ha determinado valores de velocidades y potencias medias anuales de 2.88 m/s y 33 W/m² al año con una dirección de viento predominante N y NNE todo el año, en algunos meses las direcciones son variadas con velocidades pequeñas, en la figura 5-23 se presenta por medio de la rosa de vientos la dirección de viento predominante y la distribución de frecuencias de las velocidades y los factores de la función de Weibull. En las tablas 5-10 y 5-11 se muestran los factores de Weibull, velocidad y potencia media para otros períodos de tiempo.

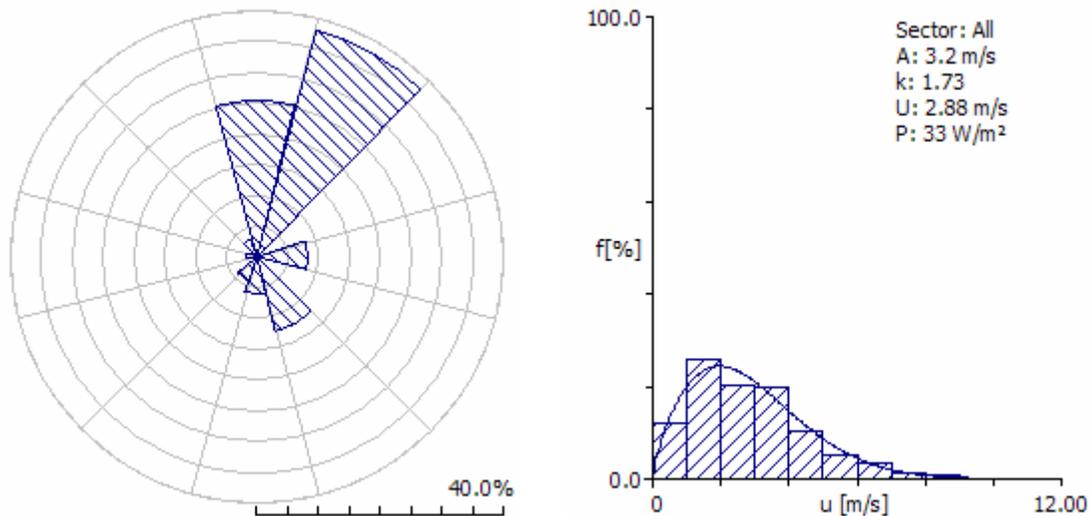


Figura 5-23 Rosa de los vientos y distribución de velocidades para la Z-4.

Tabla 5-10 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada uno de los meses del año.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A	4	5.1	2.7	3	2.1	2.8	3.5	3.6	2.6	3.7	4.3	4.9
k	1.65	2.16	1.4	1.74	1.54	1.83	2.41	2.24	2.16	1.89	1.99	2.44
U	3.54	4.54	2.5	2.66	1.85	2.47	3.14	3.21	2.26	3.28	3.79	4.34
P	65	102	29	26	10	20	31	35	13	44	64	80

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m²)

Tabla 5-11 Factores de Weibull, Velocidad y Potencia media para cada temporada del año.

	Temporada				Anual
	1	2	3	4	
A	3.8	2.3	3	4.3	3.2
k	1.72	1.68	1.97	1.95	1.73
U	3.35	2.06	2.66	3.79	2.88
P	52	13	22	65	33

Parámetros: A, factor de escala; K, factor de forma; U, velocidad (m/s); P, potencia (W/m^2)
 Temporada: s, seca; s-ll, seca lluviosa; ll, lluviosa y ll-s, lluviosa seca.

Rugosidad

Según el mapa de uso de suelos utilizados el tipo de suelo de la región es Cafetal o Bosques Naturales por lo que se utilizó un factor de rugosidad de 0.24 en toda la zona.

Orografía

El relieve en la zona es de tipo montañoso con alturas máximas de 2020 y mínimas de 1120 msnm en distancias cortas, como se muestra en la figura 5-24. La estación meteorológica se encuentra a una altura de 1900 msnm. La región se encuentra en una zona montañosa con grandes pendientes en cortas distancias, con abundante vegetación.

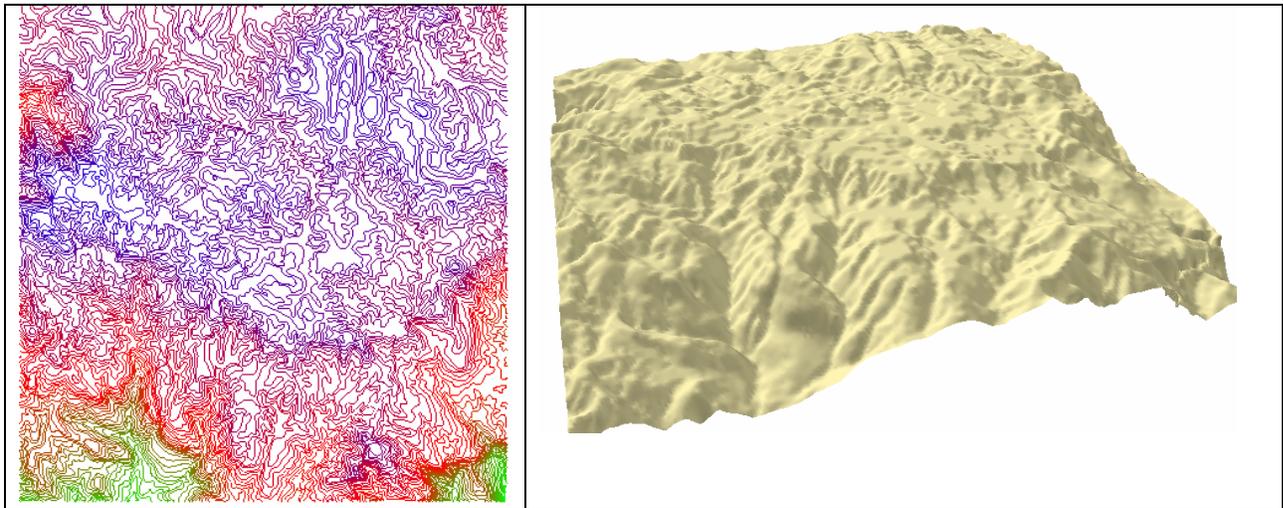


Figura 5-24 Orografía de la región “La Galera”. (a) Curvas de nivel; (b) Modelo de elevación digital.

Estimación del clima regional de la zona La Galera

La velocidad media de la región a 50 m.a.g.l. es mostrada en la figura 5-25, identificándose tres lugares con las magnitudes mayores de velocidades: La Loma de Enmedio y Costado Nor-Este de Bailaderos y el Volcán de Agua. Las menores velocidades de viento se presentan en zonas bajas o en aquellas que el efecto topográficos les ha afectado grandemente. La figura 5-26 muestra el potencial eólico a 50 m.a.g.l. de la zona, obtenido por medio del modelo realizado en WasP y el atlas eólico de NREL para Centroamérica. La ausencia de datos del Atlas se debe a los límites políticos de El Salvador, pero se observa similitud en la distribución de las potencias y no a la magnitud de las mismas. La diferencia en las magnitudes de potencia se puede atribuir a que el modelaje realizado en WASP utiliza datos a 10 m.a.g.l. de estaciones de larga duración, por lo que es posible obtener en dicha zona una mayor potencia energética que la calculada.

