

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Actualización del Mapa de Radiación Solar de
El Salvador.**

PRESENTADO POR:

**CARLOS ENRIQUE CORTEZ MÉNDEZ
EDGARD ALEXANDER MENJÍVAR URQUILLA
LESTER ENRIQUE PADILLA MARROQUÍN**

PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE, 2014

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título

:

**Actualización del Mapa de Radiación Solar de
El Salvador.**

Presentado por

:

CARLOS ENRIQUE CORTEZ MÉNDEZ
EDGARD ALEXANDER MENJÍVAR URQUILLA
LESTER ENRIQUE PADILLA MARROQUÍN

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor

:

ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS

San Salvador, Noviembre 2014

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS

AGRADECIMIENTOS.

Primeramente le agradezco a Dios por darme la vida, por darme fe y fortaleza a lo largo de mi carrera y mi vida. Agradezco a Dios por darme una familia y amigos que siempre me brindaron su apoyo y por todas esas personas que me ayudaron a salir adelante.

Agradezco a mis padres Carlos y Cecilia por darme el cariño y apoyo incondicional a lo largo de estos años, por brindarme la oportunidad de poder estudiar y completar desde mi formación básica hasta mis estudios universitarios. Les agradezco a mis padres por todos aquellos consejos y valores que me inculcaron, por aquellas palabras de aliento que me brindaron y por estar siempre en los momentos de mayor dificultad y sobre todo por ser excelentes ejemplos de vida a seguir.

Agradezco también a mis hermanos Carlos, Miguel y Gerardo por ser ejemplos a seguir y por los consejos y ayuda que me han brindado y compartir excelentes momentos juntos.

También agradezco a mis amigos, compañeros a lo largo de la carrera y de tesis por todos los trabajos que realizamos juntos y por compartir sus conocimientos y ayudar a hacer posible la culminación de esta etapa de mi formación académica.

Quiero agradecer a todos mis profesores que hicieron posible toda mi formación académica, por sus enseñanzas y consejos que me brindaron. También quiero agradecer a todas las personas que he conocido en el ambiente laboral por transmitirme sus conocimientos y ayudarme en mi crecimiento personal y profesional.

Carlos Enrique Cortez Méndez

AGRADECIMIENTOS.

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Le doy gracias a mis padres Carlos Padilla y Violeta de Padilla, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado. Y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. A mi hermano Omán Carlos por ser parte importante de mi vida y representar la unidad familiar todo el tiempo contando con su apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial a mis amigos Rubén, Mauricio y Amanda por estar a mi lado en los momentos más importantes a lo largo de mi formación académica apoyándome con sus consejos y manteniendo la moral en alto todo el tiempo.

Gracias al Ingeniero Jorge Zetino por su asesoría y consejos en el desarrollo de este trabajado de graduación, también a mis compañeros de Tesis Carlos Cortez y Edgar Menjivar por el trabajo y compromiso firme en la elaboración de la investigación y por la fe en que nuestro esfuerzo sería plasmado de forma satisfactoria.

Lester Enrique Padilla Marroquín.

AGRADECIMIENTOS.

“Todo inicio tiene un final”, o al menos eso hace entrever literalmente la frase, la cual contrasta paradójicamente con la realidad de muchos de nosotros, *eternos estudiantes*. Digo contrasta, porque para la vida académica en sí, no existe un final concreto. Una vez iniciado el camino, es difícil detenerse por completo. Vivir en constante aprendizaje es parte de nuestra naturaleza, una forma de vida continua, sin límites e infinita.

Agradezco a Dios, por regalarme vida, determinación y coraje para afrontar cada reto que se presentó durante la culminación de mi carrera universitaria.

A mi familia: mi papá Neftaly, mi hermana Rossibel y mi hermano Geovanny, por apoyarme indiscutiblemente, por creer en mí y hacer que mi esfuerzo se convirtiera en un esfuerzo familiar.

De manera especial, agradezco a mi madre Blanca Lidia Urquilla, por ser mi principal fuente de inspiración. Por sus palabras de aliento, confianza, paciencia y su increíble amor maternal único e inigualable. A ti y a tu memoria, dedico con mucho amor este gran esfuerzo hecho realidad.

A mis amigos Lester y Carlos, aleros de Tesis, por hacer realidad la frase: *“La unión hace la fuerza”*.

A Josué Arana, William Rivas, Gabriel Huiza y a todos mis amigos, quienes crecimos y compartimos desde los cimientos tantos sucesos y aventuras que marcarían nuestras vidas para siempre. A ellos les digo, nada es al azar, no nos permitamos dejar de crecer.

Edgard Alexander Menjivar Urquilla.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS.....	21
1.1 Información Básica.	23
1.1.1 Posición geográfica.	23
1.1.2 Información Climática General.	24
1.1.3 Geometría Solar.	26
Coordenadas Solares.	27
1.1.4 Radiación Solar.	28
1.1.5 Brillo solar (horas sol)	29
1.2 Antecedentes de mediciones y proyectos Solares.....	33
1.3 Metodología de la investigación.....	42
1.4 Análisis estadístico de datos meteorológicos.....	43
2.1 Introducción y generalidades del A.E.D.	46
2.1.2 ¿Qué es el A.E.D.?	46
2.2 Análisis Exploratorio de Datos.	52
2.2.1 Metodología para Análisis Estadístico.	54
2.2.2 Reportes estadísticos.....	55
Reporte Estación A-18.....	55
Reporte Estación A-31.....	56
Reporte Estación G-03.....	58
Reporte Estación L-4.....	59
Reporte Estación Z-02.	61
2.2.3 Análisis Comparativo con estudios anteriores.....	62

Análisis gráfico de la estación A18-SNET (meses con mayores diferencias).	64
Análisis gráfico de la estación Z-02-SNET (meses con mayores diferencias).	67
2.2.4 Tratamiento de datos atípicos en la series de datos.	70
2.2.5 Análisis con Media Recortada.	71
Análisis de correlación estaciones A-18.	75
Análisis de correlación estaciones Z-02.	77
2.3 Resultados de brillo solar en estaciones SNET.	81
2.4 Actualización de datos de brillo solar.	82
2.5 Análisis Anstromg.	88
2.5.1 Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge.	92
2.5.2 Zonas de Vida de El Salvador.	95
2.5.3 Ubicación de las estaciones con respecto a las zonas de vida.	97
2.5.5 Análisis por el modelo de Angstrom para estimaciones La Ceibita y Esquipulas, Guatemala.	100
Estación Esquipulas (Departamento de Chiquimula, Esquipulas).	100
Estación La Ceibita (Departamento de Jalapa, Monjas), Guatemala.	103
Estación meteorológica CEL (Centro de Gobierno).	104
Estación meteorológica secundaria.	105
2.5 Análisis Comparativo de radiación solar	106
3.1 Método de Interpolación de Kriging para estimación de potencial solar en El Salvador.	110
3.1.1 ¿Qué es Kriging?.....	110
3.1.2 Los métodos kriging	111
3.1.3 Teoría de la variable regionalizada.	112

3.1.4	Variografía.....	114
3.1.5	Modelos de semivariograma.....	117
3.1.6	La fórmula de Kriging Ordinario.....	122
3.2	Procedimientos y herramientas para elaboración de mapas de radiación solar de El Salvador.....	124
3.2.1	Conceptos básicos para elaboración de mapas.....	124
3.3	Elección de software para realización de mapas de radiación solar.....	135
3.3.1	QGIS.....	135
3.3.2	SURFER 12.....	139
3.3.3	SAGA.....	143
3.4	Elaboración de mapas de Radiación Solar.....	146
3.4.1	Guía rápida para elaboración de mapas de radiación solar.....	160
3.5	Resultados Obtenidos – Mapas de Radiación Solar.....	161
3.5.1	Análisis de Mapas de radiación solar.....	174
3.6	Algunos usos de los mapas de radiación solar.....	180
	CONCLUSIONES.....	182
	GLOSARIO.....	185
	BIBLIOGRAFÍA.....	187
	ANEXOS.....	188
4.1	Análisis Mapas de Radiación Series 2005-2013.....	188

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1.1 – Ubicación geográfica y distribución departamental de El Salvador (fuente: Visualizador geográfico CNR).</i>	23
<i>Figura 1.1.2 – Relieves de El Salvador (fuente: Geoportal CNR).</i>	24
<i>Figura 1.1.3 – Mapa de Zonas Climáticas de El Salvador (fuente: Boletín Climático MARN).</i>	25
<i>Figura 1.1.4 – Eclíptica Solar: Movimiento de la tierra alrededor del sol.</i>	26
<i>Figura 1.1.5 – Movimiento relativo de la tierra respecto al sol.</i>	27
<i>Figura 1.1.6 – Coordenadas Solares.</i>	27
<i>Figura 1.1.7 – Espectro electromagnético.</i>	28
<i>Figura 1.1.8 – Piranómetros para la medición de la radiación directa e indirecta.</i>	29
<i>Figura 1.1.9 – Heliofanógrafo o heliógrafo tipo Campbell Stokes.</i>	30
<i>Figura 1.1.10 – Bandas del heliógrafo.</i>	31
<i>Figura 1.1.11 – Sensor de Duración de Luz Solar Kipp & Zonnen.</i>	32
<i>Figura 1.2.1 – Actinógrafo tipo Robitzsch.</i>	37
<i>Figura 1.2.2 – Mapa de Radiación Solar promedio anual SWERA (kWh/m²/día).</i>	38
<i>Figura 1.2.3 – Mapa de Brillo Solar SWERA.</i>	39
<i>Figura 1.2.4 – Respuesta espectral piranómetro second class y secondary standar.</i>	40
<i>Figura 1.3.1 – Metodología de la Investigación.</i>	42
<i>Figura 2.1.1 – Representación del diagrama de cajas.</i>	52
<i>Figura 2.2.1 – Histograma de estación A18 – Anual.</i>	55
<i>Figura 2.2.2 – Histograma de estación A31 Anual.</i>	57
<i>Figura 2.2.3 – Histograma de Estación G3 –Anual.</i>	58
<i>Figura 2.2.4 – Histograma de estación L4 –Anual.</i>	60
<i>Figura 2.2.5 – Histograma de estación Z2 – Anual.</i>	61
<i>Figura 2.2.6 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de enero.</i>	64
<i>Figura 2.2.7 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de noviembre.</i>	65
<i>Figura 2.2.8 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de diciembre.</i>	66
<i>Figura 2.2.10 – Gráfica de análisis estadístico para estación Z2 –Mes de noviembre.</i>	68

<i>Figura 2.2.11 – Gráfica de análisis estadístico para estación Z2–Mes de diciembre.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 2.2.12 – Análisis grafico A18 –Brillo Solar.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.2.13 – Análisis grafico A31 –Brillo Solar.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 2.2.14 – Análisis grafico B-10 –Brillo Solar.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.2.15 – Análisis grafico G-3 –Brillo Solar.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 2.2.16 – Análisis grafico I-4 –Brillo Solar.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 2.2.17 – Análisis grafico Z-2 –Brillo Solar.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 2.2.18 – Análisis de correlación estación A-18.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 2.2.19 – Análisis de correlación estación Z-02.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 2.2.20 – Análisis grafico A-37 –Brillo Solar.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 2.2.21 – Análisis grafico H-14 –Brillo Solar.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.2.22 – Análisis grafico M-24 –Brillo Solar.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 2.2.23 – Análisis grafico N-2 –Brillo Solar.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.2.24 – Análisis grafico S-10 –Brillo Solar.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 2.3.1 – Análisis grafico Estaciones SNET –Brillo Solar.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 2.5.1 – Mapa de Centro America de Zonas de Vida según Dr. L. R. Holdridge.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 2.5.2 – Mapa de zonas de vida según Dr. L.R. Holdridge de El Salvador.</i>	<i>96</i>
<i>Figura 2.5.3 – Ubicación de las estaciones en el mapa de zonas de vida de Holdridge de El Salvador.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 2.5.4 – Empareamiento de estaciones por zona de vida.</i>	<i>97</i>
<i>Figura 2.5.5 – Mapa de zonas de Vida de Holdrige, Guatemala. Fuente: MAGA (2002). .</i>	<i>101</i>
<i>Figura 2.5.6 – Análisis Comparativo con gráficos de tendencias.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 3.1.1 – Mapa de Pluviosidad de El Salvador generado con el método de Interpolación de Kriging.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 3.1.2 – (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.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 3.1.3 – Cálculo de la diferencia cuadrada entre las ubicaciones asociadas.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 3.1.4 – Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico.....</i>	<i>115</i>

<i>Figura 3.1.5 – Modelo esférico.</i>	117
<i>Figura 3.1.6 – Modelo exponencial.</i>	118
<i>Figura 3.1.7 – Rango, meseta y nugget.</i>	119
<i>Figura 3.1.8 – Modelo de semivarianza esférica.</i>	120
<i>Figura 3.1.9 – Modelo de semivarianza circular.</i>	121
<i>Figura 3.1.10 – Modelo de semivarianza exponencial.</i>	121
<i>Figura 3.1.11 – Modelo de semivarianza gaussiana.</i>	122
<i>Figura 3.1.12 – Modelo de semivarianza lineal.</i>	122
<i>Figura 3.2.1 – Ejemplo de georreferenciación.</i>	125
<i>Figura 3.2.2 – Componentes de un SIG o GIS.</i>	126
<i>Figura 3.2.3 – Representación de los componentes de coordenadas en globo terráqueo.</i>	127
<i>Figura 3.2.4 – Componentes que conforman una retícula.</i>	128
<i>Figura 3.2.5 – Formato raster.</i>	131
<i>Figura 3.2.6 – Raster en forma de mapa base.</i>	133
<i>Figura 3.2.7 – Raster en forma de mapa de superficie.</i>	133
<i>Figura 3.2.8 – Raster en forma de mapa temático.</i>	134
<i>Figura 3.2.9 – Raster en forma de atributos de una entidad.</i>	135
<i>Figura 3.3.1 – QGIS 2.2.</i>	135
<i>Figura 3.3.2 – Interfaz de QGIS y georreferenciación de puntos de medición.</i>	136
<i>Figura 3.3.3 – Menú de configuración de parámetros para la realización de la interpolación de Kriging.</i>	136
<i>Figura 3.3.4 – Resultado de la interpolación de Kriging.</i>	137
<i>Figura 3.3.5 – Configuración de parámetros para la interpolación por método IDW.</i>	137
<i>Figura 3.3.6 – Resultado de Interpolación IDW.</i>	138
<i>Figura 3.3.7 – Resultado IDW (pseudocolor).</i>	138
<i>Figura 3.3.8 – Resultado IDW de forma discreta.</i>	138
<i>Figura 3.3.9 – Resultado IDW de forma continua+ isoclinas.</i>	138
<i>Figura 3.3.10 – Surfer 12.</i>	139

<i>Figura 3.3.11 – Configuración de parámetros para el método de interpolación de kriging en Surfer 12.</i>	140
<i>Figura 3.3.12 – Isolineas generadas por método de kriging y capa de mapa de El Salvador.</i>	140
<i>Figura 3.3.13 – Resultado de interpolación de kriging basado en isolineas.</i>	141
<i>Figura 3.3.14 – Resultado de interpolación de kriging y capa de límite geográfico de El Salvador.</i>	141
<i>Figura 3.3.15 – Resultado de interpolación de kriging de forma continua e isolineas.</i>	142
<i>Figura 3.3.16 – SAGA.</i>	143
<i>Figura 3.3.17 – Interfaz de SAGA y capas de mapas utilizadas.</i>	144
<i>Figura 3.3.18 – Interfaz de configuración para ejecución de Krging en SAGA.</i>	144
<i>Figura 3.3.19 – Resultado de interpolacion de krging obtenido por falta de configuración de parámetros.</i>	145
<i>Figura 3.4.1 – Tablas con valores de radiación solar y coordenadas.</i>	146
<i>Figura 3.4.2 – Selección de archivo para la creación del grillado o grid.</i>	147
<i>Figura 3.4.3 – Selección de valores para las variables X, Y y Z para la interpolación de Kriging.</i>	147
<i>Figura 3.4.4 – Seguimiento de pasos para Creacion de isolineas.</i>	148
<i>Figura 3.4.5 – Resultado de isolineas después de la interpolacion de Kriging.</i>	148
<i>Figura 3.4.6 – Interfaz del programa y capas agregadas (puntos, isolineas y delimitación de los departamentos).</i>	149
<i>Figura 3.4.7 – Exportación de isolineas a formato de AutoCAD.</i>	149
<i>Figura 3.4.8 – Selección de elemento polyline de archivos dxf.</i>	150
<i>Figura 3.4.9 – Exportacion de polilinea a shapefile.</i>	151
<i>Figura 3.4.10 – Cuadro de Selección de ruta de alojamiento de archivo “.shp” generado.</i>	151
<i>Figura 3.4.11 – Asignación de sistema de coordenadas.</i>	152
<i>Figura 3.4.12 – Selección de archivo “.shp” para importar a “.mps”</i>	152
<i>Figura 3.4.13 – Asignación de sistema de coordenadas en ilwis.</i>	153

<i>Figura 3.4.14 – Attribute Maps.</i>	154
<i>Figura 3.4.15 – Atributo de elevación.</i>	154
<i>Figura 3.4.16 – Atributo de elevación.</i>	154
<i>Figura 3.4.17 – Contorno de interpolación.</i>	155
<i>Figura 3.4.18 – Interpolación de Kriging.</i>	156
<i>Figura 3.4.19 – Exportando resultados.</i>	157
<i>Figura 3.4.20 – Raster to other format (multiple).</i>	157
<i>Figura 3.4.21 – Resultado de la interpolación a formato Raster.</i>	159
<i>Figura 3.5.1 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Enero.</i>	161
<i>Figura 3.5.2 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Febrero.</i>	162
<i>Figura 3.5.3 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Marzo.</i>	163
<i>Figura 3.5.4 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Abril.</i>	164
<i>Figura 3.5.5 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Mayo.</i>	165
<i>Figura 3.5.6 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Junio.</i>	166
<i>Figura 3.5.7 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Julio.</i>	167
<i>Figura 3.5.8 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Agosto.</i>	168
<i>Figura 3.5.9 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Septiembre.</i>	169
<i>Figura 3.5.10 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-October.</i>	170
<i>Figura 3.5.11 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Noviembre.</i>	171
<i>Figura 3.5.12 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Diciembre.</i>	172
<i>Figura 3.5.13 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Anual.</i>	173
<i>Figura 3.5.14 – Zonas geográficas de El Salvador.</i>	174
<i>Figura 3.5.15 – Mapa de enero actualizado.</i>	175
<i>Figura 3.5.16 – Mapa de enero SWERA.</i>	176
<i>Figura 3.5.17 – Mapa de junio actualizado.</i>	177
<i>Figura 3.5.18 – Mapa de junio SWERA.</i>	177
<i>Figura 3.5.19 – Mapa anual actualizado.</i>	178
<i>Figura 3.5.20 – Mapa anual SWERA.</i>	179
<i>Figura 4.1.1 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Enero (Serie 2005-2013).</i>	191

<i>Figura 4.1.2 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Febrero (Serie 2005-2013).</i>	<i>192</i>
<i>Figura 4.1.3 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Marzo (Serie 2005-2013).....</i>	<i>193</i>
<i>Figura 4.1.4 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Abril (Serie 2005-2013).....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 4.1.5 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Mayo (Serie 2005-2013).....</i>	<i>195</i>
<i>Figura 4.1.6 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Junio (Serie 2005-2013).....</i>	<i>196</i>
<i>Figura 4.1.7 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Julio (Serie 2005-2013).....</i>	<i>197</i>
<i>Figura 4.1.8 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Agosto (Serie 2005-2013).....</i>	<i>198</i>
<i>Figura 4.1.9 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Septiembre (Serie 2005-2013). ..</i>	<i>199</i>
<i>Figura 4.1.10 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-October (Serie 2005-2013).....</i>	<i>200</i>
<i>Figura 4.1.11 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Noviembre (Serie 2005-2013)..</i>	<i>201</i>
<i>Figura 4.1.12 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Diciembre (Serie 2005-2013). ..</i>	<i>202</i>
<i>Figura 4.1.13 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Anual (Serie 2005-2013).....</i>	<i>203</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1.1 – Especificaciones técnicas de un sensor de duración de luz solar.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 1.2.1 - Promedios Mensuales de radiación Global diaria (w/m²).</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 1.2.2 - Promedios Mensuales de radiación Global diaria (w/m²).</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 1.4.1 - Estaciones del MARN.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 1.4.2 - Estaciones del MARN (con medición de radiación).</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 2.2.1 - Variables a analizar en el A.E.D.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 2.2.2 - Resumen de cálculos estadísticos estación A-18.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 2.2.3 - Reporte estación A-31.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 2.2.4 - Reporte estación G-03.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 2.2.5 - Reporte estadístico estación L-4.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 2.2.6 - Reporte estadístico estación Z-02.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 2.2.7 - Análisis comparativo por media aritmética de datos SNET vs SWERA.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 2.2.8 - Resumen de medias recortadas para las estaciones a 5%, 15% y 25%.</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 2.2.9 - Datos para análisis de correlación estación A-18.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 2.2.10 - Datos para análisis de correlación estación Z-02.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 2.3.1 - Brillo solar de las estaciones con media truncada al 25%.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 2.4.1 - Tabla resumen de cantidad de datos de brillo solar por estación.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 2.4.2 - Resumen de número de años registrado en el proyecto Solimetría y SWERA-UCA.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 2.4.3 - Cantidad de bandas procesadas (Fuente tabla 2-12 SWERA).</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 2.4.4 - Cantidad de datos solarimetría SWERA-UCA.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 2.4.5 - Pesos de datos solarimetría+SWERA.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 2.4.6 - Promedios Datos SNET – UES+Solimetría+SWERA.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 2.5.1 - Duración astronómica promedio del día para cada estación “Nd” [horas]. ...</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 2.5.2 - Radiación extraterrestre [Ho] promedio para cada estación.</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 2.5.3 - Coeficientes de estaciones que contienen datos de brillo solar y radiación solar.</i>	<i>91</i>

<i>Tabla 2.5.4 - Clasificación de zonas de vida de Holdridge según Organización internacional de investigación científica multidisciplinaria.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 2.5.5 - Clasificación de zonas de vida de en El Salvador.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 2.5.6 - Datos de radiación calculados por el modelo de Angstrom para estimación de los mapas de potencial solar</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 2.5.7 - Radiación solar de las 11 estaciones calculadas por método de Angstrom....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 2.5.8 - Radiación solar mensual y anual de todas las estaciones.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 2.5.9 - Duración astronómica mensual y anual promedio presentada en horas.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 2.5.10 - Radiación solar extraterrestre mensual y anual promedio presentada en kWh/m²/día.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 2.5.11 - Brillo solar mensual y anual promedio presentado en horas.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 2.5.12 - Radiación solar mensual y anual promedio Est. Esquipulas.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 2.5.13 - Duración astronómica mensual y anual promedio presentada en horas. ..</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 2.5.14 - Radiación solar extraterrestre mensual y anual promedio presentada en kWh/m²/día.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 2.5.15 - Brillo solar mensual y anual promedio presentado en horas.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 2.5.16 - Radiación solar mensual y anual promedio Est. La Ceibita.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 2.5.17 – Irradiancia solar mensual y anual promedio de Est. CEL.</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 2.5.18 - Radiación solar mensual y anual promedio de estaciones secundarias.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 2.5.19 - Análisis Comparativo y sus diferencias %.</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 3.4.1 - Pasos para la realización de los mapas.</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 3.5.1 - Análisis Comparativo y sus diferencias %.</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 4.1.1 – Estaciones meteorológicas para análisis 2005-2013.</i>	<i>188</i>
<i>Tabla 4.1.2 – Niveles de irradiación periodo 2005-2013 (kWh/m²).</i>	<i>189</i>

INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la energía que dispone la superficie terrestre procede del Sol, y esta permite que la vida sobre nuestro planeta sea posible. Todas las variables climáticas dependen, en mayor o menor medida, de la energía y comportamiento del sol.

Del conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol, la radiación solar, medida en kWh/m², representa la energía emitida por el sol y representa el área bajo la curva de densidad de potencia-tiempo, es una de las variables meteorológicas más importantes, por ser la principal fuente de energía utilizada en la gran mayoría de procesos en el mundo. Depende primordialmente de factores astronómicos como latitud y topografía del lugar, la reflectividad del suelo, la cantidad de cielo cubierto de nubes, inclinación de la tierra sobre su eje, el contenido de vapor de agua y de aerosoles de la atmósfera, día del año (posición de la órbita terrestre), etc.

Esta investigación está orientada a la determinación del potencial solar en el país, fundamentándose en un estudio exhaustivo del recurso, cuya primera etapa consiste en la recuperación de Información primaria proveniente de las estaciones meteorológicas del MARN a nivel Nacional e información secundaria de estudios o antecedentes solares y de otras estaciones meteorológicas de confianza en el país (CEL) y extranjero (INSIVUMEH Guatemala). En la segunda etapa, toda la información recolectada será procesada con Técnicas de Geoestadística, tecnologías SIG, modelo de Angstrom e interpolación de Kriging para determinar los mapas de radiación solar.

Existe la necesidad de contar con información precisa y actualizada sobre distintos parámetros referentes al potencial solar en El Salvador, que permitan el desarrollo de la industria solar Fotovoltaica y Térmica, lo que proporcionará la diversificación de la matriz energética del país, además de la planeación de cosechas agrícolas, monitoreo del cambio climático, por mencionar algunas.

Alcanzar un conocimiento detallado del recurso solar es un objetivo prioritario para el país. El Mapa de Radiación Solar permite conocer las zonas potenciales para el aprovechamiento

energético, debido a la variabilidad del recurso solar tanto espacial como temporal. Es un dato importante para optimizar el dimensionamiento y diseño de los equipos e instalaciones fotovoltaicas. Esta información constituye un valioso aporte para los sectores productivos público y privado en El Salvador con la finalidad de promover la inversión e investigación en el uso de la energía solar como fuente alternativa renovable y no contaminante.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

Realizar la actualización del mapa de radiación solar de El Salvador.

OBJETIVO ESPECÍFICO.

1. Construir los mapas actualizados de recurso solar promedio mensual para El Salvador, basado en los cálculos teóricos y el método de interpolación de Kriging.
2. Construir los mapas actualizados de recurso solar promedio Anual para El Salvador, basado en los cálculos teóricos y el método de interpolación Kriging.
3. Realizar procesamiento de calidad para los datos a utilizar.
4. Reducir la incertidumbre asociada a las decisiones de inversión y desarrollo para proyectos de energía solar.
5. Determinar métodos y herramientas factibles para el desarrollo de los mapas de radiación solar.

Capítulo I

Conceptos, generalidades y
antecedentes.

1.1 Información Básica.

1.1.1 Posición geográfica.

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

Además está situado en la parte norte del cinturón tropical de la Tierra, es decir, dentro del cinturón tropical comprendido entre el trópico de Cáncer (23° N) y el ecuador, que se caracteriza por un alto grado de potencial solar.

Las ilustraciones 1.1.1 y 1.1.2 muestran la división geográfica departamental y los relieves de El Salvador.



Figura 1.1.1 – Ubicación geográfica y distribución departamental de El Salvador (fuente: Visualizador geográfico CNR).

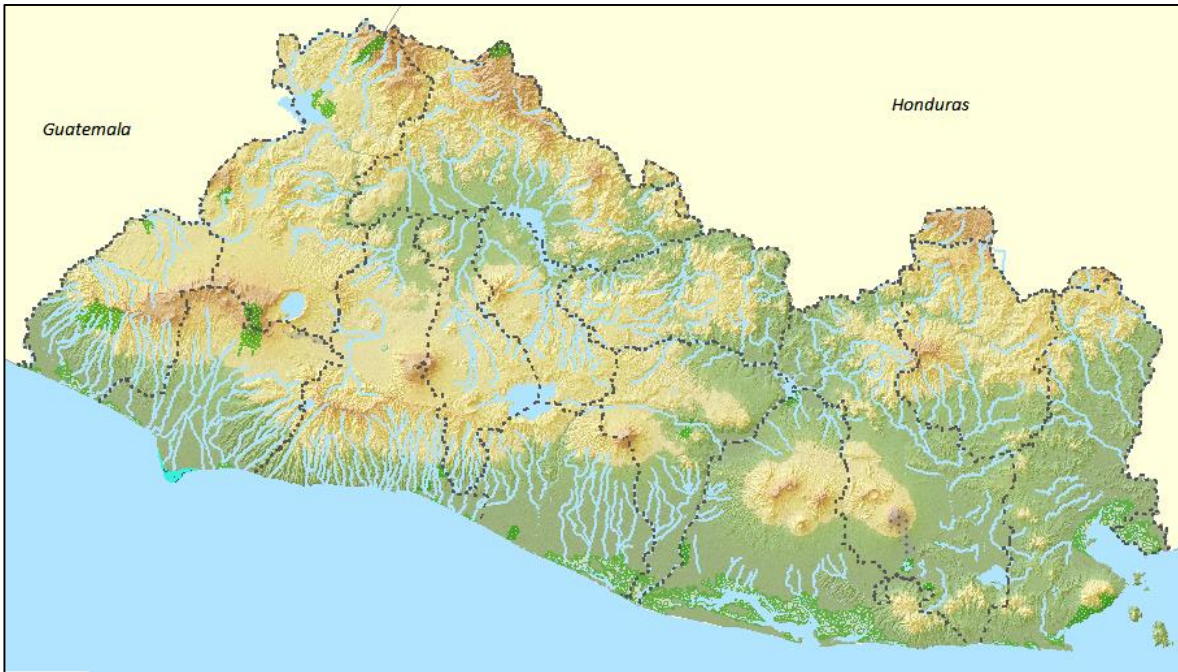


Figura 1.1.2 – Relieves de El Salvador (fuente: Geoportal CNR).

1.1.2 Información Climática General.

Al igual que la mayor parte de Mesoamérica, en El Salvador existe gran variabilidad en las características del clima de un año a otro.

Está situado en la parte exterior del cinturón climático de los trópicos. Durante el año, los cambios en las temperaturas son pequeños, en contraste a las lluvias que muestran grandes oscilaciones en el transcurso del año. Se presentan dos estaciones (seca y lluviosa) y dos transiciones (seca lluviosa y lluviosa seca). Al final de la estación seca ocurren las máximas temperaturas en los meses de marzo y abril. Otra característica de los trópicos exteriores son los vientos alisios que predominan procedentes del sector Noreste. El país presenta un buen desarrollo del sistema de brisas de mar en las planicies costeras, moviéndose hacia los valles y planicies internas después del mediodía.

Una característica especial del clima de Centroamérica son los vientos nortes que transportan masas de aire fresco hacia la región. Según la altura en metros sobre el nivel

medio del mar, se distinguen las siguientes tres zonas térmicas en El Salvador, de acuerdo al promedio de la temperatura ambiente a lo largo del año¹:

- *Sabana tropical caliente o tierra caliente con elevaciones desde 0 a 800 m.s.n.m.*
Promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 27 a 22 °C en las planicies costeras y de 28 a 22 °C en las planicies internas.
- *Sabana tropical calurosa o tierra templada con elevaciones desde 800 a 1200 m.s.n.m.*
Promedio de temperatura disminuyendo con la altura de 22 a 20 °C en las planicies altas y de 21 a 19 °C en las faldas de montañas.
- *Tierras frías cuyas elevaciones van de 1200 a 2700 m.s.n.m.*
De 20 a 16 °C en planicies altas y valles, de 21 a 19 °C en faldas de montañas y de 16 a 10 °C en valles y hondonadas sobre 1,800 metros.

NOTA: La mayor elevación de El Salvador se encuentra en el Pital, departamento de Chalatenango, con 2,700 metros.

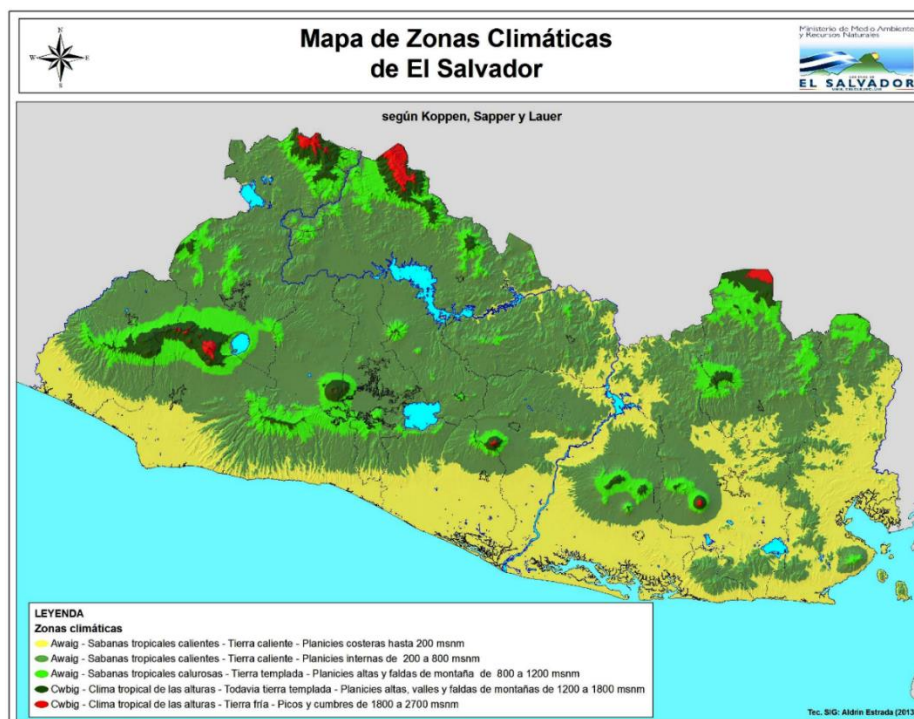


Figura 1.1.3 – Mapa de Zonas Climáticas de El Salvador (fuente: Boletín Climático MARN).

¹ Boletín Climatológico SNET [en línea]: <http://www.snet.gov.sv/ver/meteorologia/clima/climatico+anual/>

1.1.3 Geometría Solar.

El sol es el centro de nuestro sistema planetario y en torno a él, describen sus órbitas todos los planetas, entre ellos la Tierra. Su distancia a la Tierra es de 149,6 MKm y no varía apenas en el transcurso del año, ya que la trayectoria de la tierra es una elipse de excentricidad muy pequeña.

La órbita elíptica de la tierra alrededor del Sol define una trayectoria de este tipo, en uno de cuyos focos está el Sol. El plano que contiene esta órbita se denomina Plano de la Eclíptica, porque en él se verifican los eclipses del Sol y de Luna. El eje de rotación terrestre forma un ángulo constante de $23^{\circ} 27''$, denominado Oblicuidad de la Eclíptica.

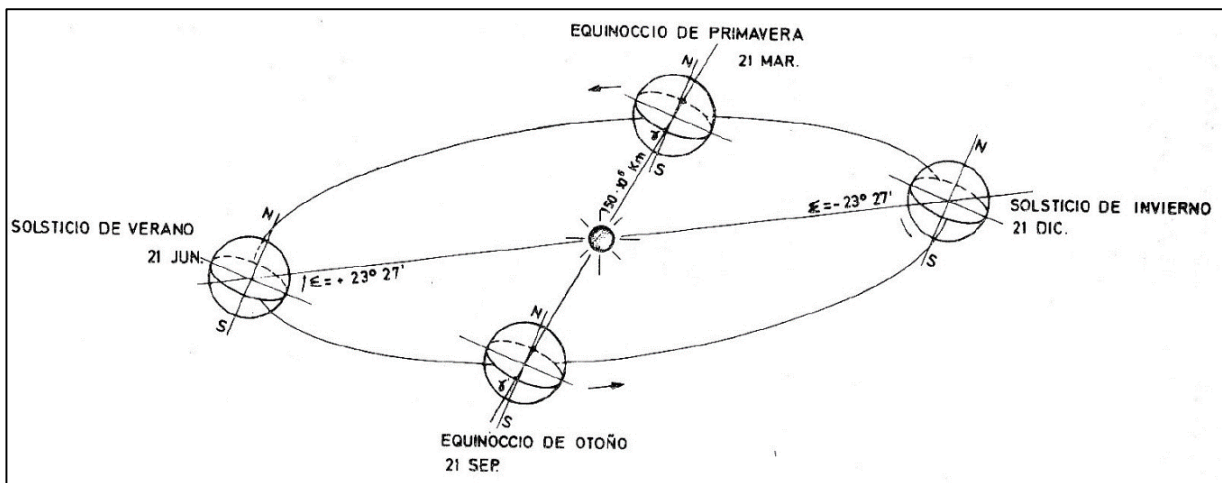


Figura 1.1.4 – Eclíptica Solar: Movimiento de la tierra alrededor del sol.

Los puntos de intersección de la Eclíptica con el Ecuador son los puntos Equinocciales, llamados así porque en las fechas en que el Sol pasa por ellos el día es igual a la noche en todos los puntos de la Tierra.

La recta perpendicular a la línea equinoccial en el plano de la eclíptica corta a ésta en dos puntos, de mínima y máxima declinación. Estos puntos son los llamados *Solsticio de verano* y *Solsticio de invierno*. Se llaman así porque en sus proximidades, el Sol conserva sensiblemente, durante unos días, la misma declinación (Sol quieto).

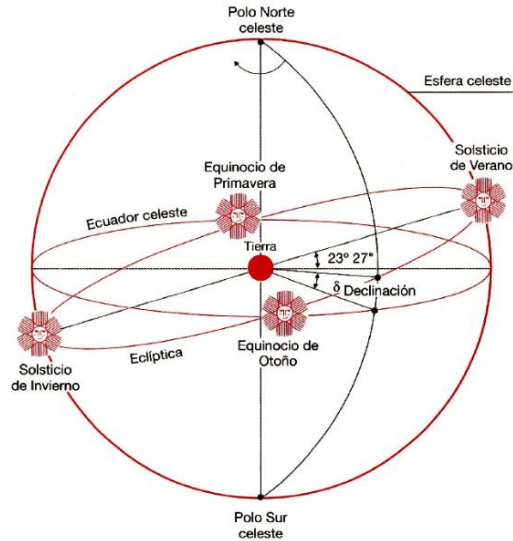


Figura 1.1.5 – Movimiento relativo de la tierra respecto al sol.

Coordenadas Solares.

La posición del Sol en cada instante respecto a una posición o punto de observación en la superficie terrestre viene definida por 2 coordenadas: altura solar y azimut solar.

La Altura Solar, α , es el ángulo que forma la línea que une el centro del Sol con el punto de observación y la superficie horizontal.

El Azimut Solar, Ψ , es el ángulo que forma la proyección horizontal de la línea que une el centro del Sol con el meridiano del lugar (dirección Norte- Sur) con origen en el Sur.

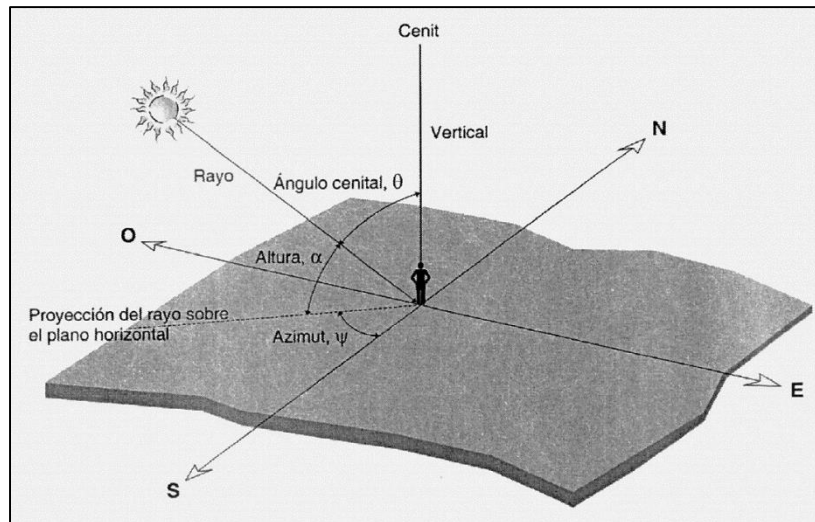


Figura 1.1.6 – Coordenadas Solares.

1.1.4 Radiación Solar.

En términos físicos, la energía solar es la energía procedente del sol. En el contexto de las energías renovables, entendemos por energía solar la luz solar que incide en la tierra en sus componentes visibles e invisibles (infrarrojo y ultravioleta). La intensidad del flujo energético solar que incide en la tierra depende de la latitud del sitio: mientras más cerca del ecuador, la luz incide de forma más perpendicular en la tierra, es decir con una intensidad más alta. Por otro lado, la intensidad varía según la época del año, el momento del día y las condiciones atmosféricas.

Se entiende como *radiación solar* a la radiación electromagnética que proviene del Sol, 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 , 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 . La cantidad de energía radiada por el sol se estima a una razón de 3.8×10^{23} kW.

En el contexto de los recursos energéticos renovables, el término radiación se usa para cuantificar la densidad superficial de energía solar incidente en una superficie plana. La radiación se mide entonces en vatio-horas por metro cuadrado (Wh/m^2).

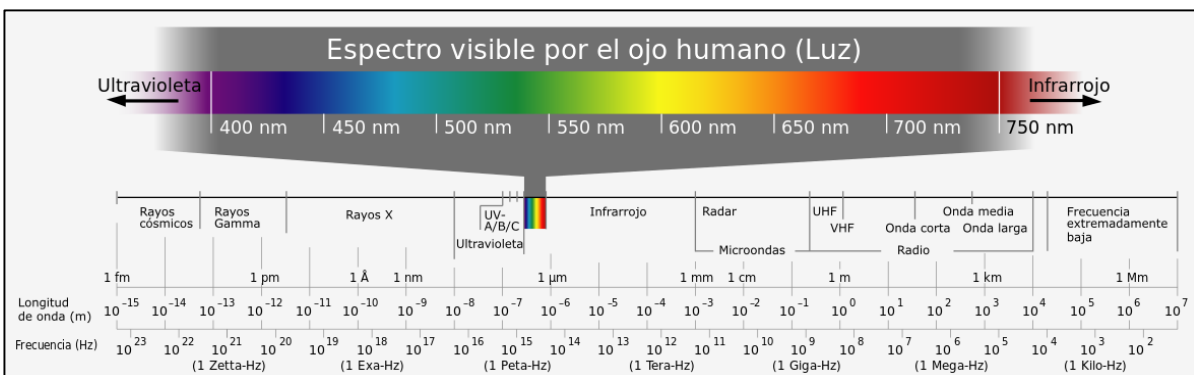


Figura 1.1.7 – Espectro electromagnético.

La radiación terrestre se mide con un piranómetro y usando dispositivos complementarios como una banda de sombrero, se puede separar la radiación directa de la difusa, la suma de estas anteriores conforman lo que se conoce como *radiación global*.

Para obtener una buena medición con un piranómetro se requiere de mucho cuidado porque los reflejos de obstáculos en el entorno del medidor pueden influir a las mediciones.

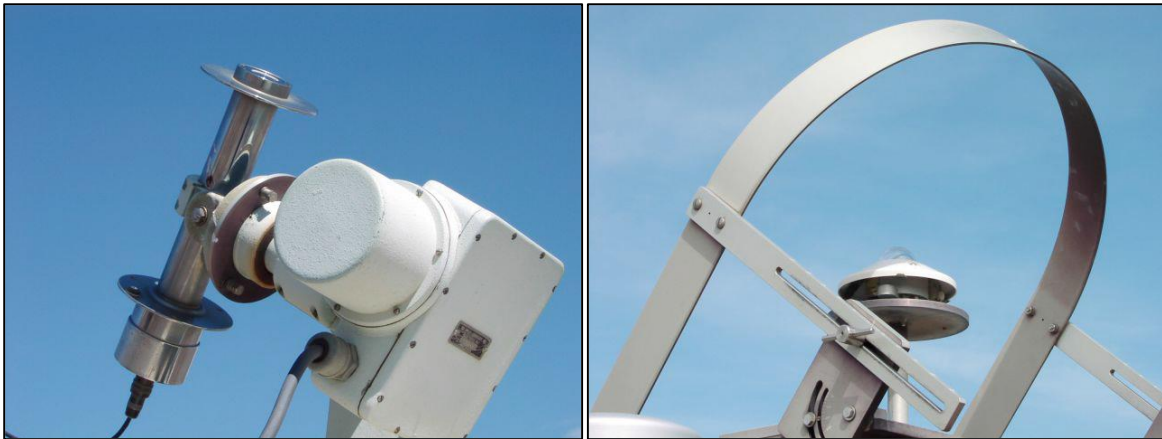


Figura 1.1.8 – Piranómetros para la medición de la radiación directa e indirecta.

1.1.5 Brillo solar (horas sol)

La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer². Este elemento meteorológico es importante en casi todas las formas de actividad y empresas humanas. Sectores como el agrícola, forestal, turismo, construcción, deportes y energía, dependen y planifican aspectos del cumplimiento de sus programas y actividades futuras sobre la perspectiva de disponer de suficiente horas de brillo solar durante el día.

Las horas-sol facilitan el diseño preliminar de sistemas fotovoltaicos, porque el cálculo de la energía que genera el sistema (Wh), se reduce al producto de la potencia máxima del sistema (W) y las horas-sol (h).

El conocimiento adecuado del régimen de brillo solar permite, estimar características cuantitativas de la nubosidad y radiación solar de forma que se pueda tener una idea sobre la disponibilidad luz del sol para el aprovechamiento de la energía solar en el país.

Para determinar la duración del brillo solar, se utiliza el Heliofanógrafo o heliógrafo. Es el instrumento que nos permite medir la duración del brillo solar, es una esfera de cristal que

² Series de Brillo Solar en Costa Rica, MINAE/IMN.

concentra los rayos solares y quema una faja subdividida en intervalos de tiempo, a medida que la inclinación del sol va variando, va quemando la faja, al disminuir la intensidad del brillo solar, ya sea por nubosidad u otras razones, la faja deja de quemarse. Esto nos permite obtener un registro de las horas de sol que se tienen en el día. En la banda se encuentran marcadas las horas y medias horas, lo que permite leer las horas y décimos de hora.



Figura 1.1.9 – Heliofanógrafo o heliógrafo tipo Campbell Stokes.

Existen tres tipos distintos de bandas para adecuar las mediciones según la época del año y el camino recorrido por el Sol (Ilustración 1.1.10). En el Hemisferio Norte, desde el comienzo de marzo hasta mitad de abril; y desde inicio de septiembre hasta mediados de octubre (alrededor de cada equinoccio) se utilizan bandas rectas, llamadas bandas equinocciales.

Desde mediados de octubre hasta fin de febrero se utilizan bandas curvas cortas, y durante el resto del año, desde mediados de abril hasta agosto, se usan bandas curvas largas. En el Hemisferio Sur se debe invertir el uso de las bandas.

Es importante que el heliógrafo no sea interferido por barreras cercanas u otros obstáculos del terreno. Se debe colocar con su base completamente nivelada a la altura de un metro, sin alteración por viento, humedad, temperatura o cercanía de elementos que puedan

bloquear la incidencia de los rayos solares. Además, para que los rayos del Sol alcancen el heliógrafo sin impedimento alguno causado por el instrumento mismo, éste se debe colocar de forma paralela al eje terrestre, y se debe hacer coincidir la escala de latitudes en su montura con la latitud real del lugar.

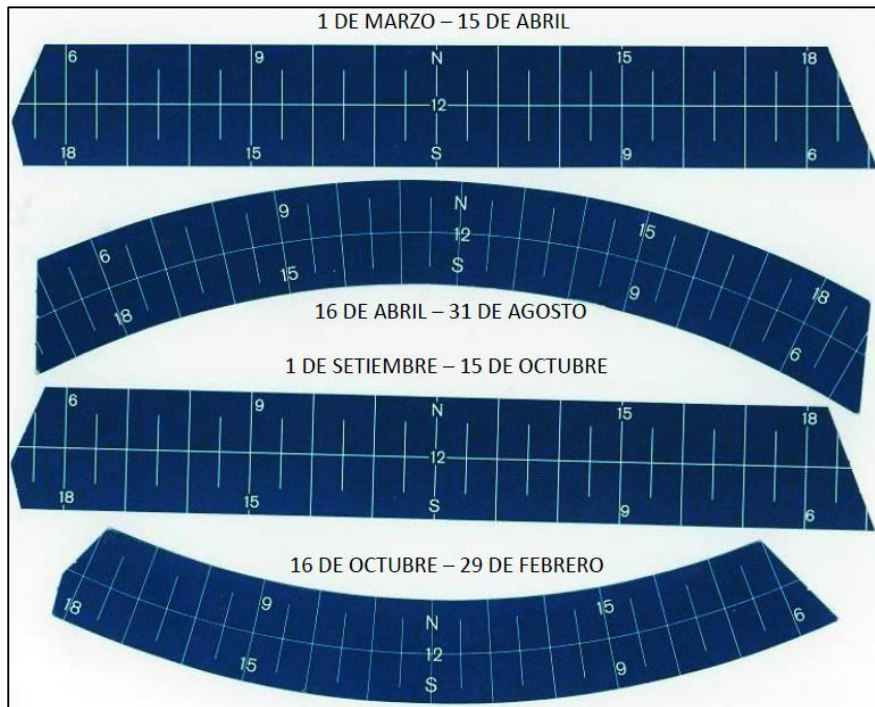


Figura 1.1.10 – Bandas del heliógrafo.

De acuerdo a las condiciones atmosféricas y el instrumento mismo, el valor del umbral mínimo de la irradiancia solar que incidirá un registro está dentro de los límites de **70 a 300 W/m^2** , los cuales traducidos en tiempo posterior a la salida del sol o anterior a su ocaso, representan de 10 a 20 minutos³.

Algunos inconvenientes de este sistema:

- Tener que contar con personal que cambie a diario las bandas.
- Quedarse sin suministro de bandas de quemado (problema que ya ha surgido en el MARN).

³ Manual de Instrumental Meteorológico y Métodos de Observación, SMN/CONAGUA/Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México.

- La esfera de cristal necesita limpieza periódica (estos procedimientos de limpieza se deben efectuar con gran cuidado para no perturbar la transparencia de la esfera).
- Ajustar de manera incorrecta la banda del Heliografógrafo (generando mediciones erróneas), entre otras.

Actualmente ya existen equipos que permiten realizar la misma función, sin mayores requerimientos que una conexión eléctrica. Estos son los **Sensores de Duración de Luz Solar**⁴.

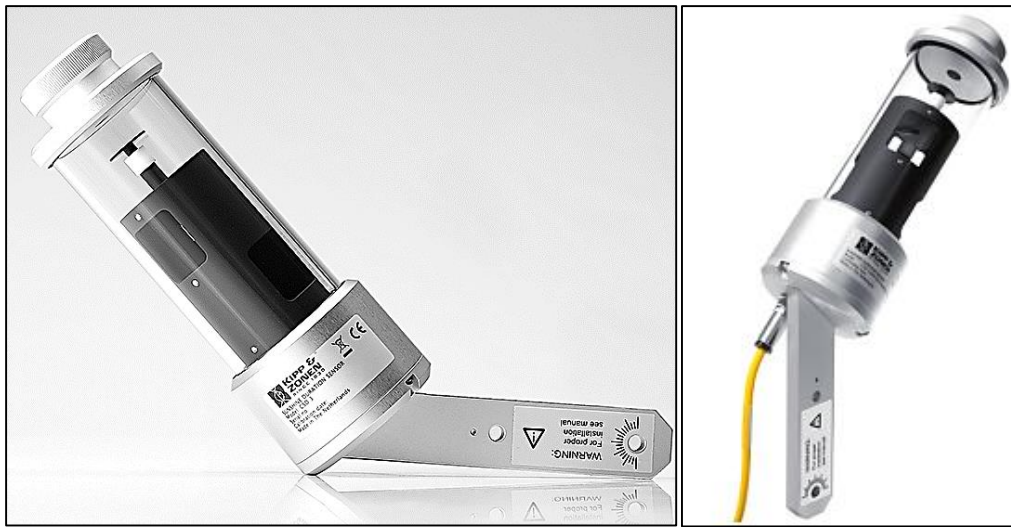


Figura 1.1.11 – Sensor de Duración de Luz Solar Kipp & Zonnen.

Ventajas:

- instrumento de poco mantenimiento y de baja potencia, para emplazamientos remotos y un uso en red.
- Conexión impermeable para facilitar la instalación y el mantenimiento.
- Sensor de humedad para indicar la necesidad de cambiar el cartucho de secado.

⁴ <http://www.kippzonen.es/Product/218/CSD-3-Sensor-de-Duracion-de-luz-Solar#.VCRBufI5MYG>

Algunas especificaciones del sistema:

Especificaciones

Rango Espectral	400 a 1100 nm
Rango de Temperatura	-40 a +70 °C
Señal de Luz Solar	$1 \pm 0.1V$ (Radiación directa $> 120 W/m^2$)
Precisión	$>90\%$ (horas mensuales de luz solar)
Precisión	$>90\%$ (señal directa para cielo descubierto)
Señal de Salida Analógica	$1 mW/Wm^2$
No-estabilidad	$< 2\%$ variación por año
Dependencia a la temperatura	$< 0.1 \%/^{\circ}C$
Tiempo de respuesta	$< 1 mS$
Fuente de alimentación	12 VDC

Tabla 1.1.1 – Especificaciones técnicas de un sensor de duración de luz solar.

1.2 Antecedentes de mediciones y proyectos Solares.

Se puede mencionar como principales antecedentes, dentro de los primeros estudios realizados en el país el proyecto de *Solarimetría* ejecutado por el departamento de Física, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador (UES) y ejecutado de 1986 a 1987 con el financiamiento de la Organización de Estados Americanos (OEA). Este proyecto fue la primer fuente de información, la cual finalizó con la creación de tablas de radiación solar y brillo solar (horas de luz solar) publicadas en un documento de septiembre de 1989⁵. En este documento se tenían registrados datos de radiación solar de 10 estaciones meteorológicas y brillo solar (horas de luz solar) en 22 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). Las cuales se detallan a continuación:

⁵ Proyecto Especial de Solarimetría, 1989.

Código	Departamento	Nombre	Latitud	Longitud	Elevación (m)
H-8	Ahuachapán	Ahuachapán	13.94°	89.86°	725
A-18	Santa Ana	Finca Los Andes	13.88°	89.64°	1770
A-31	Santa Ana	Los Planes de Montecristo	14.40°	89.36°	1851
A-35	Santa Ana	Cerro Verde	13.83°	89.62°	2027
T-6	Sonsonate	Acajutla	13.57°	89.83°	15
L-4	La Libertad	San Andrés	13.81°	89.41°	460
L-8	La Libertad	Santa Tecla	13.69°	89.29°	960
S-5	San Salvador	Observatorio	13.70°	89.20°	700
S-27	San Salvador	Estación Matriz	13.69°	89.14°	638
G-3	Chalatenango	Nueva Concepción	14.12°	89.29°	320
G-13	Chalatenango	Las Pilas	14.36°	89.09°	1960
V-6	San Vicente	Sta. Cruz Porrillo	13.44°	88.80°	30
V-13	San Vicente	Apastepeque	13.70°	88.75°	570
U-6	Usulután	Santiago de María	13.48°	88.47°	920
U-11	Usulután	Beneficio La Carrera	13.33°	88.52°	75
M-6	San Miguel	San Miguel	13.44°	88.12°	80
M-18	San Miguel	Sesori	13.71°	88.36°	195
M-23	San Miguel	Cerro Cacahuatique	13.76°	88.23°	1370
Z-2	Morazán	San Francisco Gotera	13.70°	88.11°	250
Z-4	Morazán	La Galera	14.04°	88.09°	1900
N-15	La Unión	La Unión	13.33°	87.88°	95
B-10	Cabañas	Cerrón Grande	13.94°	88.91°	245

Tabla 1.2.1 - Promedios Mensuales de radiación Global diaria (w/m^2).

Las estaciones que contaban con actinógrafo para medir la radiación global fueron las siguientes: Ahuachapán, Los Planes de Montecristo, el observatorio y su estación matriz en

San Salvador, Nueva Concepción y Las Pilas en Chalatenango, Apastepeque, el Beneficio La Carrera en Usulután, La Unión, La Galera en Morazán (Tabla 1.2.1).