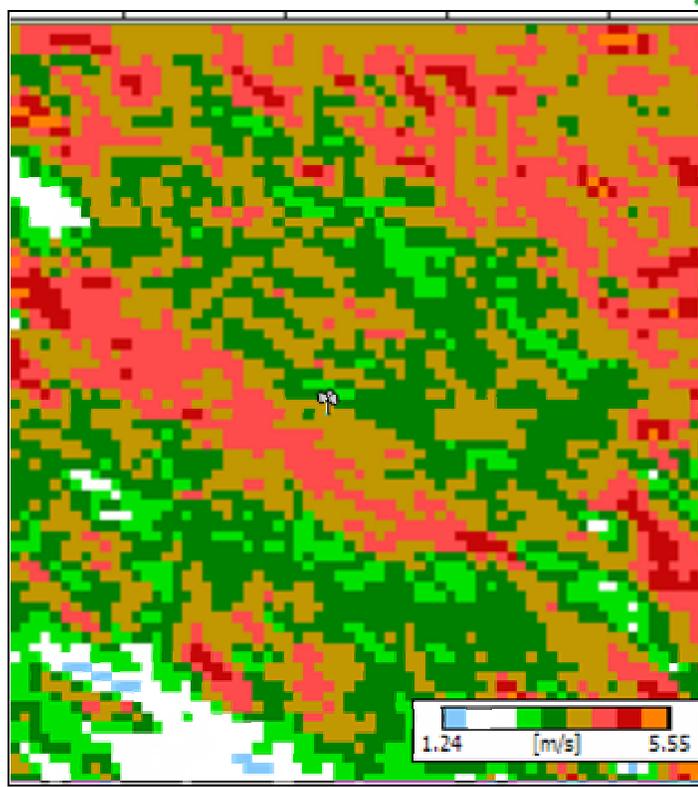


Figura 5-25 Clima regional de la zona “La Galera” (Velocidades a 50 m.a.g.l.)

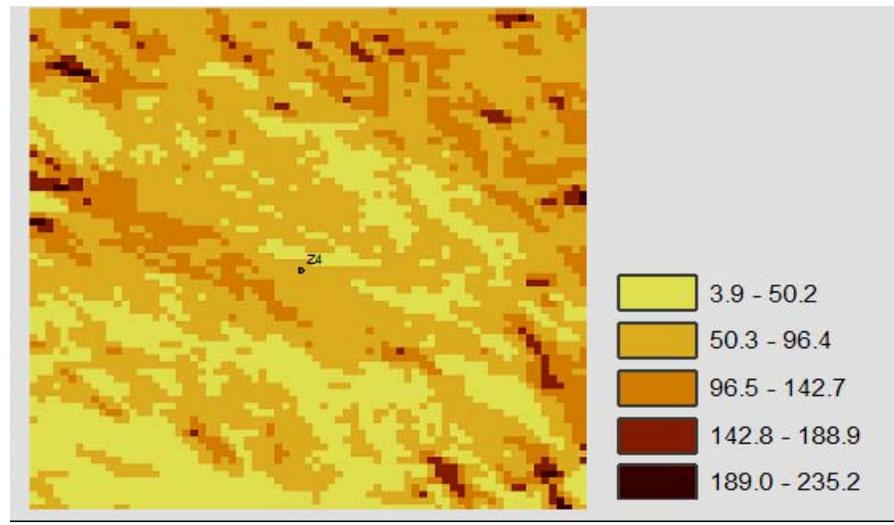


Figura 5-26 Mapas de potencial eólico a 50 m.a.g.l. en W/m² obtenido por medio del modelaje de la región La Galera.

5.6 Tablas de medición de potencial eólico en las estaciones meteorológicas del país.

El proyecto SWERA ejecutado por la UCA consideró datos de viento horarios de 18 estaciones las cuales se presentan en la tabla 5-12. El total de datos para modelaje en WAsP utilizó 20,890 horas de mediciones de todas las estaciones. Sus resultados en W/m^2 y KWh/m^2 se presentan en la tabla 5-13.

Tabla 5-12 Estaciones con mediciones de viento consideradas en el proyecto SWERA.

Estacion	Nombre	Longitud	Latitud	Elevacion
A12	Santa Ana El Palmar	-89.5700	13.9766	725
A31	Planes de Montecristo	-89.3600	14.3983	1851
A35	Cerro Verde	-89.6233	13.8266	2030
B10	Cerrón Grande	-88.7850	13.9383	600
G3	Nueva Concepción	-89.2900	14.1250	320
H13	Apaneca Santa Leticia	-89.7816	13.8616	1300
H8	Ahuachapán	-89.8600	13.9433	725
L18	El Boquerón	-89.2816	13.7350	1800
L4	San Andrés	-89.4067	13.8083	460
M23	Cerro Cacahuatique	-88.2317	13.7633	1975
M6	El Papalón	-88.1267	13.4400	1960
N15	La Unión	-87.8816	13.3316	95
S10	Aeropuerto-Ilopango	-89.1183	13.6983	615
S27	Estación Matriz	-89.1433	13.6883	650
U11	Beneficio La Carrera	-88.5250	13.3300	75
V13	Apastepeque	-88.7466	13.7000	570
V6	Santa Cruz Porrillo	-88.8033	13.4400	30
Z4	La Galera	-88.0866	14.0430	1900

En la tabla 5-14 se presenta una comparación entre los datos de viento obtenidos por la UPES en 1987 y los obtenidos por el proyecto SWERA de la UCA utilizando WAsP.

Tabla 5-4 Areas que presentan mayor potencial eólico de acuerdo a estudio UPES y al proyecto SWERA-UCA (calculados con WAsP). Datos a 10 magl.

Código	Nombre y depto.	Velocidad media anual (m/s) UPES	Velocidad media anual (m/s) SWERA	Densidad de potencia media anual (W/m^2) UPES	Densidad de potencia media anual (W/m^2) SWERA	Densidad de energía media anual (KWh/m^2) UPES	Densidad de energía media anual (KWh/m^2) SWERA
A-35	Cerro Verde (Santa Ana)	4.39	3.91	116	123	1040	1077
A-31	Planes de Montecristo (Santa Ana)	3.14	2.65	70	45	629	394
Z-4	La Galera (Morazán)	2.86	2.88	57	33	519	289

Tabla 5-3 Datos calculados por WAsP para cada mes del año, se presentan datos en W/m² y KWh/m² (anual).

Estacion	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Promedio Anual	
	17	149	17	149	13	114	16	140	9	79	6	53	6	53	6	53	5	44	8	70	10	88	18	158		12
a12	51	447	100	876	33	289	60	526	8	70	17	149	46	403	34	298	10	88	47	412	74	648	83	727	45	394
a31	163	1428	241	2111	71	622	103	902	31	272	56	491	143	1253	93	815	58	508	145	1270	200	1752	238	2085	123	1077
b10	6	53	8	70	12	105	6	53	4	35	5	44	4	35	5	44	4	35			4	35	7	61	8	70
g3	14	123	16	140	11	96	10	88	2	18	1	9	1	9	3	26	1	9	3	26	7	61	16	140	8	70
h13	52	456	46	403	12	105	8	70	4	35	2	18	7	61	9	79	5	44	46	403	36	315	54	473	19	166
h8	12	105	14	123	11	96	10	88	6	53	3	26	4	35	3	26	3	26	4	35	8	70	13	114	8	70
l18	35	307	30	263	19	166	10	88	5	44	6	53	9	79	8	70	10	88	21	184	45	394	48	420	22	193
l4	9	79	13	114	11	96	10	88	13	114	3	26	3	26	3	26	3	26	2	18	5	44	7	61	6	53
m23	20	175	16	140	16	140	17	149	6	53	11	96	17	149	16	140	10	88	14	123	14	123	27	237	17	149
m6	9	79	9	79	10	88	11	96	5	44	3	26	3	26	3	26	2	18	1	9	3	26	7	61	6	53
n15	18	158	40	350	37	324	30	263	16	140	8	70	8	70	5	44	4	35	5	44	9	79	21	184	16	140
s10	40	350	29	254	47	412	30	263	16	140	9	79	10	88	10	88	9	79	14	123	25	219	37	324	22	193
s27	6	53	8	70	8	70	8	70	4	35	3	26	3	26	3	26	3	26	3	26	4	35	6	53	5	44
u11	12	105	24	210	12	105	10	88	9	79	7	61	9	79	6	53	5	44	5	44	6	53	7	61	8	70
v13									40	350	8	70	9	79	11	96	10	88	6	53					14	123
v6	13	114	12	105	8	70	9	79	4	35	3	26	8	70	4	35	2	18	3	26	5	44	10	88	7	61
z4	65	569	102	894	29	254	26	228	10	88	20	175	31	272	35	307	13	114	44	385	64	561	80	701	33	289

Tabla 5-15 Velocidad promedio del viento en m/s obtenidas en el proyecto SWERA.

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Promedio Anual
a12	2.39	2.27	2.19	2.37	1.83	1.62	1.73	1.72	1.58	1.82	1.99	2.41	1.95
a31	2.8	3.83	2.4	2.83	1.64	1.71	2.92	2.65	1.77	3	3.57	3.61	2.65
a35	4.55	4.76	3.09	3.55	2.35	2.67	5	3.95	3.55	4.28	5.08	5.38	3.91
b10	1.65	1.76	1.78	1.6	1.37	1.24	1.41	1.41	1.31		1.42	1.7	1.12
g3	1.47	1.55	1.45	1.45	0.95	0.78	0.75	0.94	0.8	0.86	0.97	1.42	1.12
h13	2.96	1.85	1.76	1.65	1.36	1.26	1.72	1.76	1.49	2.17	2.43	1.99	1.74
h8	1.87	1.86	1.81	1.74	1.43	1.19	1.36	1.22	1.11	1.28	1.66	1.79	1.55
l18	2.76	2.62	1.87	1.48	1.25	1.45	1.85	1.82	1.65	2.01	2.96	3.11	2.08
l4	1.51	1.76	1.69	1.63	1.68	1.06	1.09	1.09	1.07	0.09	1.24	1.48	1.34
m23	2.16	2	2	1.97	1.69	1.9	2.16	2.13	1.83	2.12	2.12	2.79	2.12
m6	1.6	1.55	1.69	1.64	1.26	0.98	1.09	1.1	0.87	0.83	0.89	1.39	1.26
n15	2.38	3.34	3.12	2.67	2	1.7	1.65	1.51	1.43	1.39	1.57	2.16	1.87
s10	3.12	2.84	3.06	2.81	2.13	1.89	2.1	2.05	1.87	2.11	2.67	3.11	2.44
s27	1.66	1.73	1.68	1.71	1.24	1.28	1.28	1.29	1.23	1.31	1.49	1.64	1.5
u11	1.79	1.87	1.74	1.77	1.67	1.62	1.73	1.52	1.48	1.49	1.57	1.65	1.64
v13	--	--	--	--	2.41	1.44	1.35	1.53	1.29	1.17	--	--	1.5
v6	1.86	1.8	1.49	1.64	1.18	1.18	1.62	1.26	1.13	1.06	1.34	1.72	1.43
z4	3.54	4.54	1.5	2.66	1.85	2.47	3.14	3.21	2.26	3.28	3.79	4.34	2.88

Tabla 5-16 Datos de viento (W/m^2 y KWh/m^2) para cada una de las estaciones climáticas del país. Cálculos basados en la tabla 1-1 (Duración aproximada de las estaciones climáticas).

Estación meteorológica	Seca		Seca - Lluviosa		Lluviosa		Lluviosa - Seca	
	W/m ²	KWh/m ²						
a12	15	131	10	88	6	53	10	88
a31	66	578	11	96	25	219	74	648
a35	170	1489	29	254	88	771	186	1629
b10	7	61	5	44	6	53	5	44
g3	13	114	3	26	5	44	10	88
h13	32	280	4	35	7	61	39	342
h8	12	105	6	53	3	26	7	61
l18	31	272	5	44	9	79	40	350
l4	8	70	14	123	3	26	5	44
m23	23	201	5	44	13	114	--	--
m6	9	79	6	53	3	26	2	18
n15	24	210	23	201	9	79	4	35
s10	37	324	18	158	10	88	19	166
s27	7	61	7	61	1	9	4	35

Estación meteorológica	Seca		Seca - Lluviosa		Lluviosa		Lluviosa - Seca	
u11	12	105	10	88	6	53	5	44
v13	--	--	54	473	12	105	4	35
v6	10	88	5	44	5	44	4	35
z4	52	456	13	114	22	193	65	569

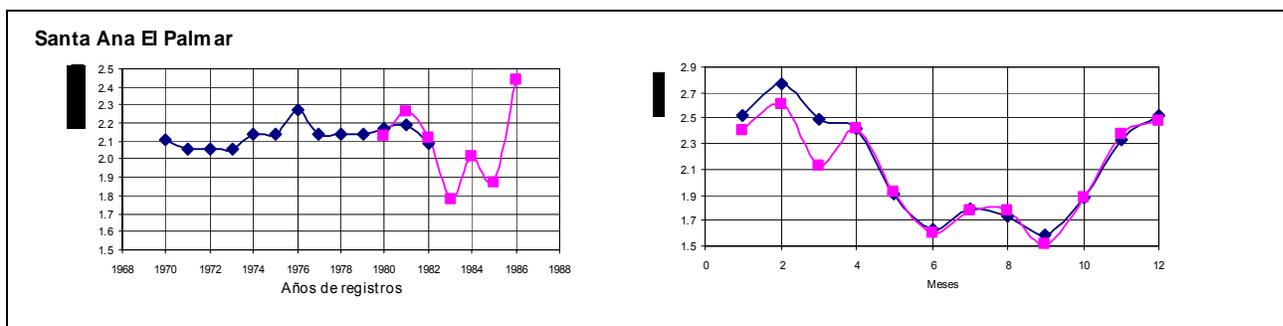
Tabla 5-17 Datos de velocidad del viento en m/s para cada una de las estaciones climáticas del país. Cálculos basados en la tabla 1-1.