A continuación se presenta el promedio mensual de radiación de las estaciones meteorológicas del Proyecto de Solarimetría.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Ahuachapán	211.42	233.33	248.06	246.11	221.50	206.65	230.96	219.45	193.56	200.61	204.91	200.52
Finca Los Andes	178.04	205.88	228.26	222.82	190.96	176.69	206.88	197.99	172.13	163.86	162.48	158.79
Los Planes de Montecristo	186.12	197.19	203.28	188.96	154.19	141.41	184.56	166.66	133.83	158.11	173.24	173.48
Cerro Verde	186.22	198.74	208.44	194.86	181.78	175.14	221.85	213.29	172.16	171.30	183.20	178.57
Acajutla	198.93	217.62	227.94	219.36	198.59	188.73	209.07	204.14	185.86	186.11	192.45	188.70
San Andrés	201.01	219.34	229.93	226.65	212.44	202.17	225.60	218.32	194.02	193.20	196.06	193.30
Santa Tecla	209.95	228.58	240.16	226.77	205.21	192.75	221.19	213.31	190.39	189.74	200.19	200.66
Observatorio	199.82	213.59	234.40	216.56	188.03	185.74	215.56	213.32	186.07	198.05	195.00	193.24
Estación Matriz	209.20	236.13	252.83	246.06	219.06	209.40	237.50	234.05	206.75	206.35	208.65	197.47
Nueva Concepción	200.14	224.87	236.13	234.62	220.52	208.92	223.50	218.40	200.43	201.57	195.29	183.41
Las Pilas	156.43	169.08	187.15	177.22	157.84	155.75	171.79	177.22	138.79	149.35	142.08	144.56
Sta. Cruz Porrillo	196.90	218.04	229.31	222.94	207.26	198.26	216.22	217.11	196.41	193.43	190.68	190.55
Apastepeque	193.40	213.16	222.63	217.87	198.21	191.29	209.74	210.34	190.99	187.08	189.42	187.16
Santiago de María	208.69	229.89	240.98	229.09	199.86	189.77	223.05	219.33	187.68	189.50	197.79	200.56
Beneficio La Carrera	199.47	220.71	232.01	225.56	202.06	196.89	213.60	217.08	197.76	192.35	195.59	191.97
San Miguel	195.76	218.04	231.89	228.17	211.11	203.29	220.01	222.27	201.58	198.41	190.68	189.44
Sesori	211.80	234.95	246.53	237.27	214.12	207.18	225.60	219.90	195.60	194.44	199.07	200.23
Cerro Cacahuatique	191.78	217.70	229.93	202.64	175.64	176.58	214.29	207.15	184.46	177.29	181.98	173.51
San Francisco Gotera	204.79	228.29	239.27	234.67	213.68	211.05	226.79	226.18	208.58	206.05	201.06	197.00
La Galera	171.88	203.63	215.22	204.76	175.15	162.98	202.12	186.86	153.39	147.41	153.45	153.86
La Unión	199.56	219.49	229.67	223.83	199.90	197.05	217.45	215.75	194.76	197.72	195.63	193.12
Cerrón Grande	201.15	219.13	243.87	231.95	211.63	202.75	224.51	223.66	197.45	200.42	198.30	194.43

Tabla 1.2.2 - Promedios Mensuales de radiación Global diaria ⁶(w/m2).

⁶ Los años de registros corresponden al periodo 1969 a 1983, con variaciones en cada una de las estaciones meteorológicas.

Es necesario aclarar que las mediciones de radiación solar global fueron realizadas con Actinógrafos tipo Robitzsch también llamado Piranógrafo Bimetálico tipo Robitzsch. 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, Dra. 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. Las mediciones de brillo solar global se realizaron con Heliógrafos tipo Campbell Stokes. Los años de registros corresponden al periodo 1957 a 1984, con variaciones en cada una de las estaciones meteorológicas.

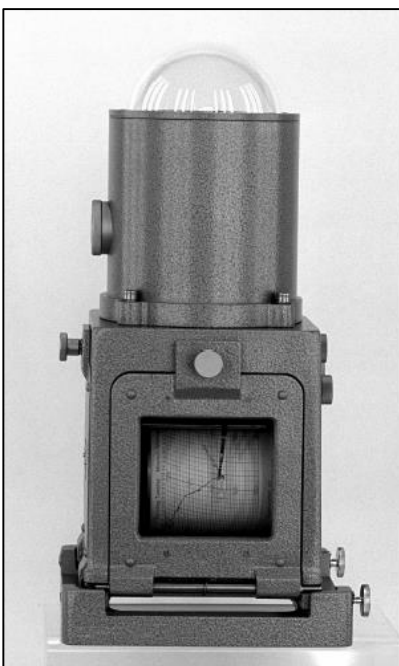


Figura 1.2.1 – Actinógrafo tipo Robitzsch.

En el año 2005 el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas” y el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) presentan el documento “*Determinación del potencial solar y Eólico en El Salvador*”, investigación enmarcada dentro del proyecto SWERA.

El proyecto SWERA (siglas en inglés) “Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar”, fue 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).

En el 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. 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. 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.

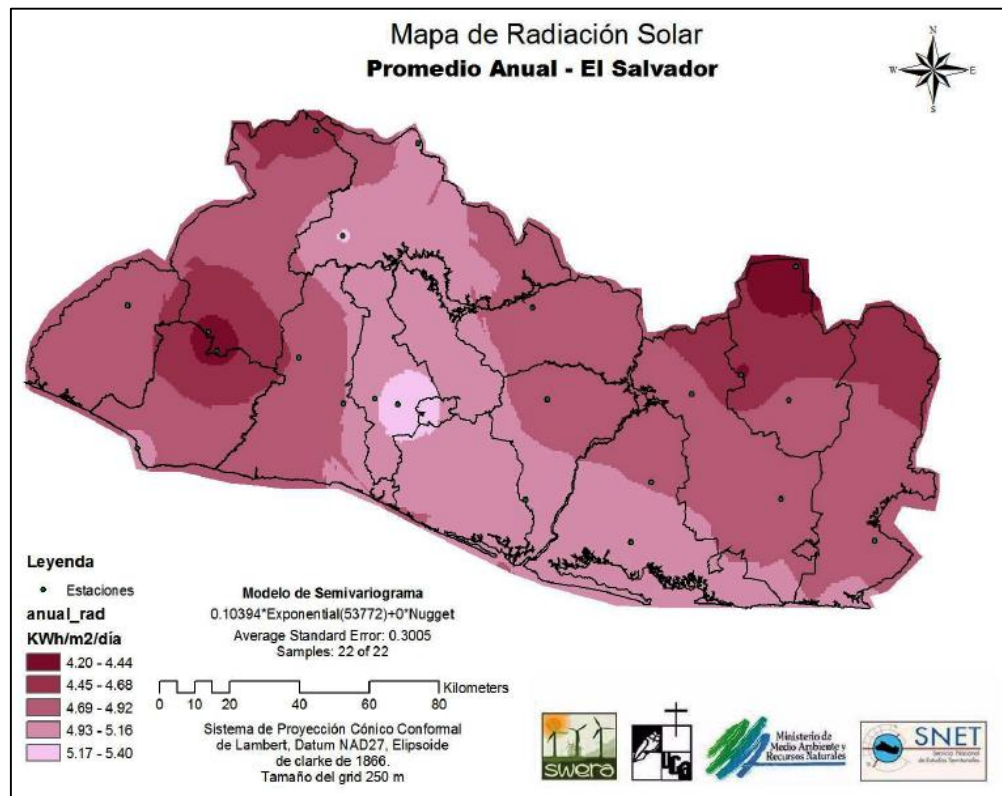


Figura 1.2.2 – Mapa de Radiación Solar promedio anual SWERA (kWh/m²/día).

Es importante mencionar, que para la realización del proyecto SWERA fue necesario recuperar toda la 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 (SNET) 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.

Para el caso de radiación solar se recuperaron y digitalizaron 2663 bandas, para el caso de brillo solar se recuperaron 84,089 bandas, de las cuales únicamente se digitalizaron los últimos años⁷ de 17 estaciones, es decir, 7,854 bandas que representan un 9.26% del total.

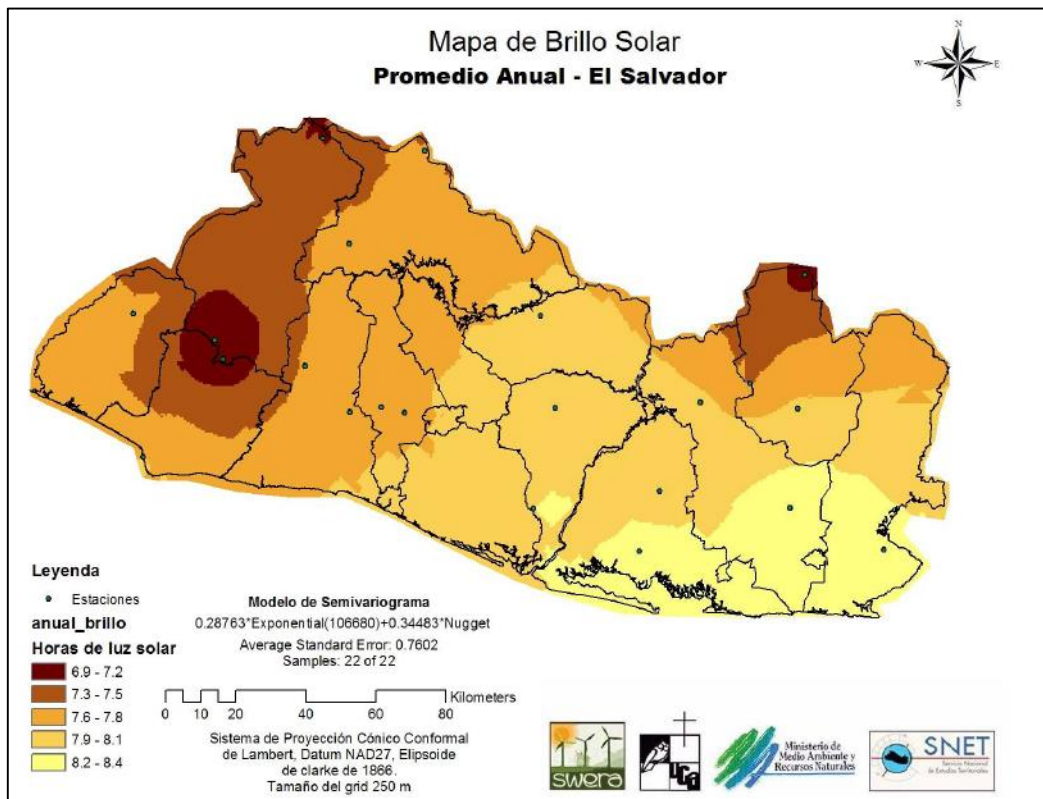


Figura 1.2.3 – Mapa de Brillo Solar SWERA.

Con un sistema automatizado de manejo de datos meteorológicos se capturaron y procesaron todos los datos disponibles, para finalmente realizar el análisis geoestadístico necesario, aplicación de tecnologías SIG, modelo de Angstrom, kriging, etc.

Para los propósitos del presente estudio la principal fuente de información meteorológica es la proveniente del Observatorio Ambiental del MARN (Periodo 2005-2013), con acceso a

⁷ 2 años.

la estación de CEL y dos estaciones limítrofes a El Salvador del lado de Guatemala: La Ceibita y Esquipulas.

Los datos proporcionados por la Fundación Salvadoreña para la Investigación del Café (PROCAFÉ) no fueron considerados en esta investigación, porque la clase de piranómetro usado en sus estaciones tiene una respuesta espectral baja, de 400 a 1100 nm⁸ (*Second Class, low cost network*⁹). Esto significa que este piranómetro solamente permite captar aproximadamente un 30% del espectro solar. Lo cual no proporciona aportes confiables al estudio.

Esto se aprecia con mayor claridad en la siguiente figura.

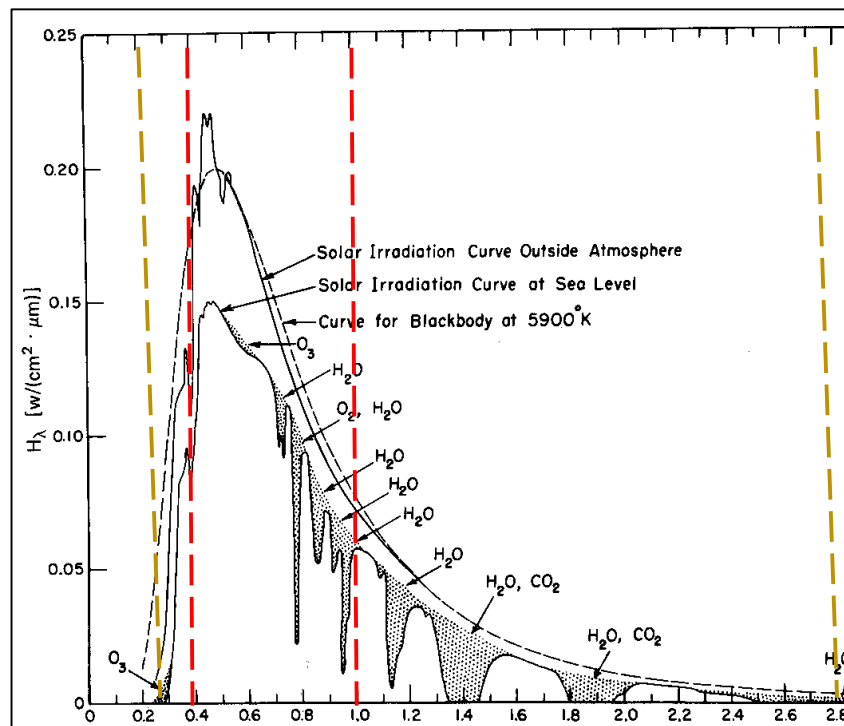


Figura 1.2.4 –Respuesta espectral piranómetro second class y secondary standar.

De la ilustración anterior, las líneas color rojo denotan la respuesta espectral de un piranómetro implementado por PROCAFÉ y la amarilla un piranómetro *Categoría Secondary*

⁸ Hoja Técnica piranómetro LI200X: <http://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/li200x.pdf>

⁹ Vea hoja de Clasificación de Piranómetros ISO9060 & WMO: <http://www.middletonsolar.com/documents/PyrClass.pdf>

*Standar (working standar) según la clasificación ISO9060 y WMO Hemispherical Solar Instrument*⁵¹⁰.

Para mediciones confiables se recomienda el uso de piranómetros con un rango espectral de 285 a 2800 nm¹¹. Esta respuesta permite captar un rango espectral de radiación solar casi del 100%.

¹⁰ Solar energy — Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9060:ed-1:v1:en>

¹¹ Ver piranómetro CMP 6: <http://www.kippzonen.com/Product/12/CMP-6-Pyranometer#.VCoyzRaq4j8>

1.3 Metodología de la investigación.

La metodología empleada para evaluar y determinar el potencial de energía solar disponible en el país, se concentró en completar la base de datos sobre parámetros climatológicos solares, registrados por las estaciones climatológicas del MARN y otras instituciones. Esta base de datos consta de una serie de registros históricos (del 2005 al 2013) los cuales se agregan a la data histórica proporcionada por los estudios anteriores.

La metodología empleada se ilustra en la figura 1.3.1.



Figura 1.3.1 – Metodología de la Investigación.

1.4 Análisis estadístico de datos meteorológicos.

La etapa inicial de este trabajo está relacionada con la recopilación de data histórica proveniente de las estaciones meteorológicas a nivel nacional comprendida entre los años 2005 y 2013. Generalmente estos datos se encuentran en una situación de dispersión, datos faltantes, y su mera síntesis y unificación tiende a ser complicado.

Cuando se habla de calidad de los datos se refiere a la representatividad de ese valor respecto a la magnitud real que se mide, a su valor en ese momento y además a la capacidad de ese dato de representar la condición meteorológica de la zona de medición.

Se ha trabajado con series históricas de variables meteorológicas correspondientes a 24 estaciones del MARN, de los cuales, 13 estaciones no cuentan con instrumentos de medición de brillo solar, por lo que se procedió a analizar los restantes (11 estaciones). Esto se detalla a continuación.

COD	NOMBRE	DEPTO	COORDENADAS		MSNM
			LAT	LONG	
A-18	Finca Los Andes	Santa Ana	13.874750	-89.628306	1752
A-31	Planes de Montecristo	Santa Ana	14.398889	-89.360556	1857
A-37	Santa Ana-UNICAES	Santa Ana	13.982667	-89.549250	665
B-10	Cerrón Grande	Cabañas	13.934222	-88.897917	207
G-03	Nueva Concepción	Chalatenango	14.125444	-89.288306	327
H-14	La Hachadura	Ahuachapán	13.859667	-90.085972	43
L-04	San Andrés	La Libertad	13.806472	-89.403778	480
M-24	San Miguel – UES	San Miguel	13.438917	-88.159083	108
N-02	La Unión-CORSAIN	La Unión	13.324944	-87.814722	12
S-10	Aeropuerto de Ilopango	San Salvador	13.697417	-89.117000	624
Z-02	San Francisco Gotera	Morazán	13.692250	-88.108500	273

Tabla 1.4.1 - Estaciones del MARN.

COD	NOMBRE	DEPTO	COORDENADAS		MSNM
			LAT	LONG	
A-15	Guija	Santa Ana	14.228389	-89.469083	449
A-27	Candelaria de la Frontera	Santa Ana	14.119306	-89.655861	743
B-01	Chorrera Del Guayabo	Cabañas	13.987750	-88.755944	205
B-06	Sensuntepeque	Cabañas	13.871306	-88.644750	695
C-09	Cojutepeque	Cuscatlán	13.720583	-88.926250	894
G-04	La Palma	Chalatenango	14.278278	-89.159139	1024
G-13	Las Pilas	Chalatenango	14.372528	-89.096444	1966
H-08	Ahuachapán	Ahuachapán	13.943111	-89.860083	732
L-27	Chiltiupán	La Libertad	13.592444	-89.479917	671
T-06	Acajutla Puerto Nuevo	Sonsonate	13.576444	-89.833556	32
T-24	Los Naranjos	Sonsonate	13.874944	-89.674111	1450
U-06	Santiago De María	Usulután	13.479611	-88.471556	917
V-09	Puente Cuscatlán	San Vicente	13.598389	-88.594306	33
Z-03	Perquín	Morazán	13.961028	-88.158389	1166

Tabla 1.4.2 - Estaciones del MARN (con medición de radiación).

Capítulo II

Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D) y Ecuación de Angstrom.

2.1 Introducción y generalidades del A.E.D.

2.1.2 ¿Qué es el A.E.D.?

El Análisis Exploratorio de Datos (A.E.D.) es un conjunto de técnicas estadísticas cuya finalidad es conseguir un entendimiento básico de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas. Para conseguir este objetivo el A.E.D. proporciona métodos sistemáticos sencillos para organizar y preparar los datos, detectar fallos en el diseño y recogida de los mismos, tratamiento y evaluación de datos ausentes (missing), identificación de casos atípicos (outliers) y comprobación de los supuestos subyacentes en la mayor parte de las técnicas multivariantes (normalidad, linealidad, homocedasticidad¹²).

La finalidad del Análisis Exploratorio de Datos (AED) es examinar los datos previamente a la aplicación de cualquier técnica estadística. De esta forma el analista consigue un entendimiento básico de sus datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas y así poder solventar posibles interrogantes como:

- ¿Existe algún tipo de estructura en los datos a analizar? (normalidad, multimodalidad, asimetría, curtosis, linealidad, homogeneidad entre grupos, homocedasticidad, etc.).
- ¿Existe algún sesgo en los datos recogidos?
- ¿Hay errores en la codificación de los datos?
- ¿Cómo se sintetiza y presenta la información contenida en un conjunto de datos?
- ¿Existen datos atípicos (outliers)?
- ¿Cuáles son? ¿Cómo tratarlos?
- ¿Hay datos ausentes (missing)?
- ¿Tienen algún patrón sistemático? ¿Cómo tratarlos?

El examen previo de los datos es un paso necesario, que lleva tiempo, y que habitualmente se descuida por parte de los analistas de datos. Las tareas implícitas en dicho examen pueden parecer insignificantes y sin consecuencias a primera vista, pero son una parte esencial de cualquier análisis estadístico.

¹² La varianza de $y|x$ es constante para todo x , es decir $\sigma^2_{y|x} = \sigma^2$.

Para poder realizar un análisis exploratorio de datos es necesario tener presentes algunas definiciones y conceptos básicos de estadísticas como:

- **Población:** Conjunto de personas, objetos o acontecimientos sobre los que se desea obtener una conclusión.
- **Muestra:** Subconjunto de la población (que representa adecuadamente a la misma).
- **Variabes o atributos:** Son las características que se pueden observar o estudiar en los individuos de la población. Según el tipo de característica a medir
- **Media aritmética:** Se define la media aritmética (o simplemente media) como:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad \text{Para datos cuantitativos} \quad \text{Ec. 2.0}$$

- **Media truncada o recortada:** Consiste en calcular la media aritmética de un porcentaje central de los datos (esto es, eliminando un porcentaje de los datos más bajos y de los más altos).

Así una media truncada al 10% calcularía la media aritmética del 90% de los valores centrales despreciando el 5% de los valores más bajos y el 5% de los más altos.

La media recortada es un concepto parecido al anterior salvo que en vez de despreciar un porcentaje de los valores más bajos y más altos lo que se hace es modificar estos valores. Se sustituyen los valores más bajos por el más bajo de los valores centrales y los valores más altos por el más alto de los valores centrales. Si en la muestra que hemos recogido no hay datos anómalos, la diferencia entre la media truncada (o recortada) y la media aritmética debe ser pequeña. Estas medidas no suelen utilizarse con valores agrupados.

- **Mediana:** se define la mediana (M_d) como aquel valor que, teniendo los datos ordenados de menor a mayor, deja igual número de valores a su izquierda que a su derecha. Si el número de datos es impar se toma como mediana el valor central como lo muestra la siguiente ecuación.

$$M_d = \frac{X_{n+1}}{2} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Ejemplo ilustrativo:

Calcular la mediana de los siguientes datos: 10, 8, 6, 4, 9, 7, 10, 9 y 6

Solución: Se ordena los datos de menor a mayor:

4	6	6	7	8	9	9	10	10
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9

Se aplica la ecuación 2.1

$$M_d = \frac{X_{n+1}}{2} = \frac{X_{9+1}}{2} = X_5$$

La mediana es el valor de X_5 (quinto dato).

Por lo tanto $M_d = 8$. Si el número de datos es par se calcula como la media de los dos valores centrales

$$M_d = \frac{X_{\frac{n}{2}} + X_{\frac{n}{2}+1}}{2} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Ejemplo ilustrativo:

Calcular la mediana de los siguientes datos: 10, 8, 9, 6, 4, 8, 9, 7, 10 y 9.

Solución: Se ordena los datos de menor a mayor y se aplica la ecuación 2.2:

4	6	7	8	8	9	9	9	10	10
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}

$$M_d = \frac{X_{\frac{10}{2}} + X_{\frac{10}{2}+1}}{2} = \frac{X_5 + X_6}{2} = \frac{8 + 9}{2} = 8.5$$

- **Moda:** La moda de una variable cuantitativa discreta o cualitativa es el valor más frecuente. En el caso de variables cuantitativas agrupadas se define el intervalo modal como aquel con mayor frecuencia relativa. La moda puede no ser única si tenemos varios intervalos con la misma frecuencia relativa máxima.
- **Cuartiles:** Son una generalización del concepto de mediana. Teniendo ordenados los datos se define el cuartil de orden p ($0 \leq p \leq 1$) como el valor (q_p) que deja a lo sumo np observaciones a su izquierda y a lo sumo $n(1-p)$ observaciones a su derecha. La mediana es por tanto el cuartil de orden 0.5. Algunos ordenes de estos cuartiles tienen nombres específicos. Así los cuartiles son los cuartiles de orden (0.25, 0.5, 0.75) y se representan por Q_1 , Q_2 , Q_3 y Q_4 . Los deciles son los cuartiles de orden (0.1, 0.2, ..., 0.9). Los percentiles son los cuartiles de orden $j/100$ donde $j=1,2,\dots,99$. El procedimiento de cálculo de los cuartiles es similar al empleado para la mediana.

Para calcular el valor de uno de los cuartiles, se utiliza la fórmula:

$$Q_k = k(N/4) \quad \text{Ec. 2.3}$$

En donde:

Q_k : Cuartil número 1, 2, 3 ó 4

N = total de datos de la distribución.

- **$Q_1=1(N/4)$:** El valor obtenido al realizar el cálculo en una serie de datos nos proporciona el valor que representa el 25 % de esa serie de datos. También, nos indica que el 25% de la serie de datos está bajo él y sobre él, se encuentra el 75% de los datos de la serie.
- **$Q_2=2(N/4)$:** Para el cuartil 2, se tiene como caso especial, primero porque su valor representa la mitad de la serie de datos, igual que la mediana. Segundo, bajo esté valor se encuentra el 50% de la serie de datos y tercero, sobre ese valor calculado se encuentra el otro 50% de la serie de datos.
- **$Q_3=3(N/4)$:** El cuartil 3, nos indica que el valor obtenido representa bajo sí el 75 % de la distribución de los datos y sobre sí, se encuentra el 25 % de la distribución de datos.

- **Q4=4(N/4)**: El cuartil 4, nos indica que el valor obtenido tiene bajo sí el 100% de la distribución de datos. Por lo general no se calcula, ya que es un hecho que el último valor de la distribución él lo representa.

Para cada valor obtenido según el cuartil calculado este indicara el número de una serie de datos ordenados de menor a mayor que posee el valor que representa a los n datos detrás de él.

Para el caso en que el cuartil resulta ser un decimal, se toma el número entero próximo inferior y mayor y se realiza una interpolación entre ellos utilizando la ecuación siguiente:

$$Q_k = X_n + \frac{k}{4}(X_n - X_{n+1}) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

X_n : Valor de la posición del número entero próximo inferior obtenido de Ec. 2.3

X_{n+1} : Valor de la posición del número entero próximo superior obtenido de Ec. 2.3

k : numero de cuartil a calcular.

Ejemplo: calcular Q1

Se tienen los datos 165, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 170, 171, 172, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 181.

Utilizando la ecuación 2.3 se obtiene Q1=4.25

Entonces utilizando Ec. 2.4 se obtiene

$$Q1=167 + 0.25 (168 - 167) = 167 + 0.25 (1) = 167 + 0.25 = 167.25$$

$$Q1=167.25$$

- **Varianza:** Se define la varianza, como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones respecto a la media.

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Ec. 2.5}$$

- **Desviación típica o estándar:** Se define la desviación típica o estándar como la raíz positiva de la varianza (s). Se suele utilizar más la desviación típica porque presenta las mismas unidades que la variable original. Al estar definidas como promedio de cuadrados son siempre no negativas.

$$s \text{ ó } \delta = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Ec. 2.6}$$

- **Frecuencias:** El primer método para resumir una muestra de tamaño $n\{x_1, \dots, x_1\}$ de una variable estadística X , que presenta las modalidades c_1, \dots, c_m , es calcular la tabla de frecuencias. Como su nombre indica es una tabla donde se presentan las modalidades observadas y sus frecuencias de aparición:
- **Frecuencia Absoluta:** Número de veces que aparece la modalidad. Se denotara por n_i , $0 \leq n_i \leq n$.
- **Frecuencia Absoluta Acumulada:** Número de veces que aparece la modalidad o valores inferiores. Se denotara por N_i , $0 \leq N_i \leq n$, $N_{i-1} \leq N_i$, $N_m = n$.
- **Frecuencia Relativa:** Tanto por uno de las veces que aparece la modalidad. $f_i = n_i/n$, $0 \leq f_i \leq 1$.
- **Frecuencia Relativa Acumulada:** Tanto por uno de las veces que aparece la modalidad o valores inferiores. $F_i = N_i/n$, $0 \leq F_i \leq 1$, $F_{i-1} \leq F_i$, $F_m = 1$.
- **Histograma:** Es la representación gráfica utilizada para las variables continuas. Es básicamente un diagrama de barras donde la altura de la barra es $h_i = f_i/l_i$, siendo l_i es la longitud del intervalo o clase. Calcula las marcas de clase y las frecuencias.
- **Diagramas de caja:** El diagrama de caja consta de una caja central que está delimitada por la posición de los cuartiles Q_3 y Q_1 . Dentro de esta caja se dibuja la línea que

representa la mediana. También ocasionalmente se puede representar la media dentro de la caja. De los extremos de la caja salen unas líneas que se extienden hasta los puntos $LI = \max\{\min(x_i), Q_1 - 1,5(RI)\}$ y $LS = \min\{\max(x_i), Q_3 + 1,5(RI)\}$ que representarían el rango razonable hasta el cual se pueden encontrar datos. Los datos que caen fuera del intervalo (LI, LS) se consideran datos atípicos y se representan individualmente como se observa en la figura 2.1.1.

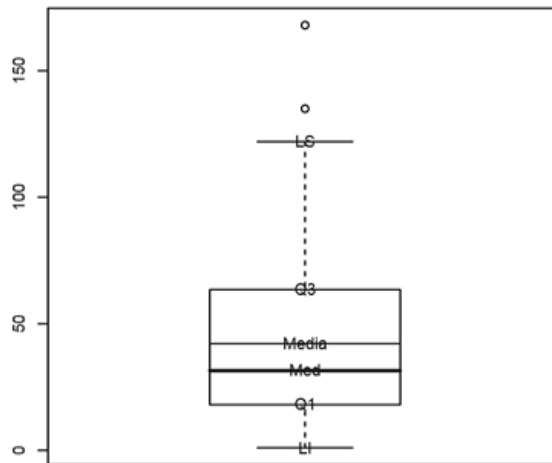


Figura 2.1.1 – Representación del diagrama de cajas.

Los diagramas de caja (bloxplots) nos proporcionan visualmente información de cómo están distribuidos los datos.

2.2 Análisis Exploratorio de Datos.

En la sección 2.1 se explicó brevemente en que consiste el análisis exploratorio de datos y en esta sección se hará uso de dicha metodología. Las mediciones de “Brillo Solar” son registros diarios, con lo que se espera mediciones al año para el mejor de los casos, pero se sabe que eso puede o no ser cierto, ya que existen diferentes circunstancias que afectan el correcto registro de los datos, tales como error en la lectura, mala colocación de la banda de quemado, falta de las mismas, pérdida de los registros, etc. En este estudio no se determinará las causas de las fallas, pero si se tomara en consideración para realizar un análisis exploratorio de los datos y un tratamiento de control de calidad, todo esto con el objetivo de obtener la mínima distorsión posible en los datos finales que se utilizan para la elaboración de mapas de radiación solar.

El tratamiento se basa inicialmente en la observación e interpretación estadística de los datos, logrando visualizar lo que se consideren errores. Algunos criterios que se utilizaron fueron los siguientes:

1. El brillo solar nunca es negativo.

Se sabe que el brillo solar no puede ser negativo ya que en ausencia de luz solar la banda no es quemada y es considerada como lectura cero "0".

2. La irradiación mínima necesaria para quemar la banda está en el rango de 70 a 180 W/m² (*Según documeto de Heliofania*) por lo que una lectura cero no debe interpretarse como ausencia de brillo solar pero su lectura debe considerarse como el valor extremo mínimo.
3. La ausencia de datos no debe considerarse como lectura cero.
4. Para El Salvador se tomará como 12 horas máximo de brillo solar diaria.
5. Caracteres que no sean numéricos serán considerados como datos erróneos y eliminados de la base datos y en su lugar se dejará una celda vacía para que no afecte los resultados.
6. No es el objetivo de este estudio describir o detallar en su totalidad los errores en la base datos proporcionada por el SNET.
7. Antes de mostrar un resultado se utilizará un análisis estadístico donde se determinará las características y el comportamiento de los datos.

2.2.1 Metodología para Análisis Estadístico.

Como ya se mencionó anteriormente se cuenta con los datos de 11 estaciones, las cuales serán analizadas en esta sección. Para esta etapa se analizaron algunas variables importantes con la que se buscó tener la mayor cantidad de información para dar un diagnóstico del estado inicial de la base de datos proporcionada por SNET¹.

Variables Analizadas.	
Cantidad de Datos (N)	Mediana.
Cantidad de Datos faltantes (N*)	Cuartil tres (Q3).
Media Aritmética.	Rango Intercuartilico (IQR)
Mínimo.	Moda.
Máximo.	Asimetría.
Cuartil uno (Q1)	Kurtosis
Desviación Estándar.	Error Estándar de la media.

Tabla 2.2.1 - Variables a analizar en el A.E.D.

Existen muchas más variables estadísticas que se pueden analizar pero en este estudio, solo se calculó las antes mencionadas, ya que se considera que son suficientes para dar un panorama de la calidad de los datos. También se analizan métodos gráficos como histogramas, diagrama de bigotes y la curva normal, siendo esta última una de las herramientas más importantes, porque se observa el comportamiento del brillo solar. Se sabe que este tipo de variable contiene componentes aleatorios y eso hace que difícilmente se logre obtener una curva normal, esto es debido a que cada día representa condiciones climáticas diferentes. Para Evaluar el brillo solar se observa que tan similar es su curva normalizada a una curva normal con el objetivo de determinar si los datos son útiles.

Cada estación cuenta con 12 series de datos correspondientes a los meses del año, y una serie anual que es la suma de las 12 series mensuales. Dichas series se analizan para cada una de las estaciones, pero en este capítulo solo se muestran algunos reportes estadísticos y el lector puede encontrar las restantes en los apéndices (Análisis de datos estadísticos)

2.2.2 Reportes estadísticos.

Los reportes consisten en una tabla resumen y una imagen donde muestran diferentes resultados de cálculos estadísticos y un histograma combinado con la curva normalizada. Con la teoría de la sección 2.1 se espera que el lector se relacione con los conceptos de estadística descriptiva para datos continuos y no agrupados.

Reporte Estación A-18.

Variable	N	N*	Media	Error estándar media	Desv.Est.	Q1	Mediana	Q3	Máximo	IQR	Moda	N para moda	Asimetría	Kurtosis
A18-Ene	242	39	4.21	0.14	2.15	2.70	4.30	5.90	9.00	3.20	4.40	8	-0.12	-0.76
A18-Feb	250	28	6.25	0.15	2.39	4.50	6.45	8.33	9.80	3.83	9.40	11	-0.51	-0.53
A18-Mar	278	3	6.84	0.15	2.45	5.60	7.60	8.70	10.10	3.10	8.40	11	-0.96	0.12
A18-Abr	270	10	6.41	0.17	2.71	4.50	6.90	8.63	10.60	4.13	9.40	11	-0.5	-0.71
A18-May	278	3	4.67	0.18	3.01	2.18	4.55	7.03	10.60	4.85	0.00	16	0.11	-1.1
A18-Jun	239	41	3.97	0.19	2.92	1.30	3.90	6.60	10.40	5.30	0.00	18	0.26	-1.15
A18-Jul	277	4	5.38	0.17	2.84	3.15	5.60	7.60	10.70	4.45	0.00	9	-0.23	-0.96
A18-Ago	279	2	5.22	0.18	2.94	2.90	5.40	7.70	10.50	4.80	0.00	13	-0.22	-1.07
A18-Sep	239	41	3.80	0.17	2.64	1.50	3.60	5.70	10.10	4.20	0.00	18	0.3	-0.91
A18-Oct	244	37	3.55	0.17	2.59	1.30	3.45	5.78	9.30	4.48	0.00	22	0.26	-1.07
A18-Nov	238	42	3.64	0.14	2.12	2.10	3.70	5.20	8.60	3.10	3.70	10	0.07	-0.84
A18-Dic	240	41	3.19	0.12	1.91	1.50	3.40	4.50	7.20	3.00	0.00	10	-0.01	-0.93
A18-Anual	3074	163	4.82	0.05	2.84	2.50	4.80	7.10	10.70	4.60	0.00	122	0.00	-1.05

Tabla 2.2.2 - Resumen de cálculos estadísticos estación A-18.

Histograma de estación A18:

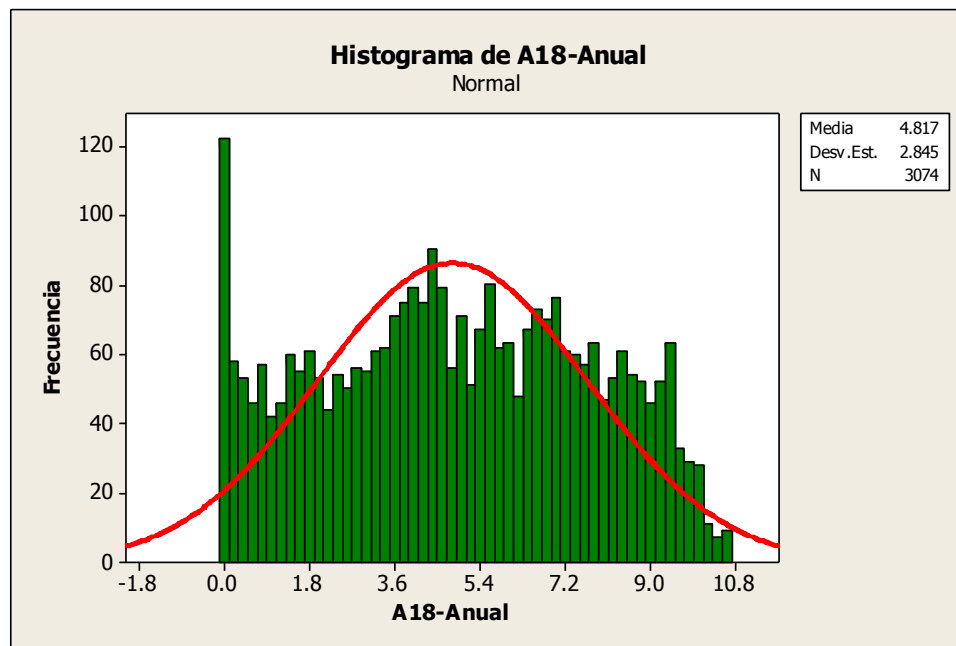


Figura 2.2.1 – Histograma de estación A18 – Anual.

Análisis: En esta estación a lo largo del año la simétrica presenta sesgos menores a 0.51 por lo que se considera simétrico, excepto en el mes de marzo que hay una sesgo a la izquierda, hacia los valores mayores, esto puede deberse a que en el mes de marzo se esperan valores altos de brillo y la kurtosis positiva confirma lo anterior ya que hay un despunte de valores altos. Al evaluar el año completo el sesgo es cero y que la Kurtosis negativa indica que no hay despunte de valor dentro de la serie de datos evaluados, también la desviación estándar está dentro los valores del rango intercuartilico, además la media y la mediana son muy cercanas en sus valores.

Reporte Estación A-31.

Variable	N	N*	Media	Error estándar media	Desv.Est.	Q1	Mediana	Q3	Máximo	IQR	Modo	N para moda	Asimetría	Kurtosis
A31-Ene	254	27	7.02	0.15	2.41	5.60	7.90	8.90	9.70	3.30	9.00	12	-1.12	0.49
A31-Feb	248	30	6.93	0.17	2.70	5.30	7.85	9.30	9.70	4.00	9.50	22	-0.94	-0.17
A31-Mar	274	7	6.74	0.17	2.78	4.58	7.60	9.20	11.40	4.63	9.40	14	-0.72	-0.52
A31-Abr	265	15	5.97	0.18	2.99	3.45	6.50	8.90	10.20	5.45	9.10	11	-0.34	-1.18
A31-May	274	7	4.49	0.18	3.00	2.10	4.00	7.13	10.20	5.03	0.00	16	0.25	-1.08
A31-Jun	246	34	4.84	0.19	3.05	2.38	4.40	7.43	10.40	5.05	0.00	11	0.17	-1.1
A31-Jul	255	26	5.91	0.18	2.94	3.50	6.10	8.70	10.30	5.20	9.30	7	-0.23	-1.07
A31-Ago	254	27	4.72	0.18	2.88	2.50	4.15	7.40	10.20	4.90	3.40	9	0.23	-1.08
A31-Sep	265	15	4.59	0.17	2.78	2.55	4.20	6.90	9.80	4.35	0.00	15	0.18	-1
A31-Oct	274	7	5.05	0.17	2.78	3.20	4.70	7.50	10.20	4.30	0.00	16	-0.06	-0.96
A31-Nov	246	34	6.80	0.16	2.43	5.53	7.65	8.80	9.90	3.28	9.20	11	-1.02	0.09
A31-Dic	274	7	7.16	0.14	2.37	6.10	8.00	9.10	10.40	3.00	9.20	28	-1.23	0.79
A31-Anual	3129	157	5.85	0.05	2.94	3.40	6.20	8.60	11.40	5.20	9.20	95	-0.35	-1.08

Tabla 2.2.3 - Reporte estación A-31

Histograma de estación A-31:

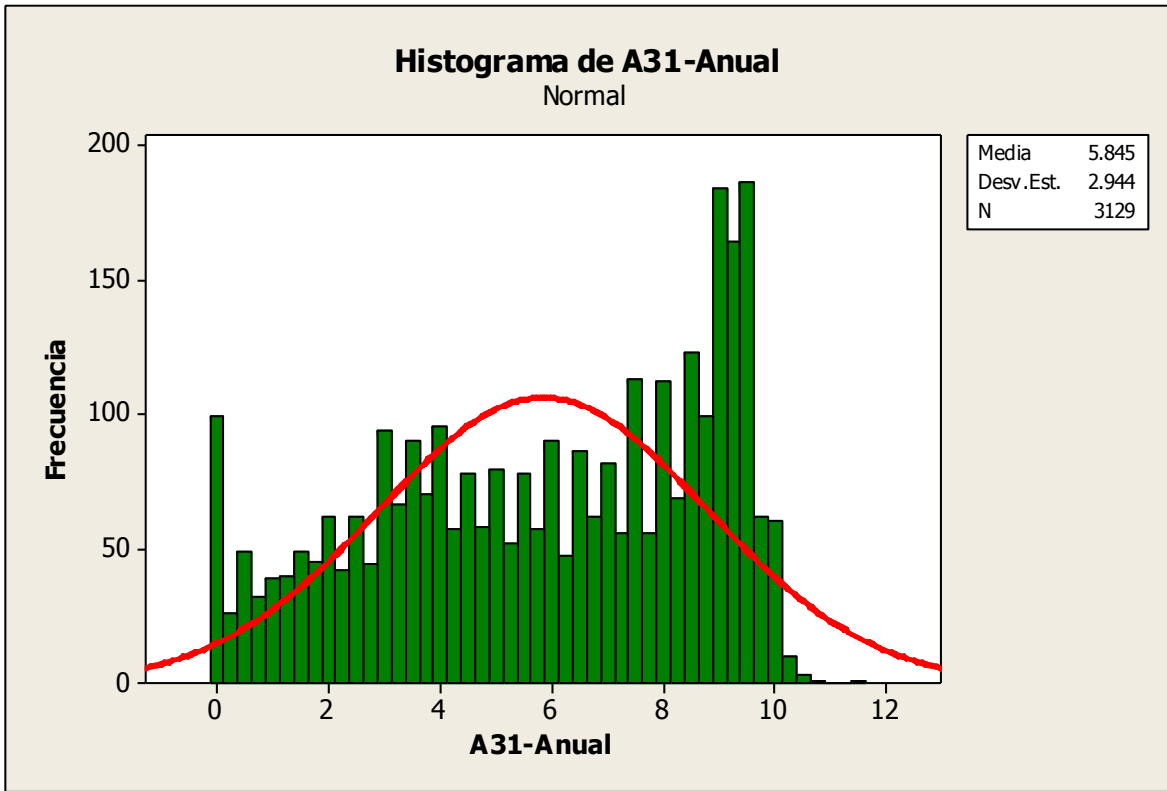


Figura 2.2.2 – Histograma de estación A31 Anual.

Análisis: Esta estación presenta asimetría ligeramente alta en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, los niveles de Kurtosis indican que no hay despuntes de valores excepto en los meses de enero, noviembre y diciembre. La asimetría se debe a una concentración de datos distribuida hacia valores altos, que son característicos de esos meses que son fuera de la época lluviosa ya que la estación se encuentra en una localización sensible a los cambios climáticos. Con respecto a la desviación estándar está dentro los valores del rango intercuartilico y la serie anual tiene una asimetría con poco sesgo hacia la izquierda debido a valores altos de los meses antes mencionados, también con una kurtosis que muestra poco despunte.

Reporte Estación G-03.

Variable	N	N*	Media	Error estándar media	Desv.Est.	Q1	Mediana	Q3	Máximo	IQR	Moda	N para moda	Asimetría	Kurtosis
G3-Ene	248	31	8.97	0.07	1.15	8.60	9.30	9.70	10.30	1.10	9.40	22	-2.43	9.24
G3-Feb	253	23	9.06	0.09	1.51	8.70	9.60	10.00	10.40	1.30	10.20	21	-2.63	9.15
G3-Mar	279	0	8.98	0.09	1.52	8.70	9.50	9.90	11.20	1.20	10.00	27	-2.62	8.88
G3-Abr	270	8	8.20	0.11	1.78	7.48	8.60	9.50	10.40	2.03	9.80	13	-1.51	2.57
G3-May	279	0	6.69	0.16	2.60	5.60	7.40	8.60	10.90	3.00	0, 7.8, 8, 8.1	8	-1.09	0.38
G3-Jun	240	38	6.23	0.16	2.54	4.70	6.80	8.00	10.60	3.30	6.8, 7.7	9	-0.77	-0.21
G3-Jul	248	31	7.06	0.13	1.96	5.70	7.45	8.60	10.00	2.90	7.1, 8.4, 8.6	8	-0.86	0.35
G3-Ago	279	0	6.94	0.12	2.06	5.70	7.40	8.50	10.30	2.80	7.70	9	-0.78	0.06
G3-Sep	270	8	6.64	0.15	2.39	5.58	7.20	8.33	10.00	2.75	7.00	12	-1.13	0.79
G3-Oct	279	0	6.78	0.16	2.73	5.50	7.50	8.80	10.30	3.30	0.00	15	-1.17	0.62
G3-Nov	270	8	8.11	0.13	2.08	7.98	8.90	9.40	10.30	1.43	9.20	18	-1.88	2.99
G3-Dic	279	0	8.66	0.08	1.25	8.40	9.00	9.40	10.00	1.00	9.1, 9.3, 9.7	19	-2.25	6.49
G3-Anual	3194	92	7.69	0.04	2.27	6.70	8.40	9.40	11.20	2.70	9.70	114	-1.42	1.73

Tabla 2.2.4 - Reporte estación G-03.

Histograma de estación G-03:

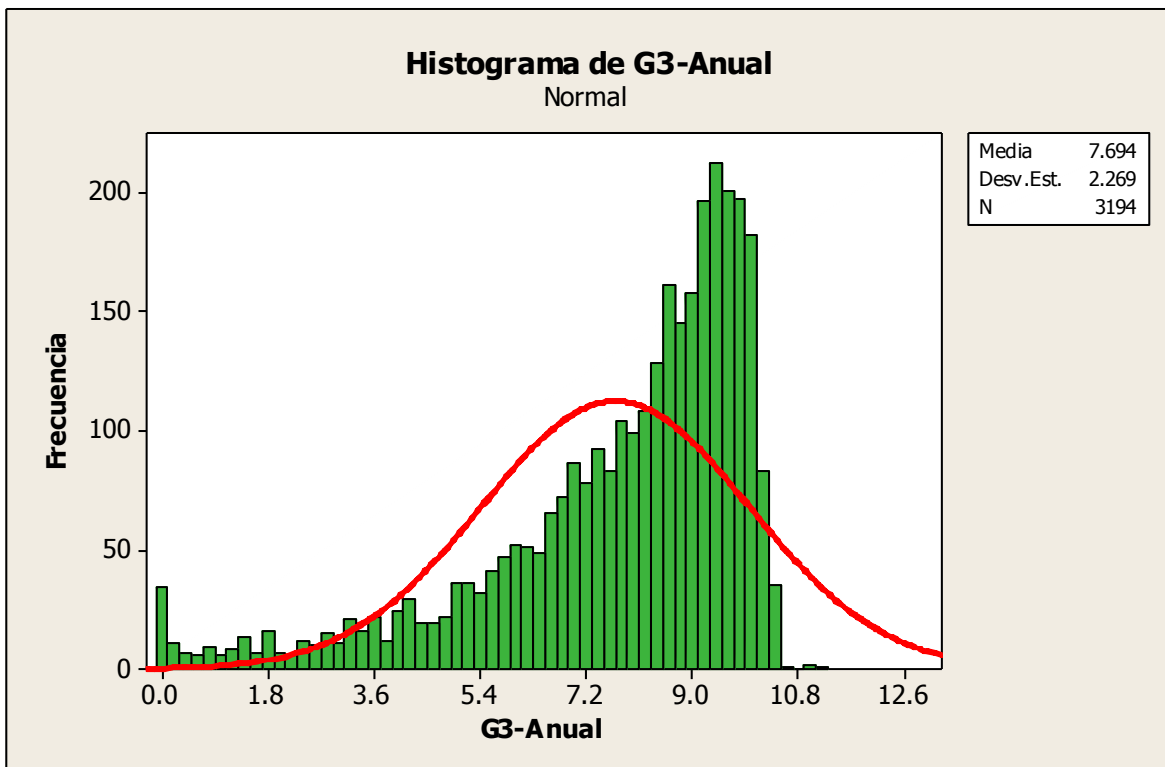


Figura 2.2.3 – Histograma de Estación G3 –Anual.

Análisis: En esta estación se presenta en todos los meses un sesgo hacia izquierda orientados a valores altos de brillo solar pero con niveles de kurtosis que indican poco

apuntamiento de los valores, con una leve diferencia entre la media y la mediana, la desviación estándar está dentro del rango intercuartilico, además existen series multimodales. No basta con las variables anteriores para determinar que los datos son favorables para utilizarlos, por lo que una inspección de su curva normalizada nos dirá más elementos para estimar la calidad de los datos de esta estación.

En la imagen anterior se observa que a pesar de sesgo hacia la izquierda las colas de la curva normalizada no terminan de manera abrupta, indicando que se distribuye de manera muy uniforme la densidad de frecuencia debido a una alta concentración de datos con valores altos arriba de la media en el histograma, por lo que se no hay ninguna razón para considerar de poca calidad y no pueden ser eliminados del estudio.

Reporte Estación L-4.

Variable	N	N*	Media	Error estándar media	Desv.Est.	Q1	Mediana	Q3	Máximo	IQR	Moda	N para moda	Asimetría	Kurtosis
L4-Ene	248	31	8.86	0.07	1.14	8.40	9.20	9.60	10.30	1.20	9.20	20	-2.88	15.09
L4-Feb	253	23	9.13	0.09	1.41	8.90	9.60	9.90	10.70	1.00	9.90	21	-2.44	8.11
L4-Mar	279	0	8.98	0.10	1.65	8.60	9.50	10.00	11.00	1.40	9.9,10	19	-2.42	7.23
L4-Abr	270	8	7.96	0.14	2.24	6.60	8.35	9.50	11.50	2.90	9.30	10	-0.88	0.71
L4-May	279	0	6.27	0.18	2.96	4.00	7.00	8.60	11.20	4.60	8.40	10	-0.54	-0.74
L4-Jun	240	38	5.73	0.20	3.06	3.53	5.90	8.25	11.80	4.73	0.00	8	-0.17	-0.91
L4-Jul	248	31	6.86	0.17	2.71	5.00	7.40	8.80	11.60	3.80	8.8, 9	7	-0.53	-0.37
L4-Ago	278	1	6.76	0.16	2.71	4.68	7.00	8.73	11.30	4.05	8.50	12	-0.42	-0.58
L4-Sep	270	8	6.05	0.17	2.75	4.08	6.40	8.20	11.10	4.13	6.80	8	-0.43	-0.58
L4-Oct	279	0	6.33	0.17	2.83	4.70	7.20	8.50	10.20	3.80	0.00	16	-0.84	-0.28
L4-Nov	270	8	7.89	0.12	2.00	7.68	8.65	9.10	10.00	1.43	8.8, 9.1	18	-1.98	3.53
L4-Dic	248	31	8.18	0.08	1.22	7.80	8.40	8.90	10.70	1.10	8.50	17	-1.7	4.68
L4-Anual	2067	92	7.62	0.06	2.69	6.20	8.60	9.50	11.80	3.30	9.30	67	-1.16	0.6

Tabla 2.2.5 - Reporte estadístico estación L-4.

Histograma de estación L-04:

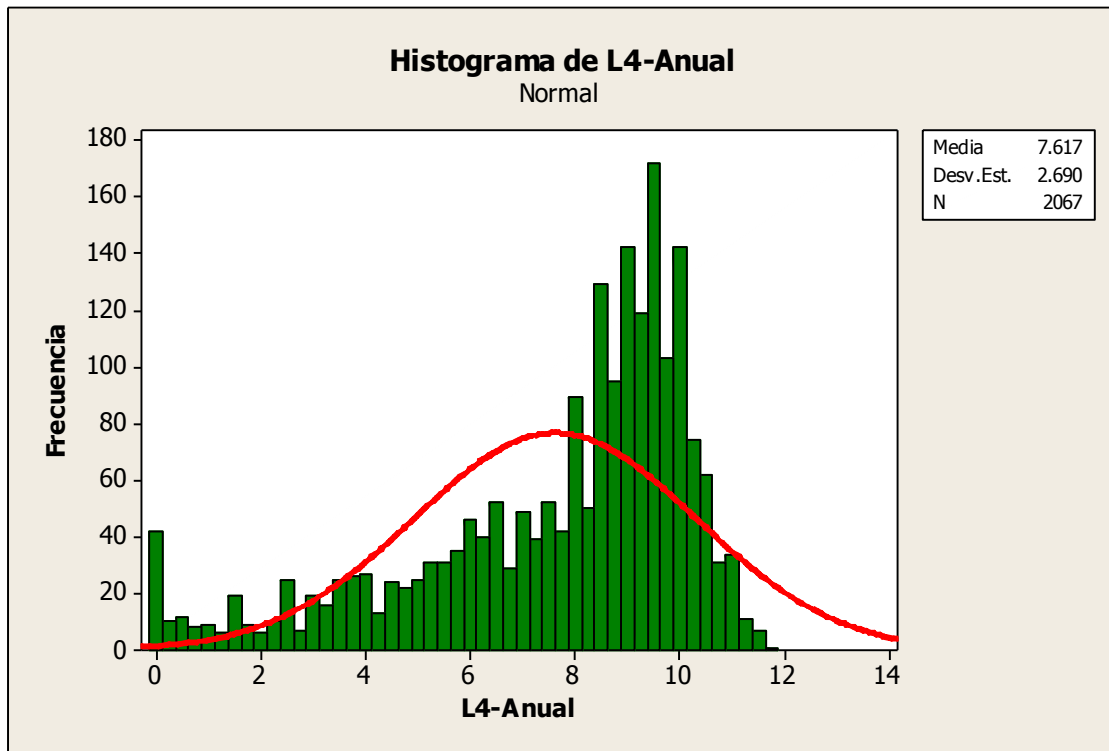


Figura 2.2.4 – Histograma de estación L4 –Anual.

Análisis: Esta estación presenta el mayor sesgo negativo en el mes de enero y una kurtosis alta positiva indicando un gran apuntamiento de valores altos en los datos, también destacar que faltan 31 datos esperados, eso puede estar provocando que la concentración sea hacia valores altos de brillo solar, pero aun así la desviación estándar es la más baja y la diferencia entre media y mediana también es baja, por lo que se puede considerar que los datos son admisibles. Respecto a la serie anual el sesgo sigue siendo negativo y con un leve apuntamiento hacia valores altos. Se puede analizar mejor con el histograma y su curva normalizada.

El histograma confirma una alta concentración de datos con valores altos de brillo solar y que su curva normalizada tiene colas que no terminan de manera abrupta por lo que se puede considerar la estación para el estudio.

Reporte Estación Z-02.