Estación meteorológica	Seca	Seca - Lluviosa	Lluviosa	
			Lluviosa	Lluviosa - Seca
a12	2.29	1.94	1.68	2
a31	3.12	1.78	2.17	3.93
a35	4.31	2.41	3.8	4.57
b10	1.67	1.58	1.45	1.45
g3	1.44	1.11	0.91	1.4
h13	2.23	1.4	1.6	2.67
h8	1.81	1.46	1.25	1.63
l18	2.5	1.19	1.7	2.71
l4	1.34	1.78	1.07	1.29
m23	2.38	1.64	1.96	--
m6	1.52	1.32	1	0.86
n15	2.36	2.28	2.37	1.37
s10	3.02	2.18	1.97	2.42
s27	1.66	1.53	0.73	1.47
u11	1.72	1.68	1.58	1.5
v13	--	2.81	1.44	1.2
v6	1.67	1.26	1.37	1.27
z4	3.35	2.06	2.66	3.79

Tabla 5-18 Tabla comparativa de datos de viento m/s, W/m², KWh/m² para diferentes proyectos.

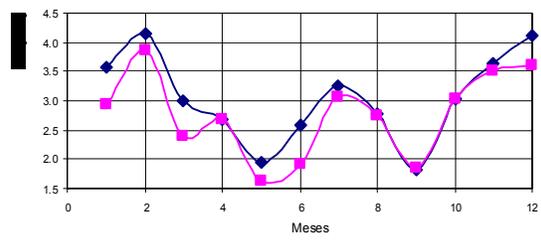
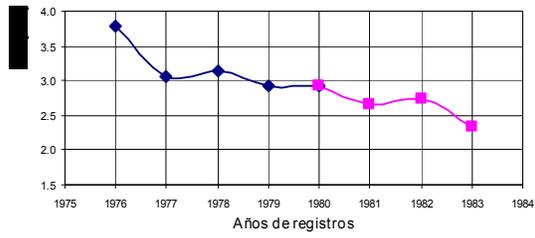
Estación	Promedio anual SWERA			Promedio anual UPES			Promedio anual MINEC ³		
	m/s	W/m ²	KWh/m ²	m/s	W/m ²	KWh/m ²	m/s	W/m ²	KWh/m ²
a12	1.95	12	105	2.13	31	280	2.1	31.8	278
a31	2.65	45	394	3.14	70	629	3.14	65.4	573
a35	3.91	123	1077	4.38	116	1040	4.33	118.7	1040
b10	1.12	8	70	1.4	15	133	1.41	15.2	133
g3	1.12	8	70	1.41	16	147	1.41	16.6	146
h13	1.74	19	166	2.06	31	275	2.03	31.4	275
h8	1.55	8	70	2.14	31	277	2.16	32	280
l18	2.08	22	193	2.24	36	319	2.26	36.7	319
l4	1.34	6	53	1.5	17	155	1.5	17.6	154
m23	2.12	17	149	2.42	37	334	2.42	39.7	348
m6	1.26	6	53	1.5	17	152	1.54	17.5	153
n15	1.87	16	140	2.55	45	407	2.55	46.2	405
s10	2.44	22	193	2.16	32	289	2.17	33	289
s27	1.5	5	44	1.55	18	159	--	--	--
s5	--	--	--	--	--	--	1.98	27.7	243
u11	1.64	8	70	1.94	26	230	1.95	26.2	230
v13	1.5	14	123	2.62	48	428	2.62	48.7	426
v6	1.43	7	61	1.49	17	149	1.49	17.1	150
z4	2.88	33	289	2.87	57	510	2.81	57.9	508
t6	--	--	--	2.87	53	475	2.87	55.9	482
p11	--	--	--	2.23	34	300	2.23	34.3	300

Tabla 5-19 Serie de datos para mediciones eólicas. Los datos en azul son los datos mensuales de la base de datos UPES y los datos en rosado son los datos horarios recuperados en el proyecto SWERA-UCA.

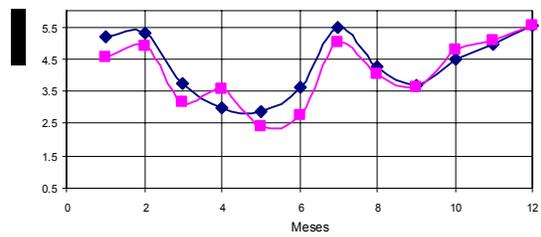
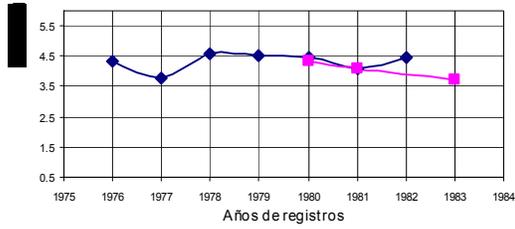


³ Tomados del CD elaborado por el consultor Humberto Rodríguez para el proyecto del MINEC “Implementación de medidas para el desarrollo de un mercado nacional sostenible para servicios de energía en el área rural”. 2005.

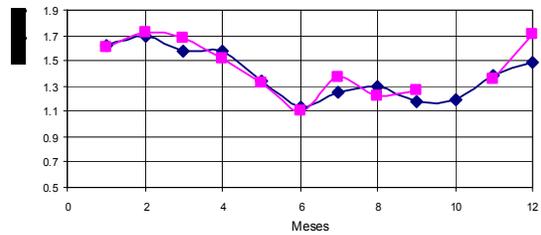
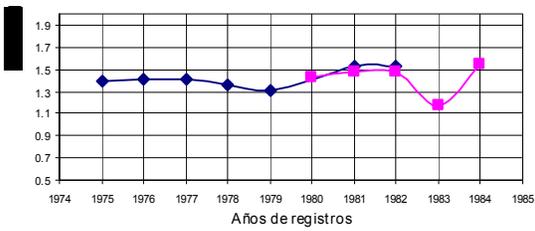
Planes de Montecristo



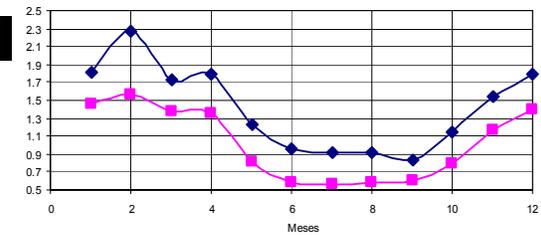
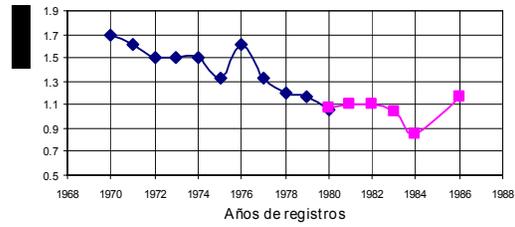
Cerro Verde



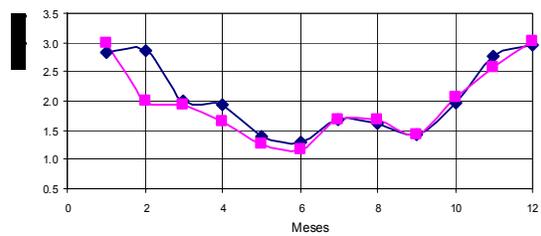
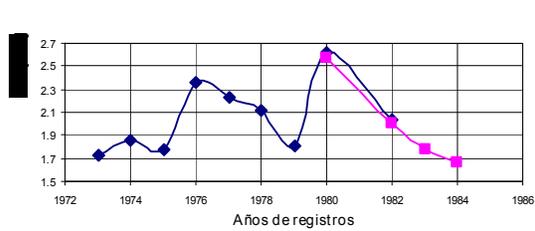
Cerron Grande

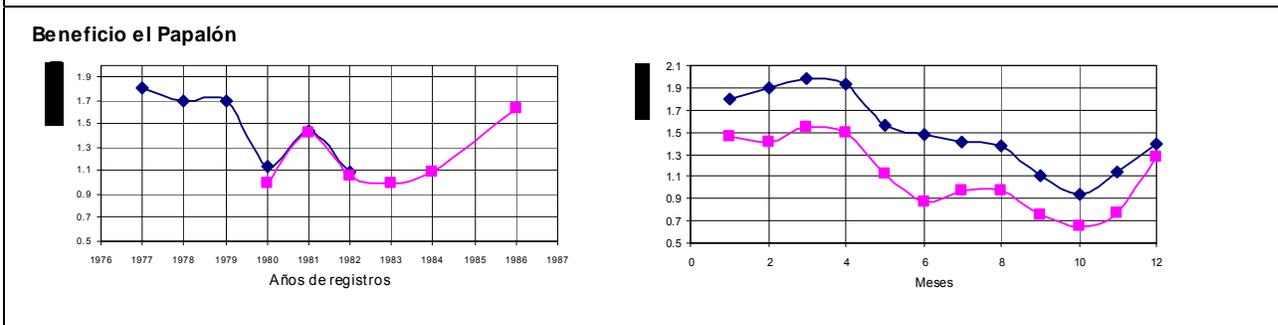
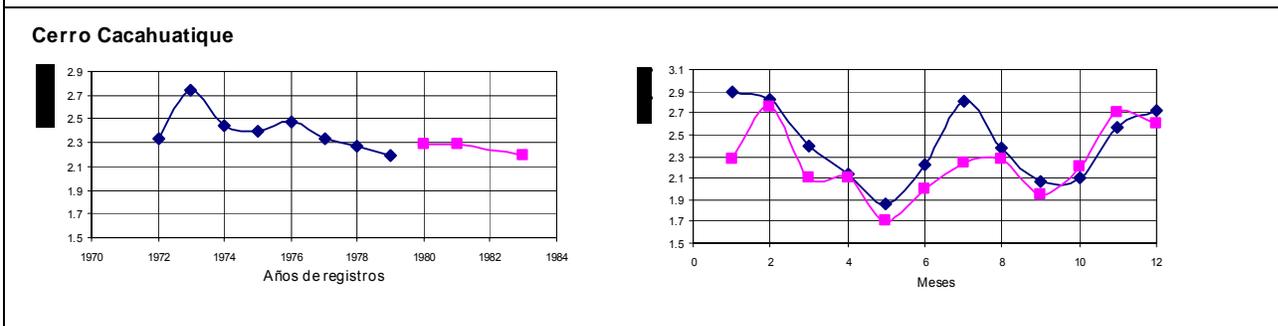
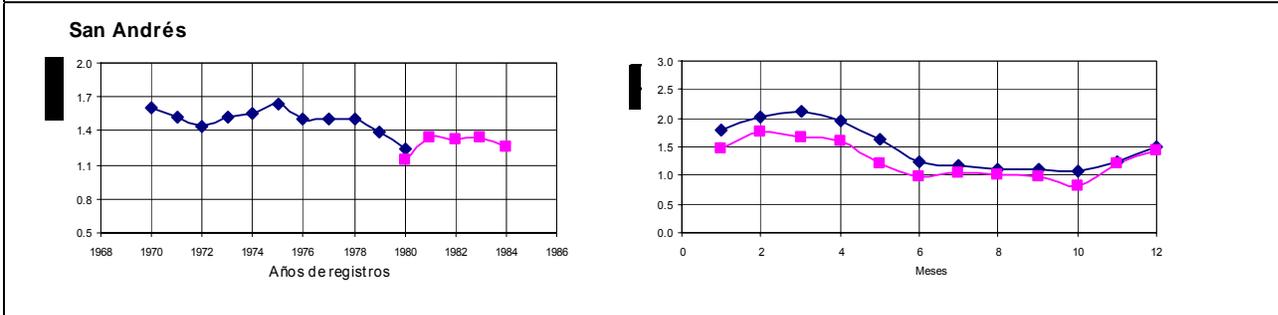
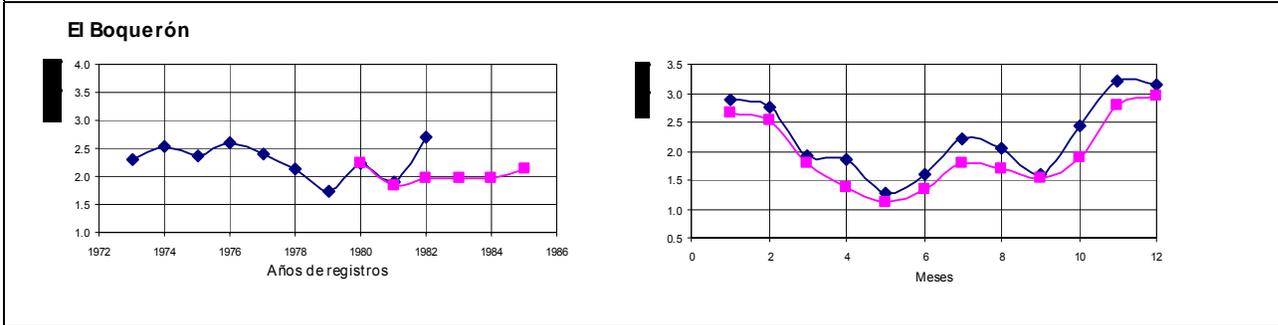
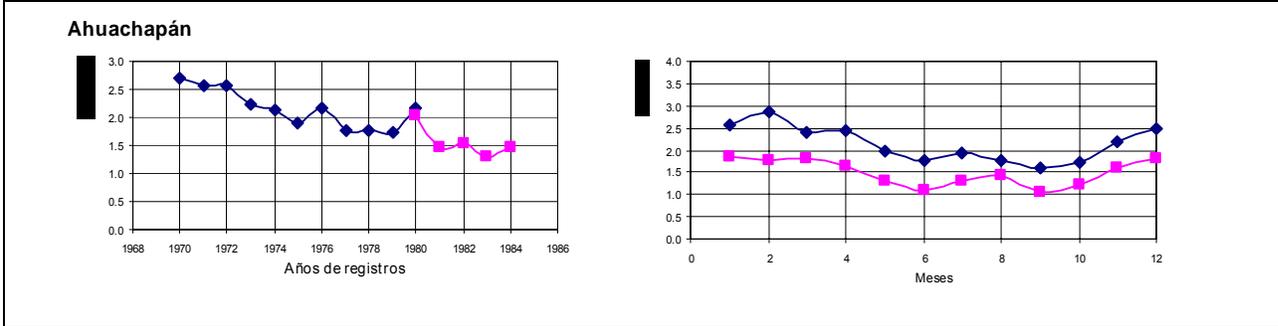