Variable	N	N*	Media	Error estándar media	Desv.Est.	Q1	Mediana	Q3	Máximo	IQR	Moda	N para moda	Asimetría	Kurtosis
Z2-Ene	186	31	7.88	0.11	1.43	6.98	8.25	9.00	10.50	2.03	9.00	15	-0.97	0.59
Z2-Feb	196	18	8.79	0.11	1.47	8.53	9.15	9.70	11.10	1.18	9.50	15	-2.88	11.88
Z2-Mar	203	14	8.33	0.12	1.74	7.60	8.90	9.60	10.30	2.00	9.70	11	-1.41	1.47
Z2-Abr	208	8	7.13	0.15	2.17	6.10	7.70	8.60	10.30	2.50	8.20	10	-1.18	1.12
Z2-May	186	0	5.83	0.20	2.76	4.18	6.65	7.90	10.40	3.73	0.00	11	-0.82	-0.44
Z2-Jun	210	6	5.62	0.17	2.42	4.35	6.20	7.43	9.50	3.08	0.00	7	-0.83	-0.07
Z2-Jul	186	31	6.61	0.14	1.93	6.10	7.10	7.80	9.40	1.70	7.4, 7.5	8	-1.65	2.97
Z2-Ago	216	1	6.35	0.16	2.31	5.53	7.00	8.00	9.20	2.48	0, 7.5, 7.9, 8	7	-1.31	1.06
Z2-Sep	210	6	6.13	0.17	2.40	5.28	6.80	7.90	9.40	2.63	6, 7	8	-1.17	0.52
Z2-Oct	217	0	4.90	0.17	2.55	3.20	5.60	6.90	9.40	3.70	0.00	14	-0.52	-0.69
Z2-Nov	180	5	4.76	0.12	1.64	4.10	4.70	5.78	8.20	1.68	4.60	10	-0.81	1.42
Z2-Dic	155	0	5.18	0.10	1.22	4.40	5.10	5.90	9.10	1.50	5.90	9	0.55	1.81
Z2-Anual	2353	141	6.48	0.05	2.44	5.00	6.90	8.30	11.10	3.30	0.00	57	-0.84	0.25

Tabla 2.2.6 - Reporte estadístico estación Z-02.

Histograma de estación Z-02:

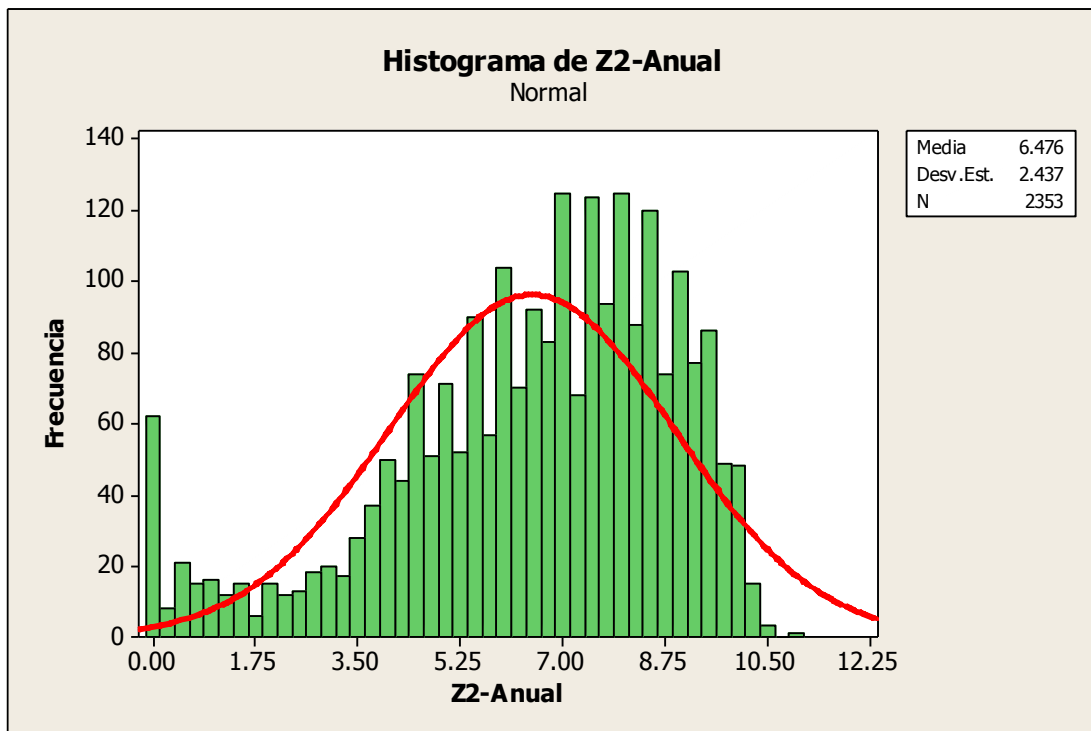


Figura 2.2.5 – Histograma de estación Z2 – Anual.

Análisis: En esta estación se destaca que los sesgos negativos predominan, esto se debe a que los datos están concentrados en valores altos de brillo solar, en febrero la kurtosis

presenta un valor alto de 11.58, también la media y mediana tienen pocas diferencias en sus valores. La serie anual presenta un sesgo a la izquierda con un leve apuntamiento, esto se podrá apreciar en el siguiente histograma y su curva normalizada. Se puede observar en el histograma una concentración de datos con valores altos, provocando una kurtosis moderada y un sesgo negativo, también que la curva normalizada tiene colas que terminan de manera suave por lo que no hay nada que indique una baja calidad de los datos en estación.

Las estaciones mostraron comportamientos diferentes, siendo las series anuales las más aceptables con niveles de asimetría y kurtosis bajos, haciendo que se consideren similares las curvas normalizadas a una curva normal, ya que al tener una mayor cantidad de datos éstas tienden a concentrar la información de manera más uniforme y las series mensuales son las más irregulares porque al tener menos datos los resultados son más sensibles a distorsiones. En esta etapa no tiene la certeza total que los datos son útiles y es necesario un análisis gráfico en el cual se hace una comparación del comportamiento con los datos del estudio anterior SWERA para observar sus diferencias.

2.2.3 Análisis Comparativo con estudios anteriores.

De las 11 estaciones proporcionadas por el SNET/MARN 6 de ellas están incluidas en el estudio “Determinación del Potencial Solar y Eólico en el Salvador”, por lo que se hará una comparación de los promedios en dicho estudio con los nuevos datos para analizar los comportamientos de las estaciones.

Las estaciones son: Finca los Andes, Planes de Montecristo, Cerrón Grande, Nueva Concepción, San Andrés y San Francisco Gotera.

Los promedios se calcularon con la media aritmética y se asignó un nombre el cual consiste en “*código de estación + SNET*” para los datos recientes y “*código de estación + SWERA*” para los datos del estudio “Determinación del Potencial Solar y Eólico en el Salvador las estaciones”. Cabe mencionar que el procedimiento estadístico realizado en el estudio

anterior no fue publicado, haciendo que sea necesario asumir que dichos promedios fueron calculados por media aritmética simple para posibilitar el análisis comparativo. Ver tabla siguiente.

	Media de Brillo Solar [h]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A-18 SNET	4.2	6.2	6.8	6.4	4.7	4.0	5.4	5.2	3.8	3.6	3.6	3.2
A-18 SWERA	6.9	7.8	8.2	7.6	5.5	4.7	6.7	6.0	4.3	4.6	5.4	5.8
Diferencia %	39%	20%	17%	16%	15%	16%	20%	13%	12%	23%	33%	45%
A-31 SNET	7.0	6.9	6.7	6.0	4.5	4.8	5.9	4.7	4.6	5.0	6.8	7.2
A-31 SWERA	8.7	8.5	8.1	7.1	5.0	4.8	6.7	6.2	4.0	5.9	7.7	8.0
Diferencia %	19%	19%	17%	16%	10%	-1%	12%	24%	-15%	14%	12%	10%
B-10 SNET	8.4	8.5	8.3	7.8	6.6	6.8	7.3	6.9	6.6	7.0	7.3	8.0
B-10 SWERA	8.9	9.0	9.4	8.5	7.0	6.7	8.1	8.0	6.2	7.3	8.3	8.7
Diferencia %	6%	5%	11%	8%	6%	-1%	10%	14%	-6%	4%	12%	8%
G-3 SNET	9.0	9.1	9.0	8.2	6.7	6.2	7.1	6.9	6.6	6.8	8.1	8.7
G-3 SWERA	9.1	9.6	9.2	8.5	7.5	6.8	7.9	7.4	6.3	7.3	8.2	8.1
Diferencia %	1%	6%	2%	3%	11%	8%	11%	6%	-5%	7%	1%	-7%
I-4 SNET	8.9	9.1	9.0	8.0	6.3	5.7	6.9	6.8	6.1	6.3	7.9	8.2
I-4 SWERA	9.2	9.2	8.8	8.0	6.8	6.4	8.1	7.4	5.7	6.7	8.3	8.9
Diferencia %	4%	1%	-2%	1%	8%	11%	15%	9%	-6%	6%	5%	8%
Z-2 SNET	7.9	8.8	8.3	7.1	5.8	5.6	6.6	6.4	6.1	4.9	4.8	5.2
Z-2 SWERA	9.4	9.8	9.4	8.5	7.0	7.0	8.2	8.0	6.9	7.6	8.6	9.2
Diferencia %	16%	10%	11%	16%	17%	20%	19%	21%	11%	36%	45%	44%

Tabla 2.2.7 - Análisis comparativo por media aritmética de datos SNET vs SWERA.

En la tabla anterior se presentan los promedios y las diferencias porcentuales respecto al valor del estudio anterior, de la siguiente manera:

$$Diferencia \% = 1 - \frac{\text{valor "SNET"}}{\text{valorSWERA}} \quad Ec. 2.7$$

La estación que muestra la mayor diferencia porcentual es la estación A-18 SNET con un máximo de 45% en diciembre y le sigue la estación Z2-SNET con un valor máximo de 44% de diferencia en diciembre. Las demás estaciones muestran diferencias no mayores al 19% y algunas con valores negativos, esto se debe a valores más altos que en el pasado.

La aparición de diferencias es de esperarse, ya que pertenecen a momentos distintos en el tiempo, pero ayudan a mostrar la tendencia del año en cada estación. Con esto no se puede afirmar si los datos son aceptables o no, pero si ayudar a detectar posibles errores o comportamiento fuera de lo esperado. Las series que presentaron diferencias

considerables se volvieron analizar para evaluar sus valores y determinar si pueden ser utilizadas en los cálculos.

Análisis gráfico de la estación A18-SNET (meses con mayores diferencias).

Análisis estadístico ENERO A-18 SNET:

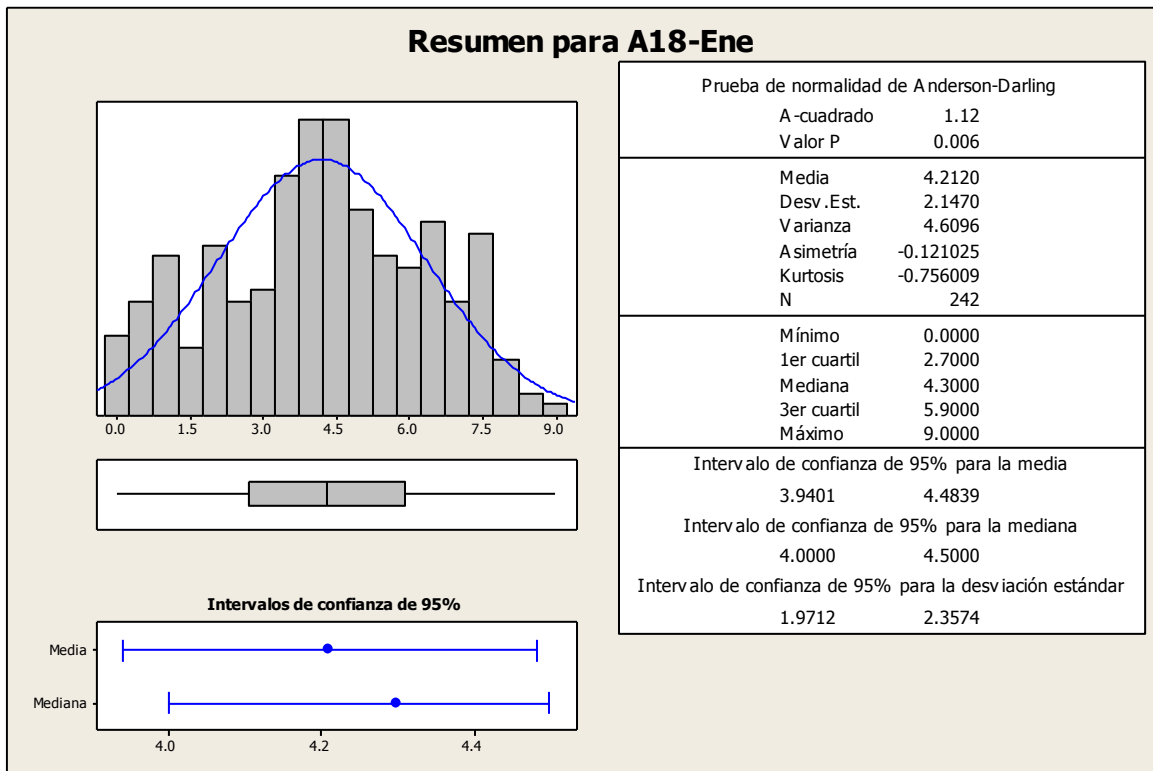


Figura 2.2.6 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de enero.

En esta serie mensual no hay datos atípicos, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana se diferencian por centésimas, con solo 38 datos faltantes y el histograma con la curva normal se observa uniforme. Todo lo anterior hace que no se descarte esta serie a pesar de haber mostrado una diferencia del 39% con el estudio anterior.

Análisis estadístico Noviembre A-18 SNET:

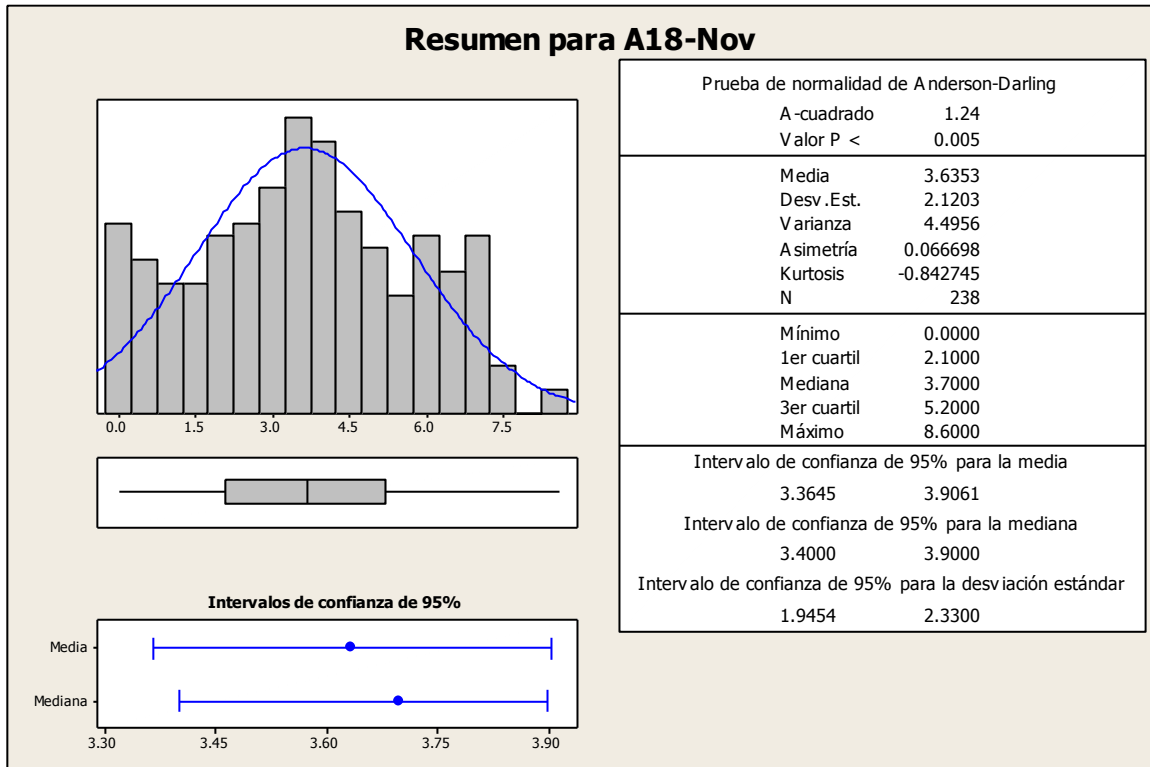


Figura 2.2.7 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de noviembre.

En esta serie mensual no hay datos atípicos, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana se diferencian por centésimas, con solo 28 datos faltantes y el histograma con la curva normal se observa uniforme aunque si una concentración de datos con valores de cero hace que la asimetría sea hacia la positiva y se vea la cola derecha tiene un salto leve pero sin llegar a ser alto. Todo lo anterior nos muestra la importancia de esta serie y no hay señales de que los datos de la estación deban ser descartados a pesar de haber mostrado una diferencia del 33% con el estudio anterior.

Análisis estadístico Diciembre A-18 SNET:

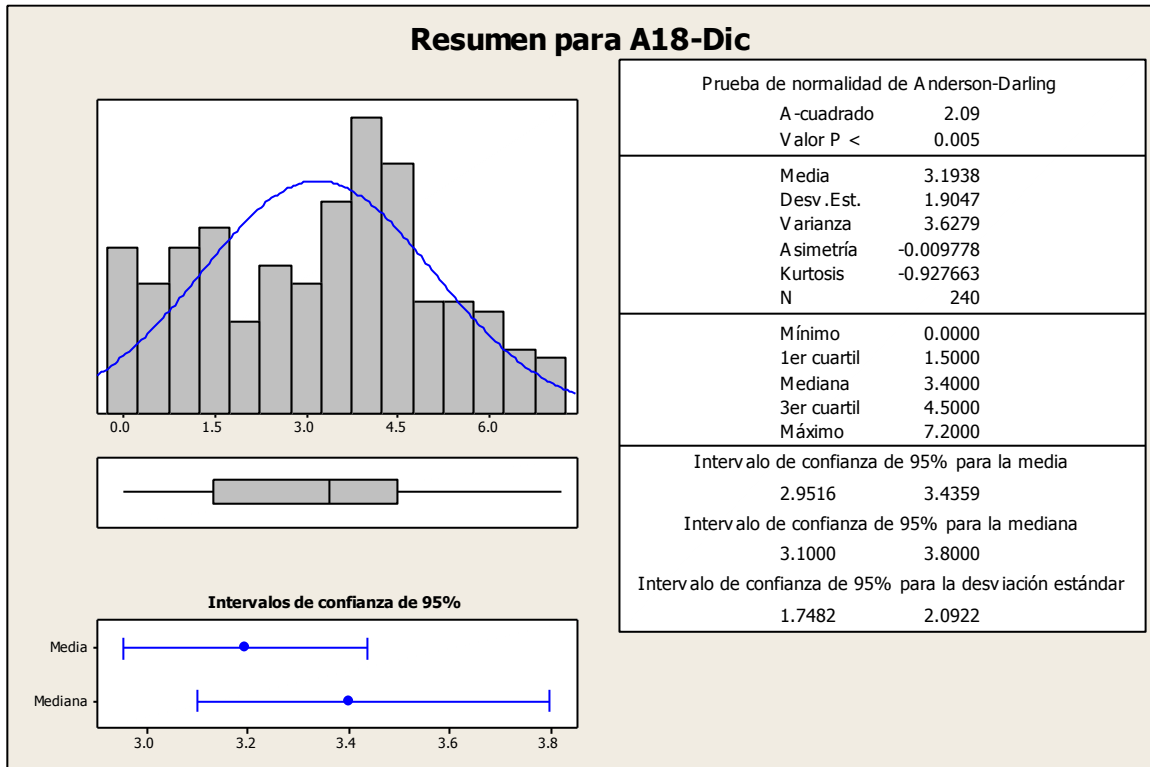


Figura 2.2.8 – Gráfica de análisis estadístico para estación A18 –Mes de diciembre.

En esta serie mensual no hay datos atípicos, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana se diferencian por décimas, con solo 41 datos faltantes, siendo esta de los más altos en la estación y el histograma con la curva normal se observa uniforme aunque si una concentración de datos con valores de cero hace que la asimetría sea positiva eso hace que la cola derecha tenga un salto leve. Todo lo anterior no afirma que se deba descartar los datos a pesar de haber mostrado una diferencia del 45% con el estudio anterior.

En el análisis anterior no se presentaron razones para que las series mensuales de enero, noviembre y diciembre de la estación A-18 SNET sean descartada, por lo que se siguieron utilizando sin ninguna discriminación

Análisis gráfico de la estación Z-02-SNET (meses con mayores diferencias).

Análisis estadístico Octubre Z-2 SNET:

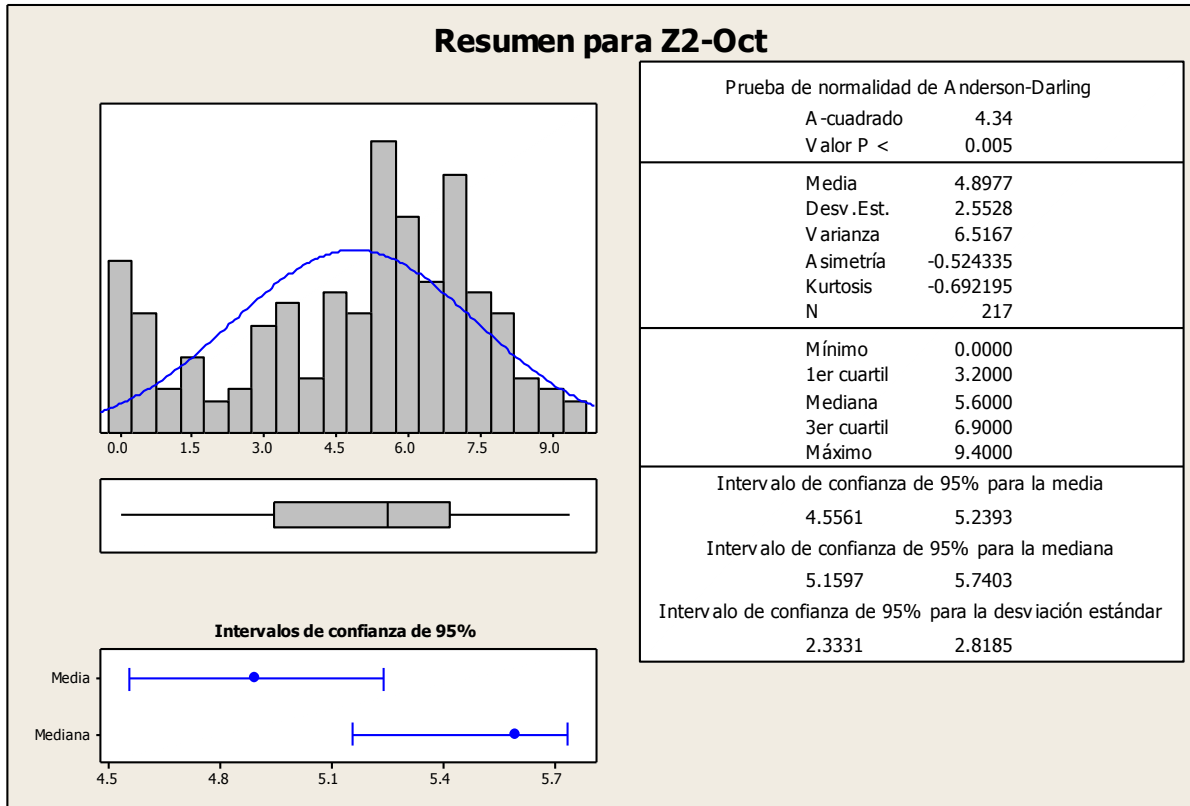


Figura 2.2.9 – Gráfica de análisis estadístico para estación Z2–Mes de octubre.

En esta serie mensual no hay datos atípicos, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana tienen una diferencia baja, con cero datos faltantes y el histograma junto con la curva normal se observa uniforme. Todo lo anterior no afirma que se deba descartar esta serie a pesar de haber mostrado una diferencia del 36% con el estudio anterior.

Análisis estadístico Noviembre Z-2 SNET:

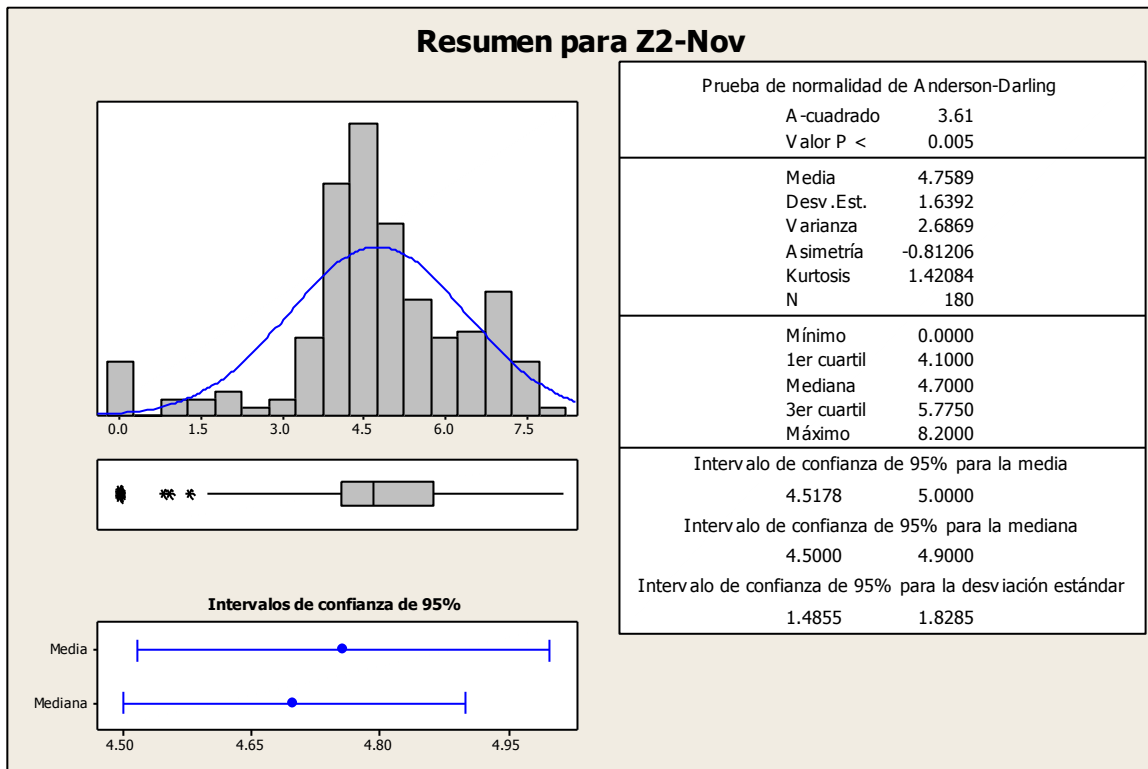


Figura 2.2.10 – Gráfica de análisis estadístico para estación Z2 –Mes de noviembre.

En esta serie mensual aparecen datos atípicos de valores por debajo de 1.5, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana tienen una diferencia por centésimas, con 5 datos faltantes y el histograma junto con la curva normal se observa uniforme. Todo lo anterior no afirma que se deba descartar esta serie a pesar de haber mostrado una diferencia del 45% con el estudio anterior.

Cabe mencionar en este momento que la aparición de datos atípicos es señal de posibles distorsiones en el cálculo de la media.

Análisis estadístico Diciembre Z-2 SNET:

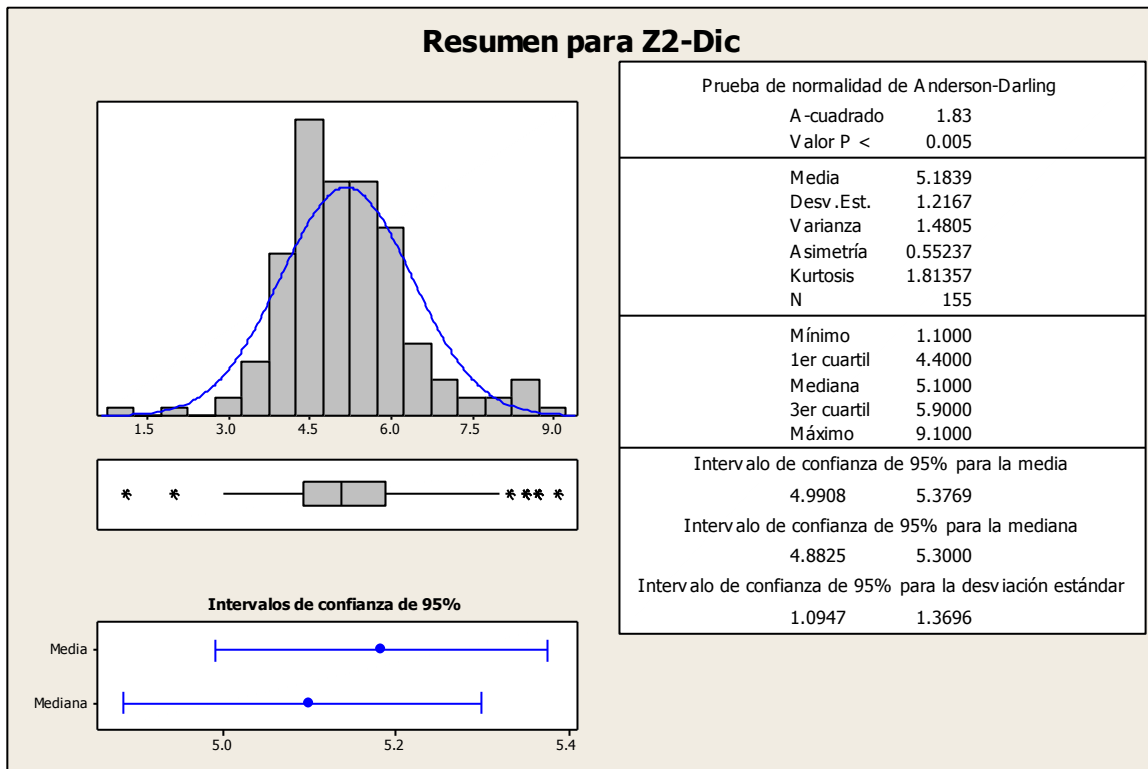


Figura 2.2.11 – Gráfica de análisis estadístico para estación Z2–Mes de diciembre.

En esta serie mensual aparecen datos atípicos de valores por debajo de 3 y arriba de 8, la asimetría y la Kurtosis son bajas, la media y mediana tienen una diferencia por centésimas, con cero datos faltantes y el histograma junto con la curva normal se observa uniforme. Todo lo anterior hace que no se pueda descartar esta serie y no hay señales de que los datos de la estación se deban descartar a pesar de haber mostrado una diferencia del 44% con el estudio anterior.

De lo anterior no hay razón para que estas series mensuales de octubre, noviembre y diciembre de la estación Z-2 SNET sean descartadas, por lo que se siguieron utilizando sin ninguna discriminación.

2.2.4 Tratamiento de datos atípicos en la series de datos.

Un valor atípico es una observación con un valor que no parece corresponderse con el resto de los valores en el grupo de datos y uno de los problemas en el análisis de datos es manejar estos valores dentro de un grupo de datos por la relación que guardan con los valores extremos. Al ignorar la presencia de estos datos atípicos se perjudica el análisis de múltiples formas dependiendo del tipo de datos con los que se está trabajando, siendo los más habituales:

1. introducir sesgo en los estimadores de los parámetros del modelo.
2. influir en las predicciones.

Una solución es buscar un estimador con menos sensibilidad a los datos atípicos que no sea la media aritmética convencional, porque esta es muy sensible a las distorsiones por datos atípicos y a los valores extremos, por lo que es necesario emplear un estimador más robusto, es aquí donde la media truncada proporciona una solución porque elimina en gran manera el problema de la posible distorsión por valores extremos pero baja la cantidad de datos al eliminar un porcentaje de ellos y no es conveniente cuando se busca siempre tener una cantidad de datos igual o mayor, pero nunca menor. Esto con el objetivo de no perder representatividad de las muestras y para solucionar eso existe la recortada, la cual ofrece una alternativa favorable. Ya que al ser un concepto parecido al anterior salvo que en vez de desprestigiar un porcentaje de los valores más bajos y más altos lo que se hace es modificar estos valores mantiene intacto la cantidad de datos.

Si en la muestra no hay datos anómalos, la diferencia entre la media truncada (o recortada) y la media aritmética debe ser pequeña y en caso de existir, se evitará la introducción de sesgo y el estimador será más representativo.

Con lo mencionado anteriormente se analizó todas las series calculando la media recortada al 5%, 10% y 25%. Siendo este último el máximo que se puede recortar porque deja el 50% de los datos intactos.

2.2.5 Análisis con Media Recortada.

Uno de los objetivos que se busca con este análisis es observar y mostrar el comportamiento a diferentes porcentajes de recorte. En primer lugar se analizaron la Finca los Andes, Planes de Montecristo, Cerrón Grande, Nueva Concepción, San Andrés y San Francisco Gotera. Pero también se hizo posteriormente para todas las estaciones restantes.

Para la tabla comparativa se asignó un nombre que consiste en *código de estación + prom*, es media aritmética, *código de estación + %* es media recortada y *código de estación + SWERA* son los datos del estudio “Determinación del Potencial Solar y Eólico en el Salvador”.

	Media de Brillo Solar [h]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
A-18 prom	4.21	6.25	6.83	6.41	4.67	3.97	5.38	5.22	3.80	3.55	3.64	3.19
A-18-5%	4.22	6.31	6.91	6.46	4.65	3.92	5.38	5.22	3.75	3.51	3.62	3.18
A-18-15%	4.24	6.40	7.07	6.56	4.62	3.86	5.42	5.27	3.70	3.45	3.62	3.17
A-18-25%	4.26	6.44	7.18	6.63	4.60	3.84	5.47	5.33	3.67	3.42	3.62	3.18
A-18 SWERA	6.9	7.8	8.2	7.6	5.5	4.7	6.7	6	4.3	4.6	5.4	5.8
A-31 prom	7.02	6.93	6.74	5.97	4.49	4.84	5.91	4.72	4.59	5.05	6.80	7.16
A-31 5%	7.13	7.03	6.81	6.01	4.46	4.83	5.94	4.70	4.58	5.05	6.89	7.25
A-31 15%	7.29	7.22	6.97	6.09	4.42	4.82	6.01	4.68	4.57	5.09	7.05	7.45
A-31 25%	7.42	7.38	7.09	6.16	4.38	4.79	6.06	4.64	4.54	5.11	7.20	7.60
A-31 SWERA	8.7	8.5	8.1	7.1	5	4.8	6.7	6.2	4	5.9	7.7	8
B-10 prom	8.39	8.53	8.34	7.78	6.56	6.77	7.28	6.88	6.58	6.99	7.34	8.02
B-10 5%	8.51	8.67	8.47	7.87	6.62	6.84	7.35	6.96	6.65	7.07	7.40	8.13
B-10 15%	8.66	8.86	8.64	8.00	6.77	6.94	7.47	7.07	6.80	7.26	7.47	8.23
B-10 25%	8.73	8.96	8.75	8.09	6.91	7.02	7.56	7.17	6.92	7.37	7.51	8.29
B-10 SWERA	8.9	9	9.4	8.5	7	6.7	8.1	8	6.2	7.3	8.3	8.7
G-3 prom	8.97	9.06	8.98	8.20	6.69	6.23	7.06	6.94	6.64	6.78	8.11	8.66
G-3 5%	9.06	9.18	9.09	8.29	6.76	6.28	7.14	6.99	6.72	6.86	8.23	8.74
G-3 15%	9.13	9.30	9.23	8.42	6.95	6.41	7.22	7.09	6.89	7.09	8.44	8.84
G-3 25%	9.18	9.39	9.32	8.50	7.10	6.51	7.28	7.15	7.01	7.26	8.61	8.89
G-3 SWERA	9.1	9.6	9.2	8.5	7.5	6.8	7.9	7.4	6.3	7.3	8.2	8.1
I-4 Prom	8.86	9.13	8.98	7.96	6.27	5.73	6.86	6.76	6.05	6.33	7.89	8.18
I-4 5%	8.94	9.23	9.09	8.04	6.31	5.73	6.91	6.81	6.08	6.39	8.01	8.25
I-4 15%	9.00	9.35	9.25	8.13	6.42	5.77	6.99	6.87	6.18	6.57	8.22	8.31
I-4 25%	9.04	9.44	9.33	8.18	6.53	5.81	7.05	6.90	6.24	6.71	8.36	8.35
I-4 SWERA	9.2	9.2	8.8	8	6.8	6.4	8.1	7.4	5.7	6.7	8.3	8.9
Z-2 Prom	7.88	8.79	8.33	7.13	5.83	5.62	6.61	6.35	6.13	4.90	4.76	5.18
Z-2 5%	7.92	8.90	8.42	7.22	5.87	5.67	6.69	6.44	6.21	4.91	4.80	5.17
Z-2 15%	8.00	9.00	8.56	7.36	6.01	5.80	6.84	6.64	6.38	4.99	4.89	5.12
Z-2 25%	8.07	9.06	8.66	7.44	6.19	5.93	6.94	6.77	6.56	5.10	4.87	5.11
Z-2 SWERA	9.4	9.8	9.4	8.5	7	7	8.2	8	6.9	7.6	8.6	9.2

Tabla 2.2.8 - Resumen de medias recortadas para las estaciones a 5%, 15% y 25%.

Con los datos de la tabla anterior se realizó un análisis grafico de dichas estaciones. Ver siguientes imágenes:

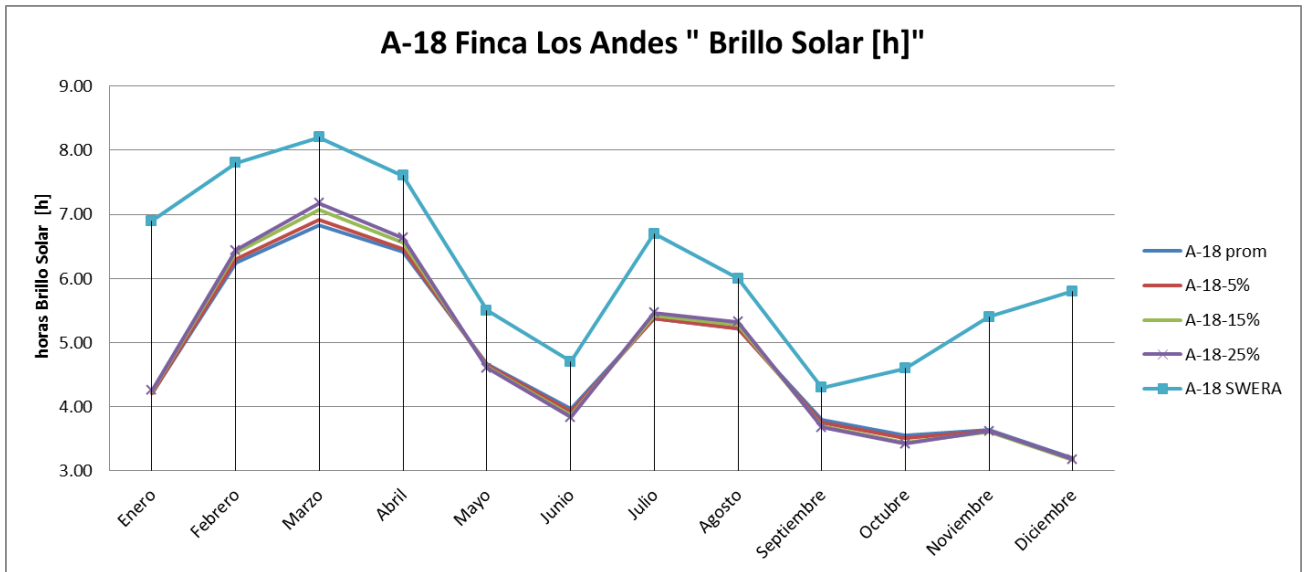


Figura 2.2.12 – Análisis grafico A18 –Brillo Solar.

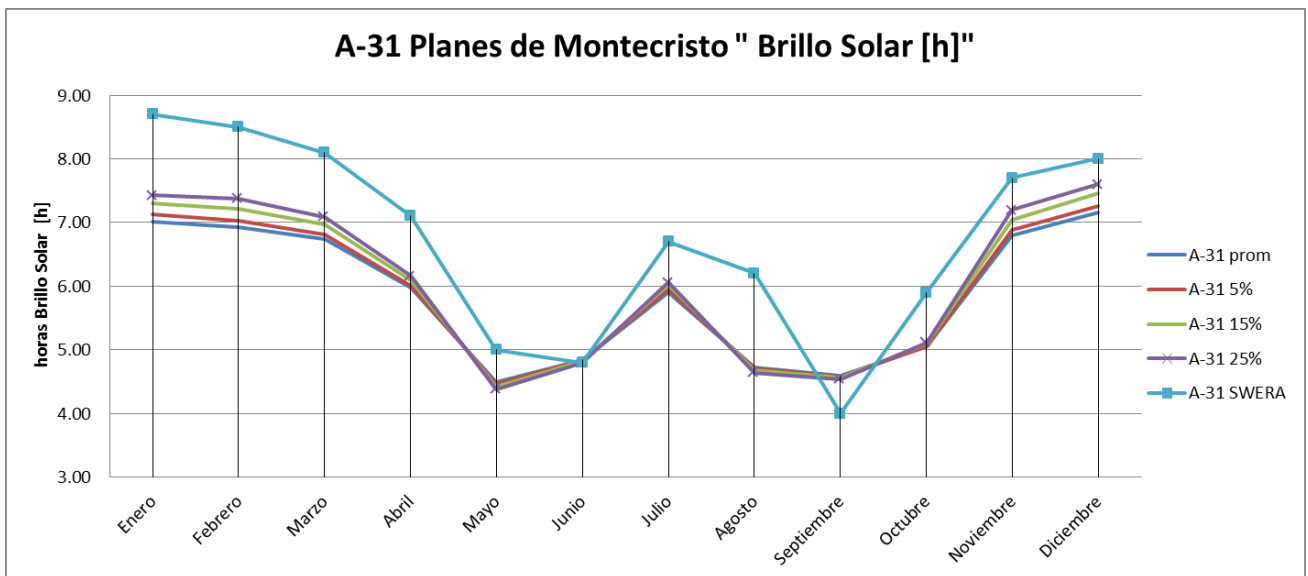


Figura 2.2.13 – Análisis grafico A31 –Brillo Solar.

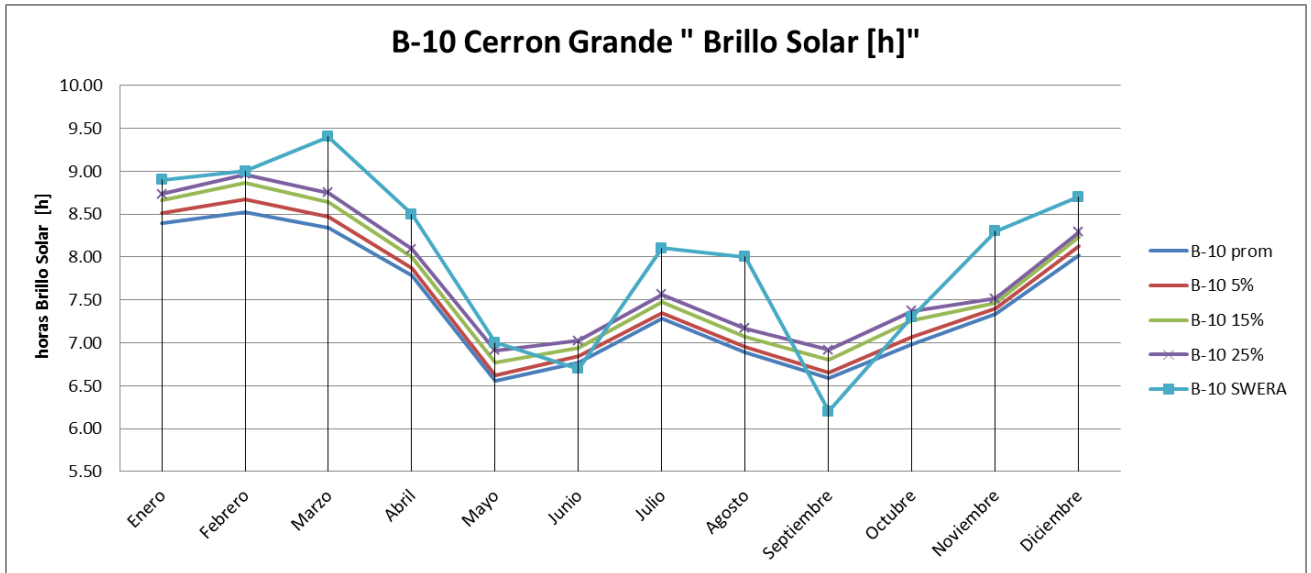


Figura 2.2.14 – Análisis grafico B-10 –Brillo Solar.

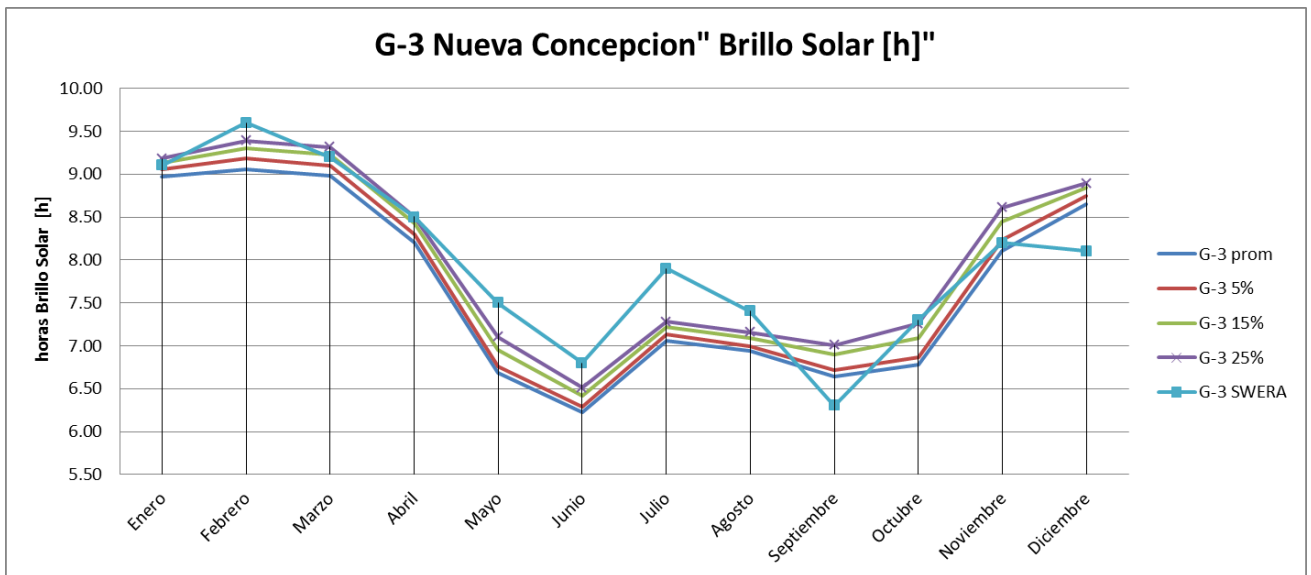


Figura 2.2.15 – Análisis grafico G-3 –Brillo Solar.

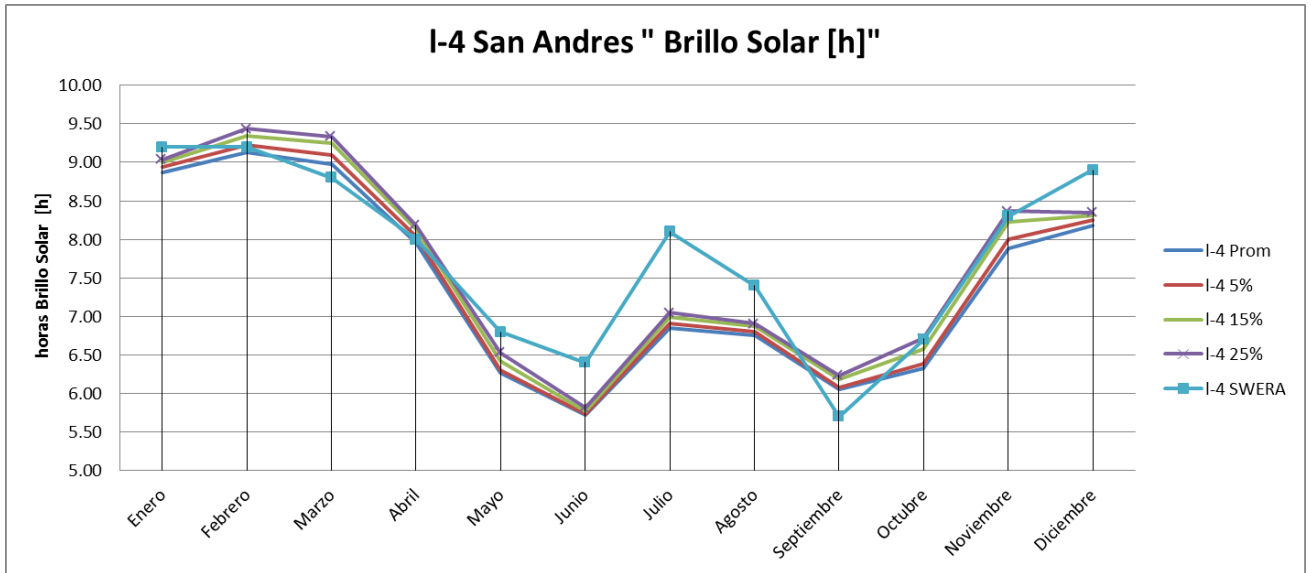


Figura 2.2.16 – Análisis grafico I-4 –Brillo Solar.

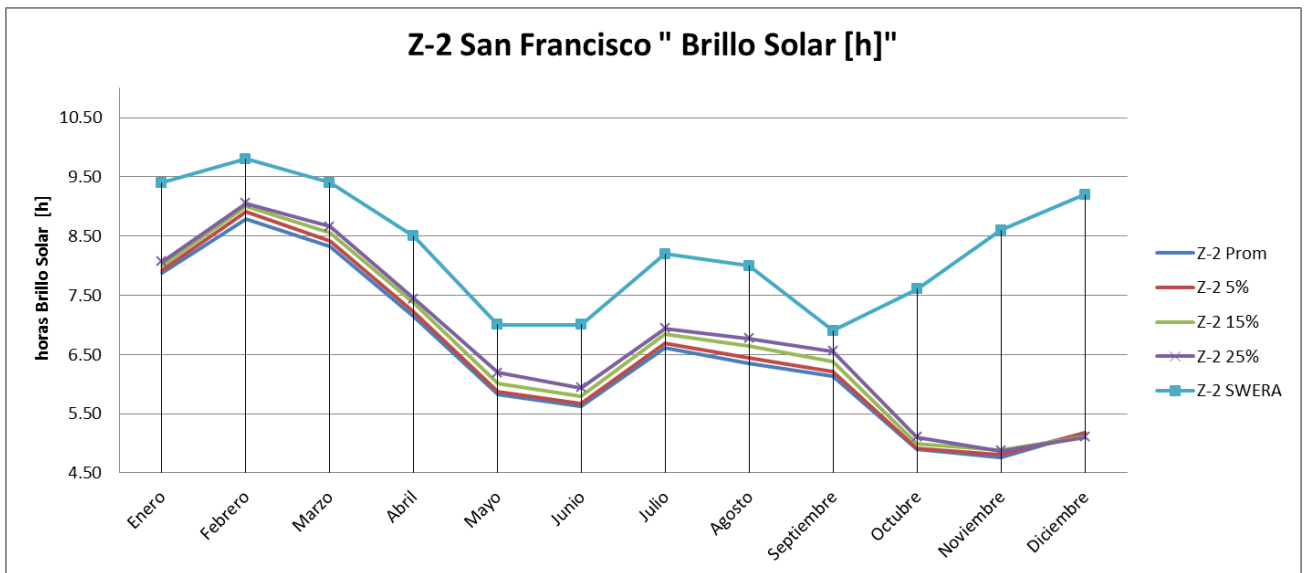


Figura 2.2.17 – Análisis grafico Z-2 –Brillo Solar.

Los datos en el estudio del SWERA son generalmente más altos que los actuales y las tendencias en las estaciones A-18 y Z-2 SNET cambiaron en los meses de octubre a diciembre, la cual era de esperarse de acuerdo a los resultados en las diferencias porcentuales de las series en sección anterior. También se observa que la media recortada a diferentes porcentajes no difiere en gran medida de la media aritmética y que en los casos

donde las estaciones muestran una tendencia diferente a los registrados en SWERA no se modificó significativamente.

Una de las razones por la cual una estación puede presentar valores bajos de brillo solar es por la nubosidad de la zona. Un aumento de nubosidad está relacionado con la acumulación de lluvia, entonces las estaciones A-18 y Z-02 se evaluó la relación horas de brillo solar con la acumulación de lluvia por medio de una análisis de correlación.

Análisis de correlación estaciones A-18.

Datos para Análisis de Correlación Estacion A-18						
	Promedio horas de brillo solar en [h]			Lluvia acumulada mensual en [mm]		
	Oct	Nov	Dic	Oct	Nov	Dic
2005	-	-	4.28	-	0.00	14.60
2006	4.56	4.70	2.60	123.50	113.40	0.60
2007	2.33	3.13	3.49	346.80	7.20	0.20
2008	2.02	2.89	2.67	476.20	0.00	0.00
2009	4.61	2.38	2.56	184.50	210.50	33.50
2010	3.12	2.82	-	56.70	8.00	0.00
2011	3.18	5.35	4.05	1284.90	50.80	0.30
2012	4.45	4.71	3.38	250.40	1.20	25.10
2013	4.10	3.17	2.35	453.00	117.00	1.00

Tabla 2.2.9 - Datos para análisis de correlación estación A-18.

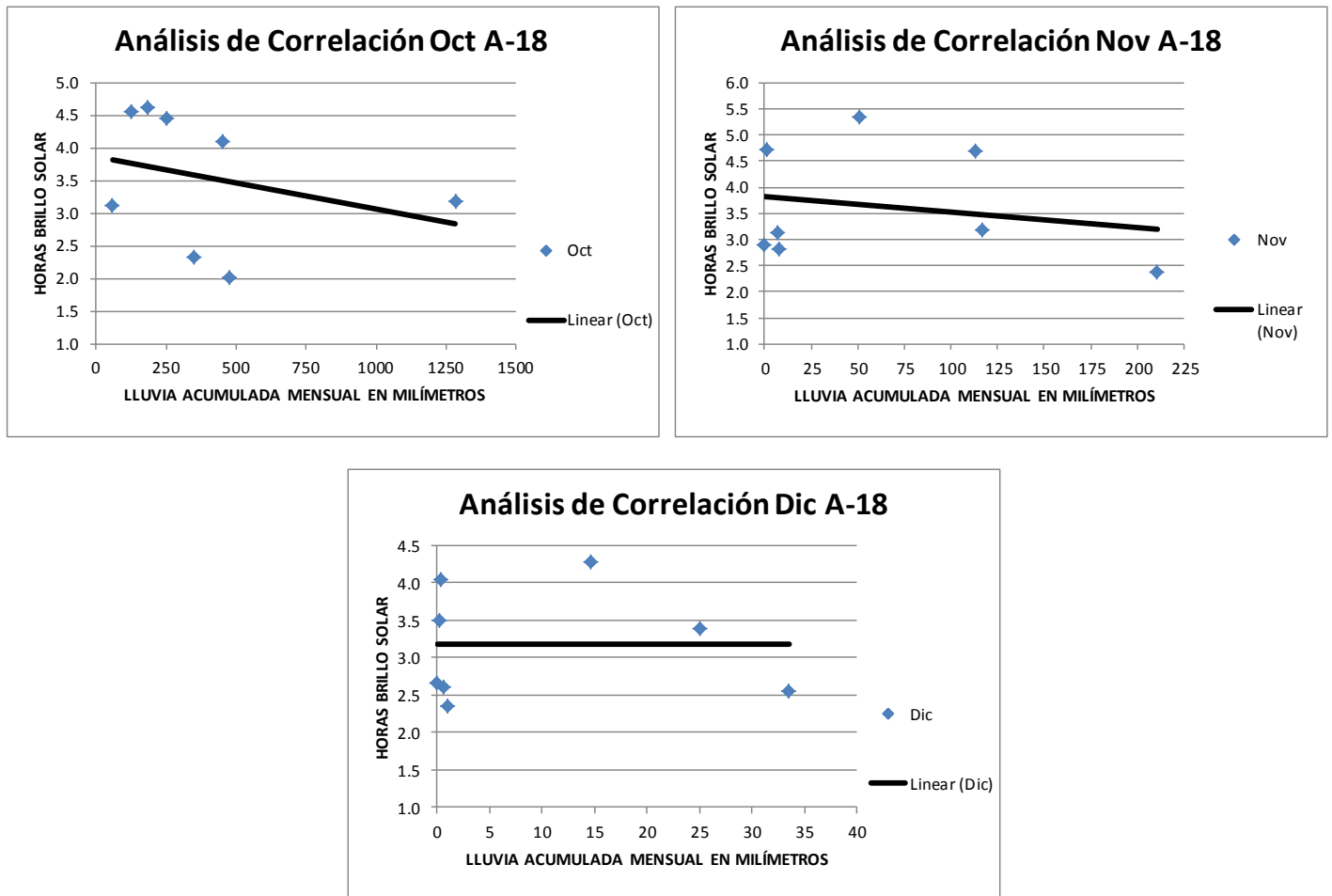


Figura 2.2.18 – Análisis de correlación estación A-18.