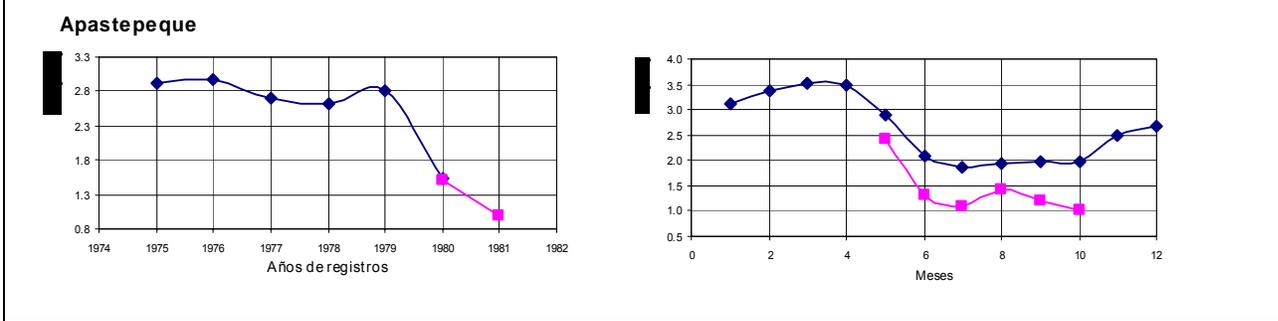
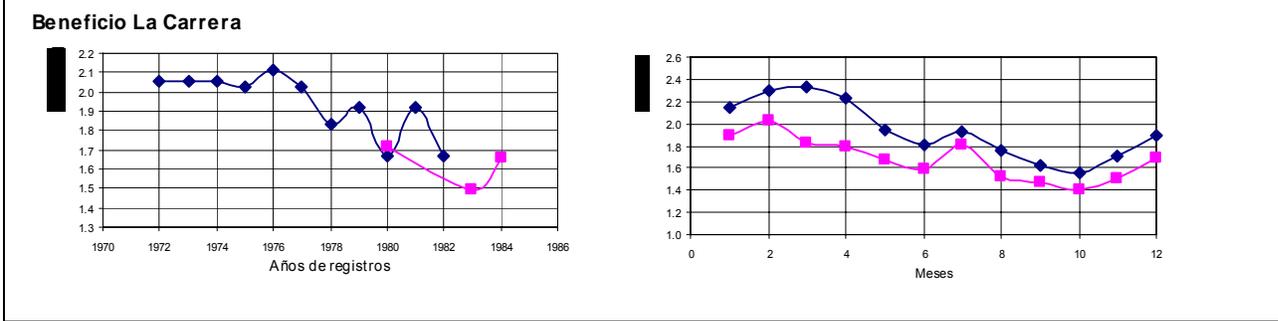
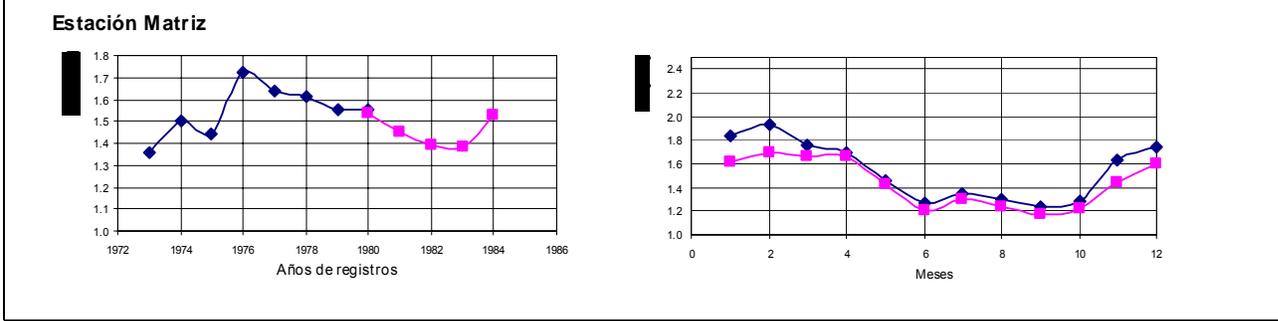
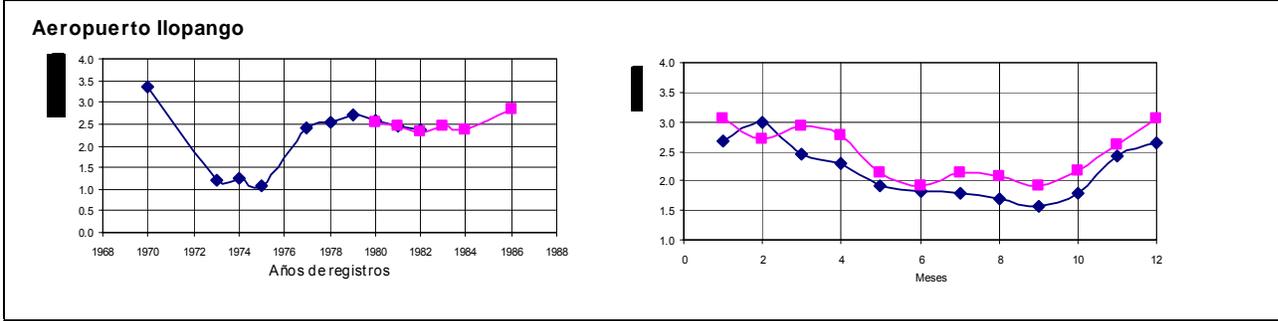
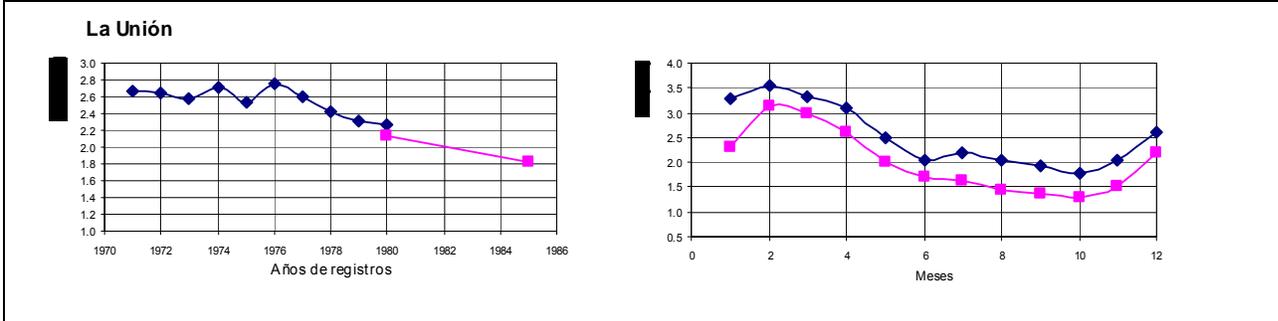
Nueva Concepción