En el mes de Octubre y noviembre se observa que a medida que aumentó la acumulación de la lluvia disminuyó el brillo solar, explicando porque sucedió un cambio de la tendencia respecto al estudio de SWERA. En el mes de diciembre se afirma que no se encontró ninguna correlación con la acumulación de lluvia que explique su comportamiento y también no se indica que se deba descartar la serie de diciembre.

Análisis de correlación estaciones Z-02.

Datos para Análisis de Correlación Estacion Z-02						
	Promedio horas de brillo solar en [h]			Lluvia acumulada mensual en [mm]		
	Oct	Nov	Dic	Oct	Nov	Dic
2005	4.71	6.11	5.94	227.00	3.40	3.70
2006	6.73	4.95	5.68	259.30	76.70	25.40
2007	4.13	5.65	5.18	352.60	22.00	0.00
2008	3.66	4.52	4.36	345.70	0.00	0.00
2009	4.84	3.42	4.76	232.60	117.30	73.40
2010	5.98	3.90	-	99.10	13.60	0.00
2011	4.23	-	-	428.50	135.30	0.00
2012	-	-	-	-	-	-
2013	-	-	-	-	-	-

Tabla 2.2.10 - Datos para análisis de correlación estación Z-02.

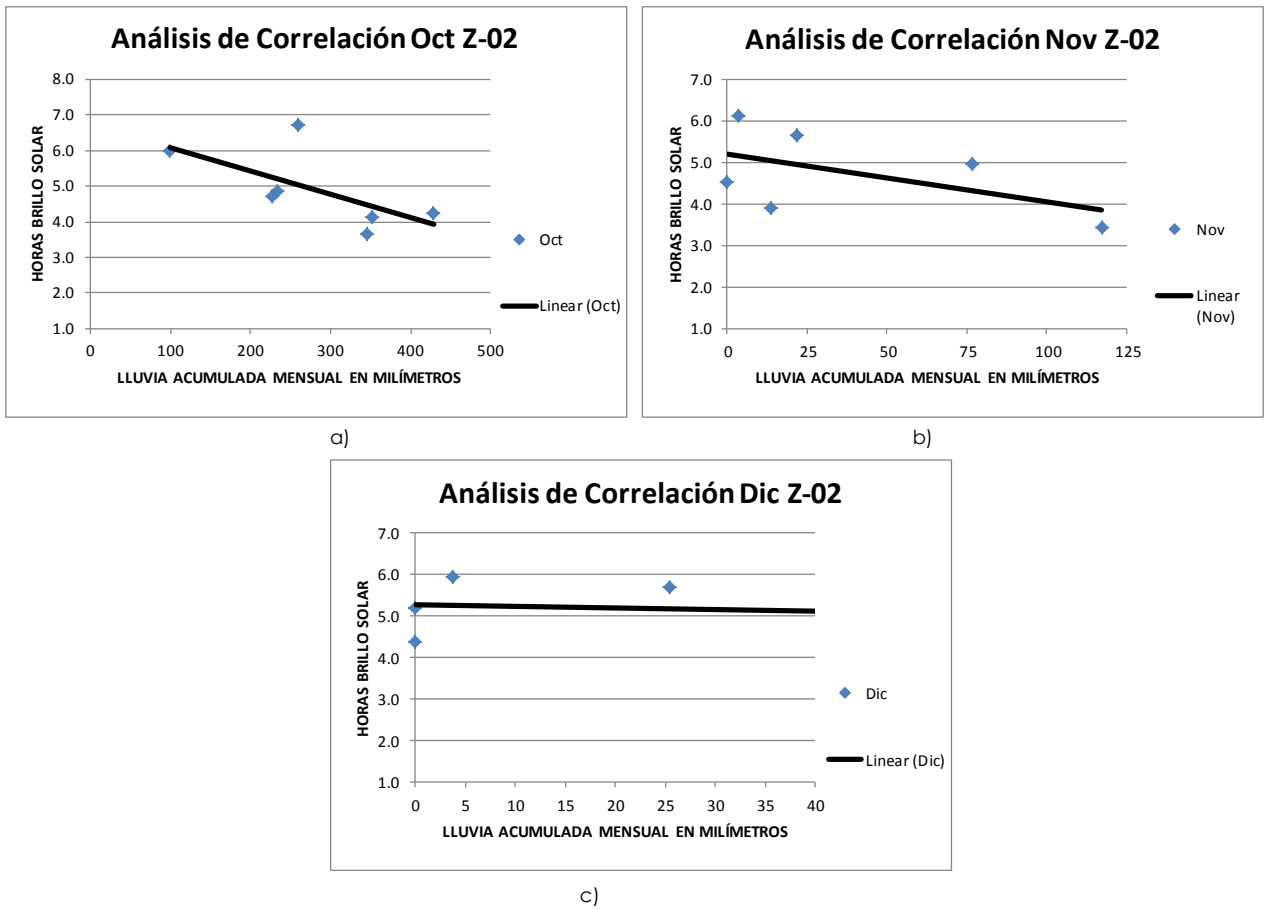


Figura 2.2.19 – Análisis de correlación estación Z-02.

Las relaciones de horas de brillo solar con lluvia acumulada en los meses de octubre, noviembre y diciembre de la estación Z-02 fueron similares a los mismos meses de la estación A-18. Entonces en los meses de diciembre de las dos estaciones evaluadas se afirma que no guardan relación las horas de brillo solar con la lluvia acumulada.

A pesar del comportamiento fuera de tendencia en algunas estaciones no se considera suficiente para concluir que los datos deben ser discriminados por presentar altas diferencias con los estudios previos.

Las estaciones restantes se muestran a continuación, donde no hay comparación con estudios anteriores y solo se puede observar su comportamiento.

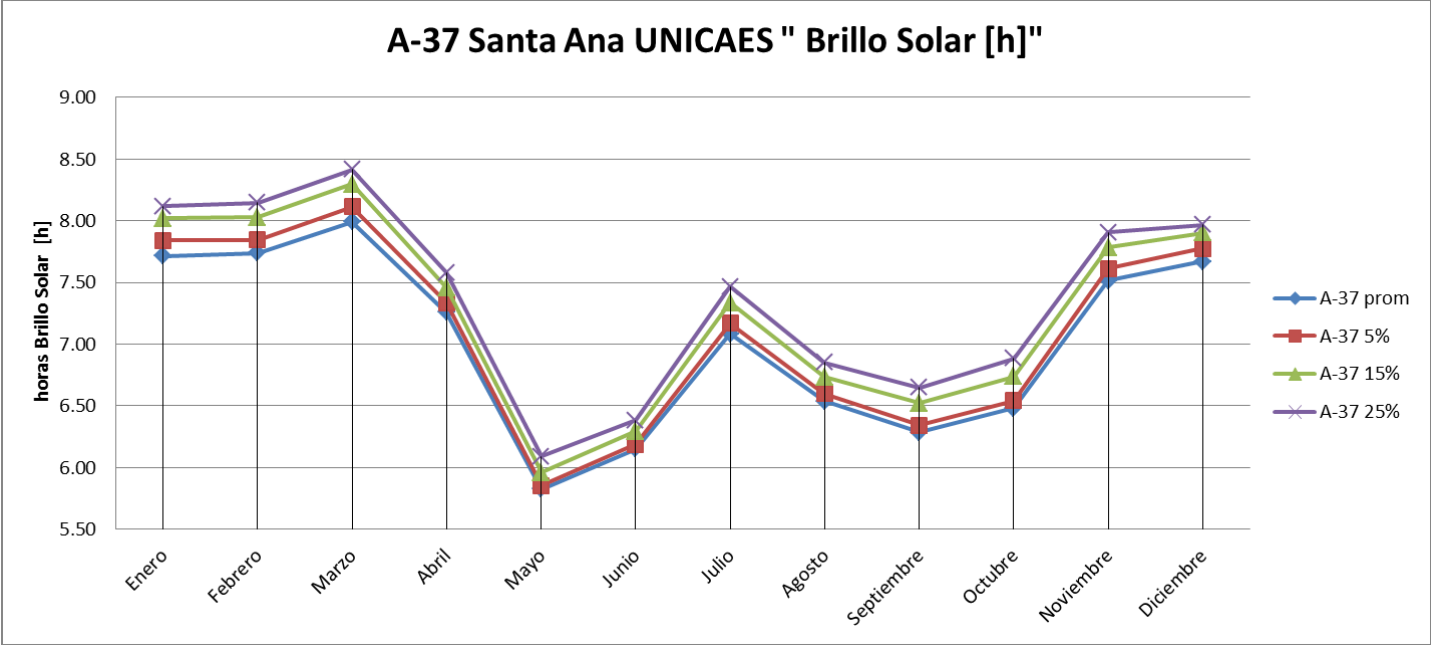


Figura 2.2.20 – Análisis grafico A-37 –Brillo Solar.

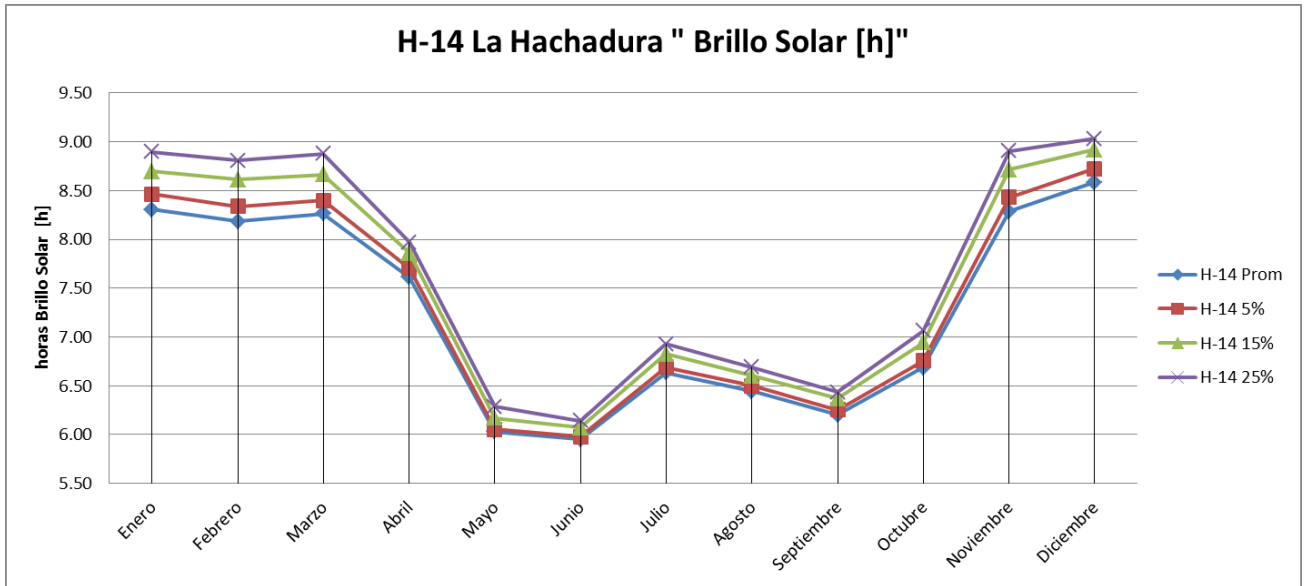


Figura 2.2.21 – Análisis grafico H-14 –Brillo Solar.

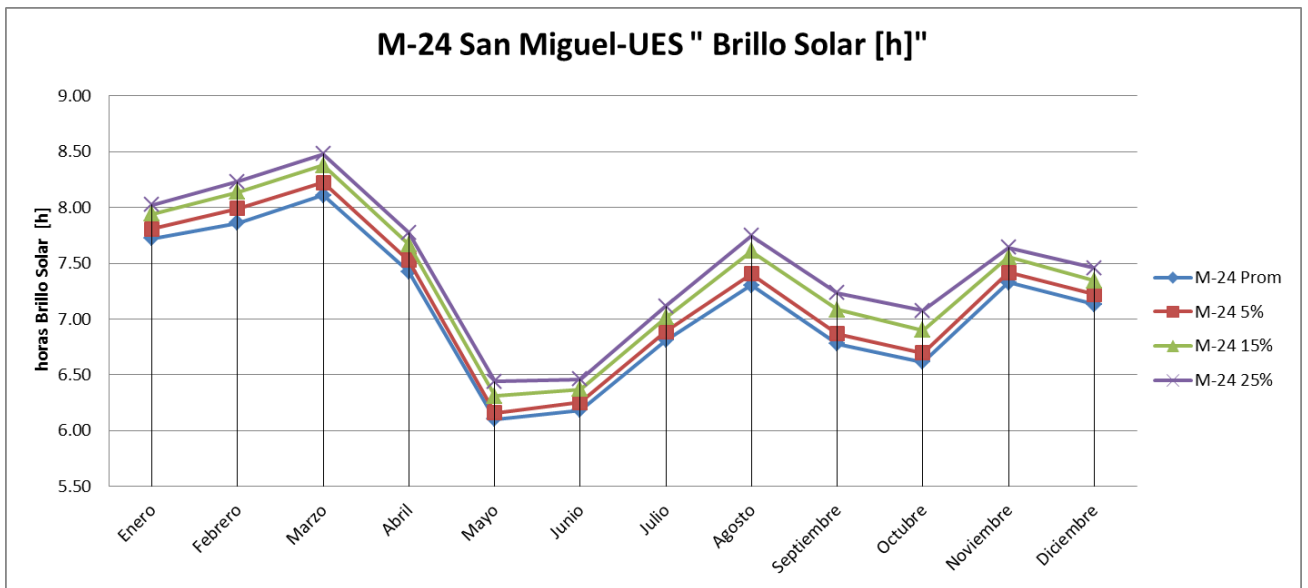


Figura 2.2.22 – Análisis grafico M-24 –Brillo Solar.

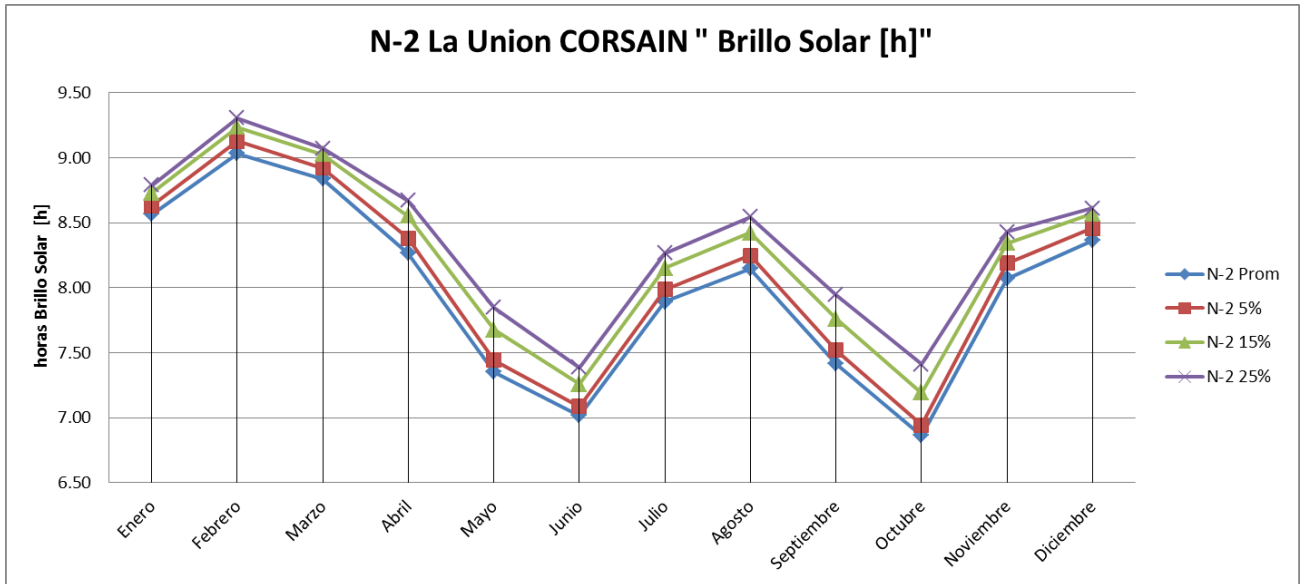


Figura 2.2.23 – Análisis grafico N-2 –Brillo Solar.

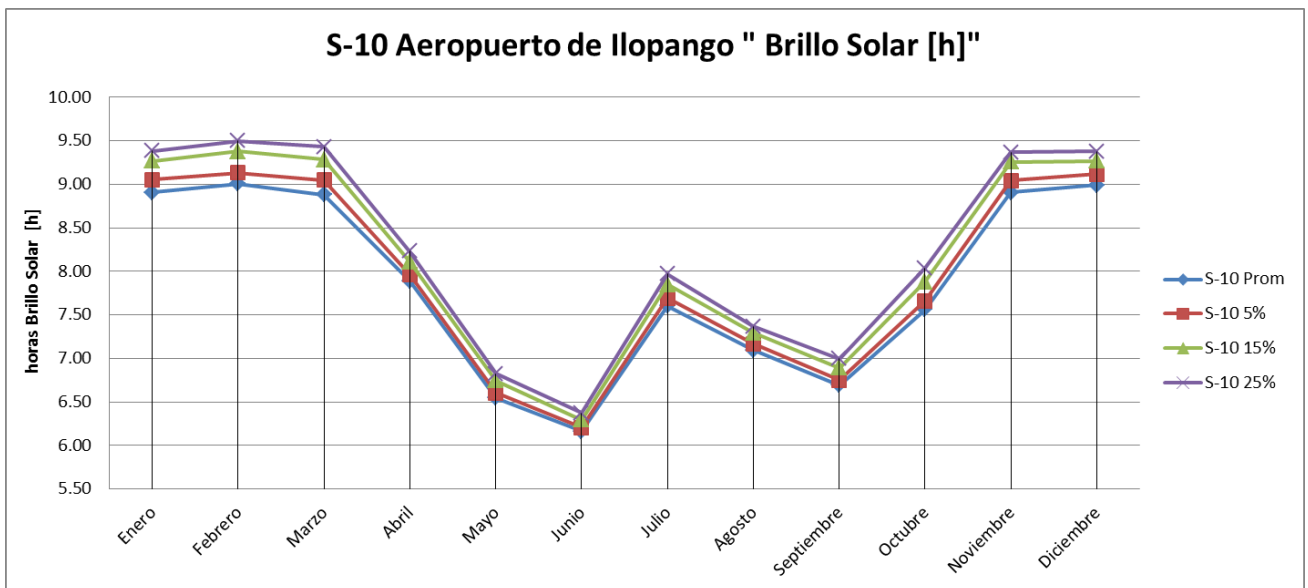


Figura 2.2.24 – Análisis grafico S-10 –Brillo Solar.

De las gráficas anteriores se puede decir que la media recortada tuvo influencia aumentado el valor de la media y siguiendo el mismo comportamiento en las tendencias.

La media recortada modificó los datos extremos de las series tendiendo resultados de aumento en el valor de la media, esto debido a que en las series iniciales había alta concentración de datos con valores bajos y que los atípicos regularmente se encontraban cercanos a cero. También la media truncada al 25% se acercó más a los valores obtenidos

en los estudios anteriores por lo que se tomará como medida representativa a la media recortada al 25% para todas las estaciones y así evitar lo menos posible la distorsión por datos atípicos y valores extremos en las series. Aunque recortar al 25% no solucione en todos los casos la falta de normalidad en la curvas este concentra la información de manera más robusta en la media ya que se ha visto que los demás porcentajes recortados el comportamiento general no es modificado en gran medida pero si aumenta la representatividad solucionando el problema de la distorsión.

2.3 Resultados de brillo solar en estaciones SNET.

Tablas de Brillo solar.

Media Recortada al 25% de Brillo Solar [h]													
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	4.26	6.44	7.18	6.63	4.60	3.84	5.47	5.33	3.67	3.42	3.62	3.18	4.82
A-31	7.42	7.38	7.09	6.16	4.38	4.79	6.06	4.64	4.54	5.11	7.20	7.60	6.06
A-37	8.12	8.15	8.42	7.58	6.09	6.38	7.47	6.85	6.65	6.88	7.91	7.97	7.43
B-10	8.73	8.96	8.75	8.09	6.91	7.02	7.56	7.17	6.92	7.37	7.51	8.29	7.79
G-03	9.18	9.38	9.33	8.50	7.10	6.51	7.28	7.14	7.01	7.28	8.63	8.90	8.11
H-14	8.90	8.81	8.88	7.97	6.29	6.14	6.93	6.69	6.43	7.06	8.91	9.03	7.75
L-04	9.04	9.44	9.33	8.18	6.53	5.81	7.05	6.90	6.24	6.71	8.36	8.35	7.81
M-24	8.02	8.23	8.48	7.78	6.44	6.46	7.11	7.75	7.23	7.08	7.64	7.46	7.49
N-02	8.79	9.30	9.07	8.67	7.85	7.39	8.27	8.54	7.94	7.41	8.43	8.61	8.48
S-10	9.38	9.50	9.43	8.23	6.82	6.37	7.97	7.37	7.00	8.04	9.37	9.38	8.32
Z-02	8.07	9.06	8.66	7.44	6.19	5.93	6.94	6.77	6.56	5.10	4.87	5.11	6.75

Tabla 2.3.1 - Brillo solar de las estaciones con media truncada al 25%.

Importantes aclarar que el valor de promedio anual se calculó sumando todas las series mensuales y aplicando la media recortada y no el promedio de las medias truncadas mensuales.

Graficas de comportamiento de todas las estaciones SNET.

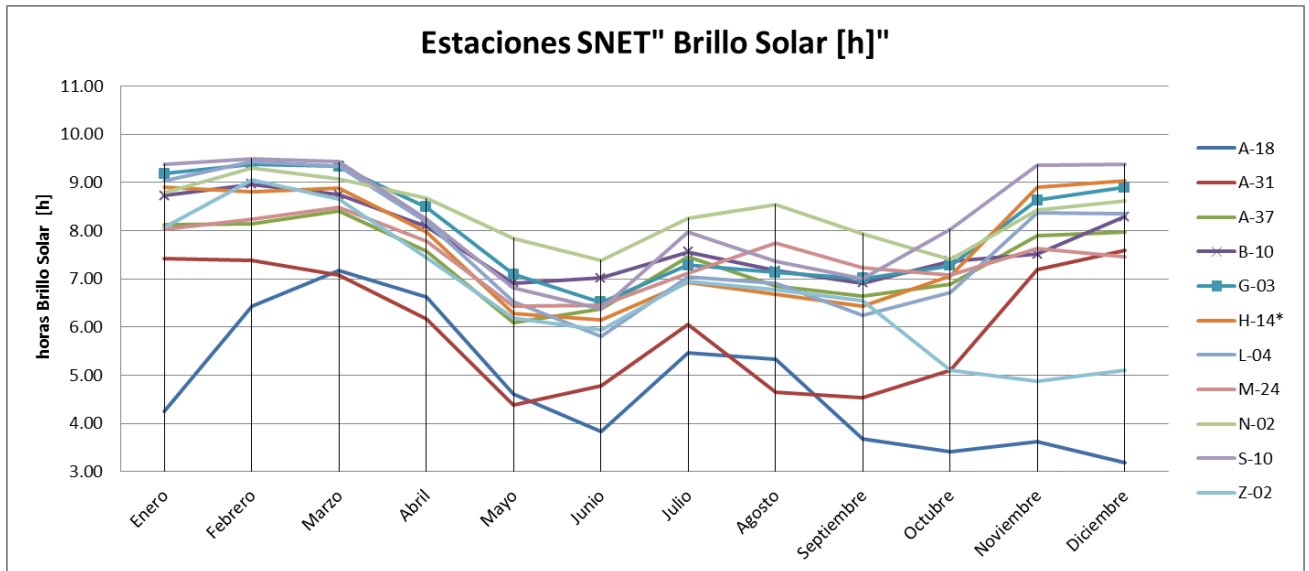


Figura 2.3.1 – Análisis gráfico Estaciones SNET –Brillo Solar.

La Ilustración 2.3.1 es útil para mostrar que aunque las estaciones se encuentren en diferentes localizaciones el comportamiento de todas ellas es similar en el transcurso del año y si alguna se distancia de la tendencia puede ser un llamado de alerta para investigar las razones que lo causan.

2.4 Actualización de datos de brillo solar

La actualización de la base de datos de brillo solar consiste en añadir los datos SWERA¹³ con los datos recientes del SNET y tener un promedio que represente un periodo de tiempo más continuo, para esto es necesario utilizar la media ponderada ya que utiliza como prioridad el peso de cada serie para hacer una distribución equitativa.

Ejemplo: Si una primera serie representa los registros de brillo solar desde 1975 al 2000 y una segunda desde 2001 al 2010, la primera serie tiene más influencia que la segunda, porque su peso es proporcional a la cantidad de datos y esta incide más en el promedio final.

La Media Ponderada se calcula de la siguiente manera:

¹³ Documento: Determinación de potencial solar y eólico en El Salvador.

Para una serie de datos no vacía.

$$X = \{x_1, x_2, x_1 \dots, x_n, \}$$

A la que le corresponden los pesos

$$W = \{w_1, w_2, w_1 \dots, w_n, \}$$

La media ponderada se calcula de la siguiente manera:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} = \frac{x_1 w_1 + x_2 w_2 + x_3 w_3 + \dots + x_n w_n}{w_1 + w_1 + w_1 + \dots + w_n} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Entonces es necesario determinar la cantidad de datos en las 11 estaciones proporcionados por SNET y también en el estudio SWERA ver siguiente tabla.

		Cantidad de Datos [horas de brillo solar] SNET												
Estacion	Codigo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1	A-18	242	250	278	270	278	239	277	279	239	244	238	240	3074
2	A-31	254	248	274	265	274	246	255	254	265	274	246	274	3129
3	A-37	257	238	273	265	278	269	277	276	269	276	268	278	3224
4	B-10	256	218	259	267	276	249	265	275	266	269	266	275	3141
5	G-03	248	253	279	270	279	240	248	279	270	279	270	279	3194
6	H-14*	243	243	274	265	269	247	236	250	246	274	265	267	3079
7	L-04	248	253	279	270	279	240	248	278	270	279	270	248	3162
8	M-24	249	249	258	267	275	249	276	277	268	274	265	276	3183
9	N-02	220	226	256	264	276	233	279	279	269	279	267	223	3071
10	S-10	160	148	162	155	161	173	177	181	174	177	175	181	2024
11	Z-02	186	196	203	208	186	210	186	216	210	217	180	155	2353

Tabla 2.4.1 - Tabla resumen de cantidad de datos de brillo solar por estación.

La información de la cantidad de datos del SWERA no fue publicada por lo que fue necesario estimarlos de la siguiente manera:

El estudio SWERA-UCA¹⁴ contiene los datos del proyecto de Solimetría y de estaciones SNET-SWERA, entonces de acuerdo con lo publicado se tiene que el número de años registrados en dichos estudios son los siguientes:

¹⁴ Tabla 2-4 de Documento: Determinación de potencial solar y eólico de El Salvador (SWERA).

Cantidad años registrados en Solimetrica -SWERA-UCA [horas de								
MES	INVESTIGACION	Estaciones						
		A-18	A-31	B-10	G-03	H-14*	L-04	Z-02
Ene	Solimetrica	15	5	9	15	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Feb	Solimetrica	17	5	9	15	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Mar	Solimetrica	17	5	9	15	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Abr	Solimetrica	17	6	9	15	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
May	Solimetrica	17	6	9	14	0	19	14
	SWERA	2	2		0	2	2	0
Jun	Solimetrica	17	6	9	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Jul	Solimetrica	17	6	9	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Ago	Solimetrica	17	6	9	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Sept	Solimetrica	17	5	7	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Oct	Solimetrica	17	6	8	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Nov	Solimetrica	17	7	10	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0
Dic	Solimetrica	17	7	10	14	0	19	14
	SWERA	2	2	2	0	2	2	0

Tabla 2.4.2 - Resumen de número de años registrado en el proyecto Solimetrica y SWERA-UCA.

En el estudio de solimetría no se tiene un total de bandas procesadas, entonces bajo el supuesto que cada día se debe registrar una medición entonces se estimó a partir de los años registrados la cantidad de datos esperados de la siguiente manera (Ver Ec. 2.9).

$$CDE = CAR * CDM \quad \text{Ec. 2.9}$$

Dónde:

CAR: Cantidad de años registrados.

CDM: Cantidad de días en cada mes.

CDE: Cantidad de datos Estimados.

También se publicó el total de bandas¹⁵ procesadas de 5 estaciones.

Código	Cantidad de bandas
A-18	508
A-31	695
B-10	698
H-14	726
L-04	695

Tabla 2.4.3 - Cantidad de bandas procesadas (Fuente tabla 2-12 SWERA).

Para este caso se tiene que hacer una fórmula diferente en la estimación de datos mensuales.

$$\begin{aligned} & \text{cantidad de datos estimados por mes} \\ & = \frac{\text{Total de datos registrados}}{12} \quad \text{Ec. 2.10} \end{aligned}$$

Cantidad de datos estimados por mes en los estudios Solimetria y SWERA.

¹⁵ Tabla 2-12 de Documento: Determinación de potencial solar y eólico de El Salvador (SWERA).

Cantidad de Datos Solimetria -SWERA-UCA [horas de brillo solar]								
MES	INVESTIGACION	Estaciones						
		A-18	A-31	B-10	G-03	H-14*	L-04	Z-02
Ene	Solimetria	465	155	279	465	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Feb	Solimetria	476	140	252	420	0	532	392
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Mar	Solimetria	527	155	279	465	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Abr	Solimetria	510	180	270	450	0	570	420
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
May	Solimetria	527	186	279	434	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Jun	Solimetria	510	180	270	420	0	570	420
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Jul	Solimetria	527	186	279	434	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Ago	Solimetria	527	186	279	434	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Sept	Solimetria	510	150	210	420	0	570	420
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Oct	Solimetria	527	186	248	434	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Nov	Solimetria	510	210	300	420	0	570	420
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0
Dic	Solimetria	527	217	310	434	0	589	434
	SWERA	42	58	58	0	61	58	0

Tabla 2.4.4 - Cantidad de datos solarimetría SWERA-UCA.

Como el estudio de SWERA-UCA es una combinación de datos, entonces la suma de los pesos representa el peso definitivo del estudio anterior. Ver siguiente tabla.

Pesos de Datos [W] Solarimetría + SWERA													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	507	518	569	552	569	552	569	569	552	569	552	569	6651
A-31	213	198	213	238	244	238	244	244	208	244	268	275	2826
B-10	337	310	337	328	337	328	337	337	268	306	358	368	3953
G-03	465	420	465	450	434	420	434	434	420	434	420	434	5230
H-14*	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	726
L-04	647	590	647	628	647	628	647	647	628	647	628	647	7630
Z-02	434	392	434	420	434	420	434	434	420	434	420	434	5110

Tabla 2.4.5 - Pesos de datos solarimetría+SWERA.

Después de obtener la cantidad de datos se estableció como sus pesos y se calculó los promedios de la siguiente manera:

$$\bar{x}_{ponderada} = \frac{w_{swera_uca} * \bar{x}_{swera_uca} + w_{SNET} * \bar{x}_{SNET}}{w_{swera_uca} + w_{SNET}} \quad Ec. 2.11$$

Los resultados fueron los siguientes:

Promedios Datos SNET- UES+Solimetría+SWERA													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	6.0	7.4	7.9	7.3	5.2	4.4	6.3	5.8	4.1	4.2	4.9	5.0	5.7
A-31	8.0	7.9	7.5	6.6	4.7	4.8	6.4	5.4	4.3	5.5	7.5	7.8	6.4
A-37	8.1	8.2	8.4	7.6	6.1	6.4	7.5	6.9	6.7	6.9	7.9	8.0	7.4
B-10	8.8	9.0	9.1	8.3	7.0	6.8	7.9	7.6	6.6	7.3	8.0	8.5	7.9
G-03	9.1	9.5	9.2	8.5	7.3	6.7	7.7	7.3	6.6	7.3	8.4	8.4	8.0
H-14	7.1	7.1	7.3	6.5	5.1	4.9	5.5	5.4	5.2	5.8	7.3	7.4	7.8
L-04	9.2	9.3	9.0	8.1	6.7	6.2	7.8	7.2	5.9	6.7	8.3	8.7	7.8
M-24	8.0	8.2	8.5	7.8	6.4	6.5	7.1	7.8	7.2	7.1	7.6	7.5	7.5
N-02	8.8	9.3	9.1	8.7	7.9	7.4	8.3	8.5	7.9	7.4	8.4	8.6	8.5
S-10	9.4	9.5	9.4	8.2	6.8	6.4	8.0	7.4	7.0	8.0	9.4	9.4	8.3
Z-02	9.0	9.6	9.2	8.1	6.8	6.6	7.8	7.6	6.8	6.8	7.5	8.1	7.8

Tabla 2.4.6 - Promedios Datos SNET – UES+Solimetría+SWERA.

2.5 Análisis Anstromg.

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):

$$\frac{H}{H_c} = a + b * \frac{n}{N} \quad \text{Ec. 2.12}$$

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,

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

En donde H_o 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:

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:

$$N_d = \frac{2}{15} w_s = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\delta * \tan\varphi) \quad Ec. 2.13$$

En donde:

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

$$\begin{aligned} \delta = & (0.006918 - 0.399912\cos\gamma + 0.070257\sen\gamma - 0.006758 \cos2\gamma \\ & + 0.000907 \sen2\gamma - 0.002697 \cos3\gamma + 0.00148 \sen3\gamma) \\ & * \frac{180}{\pi} \quad Ec. 2.14 \end{aligned}$$

En donde:

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

$$\gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad Ec. 2.15$$

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.

w_s : Angulo horario con que se oculta el sol.

Se calculó la duración astronómica del día N_d y la declinación δ para cada día, para luego hacer el promedio mensual N_d de cada mes en cada una de las estaciones consideradas.

Ver Tabla 2.5.1.

Duración astronómica promedio del día para cada estación "Nd" [horas]													
Código	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
A-18	11.29	11.57	11.93	12.31	12.63	12.79	12.73	12.46	12.10	11.72	11.39	11.21	12.01
A-31	11.25	11.55	11.93	12.33	12.67	12.84	12.77	12.48	12.11	11.71	11.35	11.17	12.01
A-37	11.27	11.56	11.93	12.32	12.65	12.81	12.74	12.47	12.10	11.71	11.37	11.19	12.01
B-10	11.28	11.56	11.93	12.32	12.64	12.81	12.74	12.47	12.10	11.72	11.37	11.20	12.01
G-03	11.27	11.55	11.93	12.32	12.65	12.82	12.75	12.48	12.10	11.71	11.37	11.18	12.01
H-14	11.28	11.56	11.93	12.32	12.64	12.80	12.74	12.47	12.10	11.72	11.38	11.20	12.01
L-04	11.28	11.57	11.93	12.32	12.64	12.80	12.73	12.46	12.10	11.72	11.38	11.20	12.01
M-24	11.30	11.58	11.93	12.31	12.62	12.78	12.71	12.45	12.10	11.73	11.40	11.23	12.01
N-02	11.31	11.58	11.94	12.31	12.61	12.77	12.71	12.45	12.10	11.73	11.40	11.23	12.01
S-10	11.29	11.57	11.93	12.31	12.63	12.79	12.73	12.46	12.10	11.72	11.39	11.21	12.01
Z-02	11.29	11.57	11.93	12.31	12.63	12.79	12.73	12.46	12.10	11.72	11.39	11.21	12.01

Tabla 2.5.1 - Duración astronómica promedio del día para cada estación "Nd" [horas].

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

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

$$H_o = \frac{24(3600)}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0.003 \cos\left(\frac{360d_n}{365}\right) \right] \left[\cos\varphi \cos\delta \sin w_s + \frac{2\pi w_s}{360} \sin\varphi \sin\delta \right] \quad Ec. 2.16$$

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

En la Tabla 2.5.2 se presenta la radiación extraterrestre para cada una de las 11 estaciones, utilizando la ecuación anterior se calculó la radiación en cada día del año para luego promediar mensual y anual.

[Ho] Radiación Extraterrestre promedio.													
Código	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
A-18	9.40	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.83	10.09	9.99	9.58	9.27	9.70
A-31	9.37	9.83	10.09	9.94	9.56	9.29	9.41	9.81	10.07	9.96	9.55	9.24	9.68
A-37	9.39	9.85	10.11	9.96	9.58	9.31	9.43	9.83	10.09	9.98	9.57	9.26	9.69
B-10	9.40	9.85	10.11	9.97	9.58	9.31	9.43	9.83	10.09	9.98	9.58	9.26	9.70
G-03	9.39	9.84	10.10	9.96	9.57	9.31	9.42	9.82	10.08	9.98	9.57	9.25	9.69
H-14	9.40	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.83	10.09	9.99	9.58	9.27	9.70
L-04	9.40	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.84	10.10	9.99	9.58	9.27	9.70
M-24	9.42	9.87	10.13	9.99	9.60	9.34	9.45	9.85	10.11	10.01	9.60	9.29	9.72
N-02	9.42	9.87	10.13	9.99	9.61	9.34	9.46	9.86	10.12	10.01	9.61	9.29	9.72
S-10	9.41	9.86	10.12	9.98	9.59	9.32	9.44	9.84	10.10	9.99	9.59	9.27	9.71
Z-02	9.41	9.86	10.12	9.98	9.59	9.32	9.44	9.84	10.10	9.99	9.59	9.27	9.71

Tabla 2.5.2 - Radiación extraterrestre [Ho] promedio para cada estación.

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

$$Y = a + b X \quad \text{Ec. 2.18}$$

Dónde:

$$Y = \frac{H}{H_0}; \text{ Radiación Medida entre la Radiación extraterrestre.}$$

$$x = \frac{N_L}{N_d}; \text{ Duración astronómica del día.}$$

a y b ; coeficientes de regresión, llamados coeficientes de Angstrom.

En el estudio SWERA-UCA se encuentran los coeficientes de las estaciones que contenían datos de brillo solar y radiación solar obteniendo los valores siguientes:

Código	b	a	a+b'	r
A-31	0.524	0.182	0.706	0.942
G-03	0.351	0.303	0.654	0.952
H-08	0.445	0.213	0.658	0.966
N-15	0.304	0.290	0.594	0.981
S-27	0.449	0.266	0.715	0.973
S-5	0.351	0.308	0.659	0.964
U-11	0.359	0.273	0.632	0.959
V-13	0.309	0.287	0.596	0.985
Z-04	0.567	0.147	0.714	0.938

Tabla 2.5.3 - Coeficientes de estaciones que contienen datos de brillo solar y radiación solar.

Para nuestro caso no se tiene estaciones que hayan registrado brillo solar y radiación solar en el mismo sitio por lo tanto no se puede calcular los coeficientes de Angstrom. Es acá donde auxiliados de otra herramienta se logra dar una solución.

Evaluación de la energía solar disponible para lugares que poseen sólo brillo solar

Los coeficientes de las estaciones que si poseían brillo solar y radiación solar fueron asignados a las que solo tenían brillo solar, basados en los siguientes criterios:

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

La cartografía de zonas de vida de El Salvador describe zonas ecológicas basadas en las elevaciones, microclimas y temperaturas promedios, registrándose en nuestro país un aproximado de 20 zonas de vida, así como se muestra en la Ilustración 2.5.2 y Tabla 2.5.4.

Si las estaciones sin registros de radiación se encuentran en la misma zona de vida, (*ver ilustración 2.5.3 y 2.5.4*) 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 tabla 2.5.6.

2.5.1 Sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge.

El sistema de zonas de vida Holdridge (en inglés, Holdridge life zones system) es un proyecto para la clasificación de las diferentes áreas terrestres según su comportamiento global bioclimático. Fue desarrollado por el botánico y climatólogo estadounidense Leslie Holdridge (1907-99) y fue publicado por vez primera en 1947 (con el título de “Determination of World Plant Formations from Simple Climatic Data”) y posteriormente actualizado en 1967 (Life Zone Ecology).

Holdridge, en 1967, definió el concepto zona de vida del siguiente modo: Una zona de vida es un grupo de asociaciones vegetales dentro de una división natural del clima, que se hacen

teniendo en cuenta las condiciones edáficas¹⁶ y las etapas de sucesión, y que tienen una fisonomía similar en cualquier parte del mundo». Esas asociaciones definen un ámbito de condiciones ambientales, que junto con los seres vivos, dan un conjunto único de fisonomía de las plantas y actividad de los animales; aunque es posible establecer muchas combinaciones, las asociaciones se pueden agrupar en cuatro clases básicas: climáticas, edáficas, atmosféricas e hídricas.

- Las asociaciones climáticas ocurren cuando tanto la precipitación y su distribución mensual como la biotemperatura son normales para la zona de vida, no hay aberraciones atmosféricas como vientos fuertes o neblinas frecuentes, y el suelo es la categoría zonal.
- Las edáficas se dan cuando las condiciones del suelo son más favorables (o menos favorables) que el suelo normal (suelo zonal) para la zona de vida.
- Las atmosféricas aparecen en donde el clima se aparta de lo normal para el sitio.
- Las hídricas ocurren en terrenos encharcados, donde el suelo está cubierto de agua durante todo el año o parte de este.

Las principales innovaciones del sistema Holdridge fueron el análisis de los efectos del calor mediante la biotemperatura, el uso de progresiones logarítmicas para obtener cambios significativos en las unidades de vegetación natural y la determinación de la relación directa entre la biotemperatura y la evapotranspiración potencial (humedad) y la relación entre la humedad y la evapotranspiración real (y en definitiva, entre la evapotranspiración real y la productividad biológica) etc.

Clases de zonas de vida.

Cuando se representan en un mapa, las zonas de vida se señalan mediante un color y el uso de unas siglas, formadas por dos grupos de letras separadas por un guion: el primer grupo, en minúsculas, corresponde a las iniciales del nombre dado a la humedad, el segundo, en mayúsculas, a la inicial de la biotemperatura; por ejemplo: bosque húmedo Tropical, se rotularía como bh-T.

¹⁶ Del suelo o relativo a él, especialmente en lo que se refiere a las plantas.

Las clases definidas dentro del sistema de Holdridge, tal como las usa la Organización internacional de investigación científica multidisciplinaria, se recogen en la siguiente Tabla.

ZONAS DE VIDA			
1	Desierto polar	20	Bosque seco templado cálido
2	Tundra subpolar seca	21	Bosque húmedo templado cálido
3	Tundra subpolar húmeda	22	Bosque mojado templado cálido
4	Tundra subpolar mojada	23	Bosque lluvioso templado cálido
5	Tundra subpolar lluviosa	24	Desierto subtropical
6	Desierto boreal	25	Monte desértico subtropical
7	Arbustal boreal seco	26	Floresta espinosa subtropical
8	Bosque boreal húmedo	27	Bosque seco subtropical
9	Bosque boreal mojado	28	Bosque húmedo subtropical
10	Bosque boreal lluvioso	29	Bosque mojado subtropical
11	Desierto fresco templado	30	Bosque lluvioso subtropical
12	Arbustal templado fresco	31	Desierto tropical
13	Estepa templada fresca	32	Monte desértico tropical
14	Bosque húmedo templado fresco	33	Floresta espinosa tropical
15	Bosque mojado templado fresco	34	Selva muy seca tropical
16	Bosque lluvioso templado fresco	35	Selva seca tropical
17	Desierto templado cálido	36	Selva húmeda tropical
18	Arbustal desértico templado cálido	37	Selva húmeda tropical
19	Arbustal espinoso templado cálido	38	Selva lluviosa tropical

Tabla 2.5.4 - Clasificación de zonas de vida de Holdridge según Organización internacional de investigación científica multidisciplinaria.

En la Ilustración 2.5.1 se observa un mapa de vida de Holdridge para toda Centroamérica, y así como para Centroamérica están definidos para la mayor parte de los países del mundo, los tipos de mapa de zonas de vidas pueden variar no solo según por la naturaleza del lugar sino que también por quien los realiza y clasifica de manera que cabe mencionar que este mapa es a manera de ejemplo, no será este mapa el que se utilizara para analizar la ubicación de las estaciones y su zona de vida, sino que será el obtenido por medio de el “SNET”.

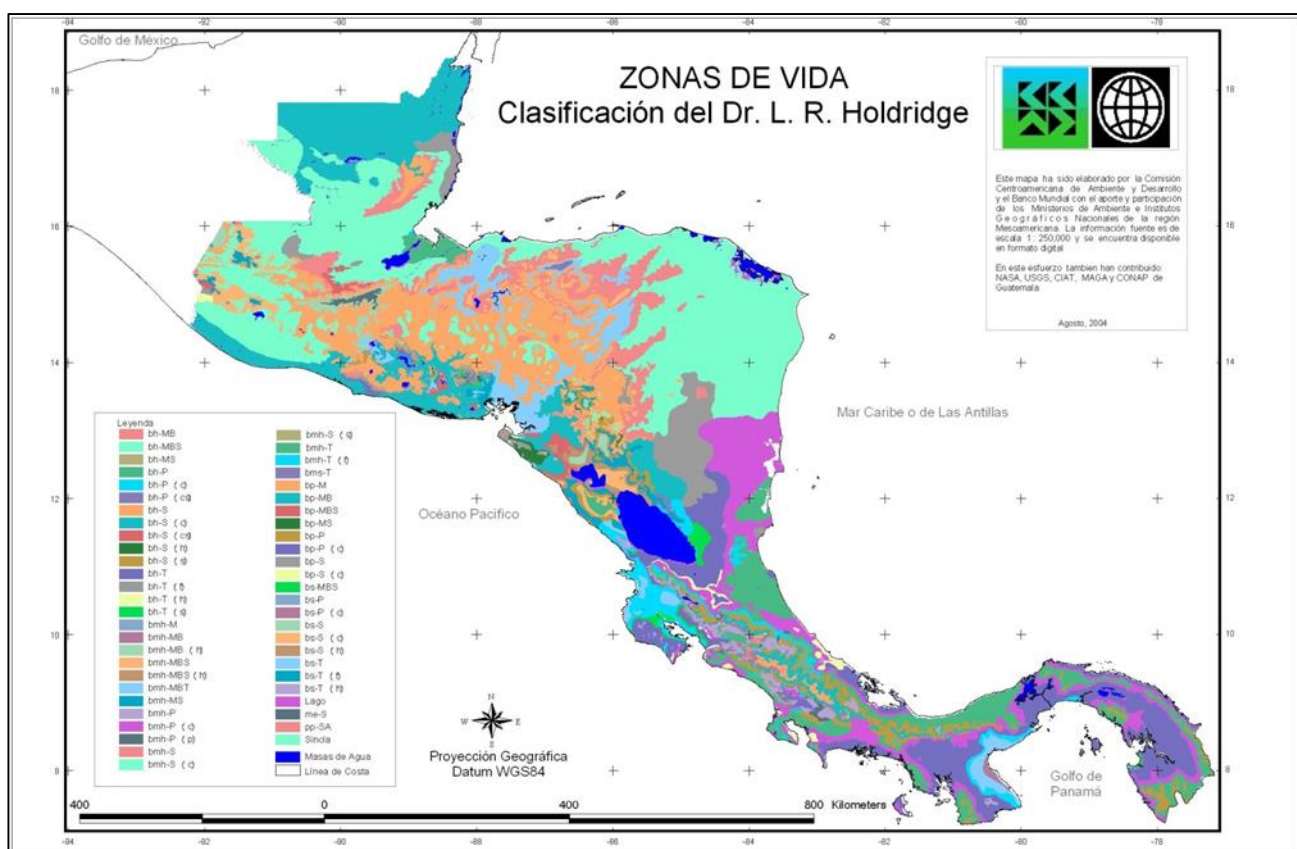


Figura 2.5.1 – Mapa de Centro América de Zonas de Vida según Dr. L. R. Holdridge.

2.5.2 Zonas de Vida de El Salvador.

Haciendo referencia a la información tomada del proyecto SWERA-EL SALVADOR, el país describe zonas ecológicas basadas en las elevaciones, microclimas y temperaturas promedio, registrándose en nuestro país 20 zonas de vida, así como se muestra en la Ilustración 2.5.2 y la Tabla 2.5.5. La información obtenida en este mapa será de vital importancia para poder realizar el análisis de Anstromg, ya que se necesitan valores de

irradiancia solar y en el caso de esta investigación solo se poseen datos de brillo solar debido a que los datos de irradiancia solar fueron descartados por factores como mala condición de los equipos de medición, error en el software de recolección de datos y otros mencionados a lo largo de este documento, etc.



Figura 2.5.2 – Mapa de zonas de vida según Dr. L.R. Holdridge de El Salvador.

	Bosque seco tropical
	Bosque seco tropical, transición a subtropical
	Bosque seco tropical, transición a subtropical (con temperaturas < 24 y temperatura media anual del aire > 24)
	Bosque húmedo tropical (con biotemperatura > 24°)
	Bosque húmedo tropical, transición a subtropical (con biotemperatura < 24°)
	Bosque húmedo subtropical (con biotemperatura y temperatura del aire, medio anuales < 24°)
	Bosque húmedo subtropical, transición a tropical (con biotemperatura > 24°)
	Bosque húmedo subtropical, transición a subhúmedo (con biotemperatura y temperatura del aire medio anuales < 24°)
	Bosque húmedo tropical, transición a seco, con menos de 2000 mm de precipitación anual
	Bosque húmedo subtropical, transición a subhúmedo. (con temperaturas del aire, medio anuales > 24°)
	Bosque húmedo subtropical (con biotemperatura < 24°, pero con temperaturas del aire, medio anuales > 24°)
	Bosque húmedo montano bajo
	Bosque húmedo montano bajo subtropical
	Bosque húmedo subtropical, transición a perhúmedo (mayor a 2000 mm de precipitación anual)
	Bosque muy húmedo subtropical
	Bosque muy húmedo montano bajo subtropical
	Bosque muy húmedo montano subtropical
	Bosque muy húmedo subtropical, transición a húmedo
	Bosque muy húmedo, montano bajo subtropical, transición a húmedo
	No codificado

Tabla 2.5.5 - Clasificación de zonas de vida de en El Salvador.

2.5.3 Ubicación de las estaciones con respecto a las zonas de vida.

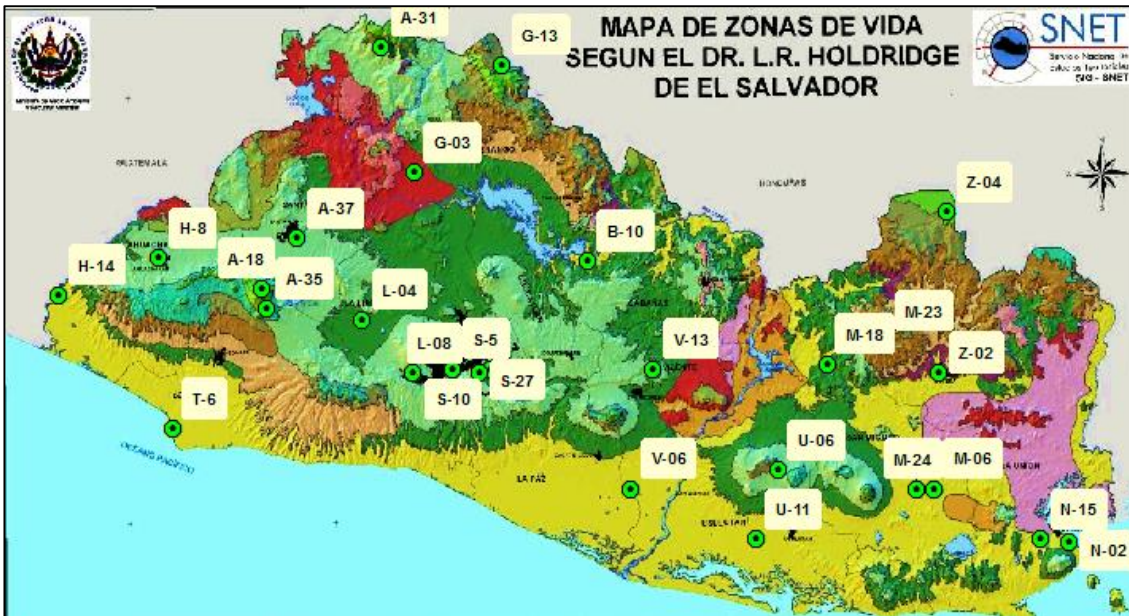


Figura 2.5.3 – Ubicación de las estaciones en el mapa de zonas de vida de Holdridge de El Salvador.

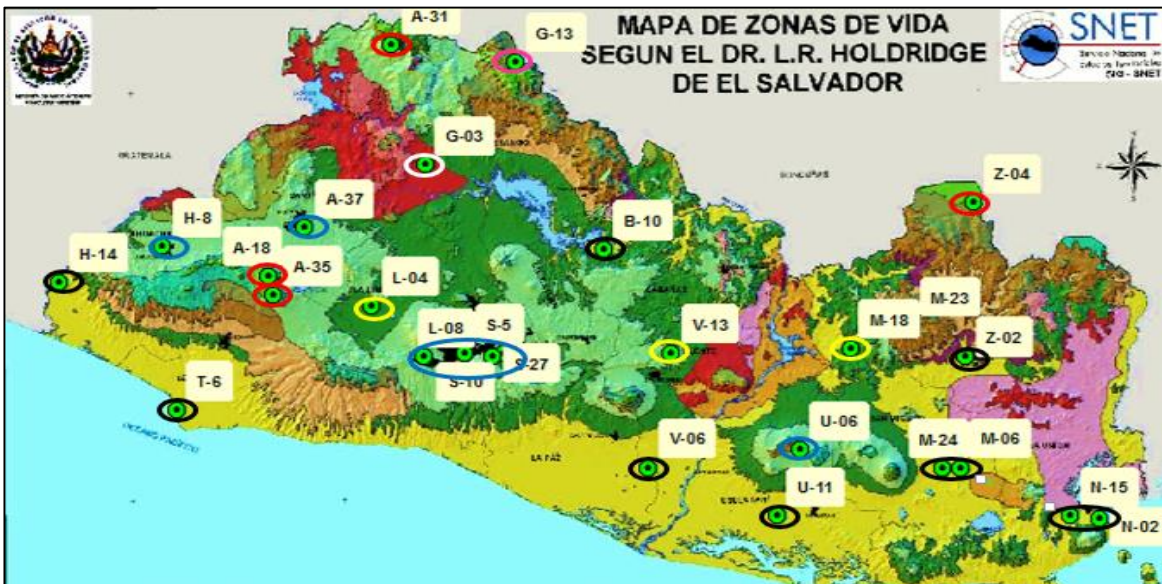


Figura 2.5.4 – Emparejamiento de estaciones por zona de vida.

En la Ilustración 2.5.4 se muestran las estaciones estudiadas y los emparejamientos entre ellas para asignar los coeficientes de la ecuación de Angstrom.

En el siguiente cuadro se muestra cuáles fueron los coeficientes asignados a las 11 estaciones.

Código Estación	Elevación msnm	Estación Fuente	a	b
A-18	1752	a31	0.182	0.524
A-31	1857	a31	0.182	0.524
A-37	665	s27	0.266	0.449
B-10	207	n15	0.29	0.304
G-03	327	g3	0.303	0.351
H-14	43	u11	0.273	0.359
L-04	480	v13	0.287	0.309
M-24	108	n15	0.29	0.304
N-02	12	u11	0.273	0.359
S-10	624	s27	0.266	0.449
Z-02	273	n15	0.29	0.304

Tabla 2.5.6 - Datos de radiación calculados por el modelo de Angstrom para estimación de los mapas de potencial solar

Radiación Solar' $H=[a+b(Ni/Nd)]*H_o$													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	4.35	5.08	5.33	4.90	3.81	3.39	4.16	4.18	3.63	3.71	3.89	3.86	4.18
A-31	5.20	5.30	5.17	4.60	3.59	3.51	4.17	4.01	3.71	4.26	5.03	5.06	4.45
A-37	5.54	5.74	5.89	5.40	4.62	4.56	4.99	5.04	5.17	5.29	5.54	5.42	5.27
B-10	4.96	5.18	5.28	4.93	4.38	4.21	4.51	4.68	4.59	4.80	4.82	4.83	4.75
G-03	5.51	5.83	5.81	5.43	4.85	4.53	4.85	4.99	4.98	5.20	5.37	5.25	5.21
H-14	4.70	4.85	4.97	4.61	4.01	3.83	4.04	4.21	4.30	4.50	4.81	4.72	4.89
L-04	5.06	5.27	5.25	4.88	4.33	4.08	4.50	4.59	4.41	4.63	4.91	4.90	4.73
M-24	4.76	5.00	5.13	4.82	4.27	4.14	4.35	4.72	4.77	4.74	4.74	4.57	4.66
N-02	5.20	5.54	5.53	5.25	4.77	4.49	4.79	5.12	5.14	5.00	5.17	5.09	5.12
S-10	6.01	6.26	6.28	5.65	4.88	4.57	5.17	5.23	5.31	5.74	6.09	5.95	5.60
Z-02	5.01	5.33	5.30	4.90	4.34	4.18	4.50	4.68	4.65	4.65	4.70	4.73	4.73

Tabla 2.5.7 - Radiación solar de las 11 estaciones calculadas por método de Angstrom.

Para la estimación del mapa de radiación solar se ocupó los datos las 11 estaciones de la Tabla 2.5.3 más 16 del SWERA-UCA (ver tabla 3-9 de documento SWERA-UCA¹⁷), haciendo un total de 27 estaciones. A continuación se muestra la tabla final (Tabla 2.5.8) de radiación solar utilizada.

¹⁷ Documento: Determinación del Potencial Solar y Eólico en El Salvador.

Radiacion Solar' $H=[a+b(Ni/Nd)]*H_o$													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	4.3	5.1	5.3	4.9	3.8	3.4	4.2	4.2	3.6	3.7	3.9	3.9	4.2
A-31	5.2	5.3	5.2	4.6	3.6	3.5	4.2	4.0	3.7	4.3	5.0	5.1	4.5
A-35	4.4	4.7	4.7	4.4	4.0	3.7	5.1	5.0	3.7	3.7	4.2	4.2	4.3
A-37	5.5	5.7	5.9	5.4	4.6	4.6	5.0	5.0	5.2	5.3	5.5	5.4	5.3
B-10	5.0	5.2	5.3	4.9	4.4	4.2	4.5	4.7	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8
G-03	5.5	5.8	5.8	5.4	4.8	4.5	4.8	5.0	5.0	5.2	5.4	5.2	5.2
G-13	4.6	5.0	5.6	5.3	5.1	5.0	5.5	5.5	4.8	4.7	4.3	4.3	5.0
H-08	5.0	5.4	5.7	5.5	5.0	4.7	5.2	5.0	4.3	4.5	4.6	4.5	5.0
H-14	4.7	4.8	5.0	4.6	4.0	3.8	4.0	4.2	4.3	4.5	4.8	4.7	4.9
L-04	5.1	5.3	5.2	4.9	4.3	4.1	4.5	4.6	4.4	4.6	4.9	4.9	4.7
L-08	5.0	5.4	5.7	5.3	4.7	4.4	5.2	5.0	4.4	4.4	4.7	4.7	4.9
M-06	4.5	5.0	5.4	5.4	5.0	4.9	5.2	5.2	4.8	4.6	4.4	4.4	4.9
M-18	4.6	5.1	5.4	5.3	4.9	4.8	5.1	5.0	4.6	4.4	4.4	4.3	4.8
M-23	4.6	5.2	5.4	4.5	3.7	3.7	4.9	4.7	4.0	3.9	4.2	4.0	4.4
M-24	4.8	5.0	5.1	4.8	4.3	4.1	4.3	4.7	4.8	4.7	4.7	4.6	4.7
N-02	5.2	5.5	5.5	5.3	4.8	4.5	4.8	5.1	5.1	5.0	5.2	5.1	5.1
N-15	4.7	5.1	5.4	5.3	4.8	5.0	5.2	5.2	4.8	4.7	4.5	4.4	4.9
S-05	4.9	5.4	5.7	5.4	4.9	5.1	5.5	5.2	4.6	4.8	4.8	4.8	5.1
S-10	6.0	6.3	6.3	5.6	4.9	4.6	5.2	5.2	5.3	5.7	6.1	6.0	5.6
S-27	5.1	5.6	6.2	5.9	5.2	5.3	5.9	5.6	4.9	4.8	5.0	4.8	5.4
T-06	4.9	5.3	5.6	5.5	5.1	4.9	5.3	5.2	4.8	4.7	4.7	4.6	5.1
U-06	5.0	5.6	5.8	5.4	4.6	4.2	5.2	5.1	4.1	4.2	4.6	4.8	4.9
U-11	4.9	5.4	5.5	5.2	4.8	4.8	5.4	5.4	5.0	4.8	4.8	4.7	5.1
V-06	4.8	5.3	5.6	5.5	5.1	4.9	5.3	5.3	4.8	4.7	4.6	4.6	5.0
V-13	4.6	5.2	5.3	5.1	4.8	4.7	5.1	5.1	4.6	4.5	4.6	4.4	4.8
Z-02	5.0	5.3	5.3	4.9	4.3	4.2	4.5	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
Z-04	4.4	4.9	5.1	4.8	4.1	4.0	4.5	4.3	3.5	3.7	3.7	3.9	4.2

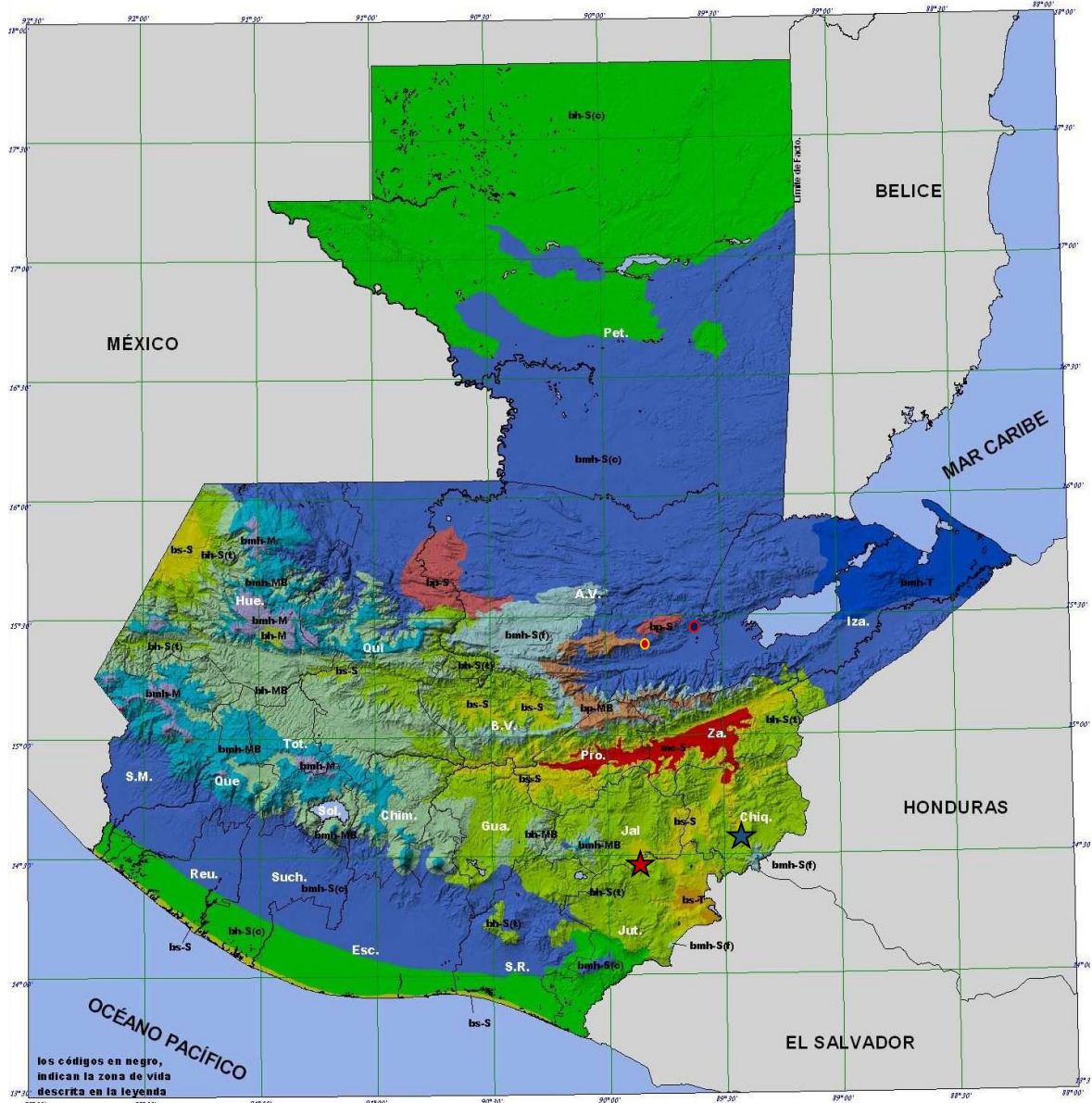
Tabla 2.5.8 - Radiación solar mensual y anual de todas las estaciones.

2.5.5 Análisis por el modelo de Angstrom para estimaciones La Ceibita y Esquipulas, Guatemala.

Para hacer posible el análisis de la estación Esquipulas y Ceibita se solicitó información al *Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología* (INSIVUMEH) de Guatemala referente a la localización geográfica de las estaciones en estudio. Luego se procedió a aplicar el análisis de Angstrom como se mostró anteriormente.

Estación Esquipulas (Departamento de Chiquimula, Esquipulas).

Utilizando la Ec. 2.12 se procedió a calcular los promedios mensuales de la duración astronómica del día (N_d), el promedio mensual de la radiación solar extraterrestre (para superficie horizontal, Ec. 2.16) partiendo del supuesto físico del modelo de Angstrom, que establece existe una relación directa entre la radiación solar global y brillo solar (Ec. 2.18). Para continuar, necesitamos de información referente a las coordenadas geográficas de la estación, su respectiva clasificación en el mapa de vida de Holdridge (para Guatemala, ilustración 2.5.5) y la estación asignada, se presentan a continuación.

















	me-S	Monte espinoso Subtropical		bp-S	Bosque pluvial Subtropical
	bs-T	Bosque seco Tropical		bmh-T	Bosque muy húmedo Tropical
	bs-S	Bosque seco Subtropical		bh-MB	Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical
	bh-S(t)	Bosque húmedo Subtropical (templado)		bmh-MB	Bosque muy húmedo Montano Bajo Subtropical
	bh-S(c)	Bosque húmedo Subtropical (cálido)		bp-MB	Bosque pluvial Montano Bajo Subtropical
	bmh-S(c)	Bosque muy húmedo Subtropical (cálido)		bh-M	Bosque húmedo Montano Subtropical
	bmh-S(f)	Bosque muy húmedo Subtropical (frío)		bmh-M	Bosque muy húmedo Montano Subtropical

Figura 2.5.5 – Mapa de zonas de Vida de Holdrige, Guatemala. Fuente: MAGA¹⁸ (2002).

¹⁸ Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.

En la ilustración 2.5.5 se muestra la ubicación de la estación Esquipulas (azul) y Ceibita (rojo). Observe que cada punto está situado en la misma zona de vida, según Holdrige, bh-MB (Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical). Esta información es indispensable para completar el análisis de Angstrom. Para la Est. Esquipulas, la información necesaria se presenta a continuación:

Coordenadas: LAT: 14.5588889°

LONG: -89.3419444°

MSNM: 950 m.

Clasificación: bh-MB (Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical). Según Clasificación de Holdrige.

Estación asignada: H8 (bh-MBS, 725 msnm, a=0.213, b=0.445, 'a+b'=0.658, r=0.966).

A continuación los promedios finales para los parámetros del modelo de Angstrom:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Nd	11.24	11.54	11.93	12.34	12.67	12.85	12.77	12.49	12.11	11.70	11.34	11.16	12.01

Tabla 2.5.9 - Duración astronómica mensual y anual promedio presentada en horas.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Ho	9.27	9.72	9.98	9.84	9.45	9.19	9.31	9.70	9.96	9.85	9.45	9.14	9.57

Tabla 2.5.10 - Radiación solar extraterrestre mensual y anual promedio presentada en kWh/m²/día.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Ni	5.10	6.46	7.47	7.53	6.39	5.66	6.23	6.46	5.71	4.96	4.45	3.88	5.98

Tabla 2.5.11 - Brillo solar mensual y anual promedio presentado en horas.

Resolviendo la Ec. 2.18, tenemos como resultado los promedios de Radiación solar en la Est. Esquipulas:

Radiación Solar $H=a+b(Ni/Nd)*Ho$ [Horas]													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
H	2.08	2.63	2.99	2.89	2.33	2.01	2.23	2.44	2.30	2.07	1.86	1.63	2.33

Tabla 2.5.12 - Radiación solar mensual y anual promedio Est. Esquipulas.

Estación La Ceibita (Departamento de Jalapa, Monjas), Guatemala.

La Ceibita se analizó de la misma manera que la Estación Esquipulas. Las coordenadas geográficas de la estación, su respectiva clasificación en el mapa de vida de Holdrige (para Guatemala), la estación asignada y las tablas resumen se presentan a continuación:

Coordenadas: LAT: 14.4927778°

LONG: -89.8755556°

MSNM: 959 m.

Clasificación: bh-MB (Bosque húmedo Montano Bajo Subtropical). Según Clasificación de Holdrige.

Estación asignada: H8 (bh-MBS, 725 msnm, a=0.213, b=0.445, 'a+b'=0.658, r=0.966).

A continuación los promedios finales para los parámetros del modelo de Angstrom:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Nd	11.25	11.54	11.93	12.33	12.67	12.84	12.77	12.49	12.11	11.70	11.35	11.16	12.01

Tabla 2.5.13 - Duración astronómica mensual y anual promedio presentada en horas.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Ho	9.27	9.72	9.98	9.84	9.46	9.19	9.31	9.70	9.96	9.86	9.45	9.14	9.57

Tabla 2.5.14 - Radiación solar extraterrestre mensual y anual promedio presentada en kWh/m²/día.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
Ni	7.01	7.56	8.07	7.84	6.20	5.96	6.93	6.61	5.89	6.01	6.74	6.26	6.93

Tabla 2.5.15 - Brillo solar mensual y anual promedio presentado en horas.

Resolviendo la Ec. 2.18, tenemos como resultado los promedios de Radiación solar en la Est.

Esquipulas:

Radiación Solar $H=a+b(Ni/Nd)*Ho$ [Horas]													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
H	2.78	3.05	3.22	3.00	2.27	2.11	2.46	2.50	2.37	2.46	2.71	2.49	2.67

Tabla 2.5.16 - Radiación solar mensual y anual promedio Est. La Ceibita.

Estación meteorológica CEL (Centro de Gobierno).

Para esta estación en particular no fue necesario realizar ningún análisis o tratamiento estadístico, pues ya CEL brindó los consolidados de radiación promedio finales para el periodo del 2009 al 2013. A continuación se presenta la información referente a las coordenadas geográficas de la estación y la tabla de radiación promedio (horizontal).

Coordenadas: LAT: 13.704737°

LONG: -89.199013°

MSNM: 675 m.

Radiación Prom (W/m ²)						
MES	2009	2010	2011	2012	2013	Prom
Enero	-	499.23	476.67	471.90	487.19	483.75
Febrero	-	463.62	460.67	473.83	504.27	475.60
Marzo	-	533.08	536.63	539.75	533.48	535.73
Abril	-	419.13	435.12	467.69	434.00	438.99
Mayo	-	391.43	434.75	377.36	396.18	399.93
Junio	385.16	390.34	418.17	383.08	437.07	402.76
Julio	497.54	371.00	422.75	497.29	467.63	451.24
Agosto	522.75	351.78	415.56	454.87	463.48	441.69
Septiembre	461.93	339.84	400.16	469.96	333.59	401.10
Octubre	470.03	507.50	375.11	442.76	424.31	443.94
Noviembre	449.72	504.20	508.01	523.26	455.11	488.06
Diciembre	452.14	493.71	483.87	477.49	460.00	473.44
Anual	462.75	438.74	447.29	464.94	449.69	452.68

Tabla 2.5.17 – Irradiancia solar mensual y anual promedio de Est. CEL.

Estación meteorológica secundaria.

Al igual que en la estación de CEL, la estación secundaria proporciono la información neta, la cual se procesó estadísticamente para obtener los consolidados finales de radiación solar. A continuación se presenta la información referente a las coordenadas geográficas de la estación y la tabla de radiación promedio (horizontal).

Coordenadas: LAT: 13.9566°

LONG: -89.199013°

MSNM: 675 m.

Radiación Prom (kWh/m ²)					
MES	2009	2010	2011	2012	Prom
Enero	-	5.54	5.75	5.61	5.63
Febrero	-	5.50	6.41	5.96	5.96
Marzo	-	6.56	7.03	6.99	6.86
Abril	-	5.80	5.97	6.50	6.09
Mayo	-	5.69	6.24	5.68	5.87
Junio	-	5.72	5.68	5.69	5.70
Julio	-	5.77	6.36	6.70	6.27
Agosto	-	5.76	6.20	6.13	6.03
Septiembre	-	4.91	5.53	6.52	5.65
Octubre	-	5.92	4.74	5.71	5.46
Noviembre	-	5.70	5.90	-	5.80
Diciembre	4.72	5.63	5.02	-	5.12
Anual	4.72	5.71	5.90	6.15	5.87

Tabla 2.5.18 - Radiación solar mensual y anual promedio de estaciones secundarias.

2.5 Análisis Comparativo de radiación solar

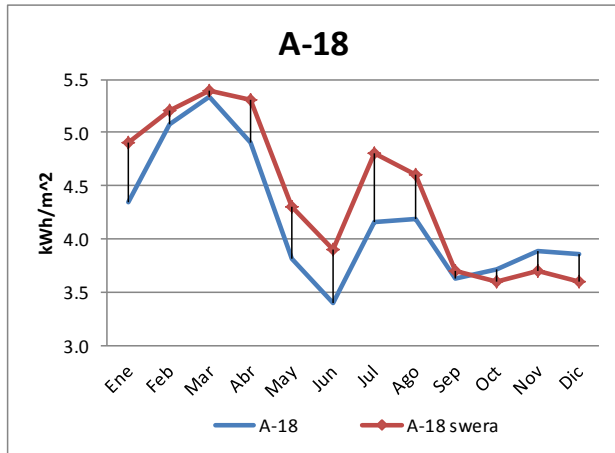
Después de haber obtenido los valores de radiación solar presentados en la tabla 2.25 es necesario realizar un análisis comparativo con el estudio del SWERA, esto con el objetivo de observar cuales son las diferencias.

$$\text{Diferencia \%} = 1 - \frac{\text{Radiación "Actualizado"}}{\text{Radiación "SWERA"}} \quad \text{Ec. 2.7}$$

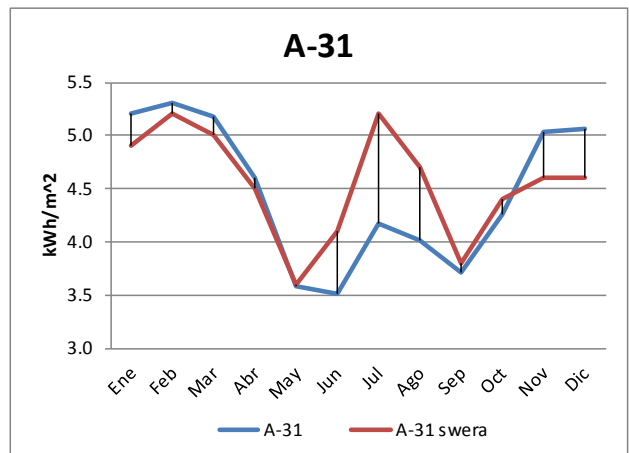
Comparacion Radiacion Solar [kWh/m^2]													
Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
A-18	4.3	5.1	5.3	4.9	3.8	3.4	4.2	4.2	3.6	3.7	3.9	3.9	4.2
A-18 swera	4.9	5.2	5.4	5.3	4.3	3.9	4.8	4.6	3.7	3.6	3.7	3.6	4.4
Diferencia %	11%	2%	1%	7%	11%	13%	13%	9%	2%	3%	5%	7%	5%
A-31	5.2	5.3	5.2	4.6	3.6	3.5	4.2	4.0	3.7	4.3	5.0	5.1	4.5
A-31 swera	4.9	5.2	5.0	4.5	3.6	4.1	5.2	4.7	3.8	4.4	4.6	4.6	4.6
Diferencia %	6%	2%	3%	2%	0%	14%	20%	15%	2%	3%	9%	10%	2%
B-10	5.0	5.2	5.3	4.9	4.4	4.2	4.5	4.7	4.6	4.8	4.8	4.8	4.8
B-10 swera	4.4	4.8	5.3	5.2	4.9	4.7	5.1	5.1	4.5	4.5	4.3	4.2	4.8
Diferencia %	13%	8%	0%	5%	11%	10%	12%	8%	2%	7%	12%	15%	0%
G-03	5.5	5.8	5.8	5.4	4.8	4.5	4.8	5.0	5.0	5.2	5.4	5.2	5.2
G-03 swera	4.9	5.4	5.7	5.5	5.2	5.2	5.4	5.4	5.0	4.9	4.7	4.6	5.2
Diferencia %	13%	8%	2%	1%	7%	13%	10%	8%	0%	6%	14%	14%	1%
L-04	5.1	5.3	5.2	4.9	4.3	4.1	4.5	4.6	4.4	4.6	4.9	4.9	4.7
L-04 swera	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.6	5.1	4.9	4.4	4.3	4.3	4.3	4.7
Diferencia %	12%	8%	3%	4%	10%	11%	12%	6%	0%	8%	14%	14%	1%
Z-02	5.0	5.3	5.3	4.9	4.3	4.2	4.5	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
Z-02 swera	4.5	5.0	5.3	5.2	4.8	4.8	5.1	5.1	4.7	4.6	4.4	4.3	4.8
Diferencia %	11%	7%	0%	6%	10%	13%	12%	8%	1%	1%	7%	10%	2%

Tabla 2.5.19 - Análisis Comparativo y sus diferencias %.

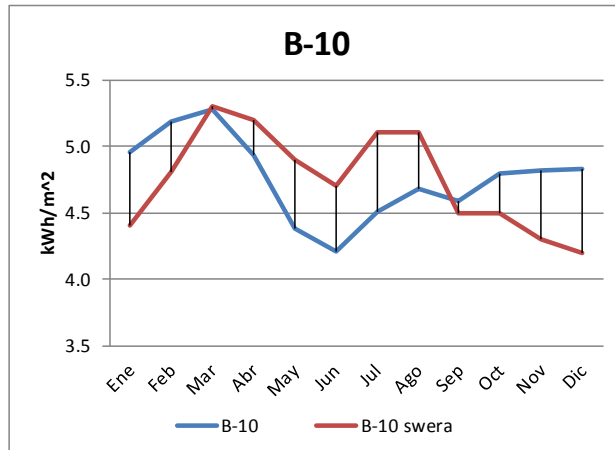
Graficas:



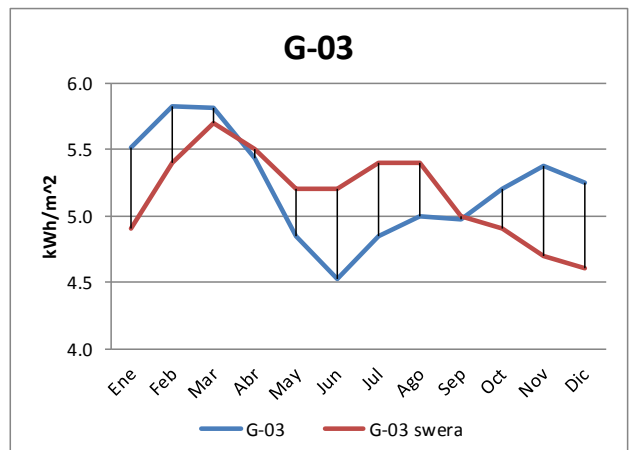
a)



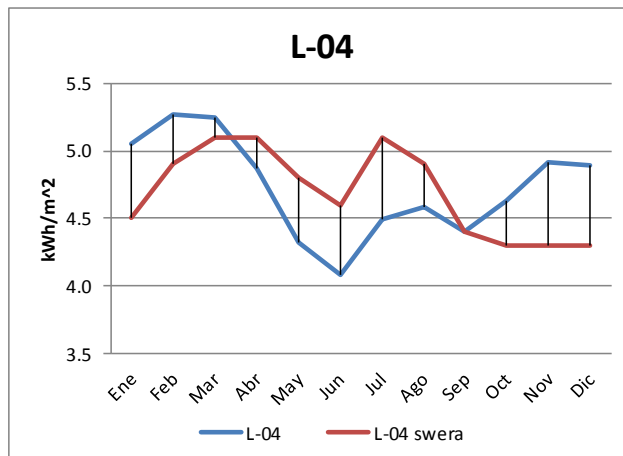
b)



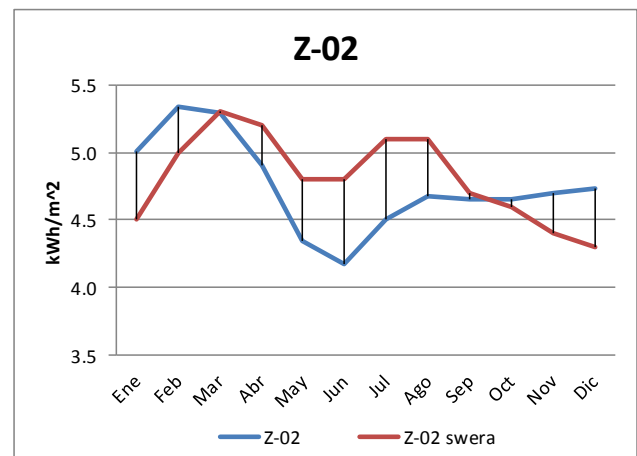
c)



d)



e)



f)

Figura 2.5.6 – Análisis Comparativo con gráficos de tendencias.

Análisis:

En las Ilustraciones 2.5.6 a) y b). Se observa que las estaciones A-18 y A-31 presentan tendencias similares a los obtenidos en el SWERA, no así en las estaciones B-10, G-03, L-04 y Z-02 porque en los meses de septiembre a diciembre presentan tendencias contrarias al SWERA con un claro aumento en la radiación, alrededor del 2% al 15%. “ver *Ilustraciones 2.5.6 c), d), e) y f) y tabla 2.36*”

En los meses de enero a marzo los valores del SWERA son menores a los actualizados con una diferencia entre el 2% y 13%. Y de marzo a septiembre los valores actualizados son menores a los del SWERA con una diferencia entre el 2% al 20%.

En los la evaluación anual se observa que los datos del SWERA son mayores a los actualizados pero que las diferencias no superan el 5% , por lo que se puede afirmar que los resultados son similares cuando se evalúa un periodo completo de un año, pero en periodos de meses porque se llega a tener diferencias hasta del 20%.

Capítulo III

Realización de Mapas de Radiación
Solar, Teoría, conceptos de
Interpolación.

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

Aplicado y finalizado el análisis de regresión de Ångström, tenemos como resultado una tabla con el conjunto de estaciones meteorológicas a implementar en el estudio. Se obtuvo un total de 31 estaciones a escala nacional (incluyendo dos estaciones de Guatemala) con sus valores calculados y estimados de radiación mensual y promedio anual. Los valores de radiación solar se presentan en la tabla 2.5.8 respectivamente.

Es importante mencionar que la Interpolación de Kriging es una de las partes medulares de nuestro estudio, por lo que a continuación profundizaremos sobre la aplicación del mismo.

3.1.1 ¿Qué es Kriging?

Es un método geoestadístico de estimación de puntos que utiliza un modelo de variograma para la obtención de datos. Calcula los pesos que se darán a cada punto de referencias usadas en la valoración. Esta técnica de interpolación se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. Fue desarrollada inicialmente por *Danie G. Krige* a partir del análisis de regresión entre muestras, las cuales fijaron la base de la geoestadística lineal.

Las herramientas de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) y Spline son consideradas métodos de interpolación determinísticos porque están basados directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas especificadas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

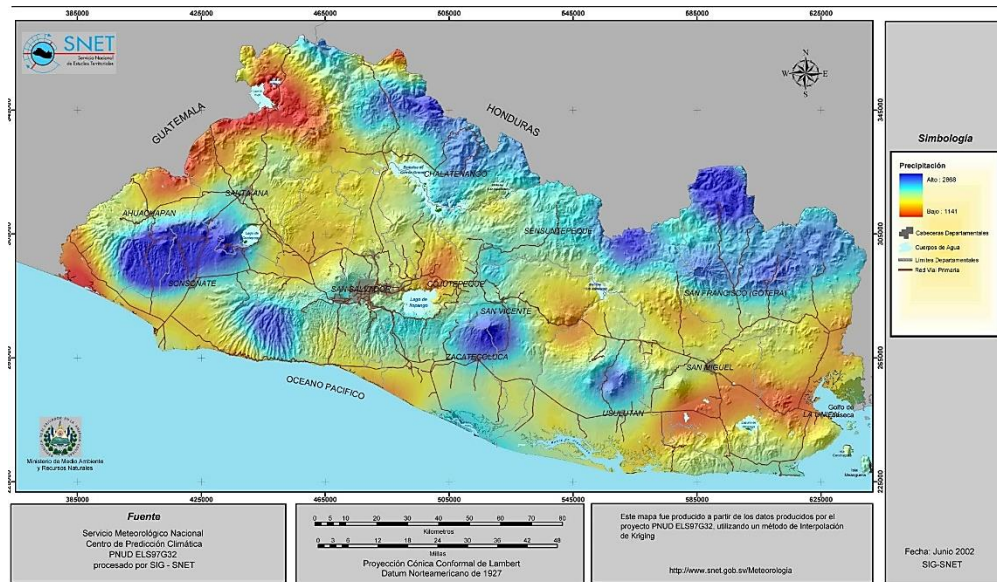


Figura 3.1.1 – Mapa de Pluviosidad de El Salvador generado con el método de Interpolación de Kriging.

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. La herramienta Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos. Se utiliza a menudo en la ciencia del suelo y la geología. 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.

3.1.2 Los métodos kriging

Existen dos métodos kriging: ordinario y universal.

El **kriging ordinario** es el más general y más utilizado de los métodos kriging y es el predeterminado. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable a menos que haya una razón científica para rechazarla.

El **kriging universal** presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, por ejemplo, un viento prevaleciente, y puede modelarse a través de la función determinística polinómica. Esta función polinómica se resta de los puntos medidos originalmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios. Una vez que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de realizar una predicción, se vuelve a sumar la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. El kriging universal solo se debe utilizar si se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla. **Debido a esto, se optó por utilizar el Kriging ordinario en los análisis de las estaciones.**

3.1.3 Teoría de la variable regionalizada.

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.

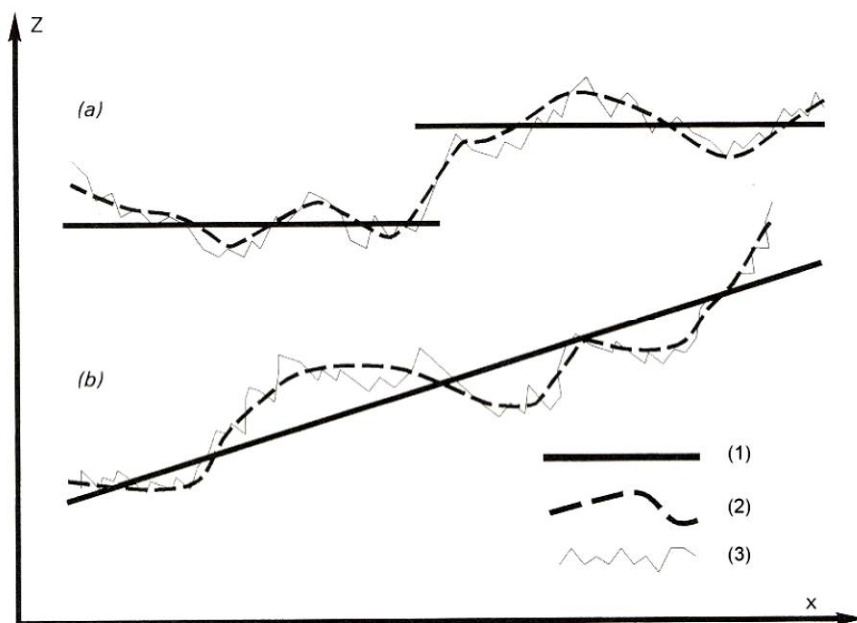


Figura 3.1.2 – (1) diferencias en niveles promedio (a) y tendencia o drift (b); (2) espacialmente correlacionada pero variación irregular (aleatoria); (3) variación local no correlacionada y aleatoria.

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

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon'' \quad (A)$$

En donde $m(x)$ es la función determinística que describe el componente “estructural” de Z en x , $\varepsilon'(x)$ es el término que denota el componente estocástico de $m(x)$ - 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 $m(x)$. En el caso más simple, en donde no existe tendencia o “drift”, $m(x)$ es igual al valor medio en el área de muestreo y el promedio o diferencia esperada entre cualesquiera dos lugares x y $x + h$ separados por una distancia vectorial h , será cero:

$$E[Z(x) - Z(x + h)] = 0$$

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

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

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 $\epsilon'(x)$ 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:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2$$

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 $\gamma(h)$ 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.

3.1.4 Variografía.

El ajuste de un modelo, o modelado espacial, también se conoce como análisis estructural o variografía. En el modelado espacial de la estructura de los puntos medidos, se comienza con un gráfico del semivariograma empírico, calculado con la siguiente ecuación para todos los pares de ubicaciones separados por la distancia h:

$$\text{Semivariogram}(\text{distance}h) = 0.5 * \text{average}((\text{value}_i - \text{value}_j)^2)$$

La fórmula implica calcular la diferencia cuadrada entre los valores de las ubicaciones asociadas.

En la imagen a continuación se muestra la asociación de un punto (en color rojo) con todas las demás ubicaciones medidas. Este proceso continúa con cada punto medido.

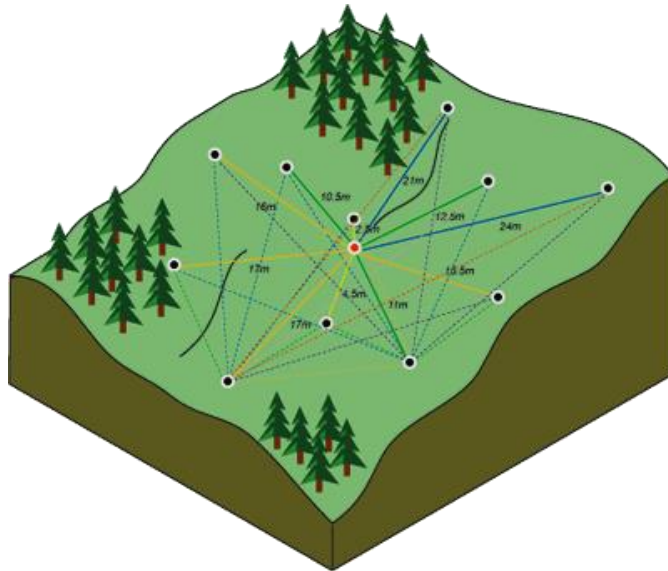


Figura 3.1.3 – Cálculo de la diferencia cuadrada entre las ubicaciones asociadas.

A menudo, cada par de ubicaciones tiene una distancia única y suele haber varios pares de puntos. La diagramación de todos los pares rápidamente se vuelve imposible de administrar. En lugar de diagramar cada par, los pares se agrupan en bins de intervalo. Por ejemplo, calcule la semivarianza promedio de todos los pares de puntos que están a más de 40 metros de distancia pero a menos de 50 metros. El semivariograma empírico es un gráfico de los valores de semivariograma promediados en el eje Y, y la distancia (o intervalo) en el eje X (consulte el diagrama a continuación).

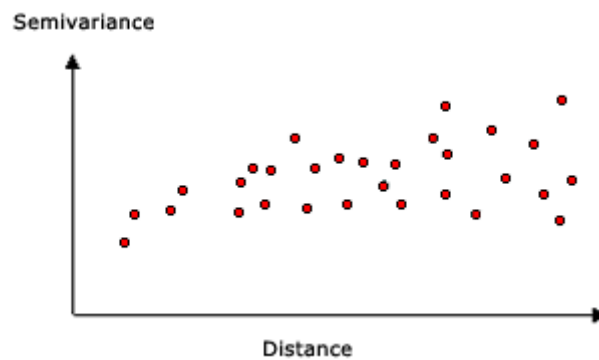


Figura 3.1.4 – Ejemplo de gráfico de semivariograma empírico.

La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de geografía: es más probable que las cosas que están más cerca sean más parecidas que las que están más alejadas. Entonces, los pares de ubicaciones que están más cerca (extremo izquierdo del eje X de la nube de semivariograma) deberían tener valores más similares (parte inferior en el eje Y de la nube

de semivariograma). A medida que los pares de ubicaciones estén más separados entre sí (hacia la derecha en el eje X de la nube de semivariograma), deberían ser más distintos y tener una diferencia cuadrada más grande (hacia arriba en el eje Y de la nube de semivariograma).

Ajustar un modelo al semivariograma empírico

El siguiente paso es ajustar un modelo a los puntos que forman el semivariograma empírico. El moldeado del semivariograma es un paso clave entre la descripción espacial y la predicción espacial. La aplicación principal de kriging es la predicción de los valores de atributo en las ubicaciones que no fueron muestreadas. El semivariograma empírico proporciona información sobre la autocorrelación espacial de los datasets. Sin embargo, no suministra información para todas las direcciones y distancias posibles. Por esta razón, y para asegurar que las predicciones de kriging tengan varianzas de kriging positivas, es necesario ajustar un modelo (es decir, una función o curva continua) al semivariograma empírico. En resumen, esto es similar al análisis de regresión, en el que se ajusta una línea o curva continua a los puntos de datos.

Para ajustar un modelo al semivariograma empírico, seleccione una función que sirva como modelo, por ejemplo, un tipo esférico que se eleve y nivele las distancias más grandes que sobrepasan un determinado rango (vea el ejemplo del modelo esférico más abajo). Existen desviaciones de los puntos en el semivariograma empírico con respecto al modelo; algunos están por encima de la curva del modelo y algunos están por debajo. Sin embargo, si suma la distancia de cada punto por encima de la línea y la distancia de cada punto por debajo, los dos valores deberían ser similares. Existen varios modelos de semivariograma para elegir.

3.1.5 Modelos de semivariograma.

La herramienta Kriging proporciona las siguientes funciones para elegir el modelado del semivariograma empírico:

- Circular.
- Esférica.
- Exponencial.
- Gaussiana.
- Lineal.

El modelo seleccionado influye en la predicción de los valores desconocidos, en particular cuando la forma de la curva cercana al origen difiere significativamente. Cuanto más pronunciada sea la curva cercana al origen, más influirán los vecinos más cercanos en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para ajustarse a diferentes tipos de fenómenos de forma más precisa.

En los siguientes diagramas se muestran dos modelos comunes y se identifican las diferencias de las funciones.

Modelo esférico.

En este modelo se muestra una disminución progresiva de la autocorrelación espacial (así como un aumento en la semivarianza) hasta cierta distancia, después de la cual la autocorrelación es cero. El modelo esférico es uno de los que más se utilizan.

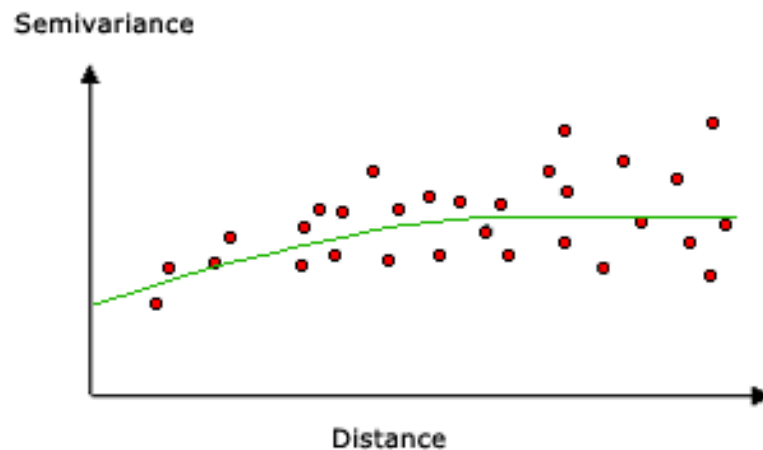


Figura 3.1.5 – Modelo esférico.

Modelo exponencial.

Este modelo se aplica cuando la autocorrelación espacial disminuye exponencialmente cuando aumenta la distancia. En este caso, la autocorrelación desaparece por completo solo a una distancia infinita. El modelo exponencial también es un modelo comúnmente utilizado. La elección de qué modelo se va a utilizar está basada en la autocorrelación espacial de los datos y en el conocimiento previo del fenómeno.

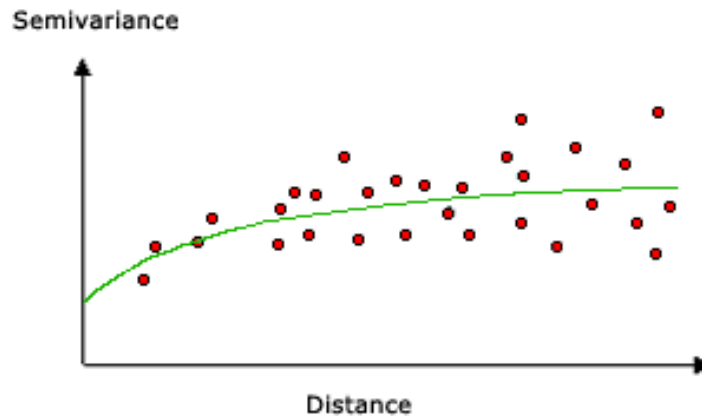


Figura 3.1.6 – Modelo exponencial.

A continuación se ilustran más modelos matemáticos.

Comprender un semivariograma: rango, meseta y nugget.

Como se indicó previamente, el semivariograma muestra la autocorrelación espacial de los puntos de muestra medidos. Tal como lo expresa un principio básico de la geografía (las cosas más cercanas son más parecidas), los puntos medidos que están cerca por lo general tendrán una diferencia cuadrada menor que la de aquellos que están más distanciados. Una vez diagramados todos los pares de ubicaciones, se ajusta un modelo para estas ubicaciones. El rango, la meseta y el nugget se utilizan, generalmente, para describir estos modelos, los cuales se detallan a continuación.

Rango y meseta.

Al observar el modelo de un semivariograma, notará que a una determinada distancia, el modelo se nivela. Las ubicaciones de muestra separadas por distancias más cortas que el rango están autocorrelacionadas espacialmente, mientras que las ubicaciones que están más alejadas que el rango, no lo están.

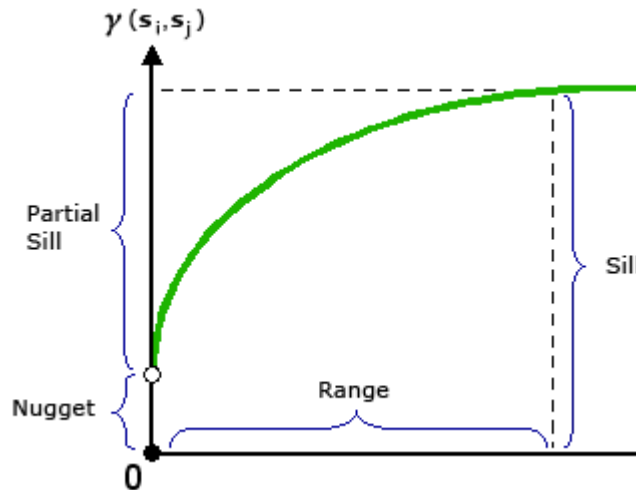


Figura 3.1.7 – Rango, meseta y nugget.

El valor en el cual el modelo de semivariograma alcanza el rango (el valor en el eje Y) se denomina meseta. Una meseta parcial es la meseta menos el nugget.

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”.

Nugget.

En teoría, a una distancia de separación cero (por ej. intervalo = 0), el valor del semivariograma es 0. No obstante, a una distancia de separación infinitamente inferior, el semivariograma a menudo muestra un efecto nugget, que es un valor mayor que 0. Si el modelo de semivariograma intercepta el eje Y en 2, entonces el nugget es 2.

El efecto nugget puede atribuirse a errores de medición o a fuentes espaciales de variación a distancias que son menores que el intervalo de muestreo (o a ambas cosas). Los errores

de medición ocurren debido al error inherente a los dispositivos de medición. Los fenómenos naturales pueden variar espacialmente en un rango de escalas. La variación a microescalas más pequeñas que las distancias de muestreo aparecerán como parte del efecto nugget. Antes de recopilar datos, es importante lograr comprender las escalas de variación espacial en las que está interesado.

Gráficos de semivariograma.

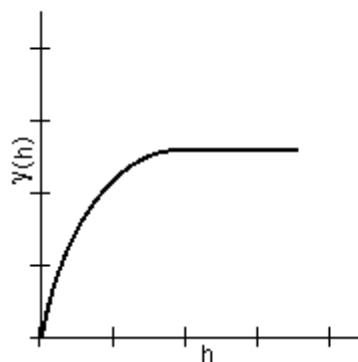
Kriging se basa en una teoría de variables regionalizadas que presupone que la variación espacial en el fenómeno representado por los valores z es estadísticamente homogénea a lo largo de toda la superficie (por ej., se puede observar el mismo patrón de variación en todas las ubicaciones sobre la superficie). Esta hipótesis de homogeneidad espacial es fundamental para la teoría de variables regionalizadas.

Modelos matemáticos

A continuación se presentan las formas generales y las ecuaciones de los modelos matemáticos utilizados para describir la semivarianza.

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.

SPHERICAL



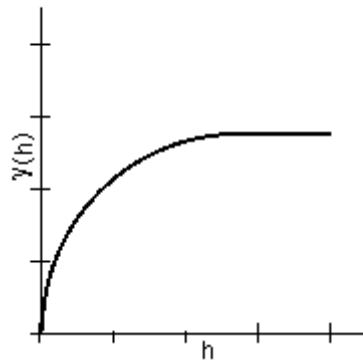
$$\gamma(h) = c_0 + c \left(\frac{3h}{2\alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{\alpha} \right)^3 \right) \quad 0 < h \leq \alpha$$

$$\gamma(h) = c_0 + c \quad h > \alpha$$

$$\gamma(0) = 0$$

Figura 3.1.8 – Modelo de semivarianza esférica.

CIRCULAR



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{h}{\alpha} \right) + \sqrt{1 - \frac{h^2}{\alpha^2}} \right)$$

$$0 < h \leq \alpha$$

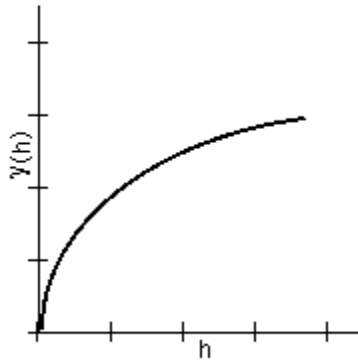
$$\gamma(h) = c_0 + c \quad h > \alpha$$

$$\gamma(0) = 0$$

Figura 3.1.9 – Modelo de semivarianza circular.

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

EXPONENTIAL



$$\gamma(h) = c_0 + c \left(1 - \exp \left(-\frac{h}{r} \right) \right) \quad h > 0$$

$$\gamma(0) = 0$$

Figura 3.1.10 – Modelo de semivarianza exponencial.

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

GAUSSIAN

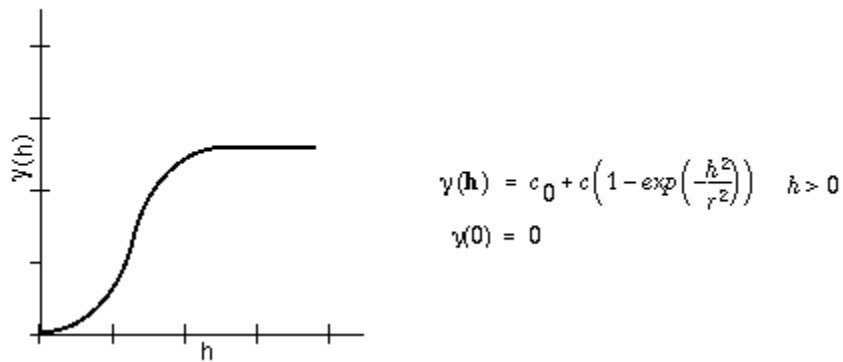


Figura 3.1.11 – Modelo de semivarianza gaussiana.

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.

LINEAR

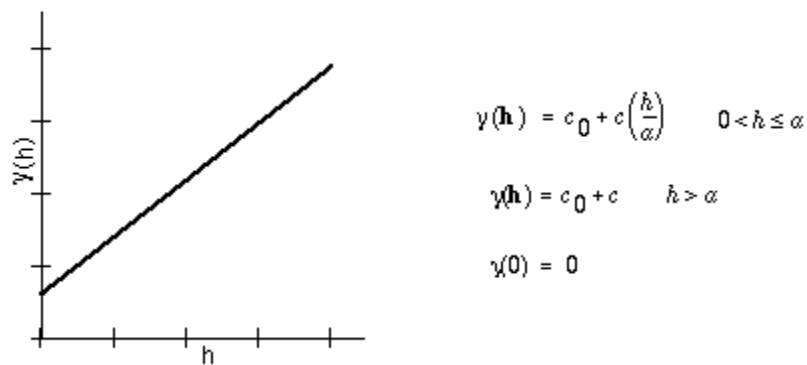


Figura 3.1.12 – Modelo de semivarianza lineal.

3.1.6 La fórmula de Kriging Ordinario.

El método kriging pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$Z(X_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

En donde: **Z(x_o)**: el valor medido en la ubicación i .

λ_i: una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i .

x_o : la ubicación de la predicción.

n : la cantidad de valores medidos.

Los pesos λ_i se seleccionan de tal forma que el estimado $Z(x_o)$ sea no sesgado y que la varianza de la estimación σ_e^2 sea menor que cualquier combinación lineal de los valores observados. La mínima varianza de $Z(x_o)$, está dada por:

$$\sigma_e^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_o) + \phi$$

Y se obtiene cuando:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_o) + \phi = \gamma(x_j, x_o) \quad \forall j$$

La cantidad $\gamma(x_i, x_j)$ es la semi-varianza de Z entre los puntos de datos x_i y x_j ; $\gamma(x_i, x_o)$ es la semi-varianza entre el punto de datos x_i y el punto no visitado x_o . 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.

Con el método kriging, las ponderaciones están basadas no solo en la distancia entre los puntos medidos y la ubicación de la predicción, sino también en la disposición espacial general de los puntos medidos. Para utilizar la disposición espacial en las ponderaciones, la correlación espacial debe estar cuantificada. Por lo tanto, en un kriging ordinario, la ponderación, λ_i , depende de un modelo ajustado a los puntos medidos, la distancia a la ubicación de la predicción y las relaciones espaciales entre los valores medidos alrededor de la ubicación de la predicción.

3.2 Procedimientos y herramientas para elaboración de mapas de radiación solar de El Salvador.

A continuación se describe brevemente los procedimientos y herramientas para la elaboración de los mapas de radiación solar. Dichos mapas son el resultado final del procesamiento y recolección de la información; como series de datos de mediciones de brillo solar de cada una de las estaciones meteorológicas involucradas, antecedentes de estudios previos, uso de métodos de interpolación y herramientas de software.

En la sección 3.1 se ha definido el método interpolación a utilizar, este método nos permitirá crear los mapas de radiación solar pero antes de crear un mapa es necesario conocer algunos conceptos básicos de geografía o geografía física, sistemas de información geográfica (SIG o GIS) y datos generales de las herramientas de software a utilizar que se describirá posteriormente a medida se ejecutan los procesos para la elaboración de los mapas de radiación solar.

3.2.1 Conceptos básicos para elaboración de mapas.

Antes de ubicar las estaciones meteorológicas en un mapa utilizando cualquier tipo de software, es necesario tener en cuenta algunos conceptos y términos que faciliten a comprender la *Georreferenciación* como los siguientes:

- **La Georreferenciación.**

Es el posicionamiento de un objeto espacial que puede estar representado mediante puntos o líneas. Es un neologismo¹⁹ que refiere al posicionamiento con el que se define la localización de un objeto espacial (representado mediante punto, vector, área, volumen) en un sistema de coordenadas y datum determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

La georreferenciación, en primer lugar, posee una definición tecno científica, aplicada a la existencia de las cosas en un espacio físico, mediante el

¹⁹ Vocablo, acepción o giro nuevo en una lengua.

establecimiento de relaciones entre las imágenes de raster o vector sobre una proyección geográfica o sistema de coordenadas. Por ello la georreferenciación se convierte en central para los modelados de datos realizados por los SIG.



Figura 3.2.1 – Ejemplo de georreferenciación.

▪ **Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS).**

Es un sistema de información geográfica (**SIG** o **GIS**, en su acrónimo inglés [Geographic Information System]) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión.

Funcionamiento de un SIG: El SIG funciona como una base de datos con información geográfica (datos alfanuméricos) que se encuentra asociada por un identificador común a los objetos gráficos de un mapa digital. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos e, inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía. La razón fundamental para utilizar un SIG es la gestión de información espacial.

El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando al profesional la posibilidad de relacionar la información existente a través de la topología de los objetos, con el fin de generar otra nueva que no podríamos obtener de otra forma. Las principales cuestiones que puede resolver un Sistema de Información Geográfica, ordenadas de menor a mayor complejidad, son:

1. **Localización:** preguntar por las características de un lugar concreto.
2. **Condición:** el cumplimiento o no de unas condiciones impuestas al sistema.
3. **Tendencia:** comparación entre situaciones temporales o espaciales distintas de alguna característica.
4. **Rutas:** cálculo de rutas óptimas entre dos o más puntos.
5. **Pautas:** detección de pautas espaciales.
6. **Modelos:** generación de modelos a partir de fenómenos o actuaciones simuladas.