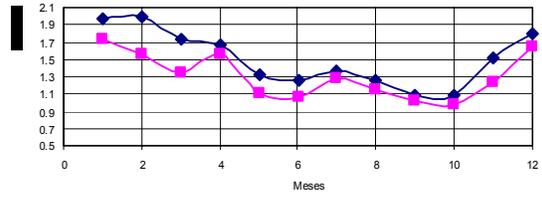
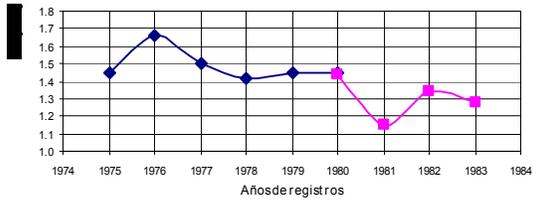
Apaneca Santa Leticia



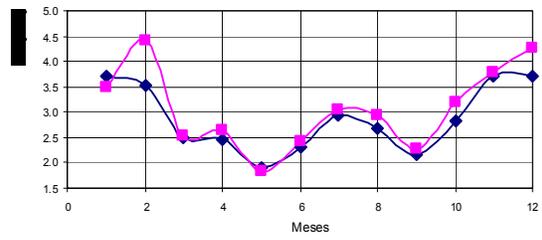




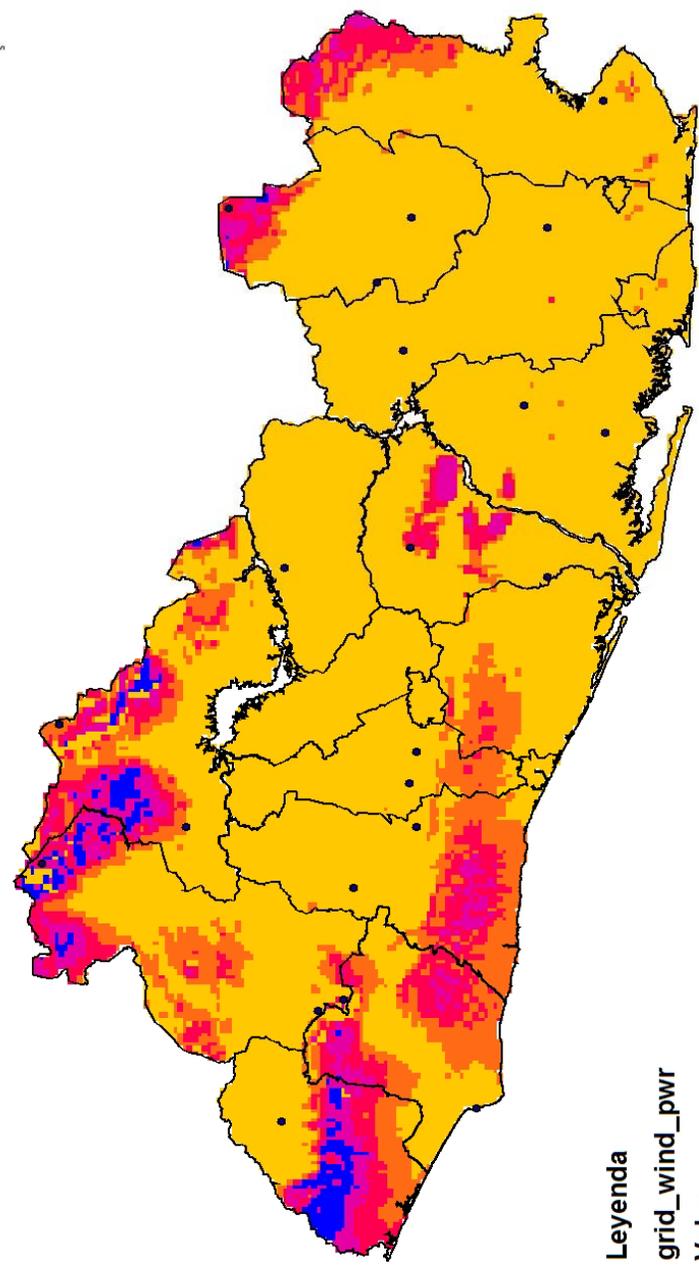
Santa Cruz Portillo



La Galera



Mapa Eólico de El Salvador (NREL 2004)
Potencia media anual a 50 m.a.g.l.



Leyenda

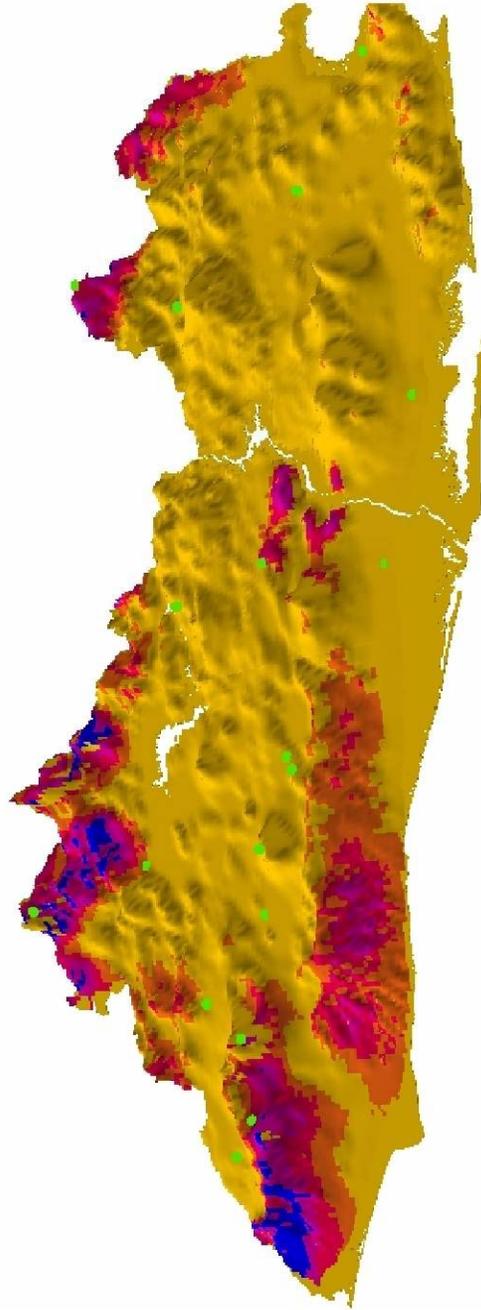
grid_wind_pwr	Value
0 - 131	Yellow
131.1 - 300	Orange
300.1 - 424	Red
424.1 - 592	Pink
592.1 - 1,031	Blue



Sistema de Proyección Cónico Conformal
 de Lambert, Datum NAD27, Elipsoide
 de Clarke de 1866.
 Tamaño del grid 250 m



Mapa Eólico de El Salvador (NREL 2004)
Potencia media anual a 50 m.a.g.l.