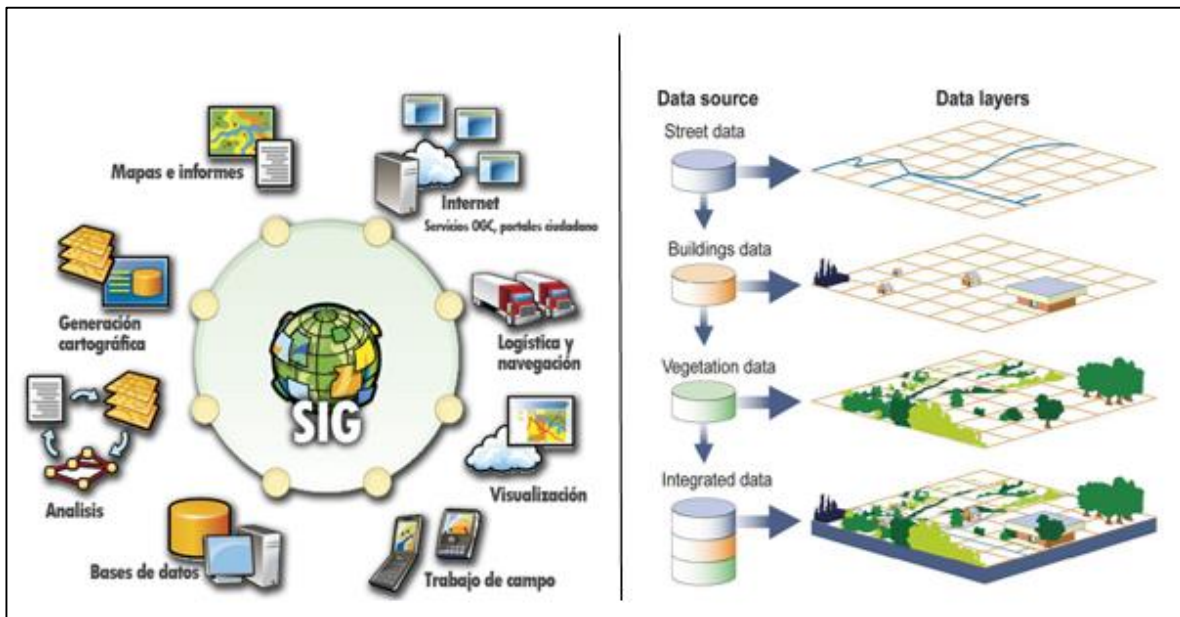


Figura 3.2.2 – Componentes de un SIG o GIS.

- **Sistema de Coordenadas Geográficas (GCS)**

En un sistema de coordenadas geográficas (GCS) se utiliza una superficie esférica de tres dimensiones para definir ubicaciones en la Tierra. Con frecuencia, a los GCS, *Geographic Coordinate System* (sistema de coordenadas geográficas) se los llama incorrectamente datum, pero un datum es solo una parte de un GCS. Un GCS incluye una unidad angular de medida, un meridiano base y un datum (basado en un esferoide).

Para hacer referencia a un punto se utilizan sus valores de latitud y longitud. La longitud y la latitud son ángulos medidos desde el centro de la Tierra hasta un punto de la superficie de la Tierra. Los ángulos se suelen medir en grados (o en grados centesimales). En la siguiente ilustración se muestra el mundo marcado con las líneas de longitud y latitud.

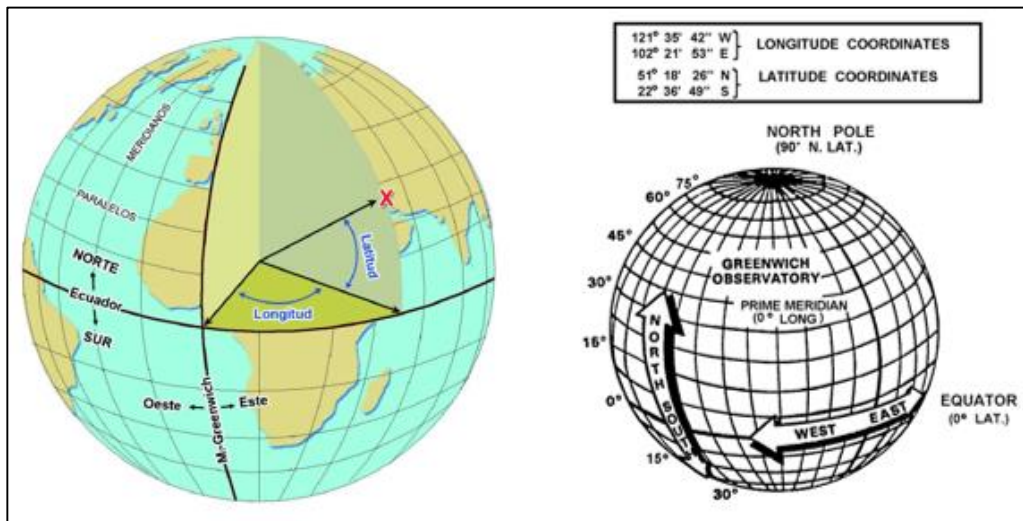


Figura 3.2.3 – Representación de los componentes de coordenadas en globo terráqueo.

En el sistema esférico, las líneas horizontales o líneas este-oeste son líneas de igual latitud, o paralelos. Las líneas verticales o líneas norte-sur son líneas de igual longitud, o meridianos. Estas líneas abarcan el globo y forman una red cuadriculada llamada retícula.

La línea de latitud que se encuentra en el punto medio entre los polos se denomina ecuador. Define la línea de latitud cero. La línea de longitud cero se denomina meridiano base. Para la mayoría de los sistemas de coordenadas geográficas, el meridiano base es la longitud que atraviesa Greenwich, Inglaterra. Otros países utilizan líneas de longitud que pasan a través de Berna, Bogotá y París como meridianos base. El origen de la retícula (0,0) se define por el punto donde se intersecan el ecuador y el meridiano base. El globo se divide, entonces, en cuatro cuadrantes geográficos basados en rumbos de brújula desde el origen. El norte y el sur están encima y debajo del ecuador, y el oeste y el este están a la izquierda y a la derecha del meridiano base.

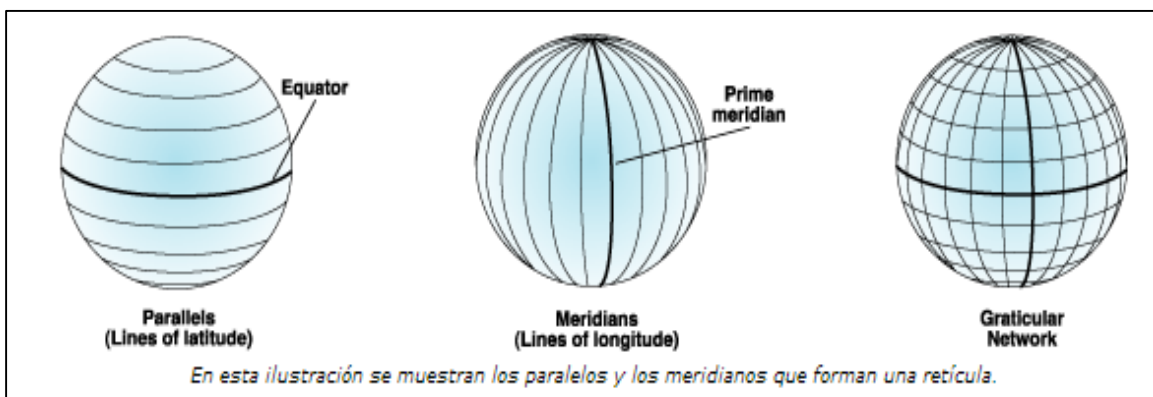


Figura 3.2.4 – Componentes que conforman una retícula.

Los valores de latitud y longitud se miden tradicionalmente en grados decimales o en grados, minutos y segundos (DMS, Degrees, Minutes and Seconds). Los valores de latitud se miden respecto al ecuador y van desde -90° en el polo sur hasta $+90^\circ$ en el polo norte. Los valores de longitud se miden respecto al meridiano base. Van de -180° cuando se viaja hacia el oeste hasta 180° cuando se viaja hacia el este. Si el meridiano base está en Greenwich, Australia, que está al sur del ecuador y al este de Greenwich, tiene valores de longitud positivos y valores de latitud negativos.

Los valores de latitud y longitud también pueden utilizarse en el sistema de coordenadas Lambert, este será el sistema a utilizar debido a la facilidad de trabajo en el software para generar los mapas de radiación solar.

- **El formato *Shapefile*.**

El *Shapefile* es un formato de representación vectorial desarrollado por ESRI (*Environmental Sistema Research Institute*). Consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos (archivo shape *.shp) junto con sus atributos o características (tabla dBase *.dbf). Algunas de las características principales de este tipo de archivos son:

Está compuesto generalmente por alrededor de entre 3 y 8 archivos independientes. Cada uno de estos archivos tiene una función específica y almacena un tipo de información (elementos geométricos, atributos, proyección, metadatos).

Los elementos geométricos se almacenan mediante sus vértices en el archivo shape. Actualmente, cada shapefile solo puede tener un tipo de elementos (puntuales, lineales o zonales). Dependiendo del tipo de shapefile, también podremos almacenar valores de altura (PointZ) o mediciones (PointM) en estos vértices.

La información temática y los atributos de cada elemento se almacenan mediante números o cadenas de texto, en una tabla de datos independiente en formato dBase. Cada elemento del shapefile se relaciona con su registro en la tabla mediante un código identificador.

Un mismo elemento (o registro) puede estar compuesto por varias partes; son los denominados elementos multi-parte. Estas capas suelen representar tipologías, y un mismo registro de la tabla se corresponde con varias entidades geométricas independientes con unas mismas características comunes.

Los shapefile no almacenan topología ni características de la representación. Para conservar la representación de los elementos en un shapefile, se tiene que generar otro tipo de archivos (Layer *.lyr). La principal ventaja es que se simplifica la

compatibilidad de este tipo de archivos a la vez que se reduce su tamaño respecto a otros sistemas de representación vectorial.

Partes de un Shapefile.

Dependiendo de la aplicación con que generemos nuestros shapefiles, podremos obtener un número variable de archivos. Sin embargo hay tres archivos que resultan imprescindibles en todo shapefile:

Shape (.shp): Se trata del archivo principal y almacena la información geométrica de los elementos de la capa en formato vectorial. Pueden contener puntos, líneas o polígonos y cada vértice lleva implícitas sus coordenadas en un sistema de referencia concreto (que por lo general se especifica en el archivo project). Se componen de una cabecera con información general sobre el tipo de shapefile y un número variable de registros, que a su vez pueden estar compuestos por varias entidades geométricas independientes.

Shape Index (.shx): Consiste en un índice de las entidades geométricas que permite refinar las búsquedas dentro del archivo .shp.

dBase (.dbf): Se trata de una tabla de datos en la que se registran los atributos de cada elemento.

Es un formato con larga historia, muy compatible y sencilla que nos permite almacenar datos estructurados. En los shapefiles, las tablas dBase se emplean para asignar atributos numéricos, de texto o de fecha a los registros contenidos en el archivo principal. Cada registro debe estar asociado con una única entrada en la tabla, ambos archivos se vinculan mediante un número de registro en el archivo principal y el código en la tabla (OBJECTID).

Además de estos tres archivos requeridos, opcionalmente se pueden utilizar otros para mejorar el funcionamiento en las operaciones de consulta a la base de datos,

información sobre la proyección cartográfica, o almacenamiento de metadatos. Estos archivos son:

- **Project (.prj)**: Es el archivo que guarda la información referida al sistema de coordenadas en formato WKT.
- **.sbn y .sbx**: Almacena el índice espacial de las entidades.
- **.fbn y .fbx**: Almacena el índice espacial de las entidades para los shapefiles que son inalterables (solo lectura).
- **.ain y .aih**: Almacena el índice de atributo de los campos activos en una tabla o el tema de la tabla de atributos.
- **.shp.xml**: Almacena los metadatos del shapefile.

▪ **Raster.**

En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

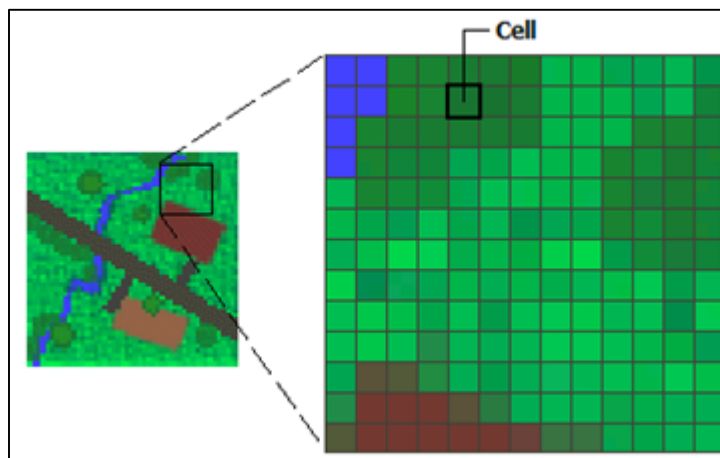


Figura 3.2.5 – Formato raster.

Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real:

- Los datos temáticos (también conocidos como discretos) representan entidades como, por ejemplo, el uso del suelo o los datos del suelo.

- Los datos continuos representan fenómenos como la temperatura o elevación, o datos espectrales, entre ellos imágenes de satélite y fotografías aéreas.
- Las imágenes incluyen mapas escaneados o dibujos y fotografías de edificios.

Los rásteres temáticos y continuos se pueden visualizar en el mapa en forma de capas de datos junto con otros datos geográficos, pero a menudo se utilizan como datos de origen para el análisis espacial con la extensión ArcGIS Spatial Analyst. Los rásteres de imágenes suelen utilizarse como atributos en tablas: pueden visualizarse con datos geográficos y se utilizan para transmitir información adicional acerca de las entidades geográficas de mapas.

Si bien la estructura de datos ráster es simple, es excepcionalmente útil para una amplia variedad de aplicaciones. En un SIG, los usos de los datos ráster se pueden dividir en cuatro categorías principales:

- 1. Rásteres en forma de mapas base:** Un uso común de los datos ráster en un SIG es en forma de visualización de fondo para otras capas de entidades. Por ejemplo, las ortofotografías que se visualizan debajo de otras capas ofrecen al usuario de mapas la garantía de que las capas de mapa se alinean espacialmente y representan tanto objetos reales como información adicional. Las tres fuentes principales de mapas base ráster son las ortofotografías de fotografías aéreas, imágenes de satélite y mapas escaneados. A continuación se muestra un ráster utilizado como mapa base para los datos de carretera.

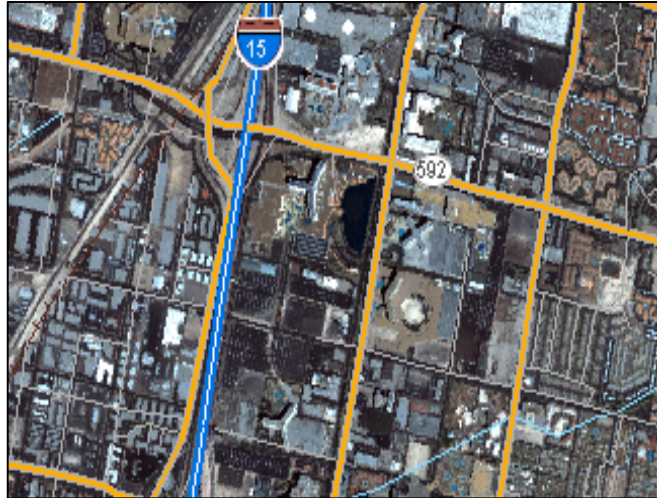


Figura 3.2.6 – Raster en forma de mapa base.

- 2. Rásteres en forma de mapas de superficie:** Los rásteres son apropiados para representar datos que cambian continuamente en un entorno (superficie). Ofrecen un método efectivo para almacenar la continuidad en forma de superficie. También proporcionan una representación de superficies con espacios regulares. Los valores de elevación que se miden desde la superficie de la Tierra son la aplicación más común de los mapas de superficie, pero otros valores, como las precipitaciones, la temperatura, la concentración y la densidad de población, también pueden definir superficies que se pueden analizar espacialmente. En el siguiente ráster (ver figura 3.18) se visualiza la elevación: se utiliza el color verde para mostrar una elevación menor y celdas de color rojo, rosa y blanco para mostrar elevaciones mayores.

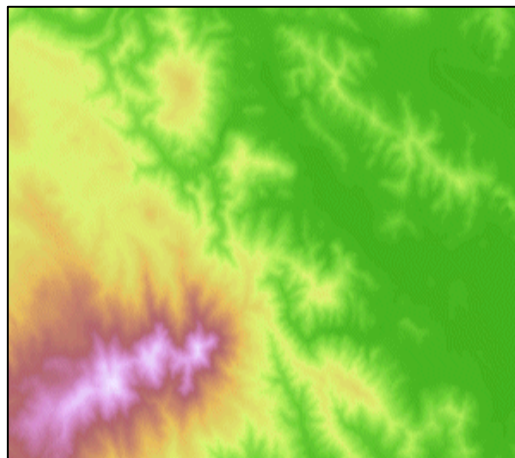


Figura 3.2.7 – Raster en forma de mapa de superficie.

- 3. Rásteres en forma de mapas temáticos:** Los rásteres que representan datos temáticos se pueden derivar al analizar otros datos. Una aplicación de análisis común consiste en clasificar una imagen de satélite por categorías de cobertura de suelo. Básicamente, esta actividad agrupa los valores de datos multiespectrales en clases (como tipo de vegetación) y asigna un valor categórico. También es posible obtener mapas temáticos a partir de operaciones de geoprocésamiento que combinen datos de varias fuentes como, por ejemplo, datos vectoriales, ráster y de terreno. Por ejemplo, puede procesar datos por medio de un modelo de geoprocésamiento para crear un dataset ráster apropiado para una actividad específica. A continuación encontrará un ejemplo de dataset ráster clasificado en el que se muestra el uso del suelo.

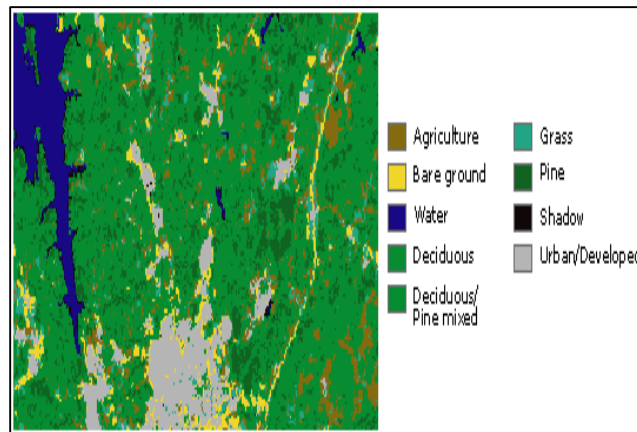


Figura 3.2.8 – Raster en forma de mapa temático.

- 4. Rásteres en forma de atributos de una entidad:** Los rásteres utilizados como atributos de una entidad pueden ser fotografías digitales, documentos escaneados o dibujos escaneados relacionados con un objeto o ubicación geográfica. Una capa de parcela podría tener documentos legales escaneados que identifiquen la transacción más reciente de dicha parcela, o una capa que represente las entradas a una cueva que podría incluir imágenes de las entradas reales a las cuevas asociadas a las entidades de puntos. A continuación encontrará una imagen digital de un viejo árbol de gran tamaño (ver figura 3.19), que podría utilizarse como atributo de una capa de paisaje que puede mantener una ciudad.



Figura 3.2.9 – Raster en forma de atributos de una entidad.

3.3 Elección de software para realización de mapas de radiación solar.

3.3.1 QGIS.

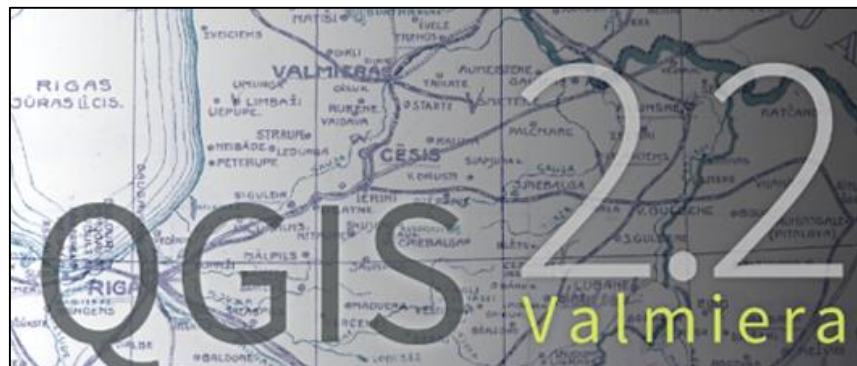


Figura 3.3.1 – QGIS 2.2.

QGIS es un software de Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto. Una de las grandes fortalezas de QGIS es que trabaja en cualquiera de los sistemas operativos: GNU/Linux, BSD, Unix, Mac OSX, Windows y Android, funcionando de manera similar en todos ellos, por lo que se puede considerar una buena opción para el procesamiento y presentación de información geográfica.

Primeramente al igual que cualquier otro programa SIG se georreferencia los puntos de medición para comprobar que las coordenadas asignadas a cada estación sea la correcta, al igual se puede agregar capas como delimitaciones de departamentos, cuerpos de agua, etc.

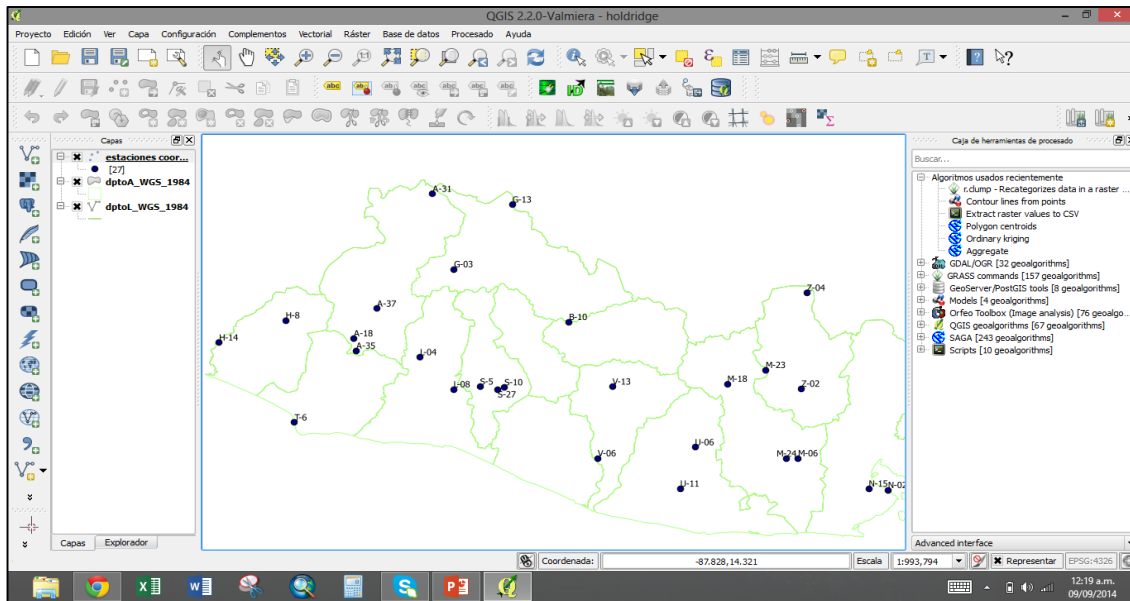


Figura 3.3.2 – Interfaz de QGIS y georreferenciación de puntos de medición.

QGIS y kriging: Una vez asignadas correctamente las coordenadas de las estaciones se realiza la interpolación en este caso interpolación espacial por el método de kriging y se configuran sus opciones y parámetros a conveniencia del usuario (ver figura 3.3.3).

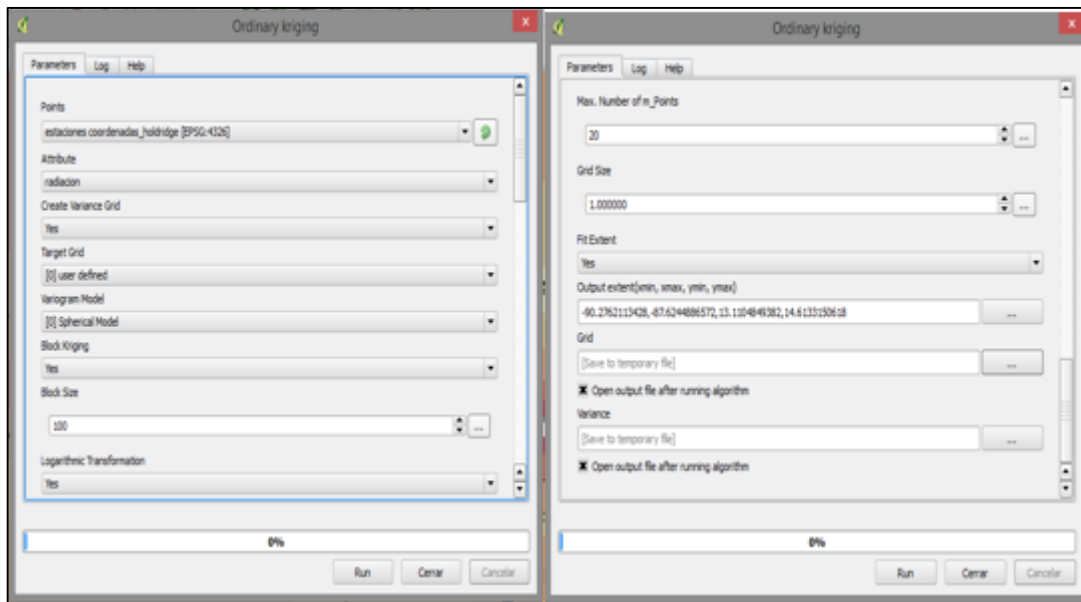


Figura 3.3.3 – Menú de configuración de parámetros para la realización de la interpolación de Kriging.

El resultado obtenido es el que se muestra en la figura 3.3.4 como se observa no se obtuvo el resultado esperado. Para lograr un mejor resultado se requiere de una mayor manipulación de las opciones de configuración para lo cual es necesario tener sólidos

conocimientos de geo-estadística, por lo tanto este tipo de configuración vuelve menos amigable al software para algunos usuarios.

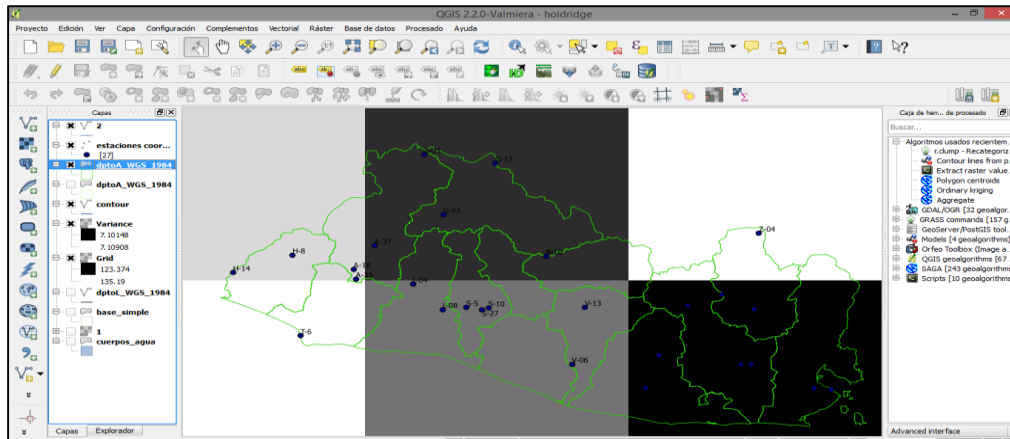


Figura 3.3.4 – Resultado de la interpolación de Kriging.

QGIS e IDW: El método de interpolación espacial IDW en QGIS arroja mejores resultados debido a que su configuración es más básica, de esta forma se reduce la introducción de valores erróneos e incoherentes. Como se observa en la figura 3.3.5 solo se necesita escoger la capa (elemento con valores; estaciones meteorológicas) que contiene la información a procesar, atributo a interpolar (valores de radiación solar), y por supuesto el método de interpolación IDW.

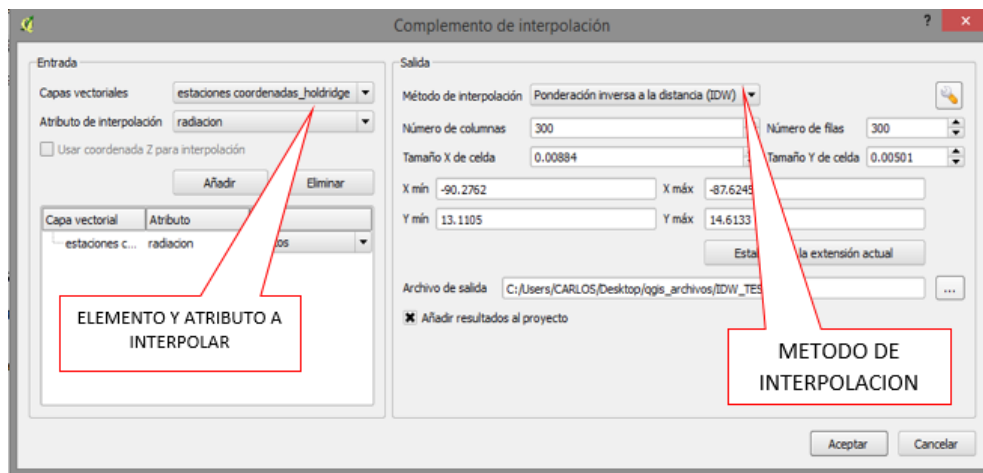


Figura 3.3.5 – Configuración de parámetros para la interpolación por método IDW.

Se muestra el resultado de interpolación IDW, cual se presenta de forma continua y discreta y también se pueden generar isoclinas como se ve en las siguientes imágenes.

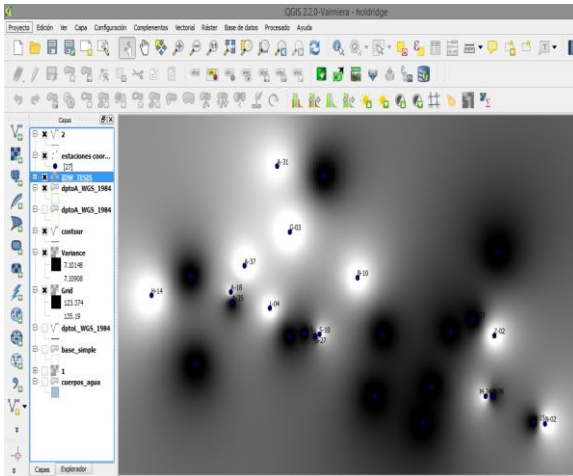


Figura 3.3.6 – Resultado de Interpolación IDW.

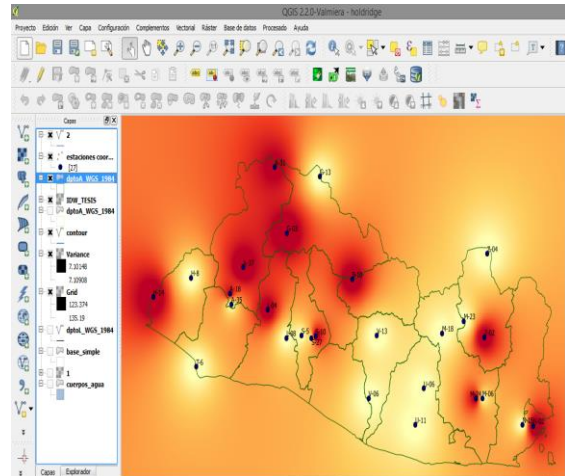


Figura 3.3.7 – Resultado IDW (pseudocolor).

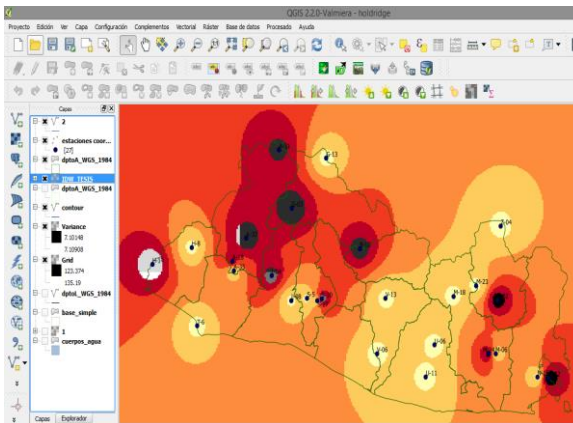


Figura 3.3.8 – Resultado IDW de forma discreta.

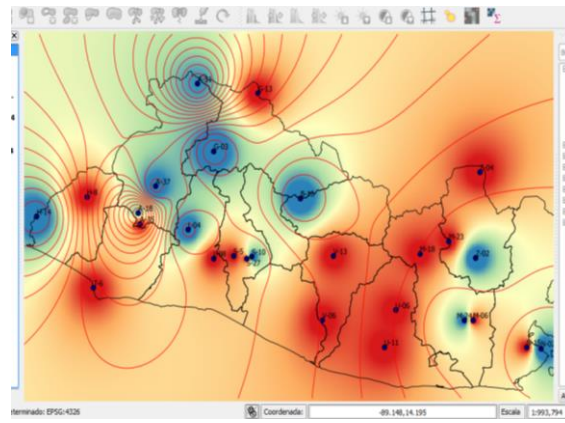


Figura 3.3.9 – Resultado IDW de forma continua+ isoclinas.

En resumen QGIS es un software bastante util y potente de uso libre en el cual pueden elaborarse mapas en los cuales se pueden georreferenciar puntos, agregar capas “shapefiles”, presentar resultados de procesamiento de informacion por medio de un metodo de interpolacion espacial. Pero basado en los resultados mostrados anteriormente (ver de figura 3.3.6 a la figura 3.3.9) se descarta esta herramienta; debido a que la configuracion de los parametros para la elaboracion de un mapa se vuelve de una manera bastante engorrosa si no se poseen solidos conocimientos de geostatistica, lo cual torna al software poco amigable al usuario para los propositos de esta investigaci3n.

3.3.2 SURFER 12.

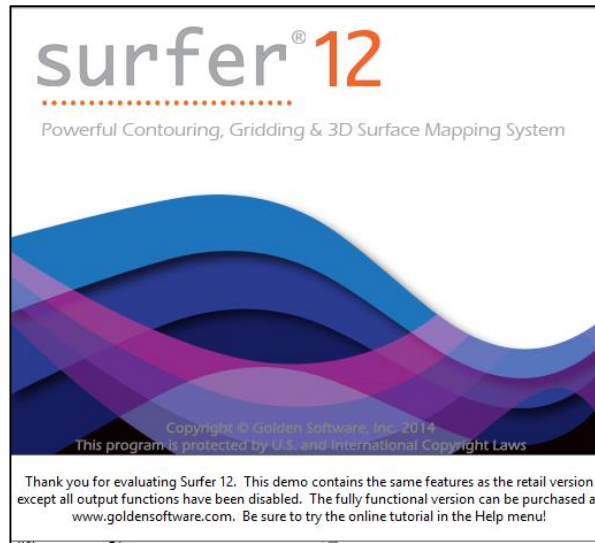


Figura 3.3.10 – Surfer 12.

Surfer 12 es un programa para hacer mapas y trazar líneas de contorno en 3D para Windows únicamente. Con facilidad y rapidez, convierte datos procesados en mapas con contorno, superficie, vector, imagen y sombras.

Surfer 12 es un programa con licencia de pago pero puede descargarse un demo gratis el cual es lo suficiente útil para la presentación de los datos procesados.

SURFER y Kriging: Al elaborar el método de interpolación espacial de kriging solo se debe de asignar las coordenadas y valores de los datos a interpolar, ya sean valores de radiación solar, temperatura, pluviosidad, etc. La simplicidad de la configuración y selección de valores de esta herramienta para el desarrollo del método de Kriging (ver figura 3.3.11), vuelve esta herramienta bastante amigable al usuario, reduciendo la posibilidad de obtener resultados no deseados.

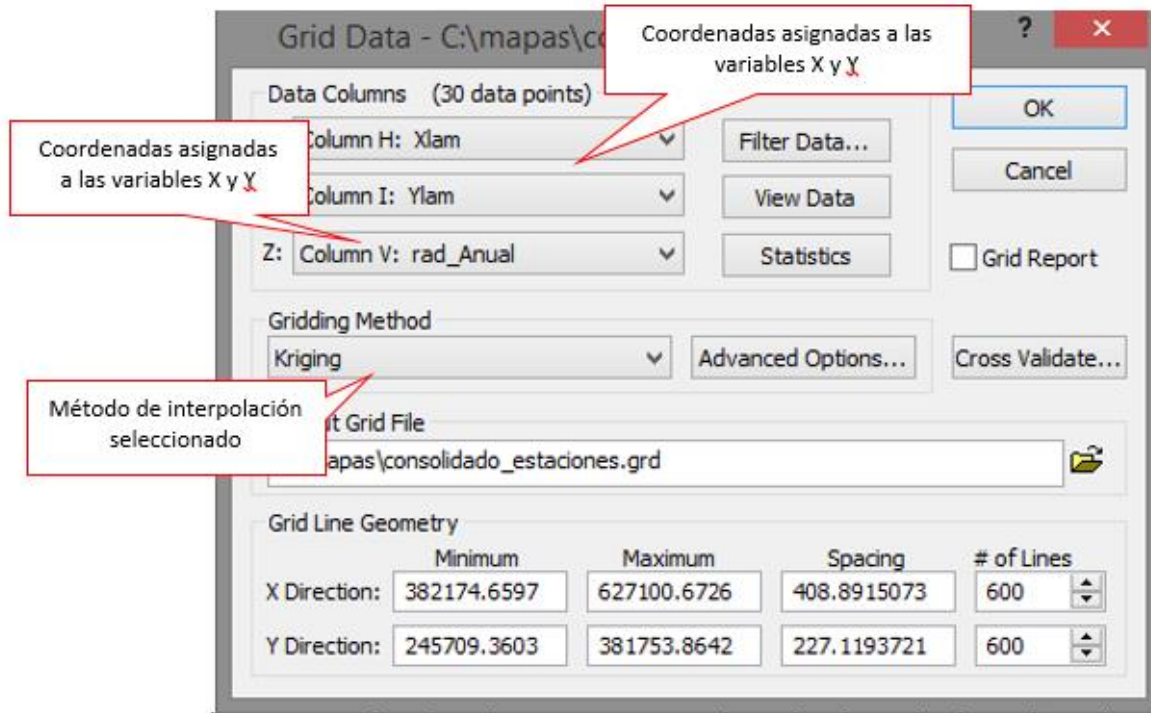


Figura 3.3.11 – Configuración de parámetros para el método de interpolación de kriging en Surfer 12.

Al igual que cualquier software de procesamiento de información geográfica y geoestadística se puede georreferenciar objetos de interés; estaciones meteorológicas, capas como mapas de delimitación geográfica e isoclinas (ver figura 3.3.12)

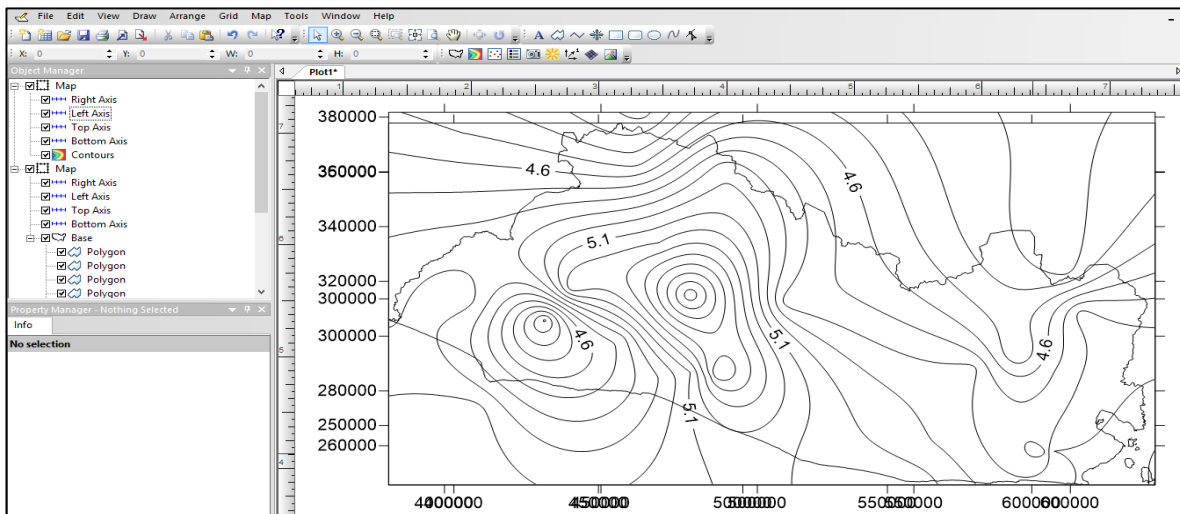


Figura 3.3.12 – Isoclinas generadas por método de kriging y capa de mapa de El Salvador.

Luego se puede cargar el resultado obtenido de la interpolación espacial de kriging (ver figura 3.3.13) así como otras capas de personalización, se realizan los ajustes necesarios y se obtiene el resultado final como se ve en las figuras (figura 3.3.14 y figura 3.3.15).

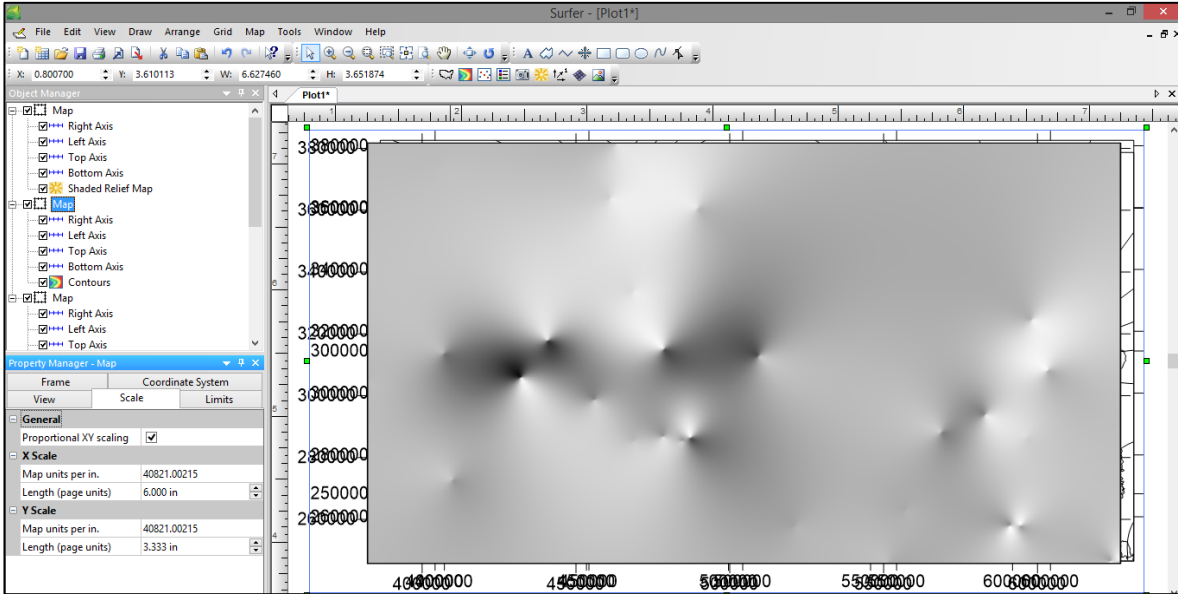


Figura 3.3.13 – Resultado de interpolación de kriging basado en isolíneas.

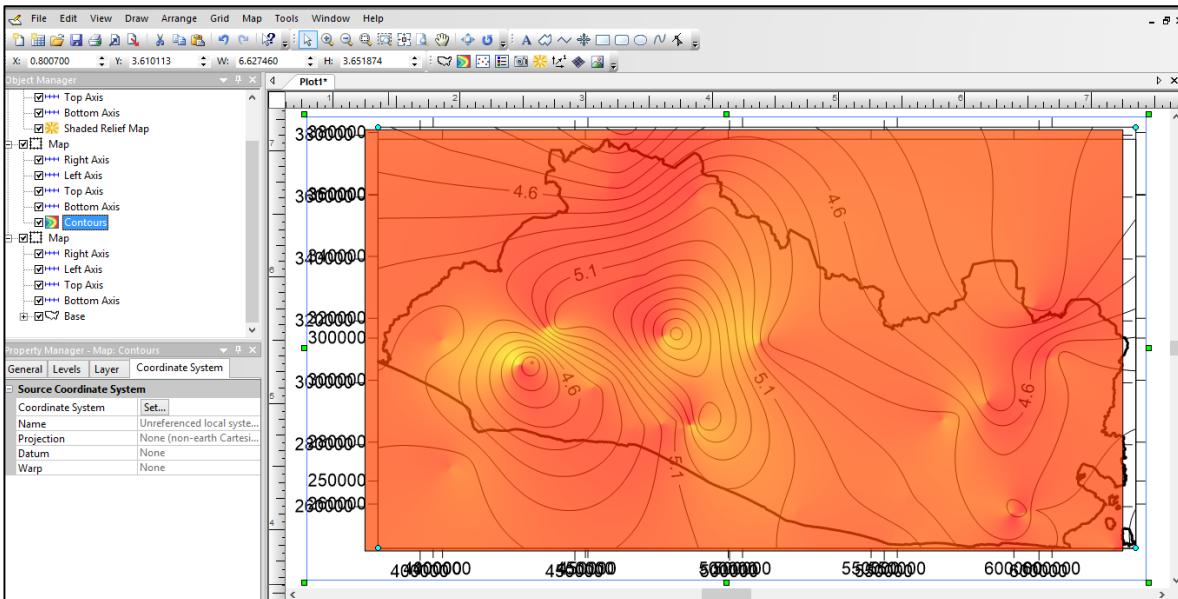


Figura 3.3.14 – Resultado de interpolación de kriging y capa de límite geográfico de El Salvador.

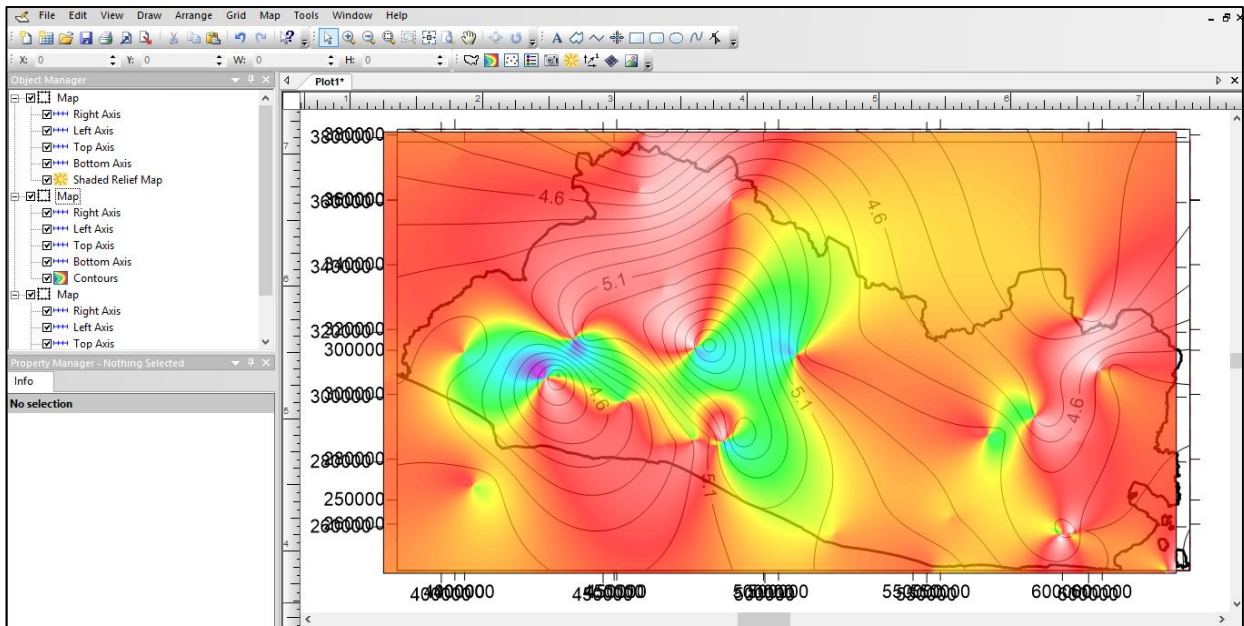


Figura 3.3.15 – Resultado de interpolación de kriging de forma continua e isoclinas.

La interpolación de kriging se vuelve bastante rápida y sencilla en este tipo de software debido a su interfaz y simplicidad de requerimientos que se exigen en la configuración de parámetros. Sin embargo el resultado de los mapas no es el más claro ya que no posee una delimitación definida de los valores obtenidos lo cual puede provocar lecturas erróneas a la hora de la interpretación de la información de los mapas. También el uso de las isoclinas con respecto a los resultados obtenidos puede dar lugar a confusión por la falta de coincidencia de sus valores. Debido a que la interpolación espacial de kriging es bastante rápida y fácil de desarrollar en este tipo de software, no se descarta totalmente el uso de esta herramienta.

3.3.3 SAGA.



Figura 3.3.16 – SAGA.

SAGA (*acrónimo inglés de System for Automated Geoscientific Analyses o Sistema para Análisis Automatizados Geocientíficos en español*) es un software híbrido de información geográfica.

El primer objetivo de SAGA es dar una plataforma eficaz y fácil para la puesta en práctica de métodos geocientíficos mediante su interfaz de programación. El segundo es hacer estos métodos accesibles de una manera fácil. Esto se consigue principalmente mediante su interfaz gráfica de usuario (GUI). Juntos, API Y GUI son el verdadero potencial de SAGA.

Esta herramienta de software es bastante similar a las mencionadas con anterioridad, se aprecia en la figura 3.3.17 un entorno bastante similar a QGIS en la cual se pueden agregar distintas capas de de información a un mapa.

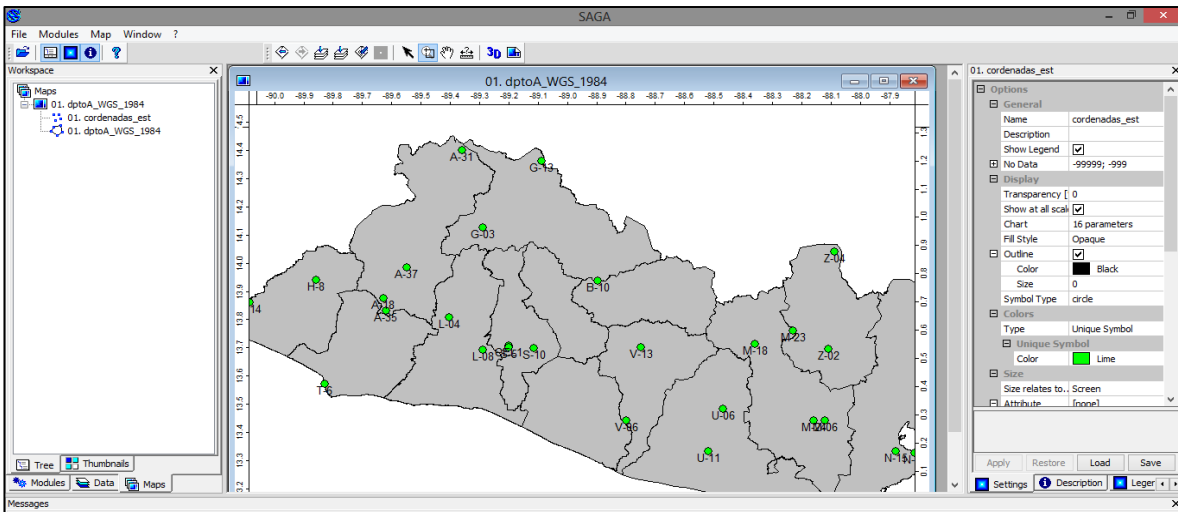


Figura 3.3.17 – Interfaz de SAGA y capas de mapas utilizadas.

SAGA Y KRIGING: Nuevamente como se aprecia en la figura 3.3.18 la realización del método de interpolación de kriging puede resultar bastante tedioso y confuso debido a la cantidad de parámetros a modificar

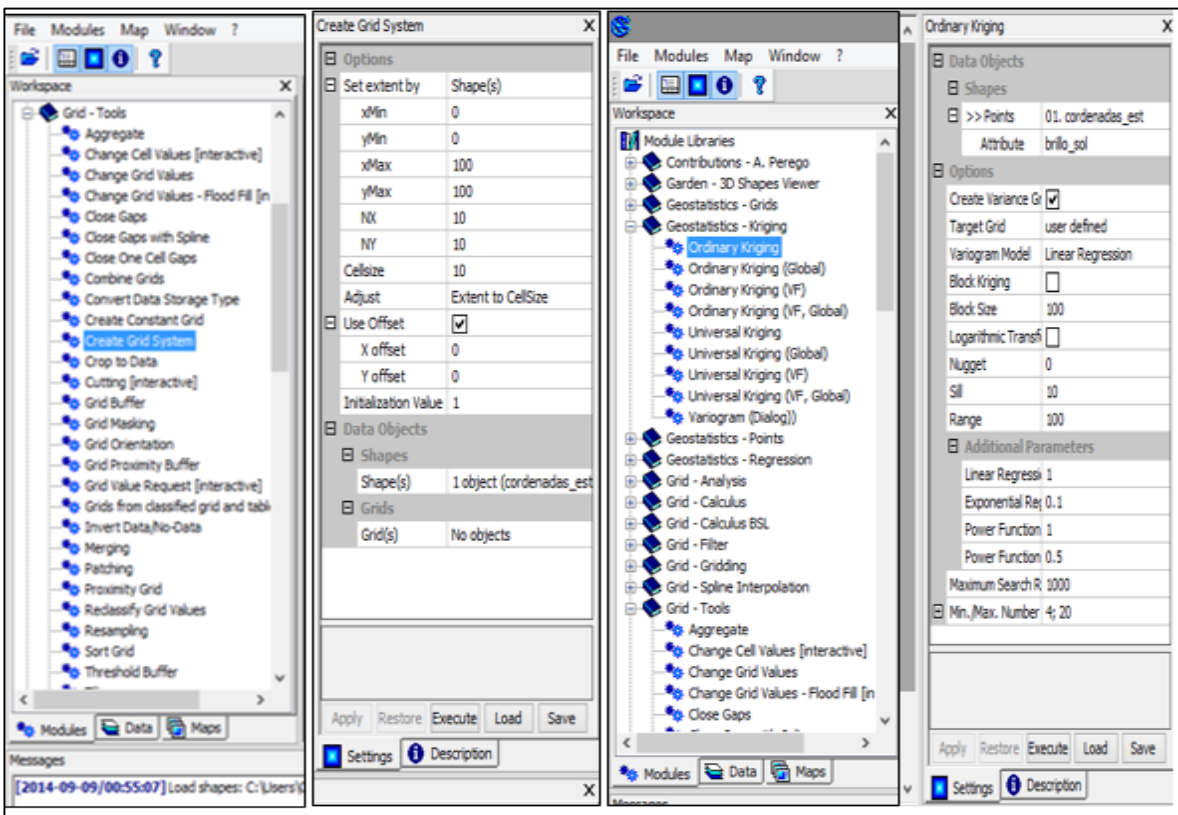


Figura 3.3.18 – Interfaz de configuración para ejecución de Kriging en SAGA.

Luego de ejecutar Kriging se obtuvo el siguiente resultado mostrado en la figura 3.3.19, esto no quiere decir que no se puede realizar la interpolación espacial de kriging o que este software no es de buena calidad, sino que se necesitan más conocimientos de geoestadística y comprensión de los parámetros a configurar.

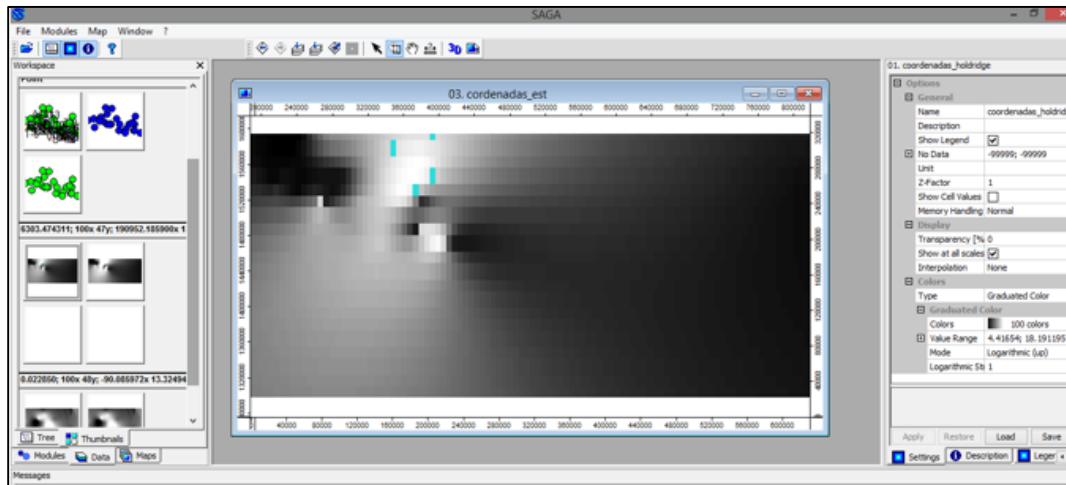


Figura 3.3.19 – Resultado de interpolación de kriging obtenido por falta de configuración de parámetros.

Uno de los principales objetivos de SAGA es que este tipo de software es bastante similar en cuanto a entorno de trabajo respecto a los programas mencionados anteriormente. Pero debido a todos los parámetros a configurar se descarta su uso ya que esto generara malos resultados al no poder manipular esta herramienta de forma correcta.

En resume se tienen herramientas de software bastantes buenas para la realización de los mapas de radiación solar pero debido a su complejidad de configuración se descartara su uso, esto no quiere decir que no podrán combinarse entre sí para utilizarlos parcialmente e introducir otros softwares para obtener un buen resultado.

Se conocen más herramientas para la realización de mapas pero para efectos de documentación solo se mencionan los descritos en esta sección. En la siguiente sección se mencionan otras herramientas utilizadas.

3.4 Elaboración de mapas de Radiación Solar.

En este apartado se pretende describir brevemente los pasos necesarios para la creación de los mapas de radiación solar y las herramientas utilizadas, para efectos de ejemplo se utilizaran datos de radiación solar anual y los nombres de los archivos generados pueden asignados a conveniencia del lector. También durante el desarrollo de esta sección se mencionaran los programas utilizados.

Primeramente se debe de trasladar los valores de radiación solar a una tabla, de preferencia en un archivo de preferencia en formato “.xls” el cual contenga las coordenadas de las estaciones a analizar y sus valores de radiación solar como se muestra a continuación.

	A	B	C	G	H	I	J	K	L
1	cod	nom	depto	Xlam	Ylam	rad_Enero	rad_Feb	rad_Mar	rad_Abr
2	A-18	Finca Los Andes	Santa Ana	432082.9754	305854.41	4.348396375	5.0752379	5.3318984	4.902739
3	A-31	Planes de Montecristo	Santa Ana	461174.2469	363877.08	5.199256878	5.300873	5.1727101	4.601060
4	A-35	Cerro verde		432971.6539	301168.35		4.4	4.7	4.3
5	A-37	Santa Ana-UNICAES	Santa Ana	440761.1562	317822.08	5.536117491	5.7354457	5.8900104	5.402382
6	B-10	Cerrón Grande	Cabañas	509365.3513	312773.85	4.96032688	5.1818968	5.2792178	4.934928
7	G-03	Nueva Concepción	Chalatenang	468687.2276	333626.49	5.513135642	5.8265448	5.8068307	5.427373
8	G-13	Las Pilas		489573.3022	360715.35		4.6	5	5.6
9	H-08	Ahuachapan		407069.736	313675.86		5	5.4	5.7
10	H-14	La Hachadura	Ahuachapán	382174.6598	304557.67	4.697411245	4.8465109	4.9730362	4.606592
11	L-04	San Andrés	La Libertad	456030.9032	298612.05	5.055499551	5.2688206	5.2489673	4.876411
12	L-08	Boqueron		468809.045	285133.95		5	5.4	5.7
13	M-06	El Papalon		594573.2513	257999.17		4.5	5	5.4
14	M-18	Sesori	San Miguel	568864.6405	288156.45		4.6	5.1	5.4
15	M-23	CerroCacahuatique		583088.5632	293729.37		4.6	5.2	5.4
16	M-24	San Miguel - UES	San Miguel	591148.3511	257799.26	4.763201134	4.9951983	5.1254463	4.815198
17	N-02	La Unión-CORSAIN	La Unión	627100.6725	246265.41	5.20248623	5.5427204	5.5313623	5.254927
18	N-15	La Union		623867.454	246321.75		4.7	5.1	5.4
19	S-05	Observatorio		478365.97	286708.45		4.9	5.4	5.7
20	S-10	Aeropuerto de Ilopango	San Salvado	487199.7206	286409.04	6.011470636	6.2570845	6.2814231	5.647043
21	S-27	Matazano	San Salvado	484494.777	285304.25		5.1	5.6	6.2
22	T-06	Acajutla		409809.4432	272733.86		4.9	5.3	5.6
23	U-06	Santiago de Maria		557202.3501	262868.46		5	5.6	5.8
24	U-11	Beneficio La carrera		551461.8574	245709.36		4.9	5.4	5.5
25	V-06	Santa Cruz Porrillo		521297.0748	257836.15		4.8	5.3	5.6
26	V-13	Apastepeque		603397.8665	308183.92		4.6	5.2	5.3

Figura 3.4.1 – Tablas con valores de radiación solar y coordenadas.

El siguiente paso es preparar la grilla o “grid”, para crear las isoclinas para la generación de los mapas. Se utiliza kriging como método de grillado; para realizar el grillado se utiliza un editor de grillas e isoclinas como “surfer 12 - demos versión”, Se abre el archivo con extensión “.xls” que contiene las coordenadas de las estaciones y sus valores de radiación solar desde la opción: *Grid* → *Data*.

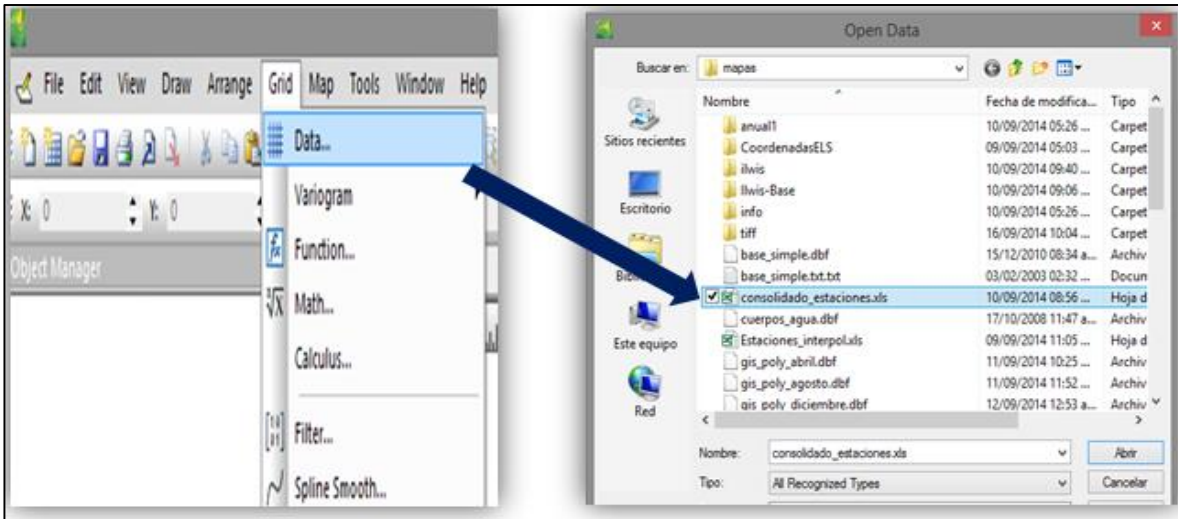


Figura 3.4.2 – Selección de archivo para la creación del grillado o grid.

Se seleccionan valores para los campos X, Y, Z y el método de grillado, una vez hecho este paso se genera un archivo con extensión **“.grd”** este archivo contiene toda la información de la interpolación de kriging el cual genera las isoclinas.

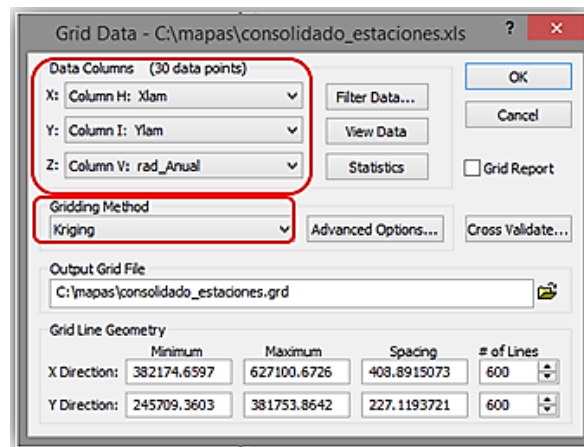


Figura 3.4.3 – Selección de valores para las variables X, Y y Z para la interpolación de Kriging.

Una vez generado el archivo **“.grd”** ir a las opciones: **Map --> Contour Map --> “archivo.grd”** así se generaran las isoclinas como se muestra en las siguientes ilustraciones.

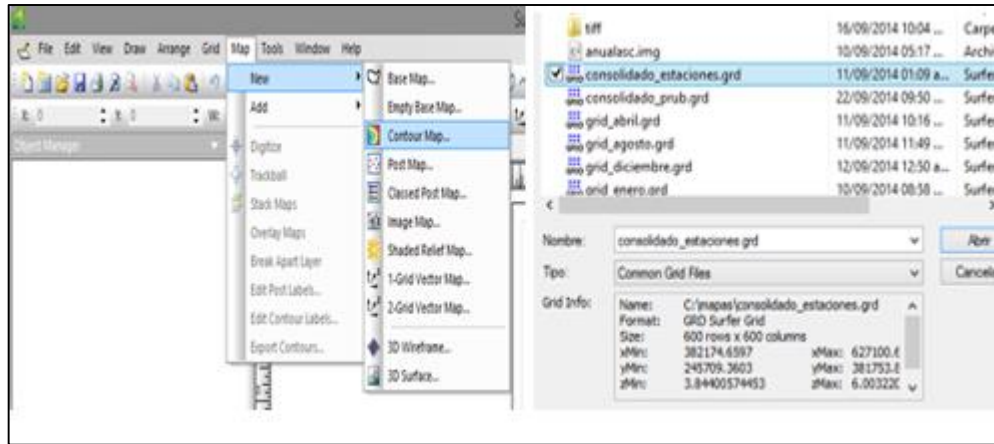


Figura 3.4.4 – Seguimiento de pasos para Creacion de isolneas.

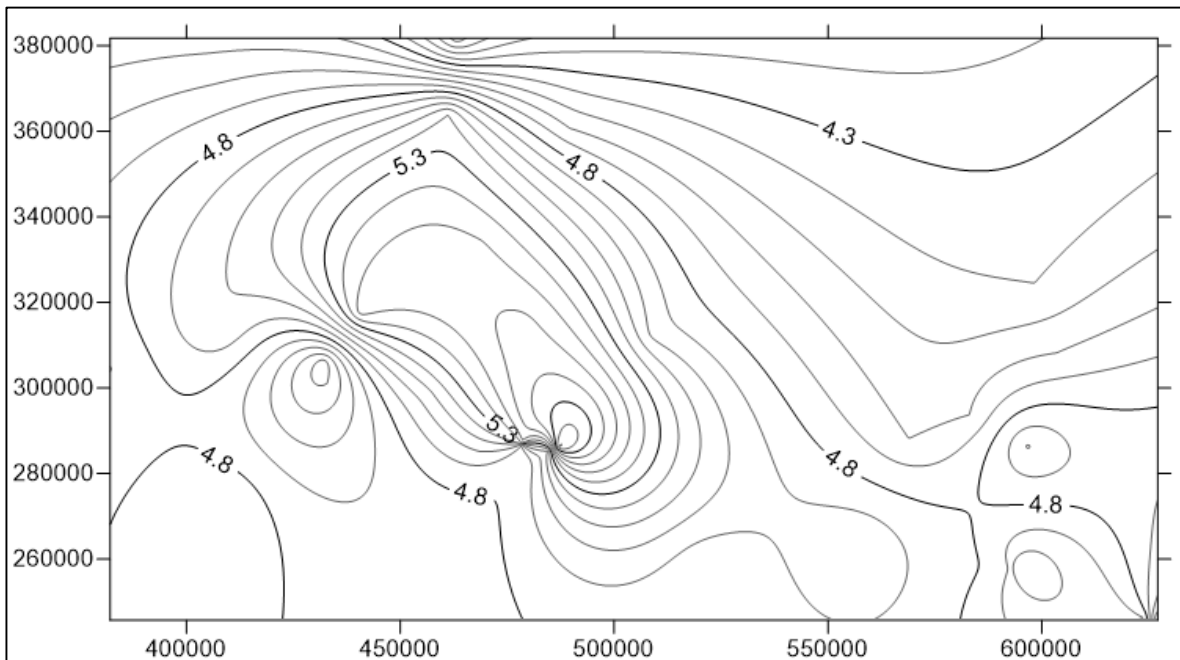


Figura 3.4.5 – Resultado de isolneas después de la interpolacion de Kriging.

Se pueden agregar distintas capas como croquis de mapas, ubicación de las estaciones y las isolneas.

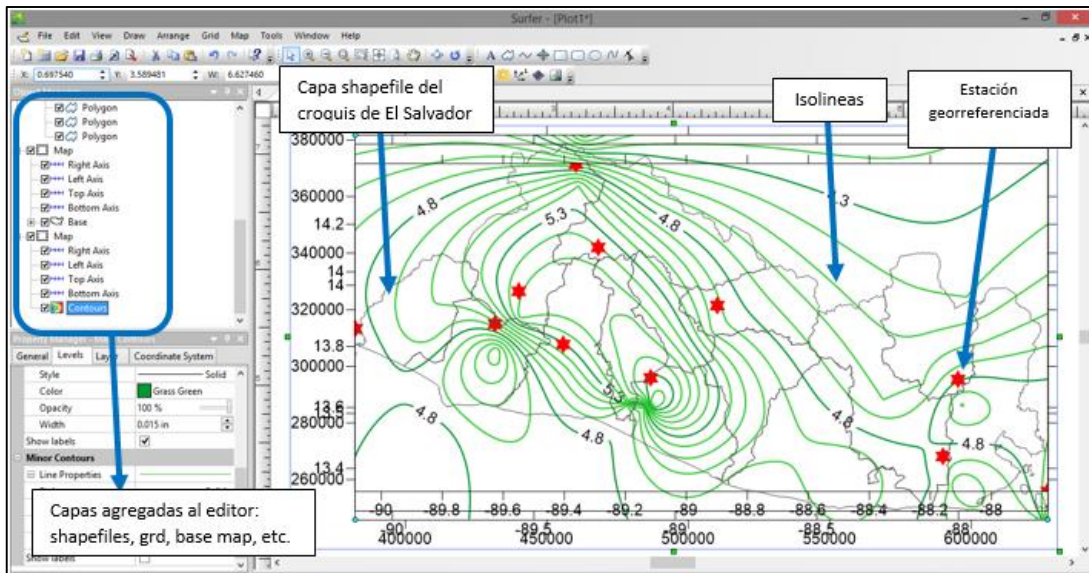


Figura 3.4.6 – Interfaz del programa y capas agregadas (puntos, isolneas y delimitación de los departamentos).

Luego se exportan las isolneas a formato de AutoCAD **“.dxf”** como se muestra en las Figura 3.4.7 de esta manera se facilita la manipulación de la información. En este paso se transforman las isolneas del archivo **“.grd”** extrayendo toda la información y separándola a poli-líneas, polígonos y puntos.

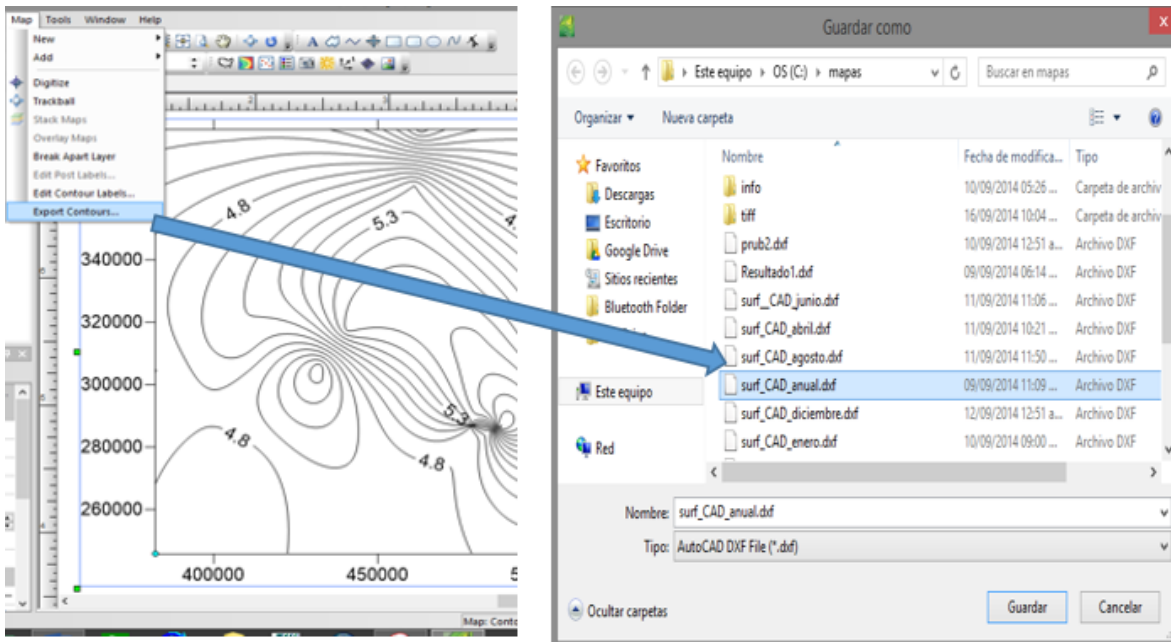


Figura 3.4.7 – Exportación de isolneas a formato de AutoCAD.

Una vez generado el archivo de extensión “.dxf” se utiliza la herramienta de software *ArcCatalog* de *ArcGIS*. Aquí se pueden visualizar todos los archivos que se utilizan para la creación de mapas, shapefiles, y otra variedad de archivos de distintas extensiones.

En la figura 3.4.8 se muestra seleccionado el archivo “*surf_CAD_anual.dxf*” creado a partir de las isoclinas generadas con el método de grillado de kriging, el archivo se nombra de la manera que el lector mejor le parezca pero se recomienda utilizar términos y palabras que muestren la procedencia de la información obtenida. De este archivo se utilizarán las polilíneas (polyline).

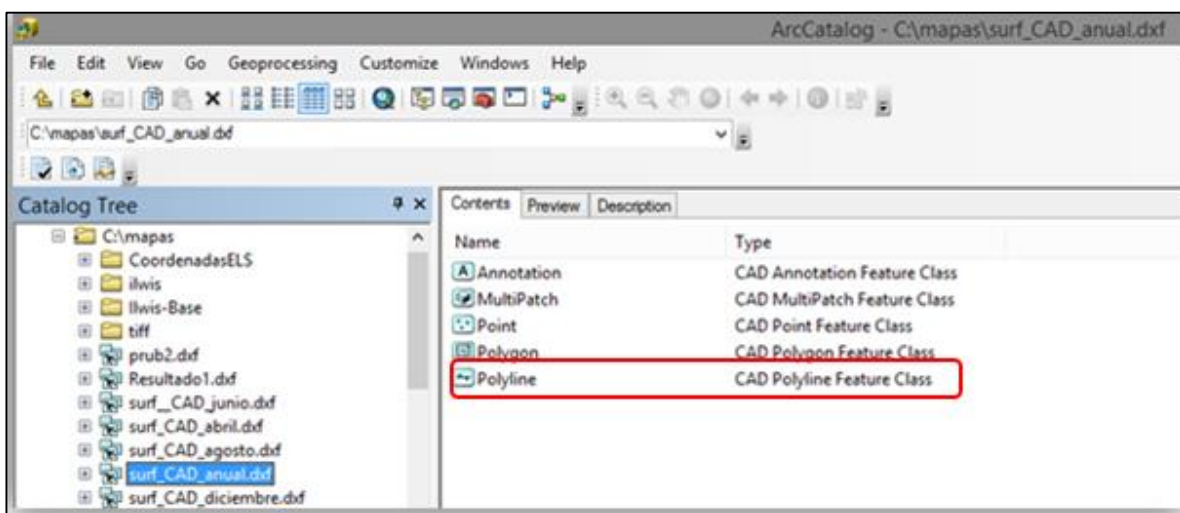


Figura 3.4.8 – Selección de elemento *polyline* de archivos *dxf*.

Las polilíneas se exportan a un archivo *shapefile*; se hace un clic derecho en el archivo *polyline* y se elige en las opciones: *Export* → *To Shapefile (single)*. Al realizar esta acción se muestra un cuadro en donde se debe de colocar el archivo a exportar, seleccionar la localidad donde se guardarán los archivos generados como se muestra en la figura 3.4.9.

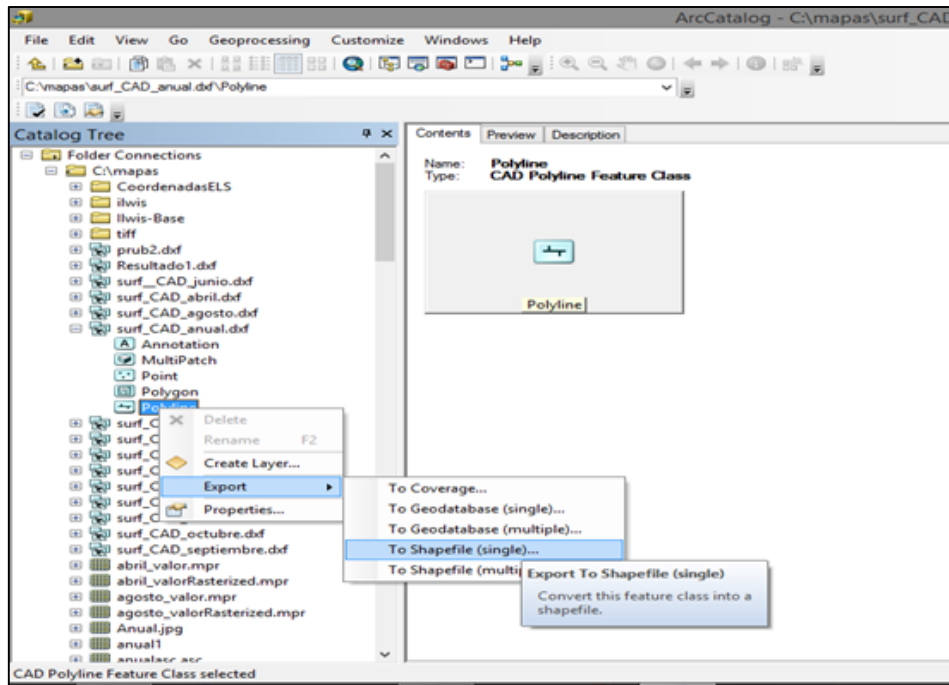


Figura 3.4.9 – Exportación de polilínea a shapefile.

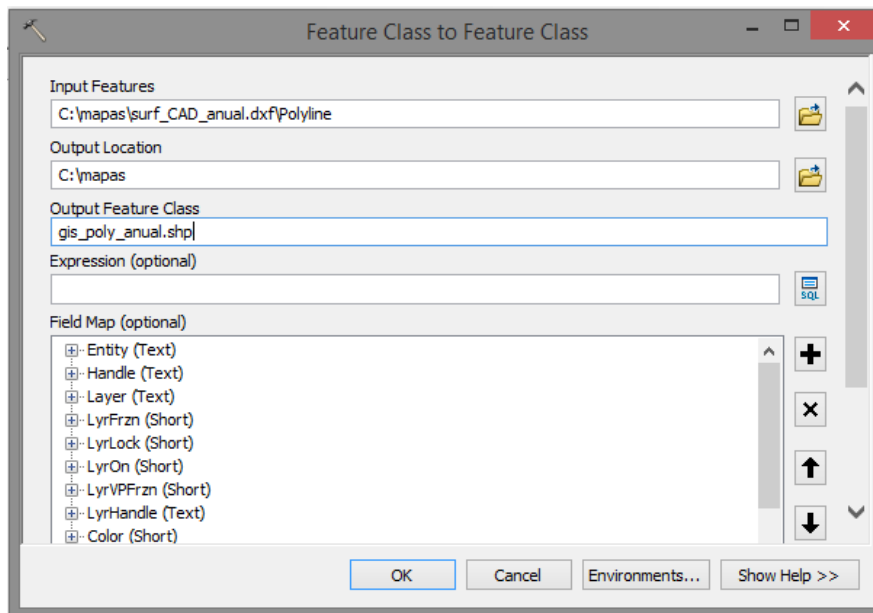


Figura 3.4.10 – Cuadro de Selección de ruta de alojamiento de archivo “.shp” generado.

Una vez generado el archivo shapefile hay que validar su georreferenciación de manera que se le asigne el sistema de coordenadas LAMBERTCC_ESA²⁰ como se muestra en la figura 3.4.11.

²⁰ Archivo de sistema de coordenadas Lambert para El Salvador proporcionado por el Observatorio Ambiental del MARN.

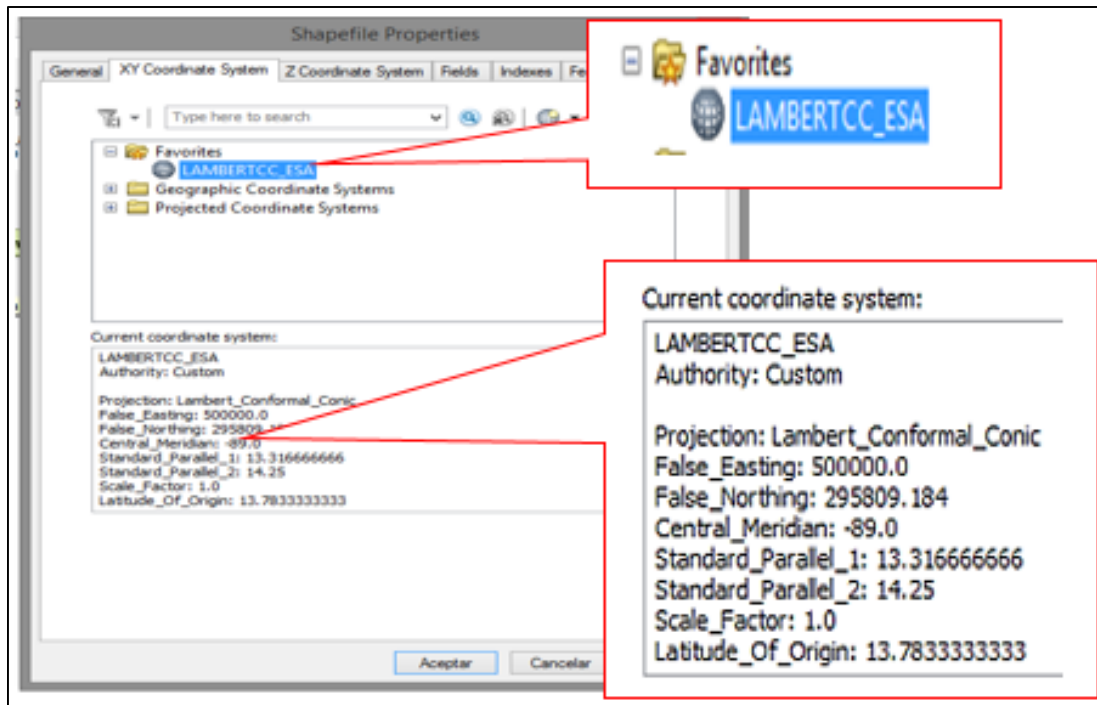


Figura 3.4.11 – Asignación de sistema de coordenadas.

Para el siguiente paso se utiliza la herramienta de software ILWIS y se debe de importar el archivo shapefile generado a un formato de archivo que se pueda utilizar en ILWIS el cual tiene que ser un archivo **“.mps”** para tal efecto se debe de importar el shapefile, dirigiéndose a la opción: *File* → *import* → *map* y asignar un nombre para el archivo **“.mps”** como se muestra en la figura 3.4.12.

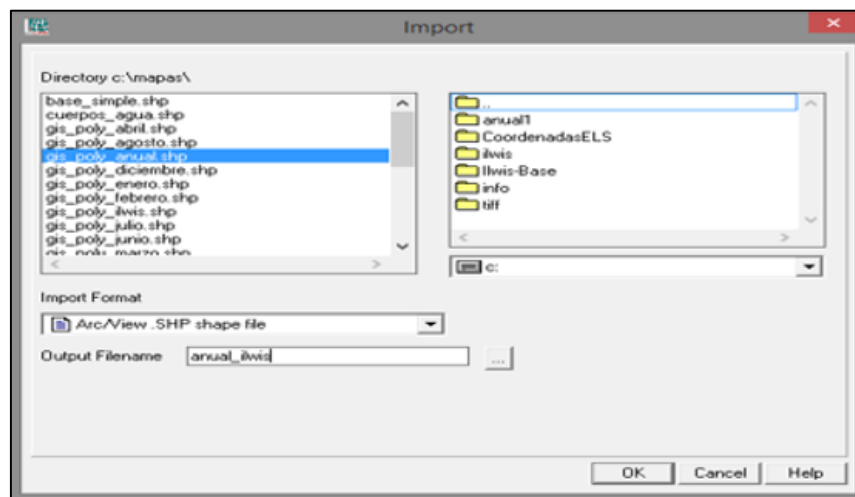


Figura 3.4.12 – Selección de archivo **“.shp”** para importar a **“.mps”**

Se crea el nuevo archivo **“mps”** al cual es necesario asignarle nuevamente el sistema de coordenadas; ¿pero porque se debe de hacer de nuevo si el archivo shapefile ya tenia asignado un sistema de coordenadas? esto es porque la asignacion anterior de sistemas de coordenadas se realizo para proporcionar una informacion completa al programa ilwis sobre el shapefile creado a partir de las polilineas las cuales fueron extraidas del archivo **“.dxf”** de manera que ahora se genera otro archivo con extension **“.mps”** con toda la informacion que proviene desde el primer paso en la generacion de los mapas de radiacion solar (generacion de grid e isolineas). Nuevamente se requiere asignar un sistema de coordenadas ya que se esta trabajando en un nuevo programa y cada vez que se genera un archivo nuevo es necesario realizar esta tarea de asignar un sistema de coordenadas como se muestra en la siguiente figura 3.4.13.

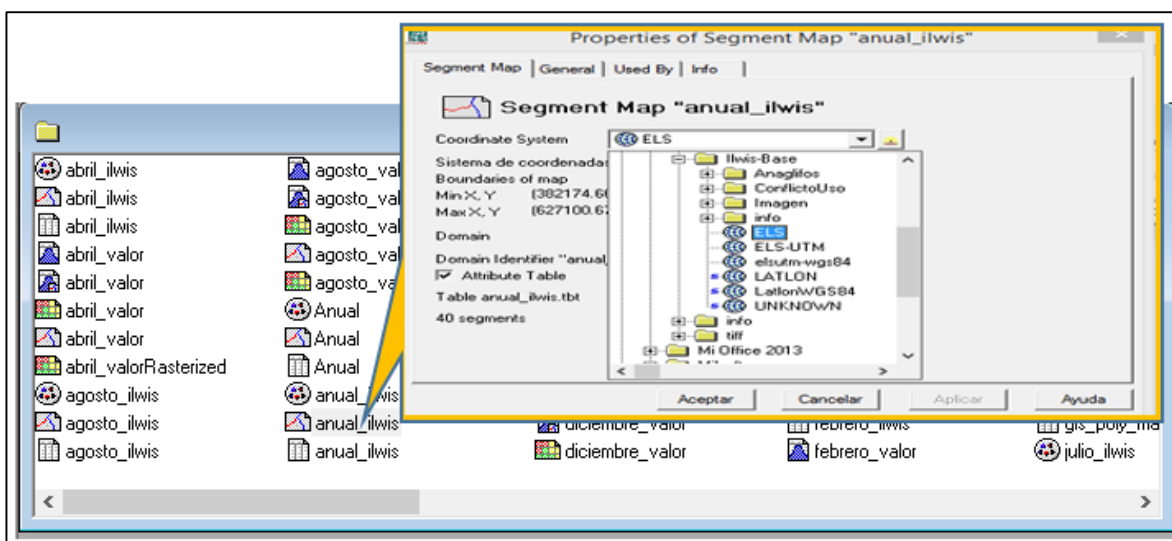


Figura 3.4.13 – Asignación de sistema de coordenadas en ilwis.

Ahora ya creado el archivo para trabajar en ilwis se le asignaran los atributos de valores de radiación solar para realizar la interpolación espacial de kriging, para lo cual es necesario dar click derecho y elegir la opción: **→ Vector operations → attribute maps** como lo muestra la figura 3.4.14. Luego se elige el atributo de elevación como se muestra en la figura 3.4.15. La razón por la cual se elige el atributo de elevación es porque generalmente es la columna donde se almacena la información de la variable a interpolar. Si se desea se puede confirmar que el atributo de elevación contiene los valores de radiación solar abriendo el archivo **“.tbt”** como se muestra en la figura 3.4.16.

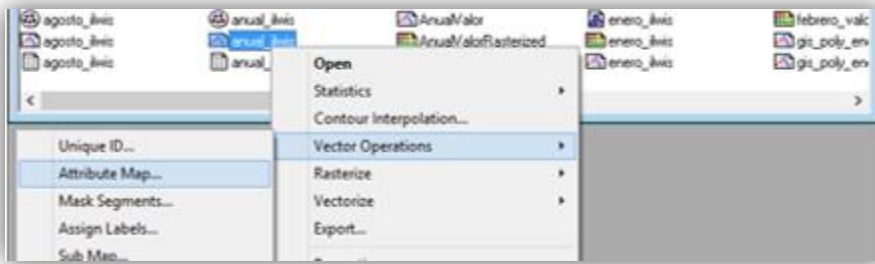


Figura 3.4.14 – Attribute Maps.

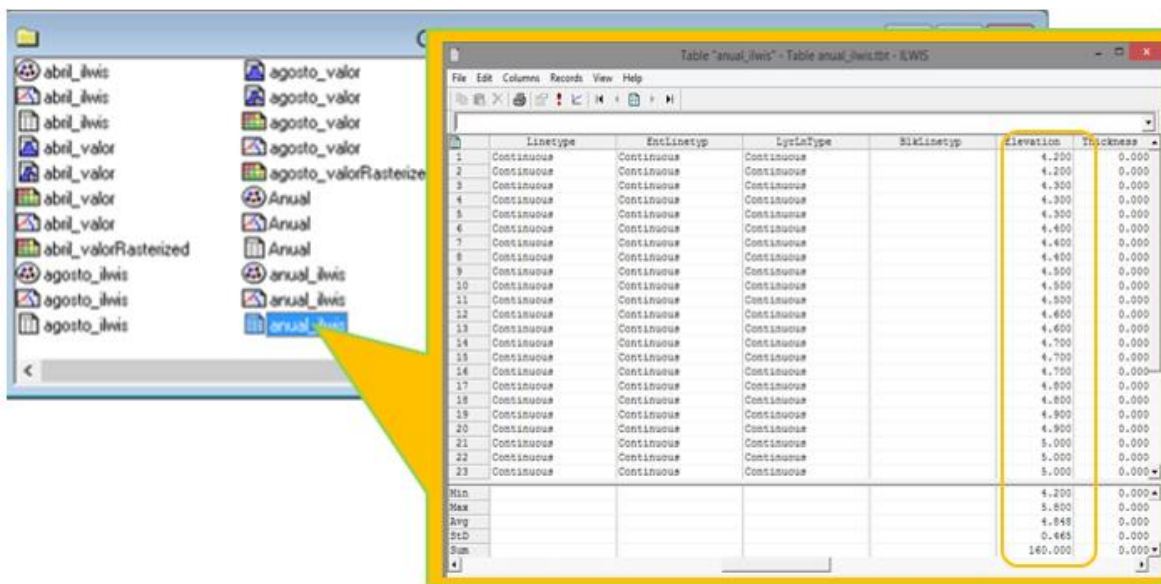


Figura 3.4.15 – Atributo de elevación.

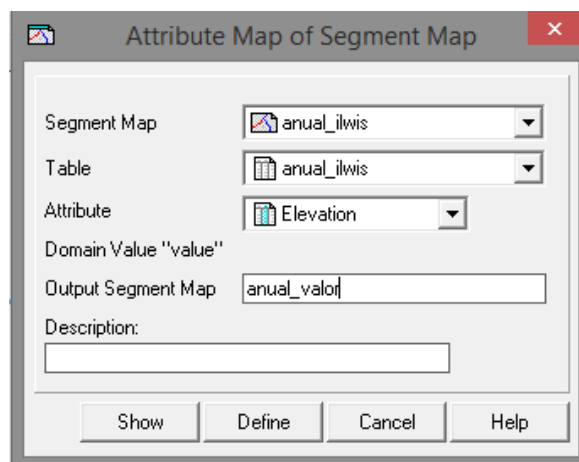


Figura 3.4.16 – Atributo de elevación.

En esta etapa se realiza la interpolación del archivo “*anual_valor.mps*” el cual fue creado en el paso anterior. Se debe de aclarar que esta interpolación no es la del método de kriging, ya que la interpolación de kriging se realizó en el momento de la generación de la grilla e isoclinas. El programa *ilwis* solo interpretará las isoclinas generadas las cuales pueden ser creadas con cualquier otro método de interpolación. En este paso nuevamente asignamos sistema de coordenadas para georreferenciar el resultado del tratamiento de la interpolación desde las isoclinas generadas.

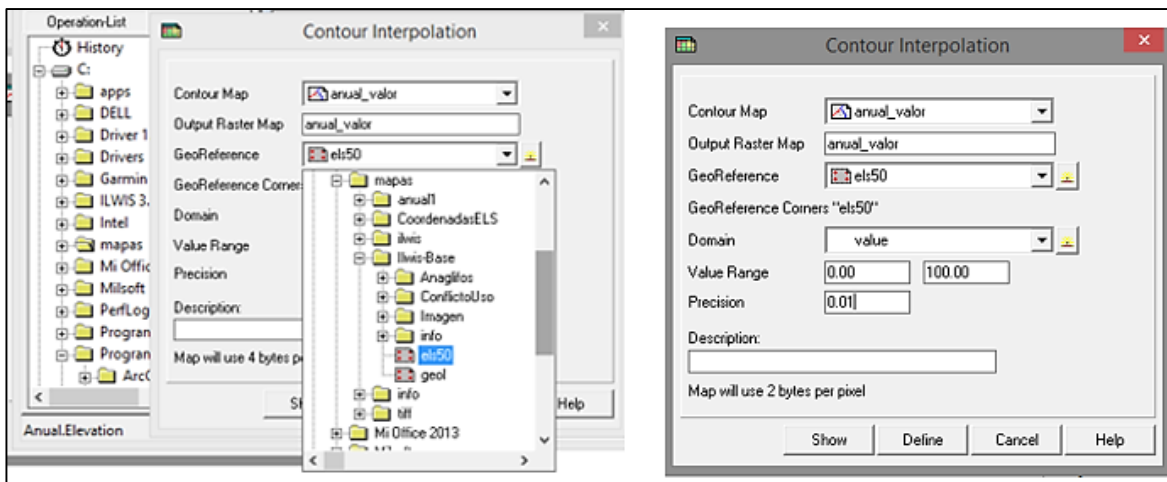


Figura 3.4.17 – Contorno de interpolación.

Como resultado de todos los pasos anteriores se obtiene de manera gráfica la interpolación espacial de kriging. Se puede apreciar los distintos valores de radiación solar para cada región de la grilla, pero este resultado carece de una delimitación como de un croquis de mapa, lo que dificulta conocer a qué lugar del país corresponden los valores de radiación solar (ver figura 3.4.18).

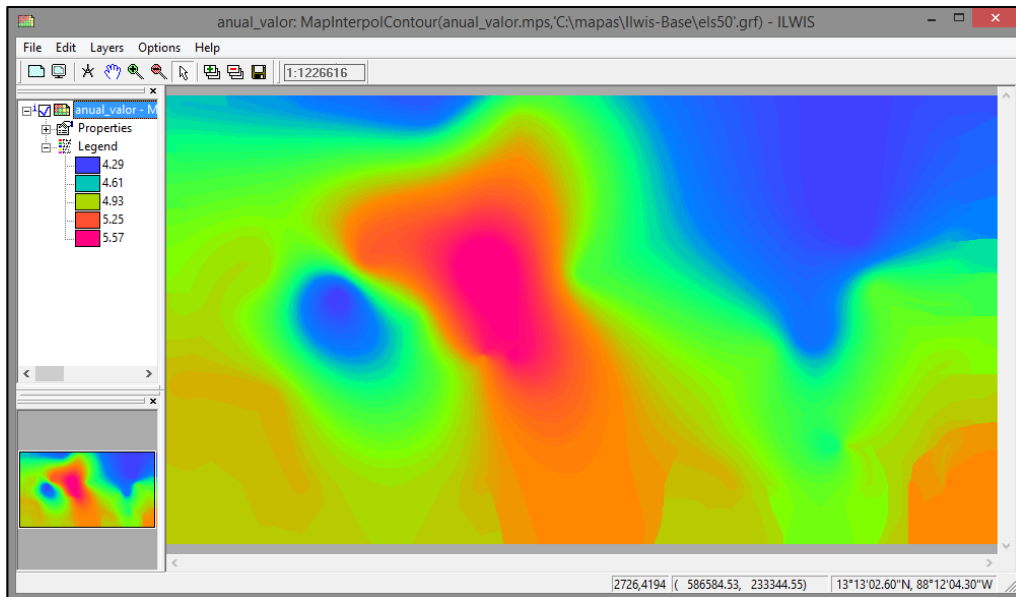


Figura 3.4.18 – Interpolación de Kriging.

Para una mejor presentación de los resultados se exporta el archivo “**anual_valor.mps**” a formato *Arc/info ASCII* con extensión “**.asc**” Este es un archivo de tipo ARC ASCIIGRID que se refiere a un formato de intercambio específico desarrollado por ARC / INFO raster en formato ASCII. El formato consta de una cabecera que especifica la resolución de dominios y geográfica, seguido de los valores de celda de cuadrícula reales. Por lo general, la extensión de archivo es “**.asc**”.

Para exportar los resultados seleccionar las el archivo *anual_valor.mps*; luego seleccionar el formato a exportar → **Aec/info ASCII .ASC** y asignar un nombre para el archivo de salida (ver figura 3.4.19).

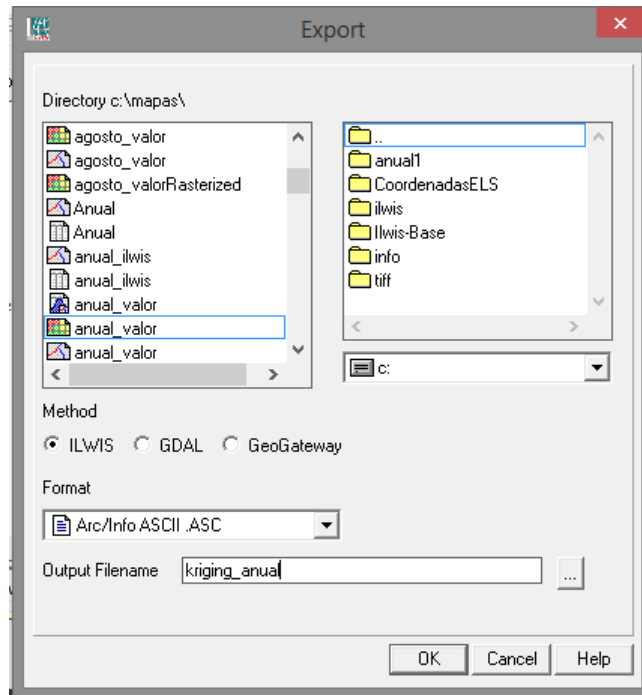


Figura 3.4.19 – Exportando resultados.

Para el siguiente paso se utiliza nuevamente la herramienta *ArcCatalog de ArcGIS* se seleccionan las opciones: *ArcToolbox* → *ConversionTools* → *To Raster* → *Raster To Other Format (Multiple)*. (ver figura 3.59). Se desplegara una ventana donde se selecciona el archivo “*kriging_anual.asc*”, se asigna la ruta para guardar el archivo y se selecciona en el campo → *Raster Format (optional)* : “*IMAGINE Image.*” Con esta acción se convierte el resultado de la interpolación a formato **Raster** (Ver figura 3.4.20).

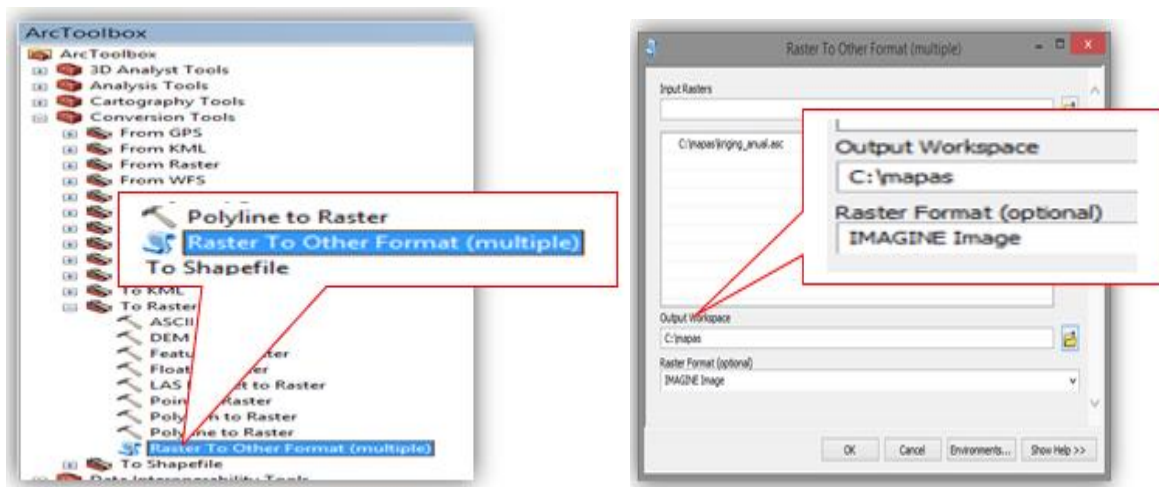
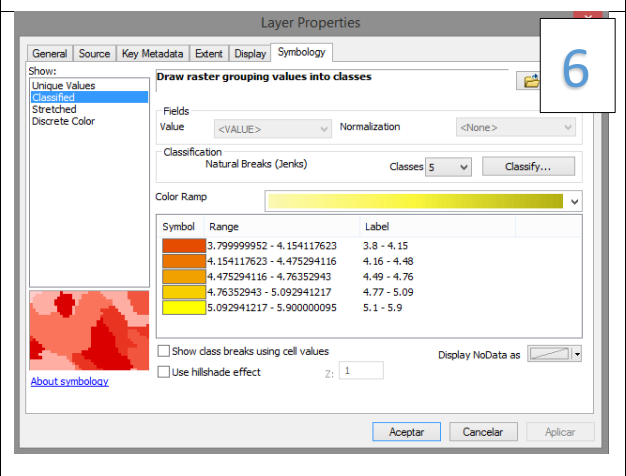
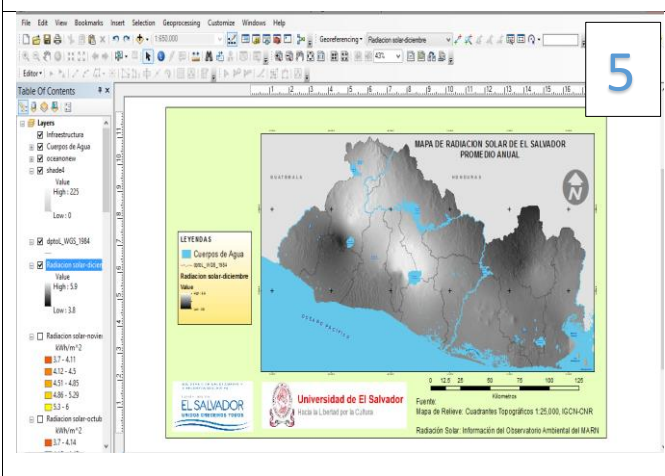
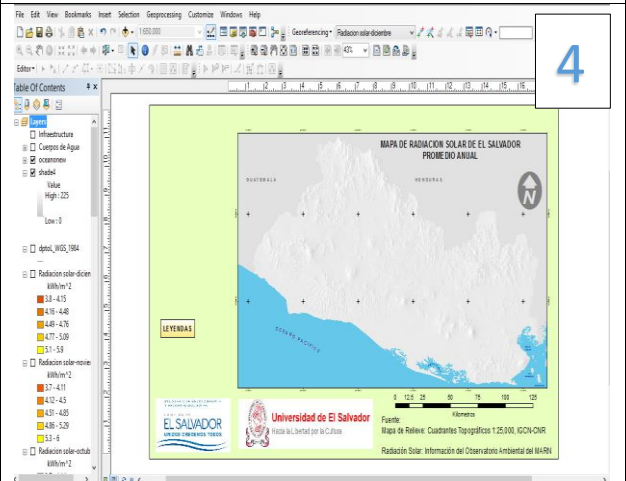
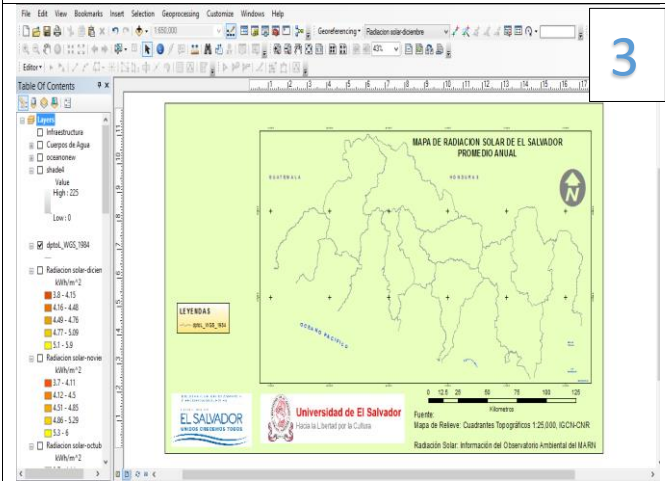
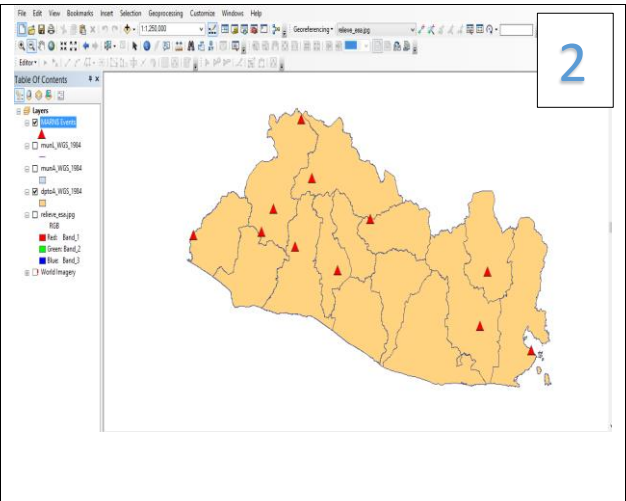
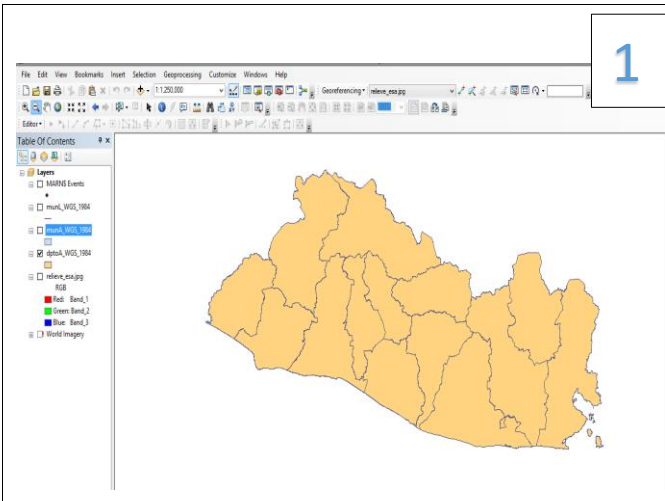


Figura 3.4.20 – Raster to other format (multiple).



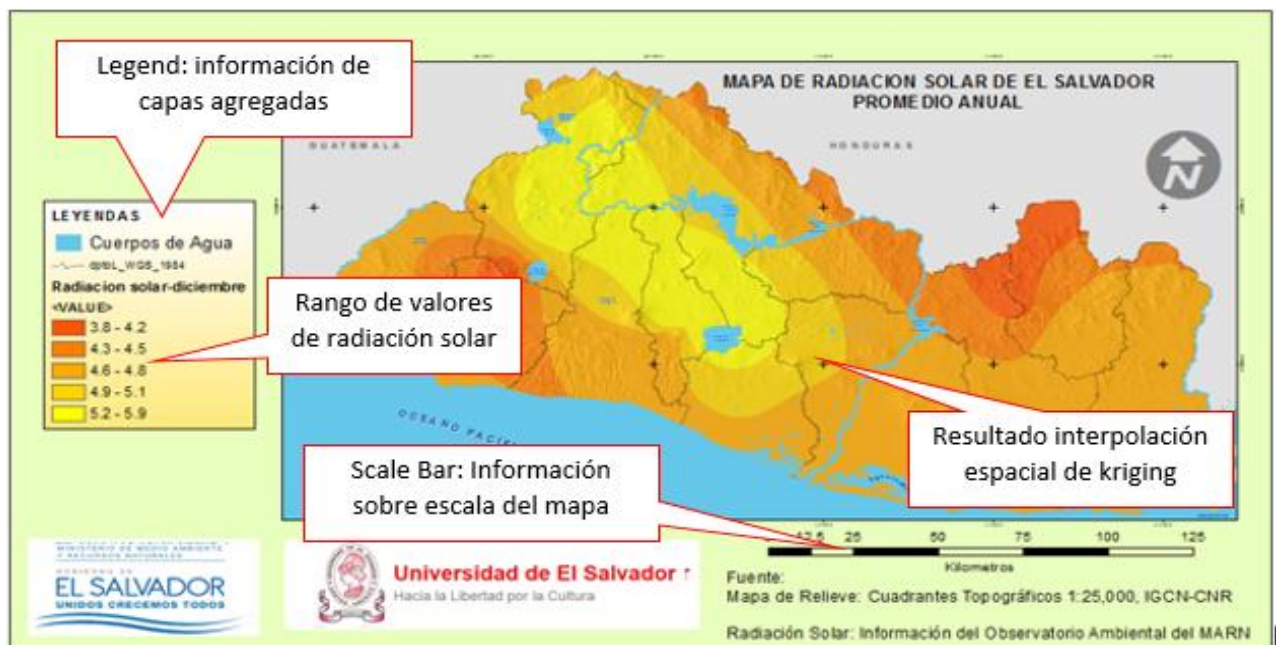
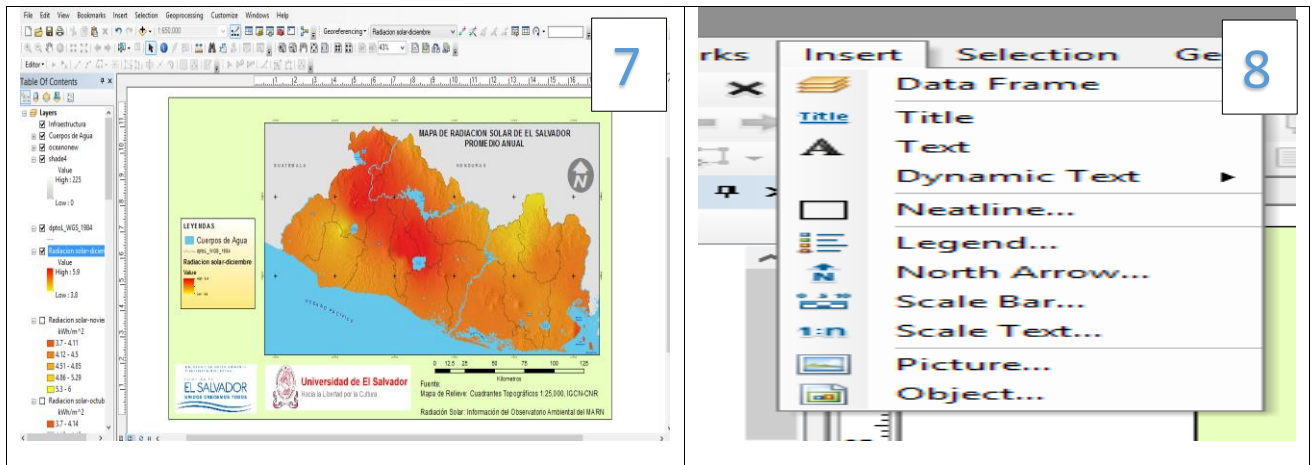


Figura 3.4.21 – Resultado de la interpolación a formato Raster.