Leyenda

grid_wind_pwr	Value
	0 - 131
	131.1 - 300
	300.1 - 424
	424.1 - 592
	592.1 - 1,031



Sistema de Proyección Cónico Conformal
de Lambert, Datum NAD27, Elipsoide
de Clarke de 1866.
Tamaño del grid 250 m



6. Conclusiones y recomendaciones.

1. Para la estimación de los mapas de radiación solar se mejoró la serie de datos con mediciones de 5 a 14 años del proyecto de Solarimetría a una nueva serie de datos de 5 a 30 años con el proyecto SWERA. Para los datos de luz solar se utilizó la serie del proyecto de solarimetría de 5 a 25 años completado con dos años de datos (para cada una de las estaciones) digitalizados con el proyecto SWERA.
2. La tecnología de SIG permitió que se hicieran de mejor manera las asignaciones de constantes de Ångström a estaciones con mediciones de luz solar únicamente. Para ello se utilizaron diferentes criterios como: el mapa de zonas de vida de Holdrige, las elevaciones de las estaciones (altitud) y las cercanías entre las estaciones. Para la generación de los mapas de potencial solar (luz solar y radiación solar) se utilizó la información de 22 estaciones meteorológicas por medio de la interpolación de Kriging.
3. Se ha realizado un esfuerzo importante en la recuperación de los datos digitales de sol y viento. El inventario de radiación solar está completo y falta terminar de digitalizar las series de datos de luz solar y bandas de viento. En el documento se detallan los porcentajes de avances en el proceso de digitalización.
4. Para la determinación del potencial eólico del país se utilizó el software WASP, el cual permitió modelar la climatología regional alrededor de tres estaciones meteorológicas identificadas como de mayor potencial eólico: cerro verde, planes de Montecristo y la galera. Además, se usó esta herramienta de software para calcular los atlas de viento de las 18 estaciones meteorológicas para diferentes meses del año y estaciones climáticas.
5. Se desarrolló un sistema informático que permite incorporar datos nuevos de sol y viento a una base de datos la cual puede ser consultada, generar diferentes tipos de reportes, etc todo esto en un ambiente de red lo que permite aumentar la productividad de los encargados de mantener actualizadas las bases de datos solar y eólica del país. También este sistema podría ser utilizado por otros países de Centroamérica que utilizan instrumentos de medición similar a los de nuestro país.
6. Los mapas generados de brillo solar y radiación solar deben analizarse dentro del contexto que representan modelos de superficies generados por el método de interpolación de Kriging. Otros métodos de interpolación de seguro producirán modelos de superficies diferentes a los generados en este estudio. También debe considerarse que estos métodos geoestadísticos dependen del criterio del investigador para ajustar el semivariograma experimental a los modelos tradicionales de semivariogramas (circular, estable, esférico, exponencial, gaussiano, etc.).
7. Las bandas escaneadas para el caso de la radiación y el viento constituyen una importante base de datos en digital que permitiría en un futuro eliminar físicamente los inventarios en papel de estas imágenes.
8. Para cada uno de los parámetros de estudio de sol y viento se establece un procedimiento informático para su recuperación lo cual permite que la división de meteorología del SNET actualice continuamente estos parámetros.
9. La suma de las constantes de Ångström (a y b) encontradas en este estudio andan alrededor de 0.65, lo que está de acuerdo a lo que establece la literatura para climas tropicales y húmedos como el de nuestro país.
10. El análisis de la climatología regional nos permite concluir que el mapa eólico elaborado por NREL en el año 2004 para el país es un excelente instrumento para la determinación de sitios adecuados para la explotación eólico tanto a nivel residencial como de granjas eólicas.
11. En los tres lugares en que se determinó la climatología regional se encontraron sitios con valores altos de potencia y velocidad que no se evidenciaban con los valores registrados por las estaciones meteorológicas por lo que este estudio no descarta la posibilidad de la creación de granjas eólicas en El Salvador.
12. El mapa eólico de NREL es una excelente guía para la ubicación de estaciones meteorológicas con el objetivo de afinar las mediciones de viento en las zonas identificadas en el mapa eólico.
13. Se recomienda que la divisiones de meteorología del SNET recupere la información horaria de viento utilizados por los estudios de UPES (1987) y MINEC (2005) de tal forma de crear una sola

base de datos digital en viento que permita hacer mejores estimaciones que las realizadas por el proyecto SWERA.

14. Comparando las series de datos de viento del proyecto SWERA con las históricas mostradas en otros estudios, indican un deterioro de los instrumentos de medición (anemómetros) en algunas de las estaciones, lo cual hace necesario que se tome en cuenta al utilizarlos los datos en futuras investigaciones.
15. El modelaje eólico desarrollado en este estudio no consideró pérdidas por obstáculos alrededor de las estaciones meteorológicas y estas debieron haber sido consideradas al observar las rosas de vientos de algunas estaciones que lo evidenciaron. Esto dificultó hacer un detalle completo de las huellas meteorológicas de las estaciones del país con registros de viento.
16. La incorporación de lenguaje informático SQL de bases de datos relacionales y herramientas de sistemas de información geográficas simplificó y sistematizó el manejo y cálculos de los datos meteorológicos presentados en este estudio. Se sistematizó adicionalmente los formatos de entrada y salida de WASP para su representación y análisis con sistemas de información geográfica.
17. El grupo de investigadores de la UCA agradece a la división de meteorología de SNET (MARN) por el acceso a los inventarios de información solar y eólica de el país y el apoyo técnico oportuno. Así mismo se agradece al proyecto SWERA por el fortalecimiento de las capacidades y habilidades adquiridas por los investigadores en los temas solar y eólico.

7. Bibliografía.

1. Burrough, P.A., "Principles of Geographic Information Systems", Oxford University Press, 1998.
2. Manuales de ArcView y Spatial Analyst, ESRI.
3. Manuales de Idrisi Kilimanjaro, 2003.
4. Panatier Y., VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D, Springer, 1996.
5. Informe del proyecto de Solarimetría publicado por la UES en septiembre de 1989. Financiamiento de OEA. Ejecución del Departamento de Física de la Universidad de El Salvador.
6. Duffie, John, Beckman, W. "Solar engineering of thermal processes". John Wiley & Sons. 1980.
7. Módulos de radiación solar publicados en el sitio web <http://www.courses.ait.ac.th/ED06.22/course1/lecs/>
8. Ib Troen y Erick Lundtang Petersen, "El atlas eólico europeo", Meteorology and Wind Energy Department, Risø National Laboratory, 1990.
9. WAsP courses and manuals, "Wind Atlas Analysis and Application Program", course notes 2002 y 2004.
10. "Small wind electric systems: an Ohio consumer's guide", US Department of Energy, 2005.
11. Eduardo Morales Manchame, "El viento en Centroamérica", principios de los años 80.
12. Mick Sagrillo, "Site Análisis for Wind Generators", abril-mayo de 1994.
13. Alexandre de Lemos Pereira, "Site selection for wind power project in El Salvador", Noviembre de 1994, convenio UCA-CEL-MARN.
14. Humberto Rodríguez, "Implementación de medidas para el desarrollo de un Mercado nacional sostenible para servicios de energía en el área rural de El Salvador", Ministerio de Economía, Mayo de 2005, CD de divulgación.
15. Sección Diagnóstico-Clima, vientos en El Salvador, "Plan Nacional de ordenamiento y desarrollo territorial", 2005.
16. Lisa M. Daniela, Sara Johnson, "Harvest the wind: A wind energy handbook for Illinois", por WINDUSTRY, 2004.
17. Trabajo de graduación "Extracción de agua subterránea con energía eólica en El Salvador" realizado por estudiantes de la Universidad Politécnica de El Salvador (UPES) en 1987.
18. "Primer plan nacional de desarrollo energético integrado 1988-2000", publicado en enero de 1988 por la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa (CEL).