3.4.1 Guía rápida para elaboración de mapas de radiación solar.

Primeramente se debe de contar con los datos de las estaciones meteorológicas como los valores de radiación solar y las coordenadas en proyección Lambert en un archivo de Excel que deberá contener primordialmente tres columnas para las variables X, Y y Z. Las variables X y Y serán para el par ordenado de coordenadas de cada estación y la variable Z estará destinada para los valores de radiación solar.

SOFTWARE	OPCION / MENU	ACCION
SURFER 12 Demo version	Grid--> Data	1-) seleccionar "Archivo.xls" 2-) Asignar coordenadas a variables X y Y. 3-) Sasignar Valores de radiacion Solar a variable Z. 4-) Asignar nombre a la grilla o grid --> "grid_archivo.grd"
	Maps--> New--> Contour Map	5-) Seleccionar "grid_archivo.grd.xls" 6-) Seleccionar isolineas generadas.
	Map--> Export contours	7-) Asignar nombre al archivo a exportar-->"surf_CAD_archivo.dxf"
ArcCatalog	Catalog Tree	8-) Seleccionar --> "surf_CAD_archivo.dxf" 9-) Click derecho sobre polyline y seleccionar Export--> To Shapefile (single). 10-) Se muestra la ventana "Feature class to feature class", asignar en el campo "Output feature class --> gis_poly_archivo.shp." 11-) Seleccionar --> "gis_poly_archivo.shp"--> click derecho --> properties --> LAMBERTCC_ESA
ILWIS	New Catalog	12-) Seleccionar ruta de almacenamiento del archivo "gis_poly_archivo.shp" utilizado en el paso anterior. (realizar este paso en caso que el software "ILWIS" no detecte el archivo "gis_poly_archivo.shp")
	File--> Import--> Map	13-) Seleccionar archivo "gis_poly_archivo.shp" Luego en el campo <i>Import format</i> ; seleccionar-->Arc/view.SHP asignar nombre al archivo de salida -->"archivo_ilwis" .
	C:\Mapas	14-) Asignar sistemas de coordenadas -->"archivo_ilwis.mps"--> click derecho--> properties--> Coordinate System--> ILWISBASE--> ELS 15-) seleccionar "archivo_ilwis.mps"--> click derecho--> vector operation--> Attribute maps
	Attribute Map of Segment Map	16-) seleccionar en Attribute--> Elevation y en output Segment map--> Asignar nombre--> "archivo_valor.mps"
	C:\Mapas	17-) Seleccionar "archivo_valor.mps"--> click derecho--> contour interpolation--> GeoReference--> asignar sistema de coordenadas-->EL50. value range--> asignar de 0 a 100 y precision 0.01 18-) Se genero un nuevo archivo-->"archivo_valor.mpr" --> click derecho--> Export--> Arc/info ASCII.ASC--> nombrar el archivo--> "kriging_archivo.asc".
ArcCatalog	ArcToolbox--> conversion Tools--> to Raster--> Raster to other Format (multiple)	19-) Seleccionar Kriging_archivo.asc--> seleccionar carpeta de destino--> C:\mapas-->elegir formato de salida del Raster--> IMAGE Image. --> se ha creado un archivo con extension ".img" --> "kriging_archivo.img"
ArcGIS	Add Data	20-) Cargar archivo "Kriging_archivo.img" --> agregar capas de limites de departamento, relieve, cuerpos de agua etc.
	Table of contents	21-) Seleccionar "Kriging_archivo.img"--> LayerProperties--> Symbology--> Classifield--> seleccionar "color Ramp".

Tabla 3.4.1 - Pasos para la realización de los mapas.

3.5 Resultados Obtenidos – Mapas de Radiación Solar.

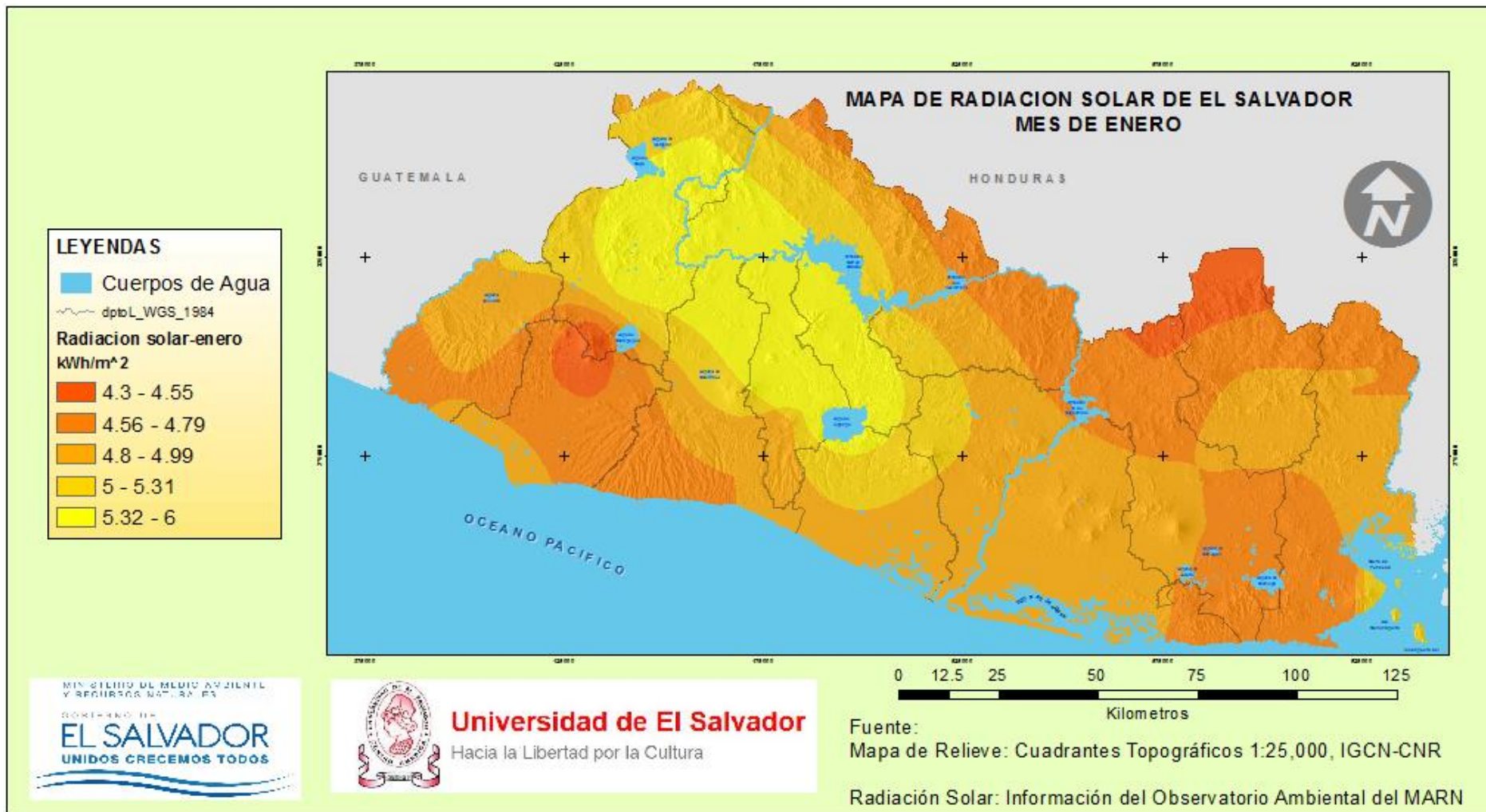


Figura 3.5.1 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Enero.

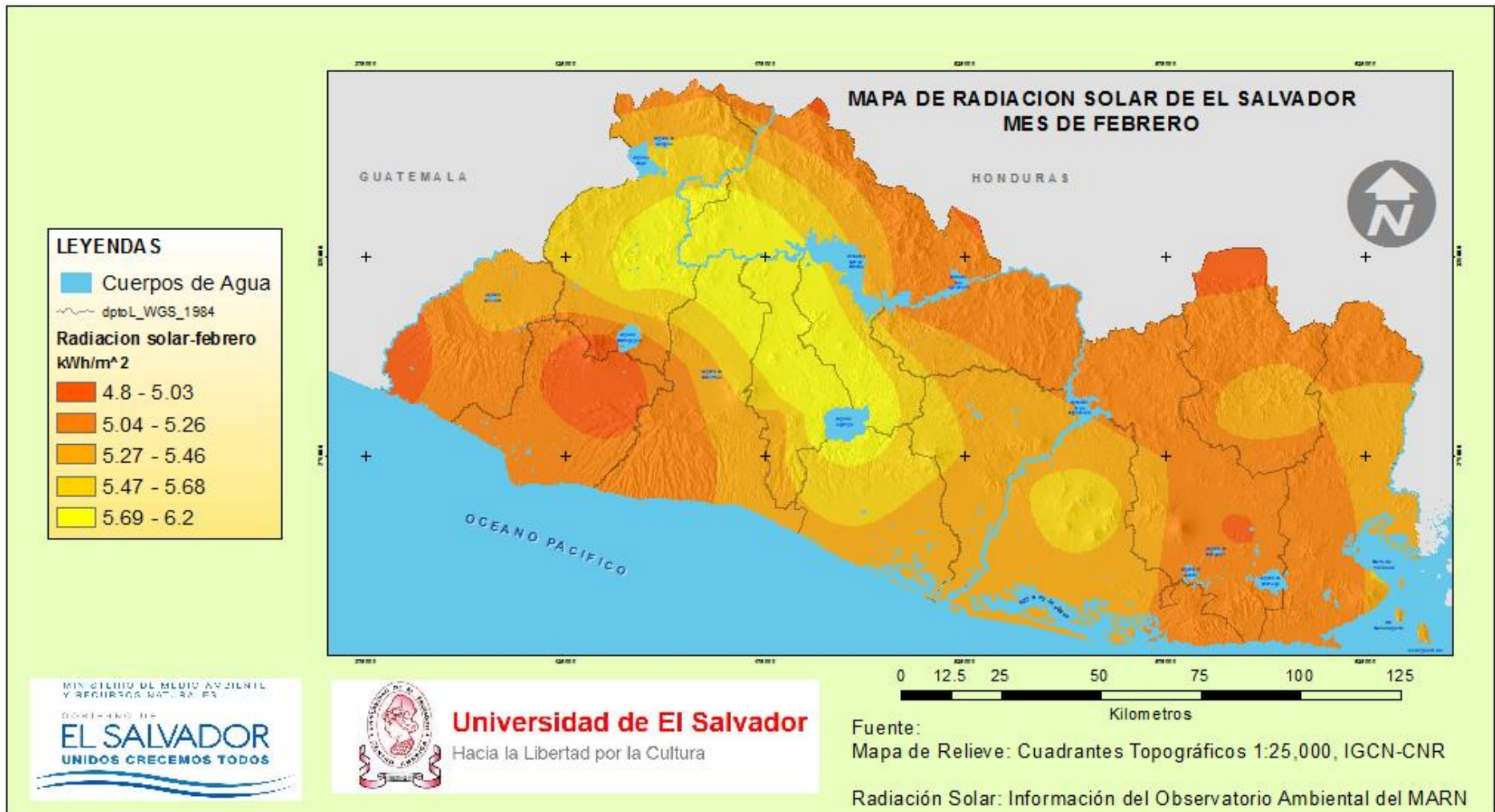


Figura 3.5.2 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Febrero.

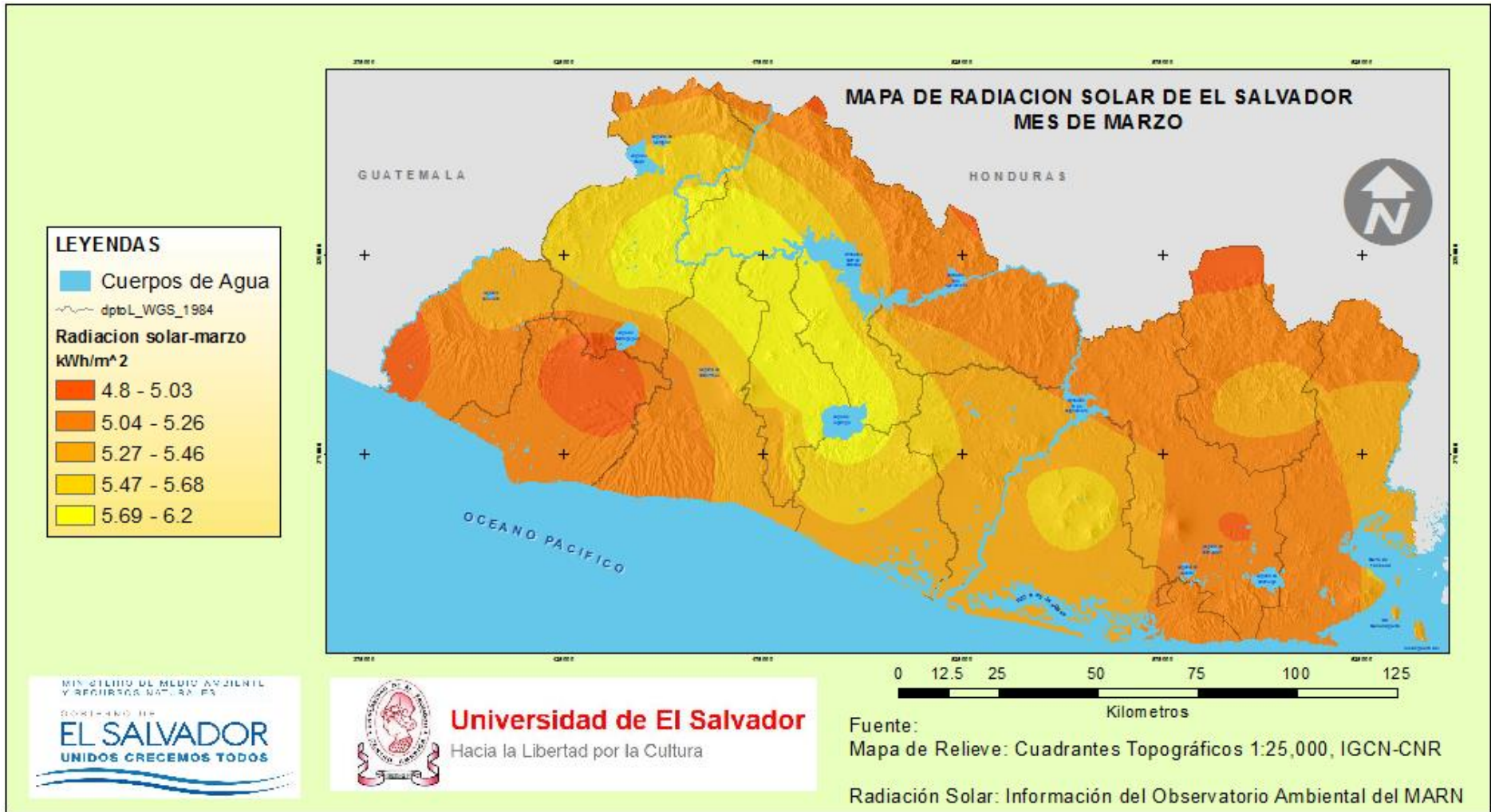


Figura 3.5.3 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Marzo.

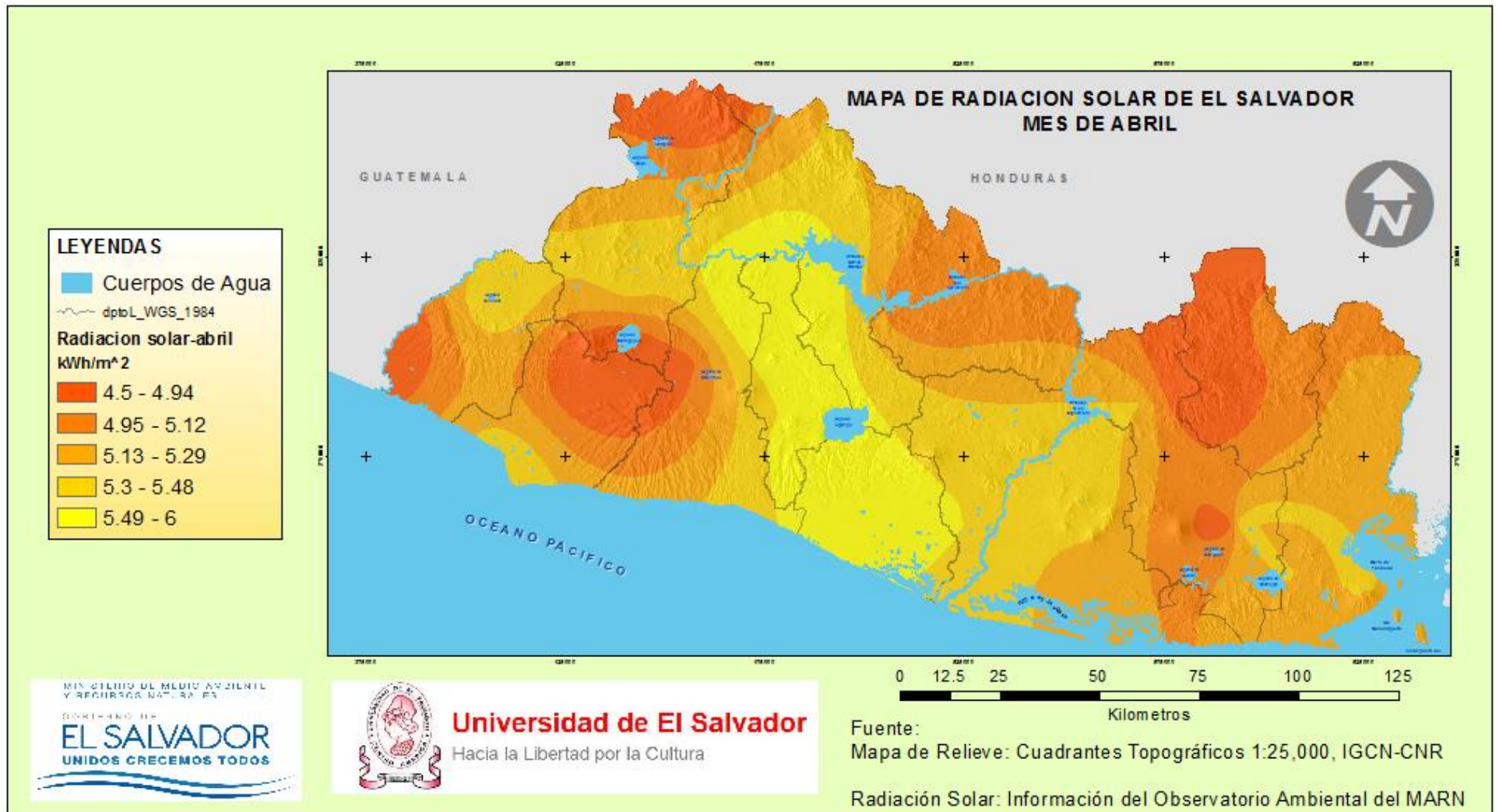


Figura 3.5.4 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Abril.

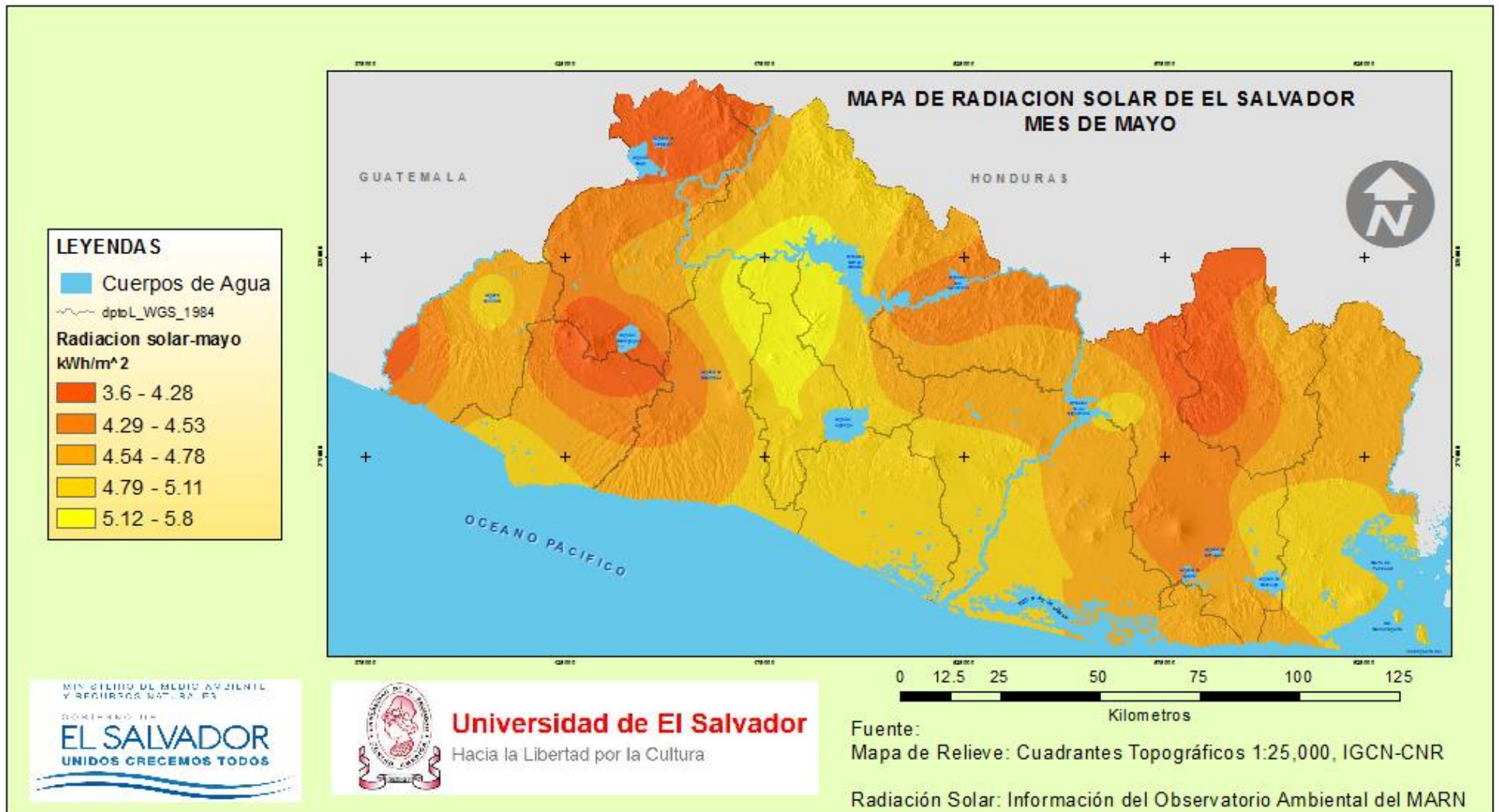


Figura 3.5.5 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Mayo.

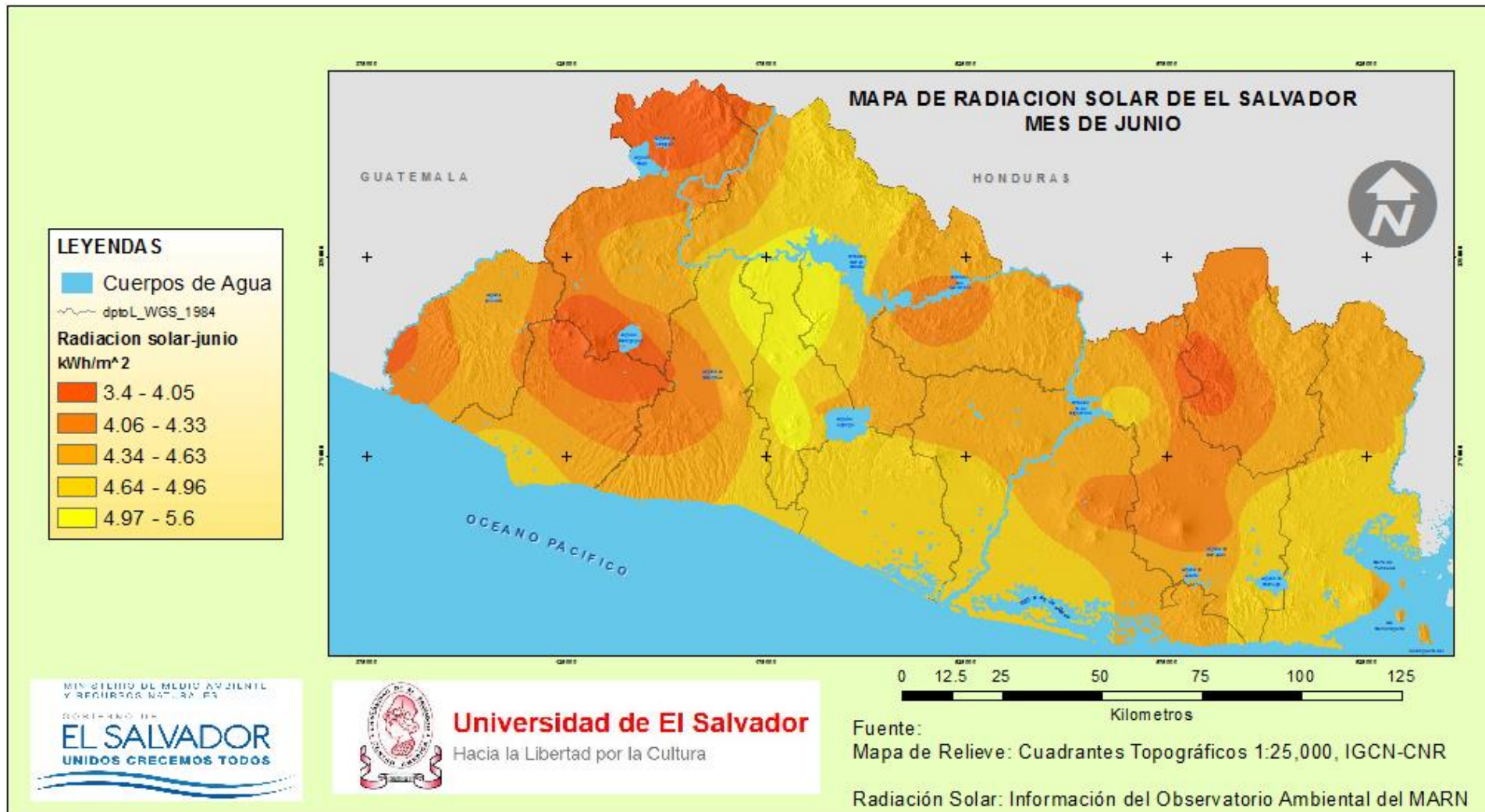


Figura 3.5.6 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Junio.

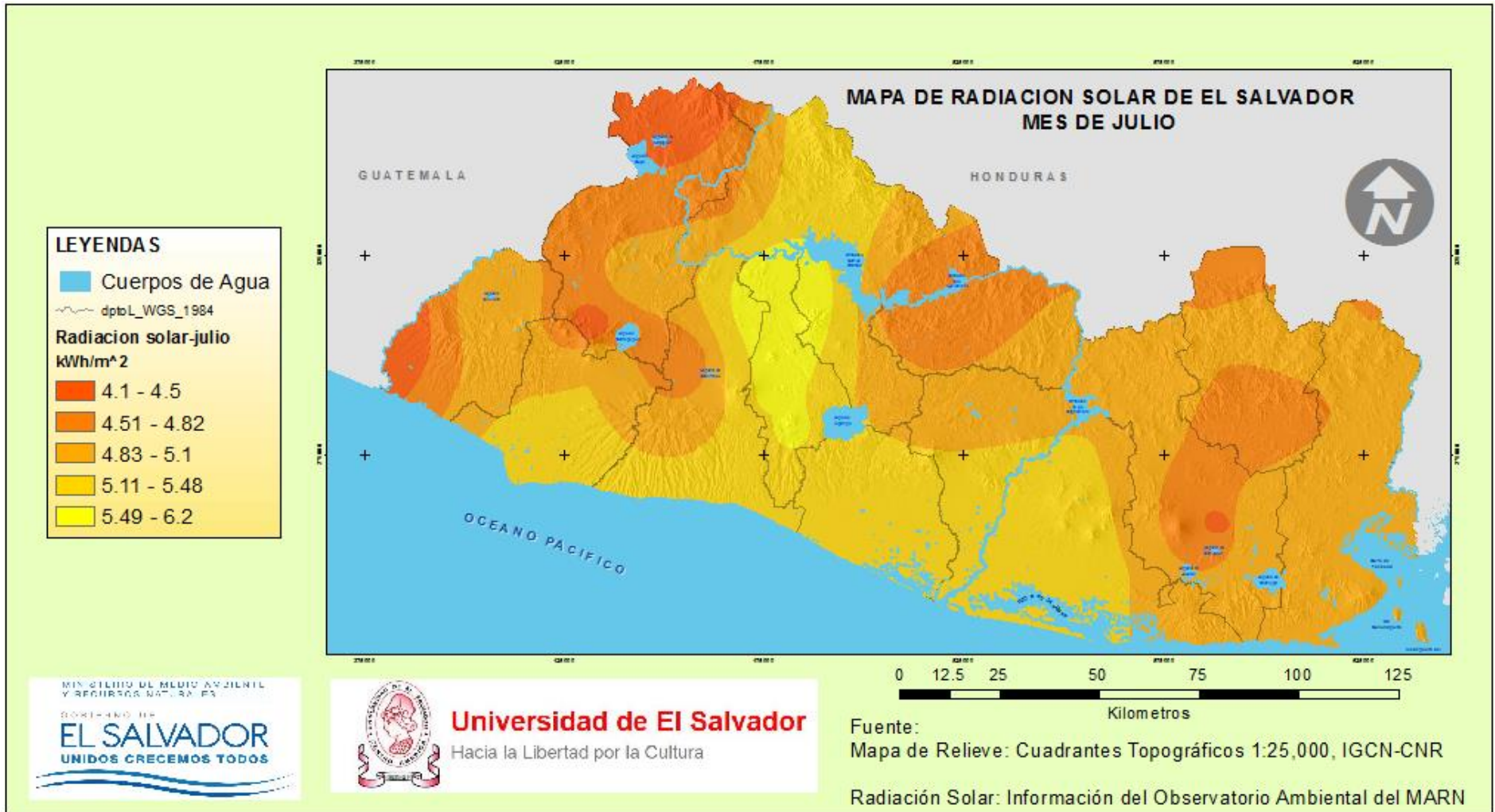


Figura 3.5.7 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Julio.

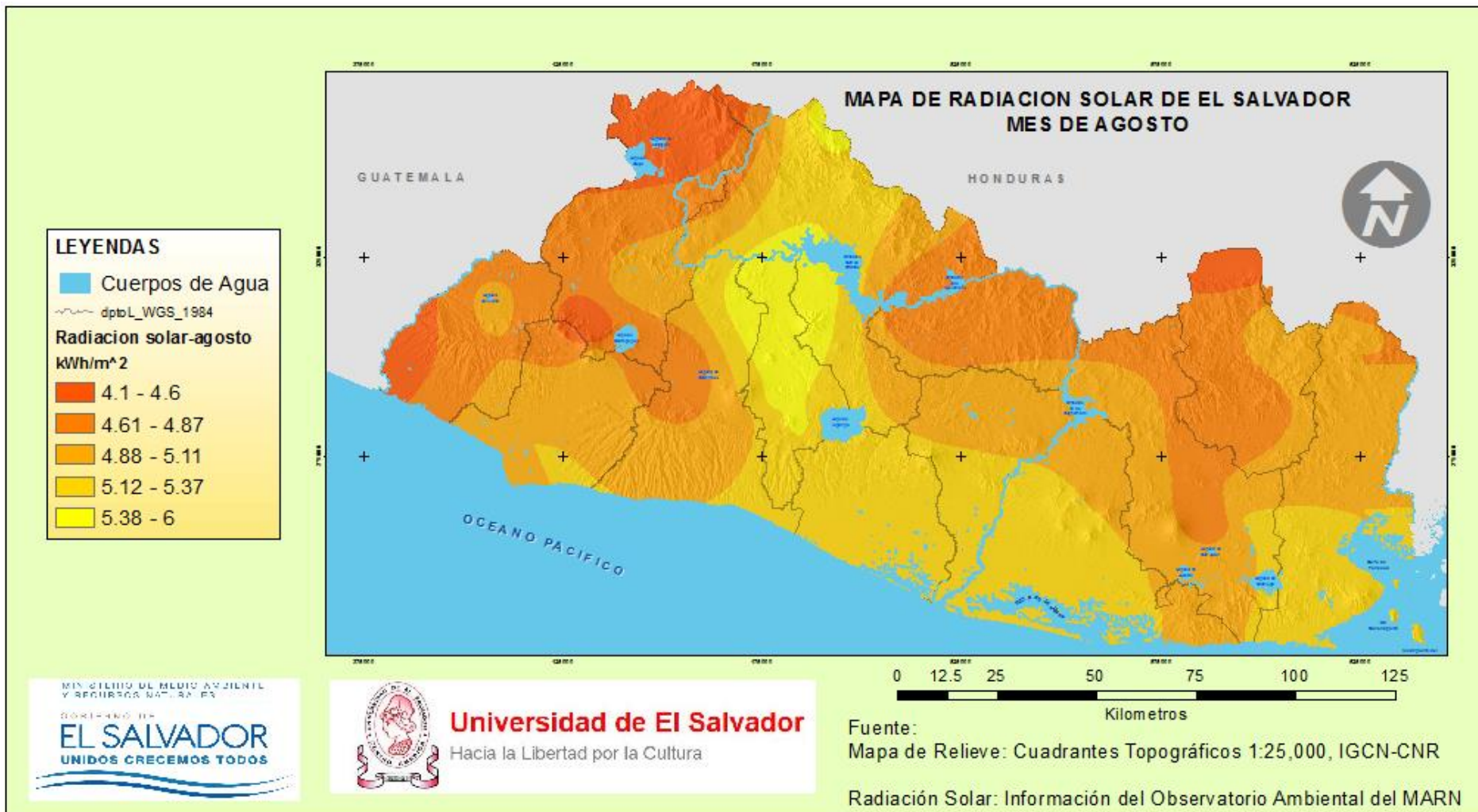


Figura 3.5.8 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Agosto.

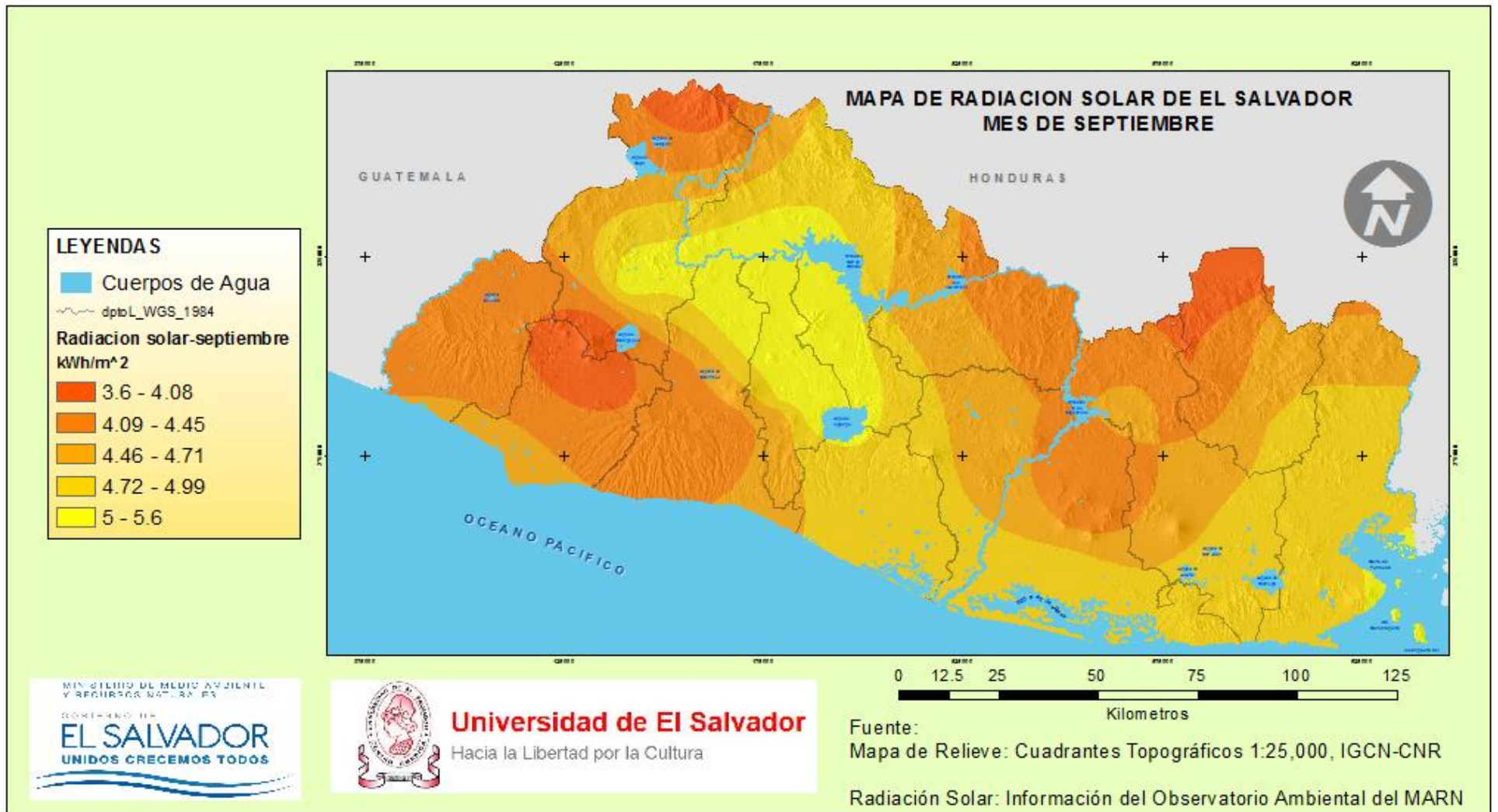


Figura 3.5.9 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Septiembre.

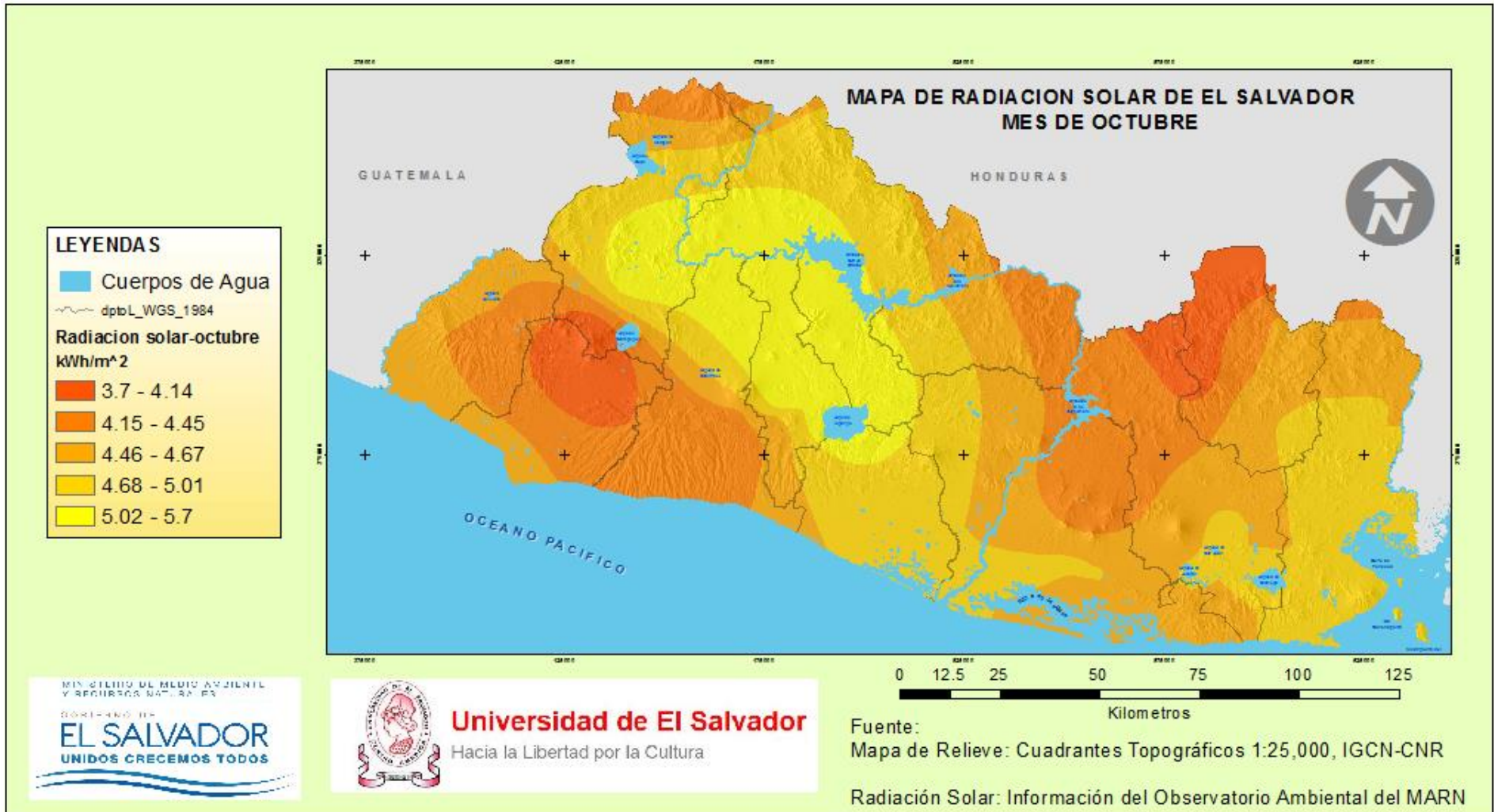


Figura 3.5.10 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Octubre.

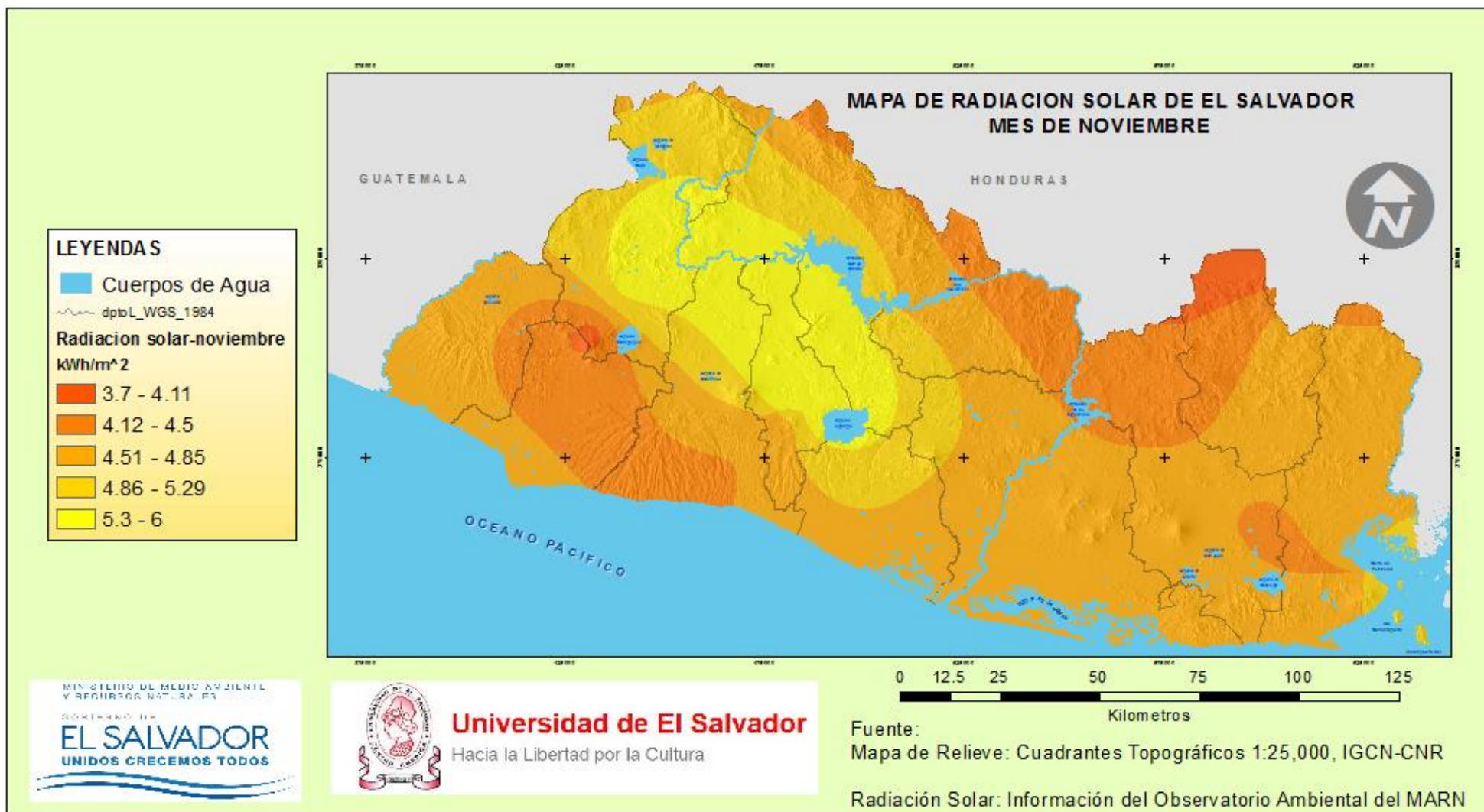


Figura 3.5.11 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Noviembre.

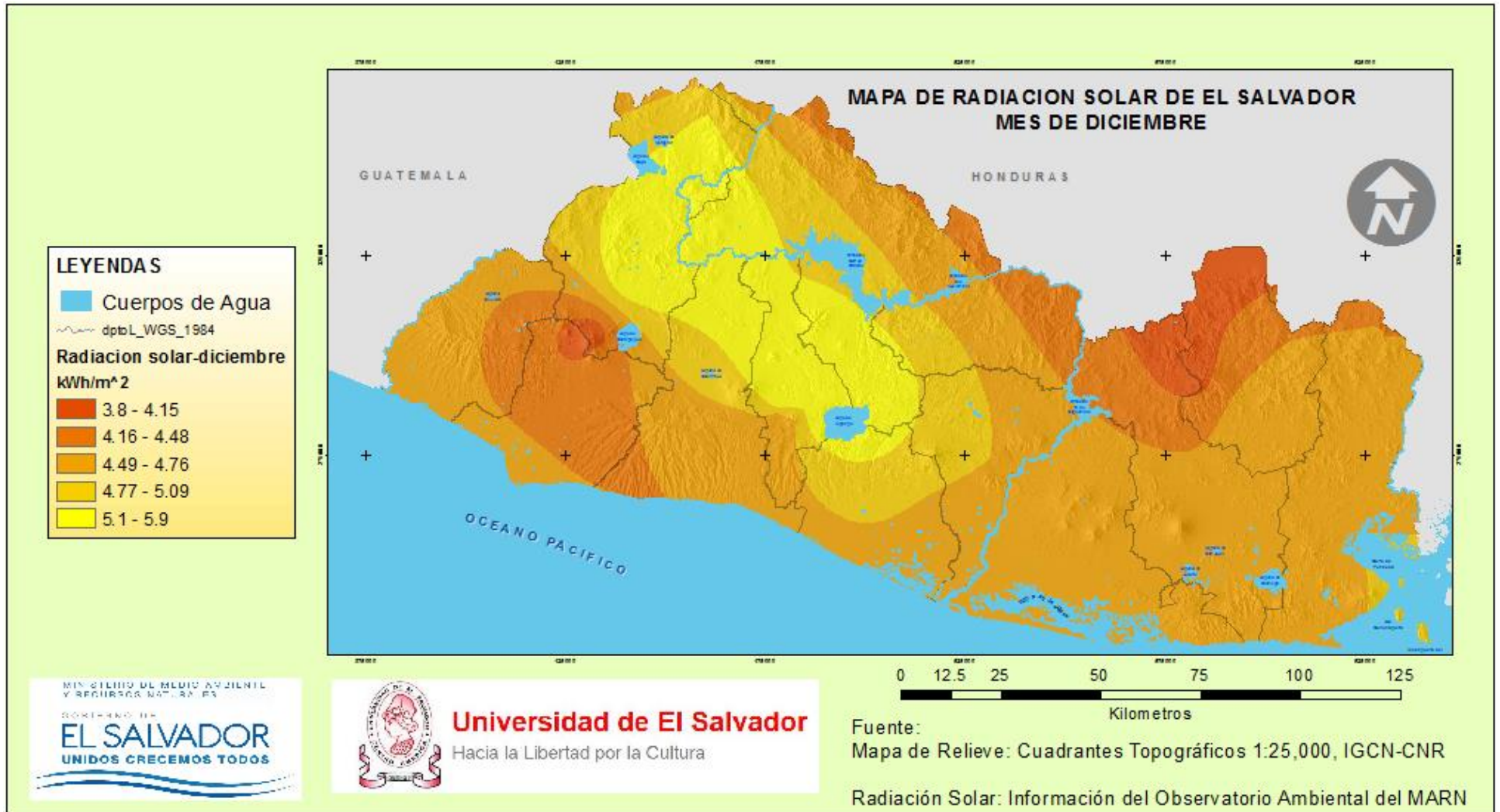
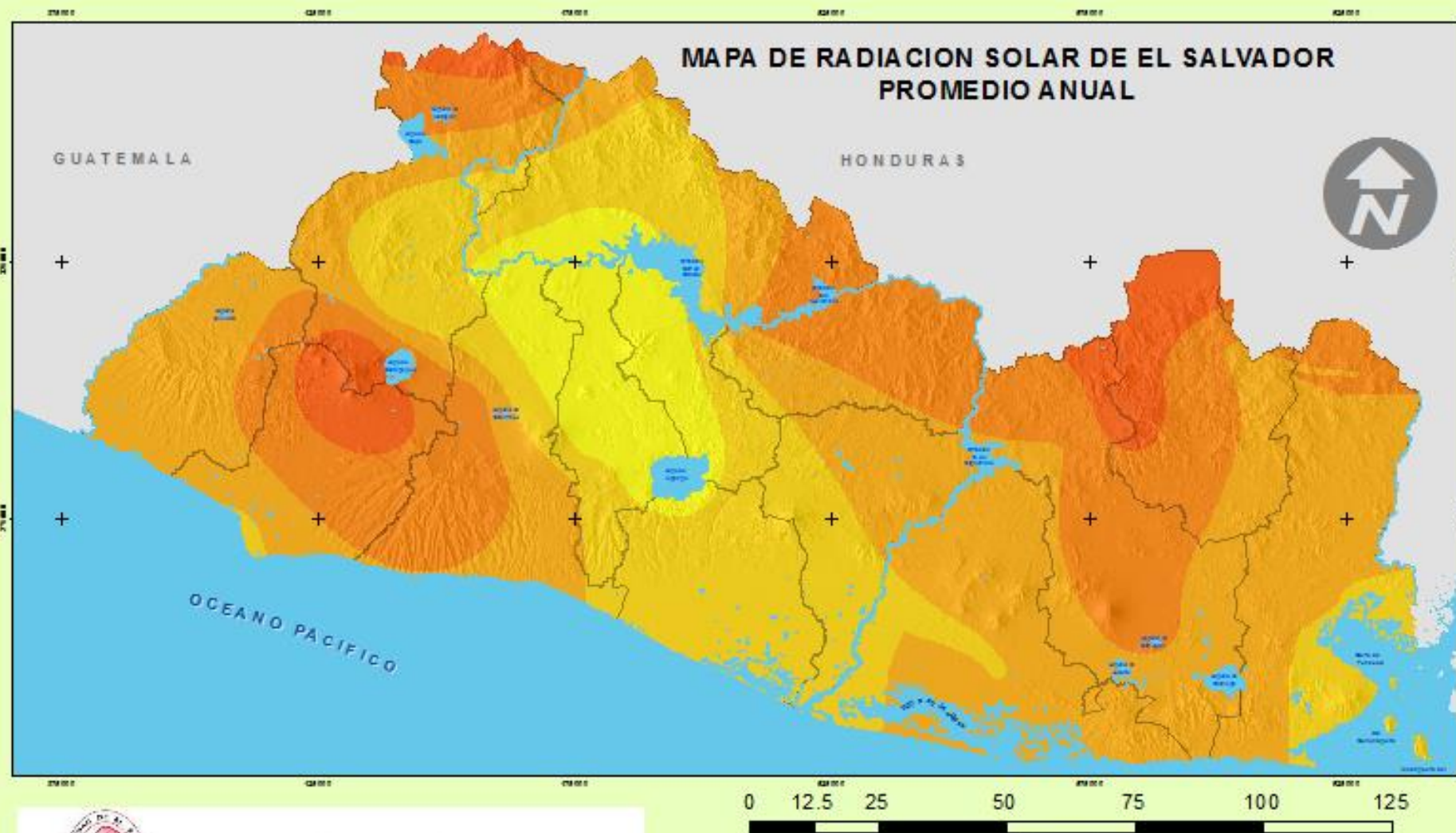


Figura 3.5.12 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Diciembre.



LEYENDAS

- Cuerpos de Agua
- dptbL_WGS_1984

Radiacion solar-anual kWh/m²

- 4.2 - 4.55
- 4.56 - 4.8
- 4.81 - 4.98
- 4.99 - 5.27
- 5.28 - 5.8

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

GOBIERNO DE

EL SALVADOR

UNIDOS CRECEMOS TODOS

Universidad de El Salvador
Hacia la Libertad por la Cultura

Fuente:
 Mapa de Relieve: Cuadrantes Topográficos 1:25,000, IGCN-CNR
 Radiación Solar: Información del Observatorio Ambiental del MARN

Figura 3.5.13 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Anual.

3.5.1 Análisis de Mapas de radiación solar.

Cuando existen mapas de diferentes fuentes de información se busca determinar cuál es el más confiable y representativo de la región, esto depende de la cantidad de estaciones, calidad de los datos registrados y los periodos de tiempo en los cuales fueron medidos en un determinado espacio territorial. Para el caso de El Salvador las principales diferencias son que el estudio SWERA determinó con 22 estaciones y el actualizado con un total de 31 estaciones, los periodos de tiempo son diferentes ya que el actualizado incluye datos de la última década y SWERA no. también no está detallado el procedimiento estadístico que se aplicó en el SWERA por lo que no se puede comprobar en este momento la calidad de dichos datos. Por todo lo anterior el análisis entre los mapas de SWERA y el actualizado se hizo observando el comportamiento de la radiación desde el año 2002 al 2013 en las 3 zonas geográficas principales del país (ver ilustraciones 3.5.14). Tomando el mes de enero como representante de la estación Seca y el mes de Junio de la lluviosa se realizó el siguiente análisis.

Regiones Principales de El Salvador:



Figura 3.5.14 – Zonas geográficas de El Salvador.

Además de las 3 zonas geográficas se hace mención de zonas utilizando los puntos cardinales tradicionales y sus combinaciones (ver tabla 3.5.1).

Puntos Cardinales	
N	Norte
S	Sur
E	Este
O	Oeste
NE	Nordeste
SU	Sudeste
SO	Sudoeste
NO	Noroeste

Tabla 3.5.1 - Análisis Comparativo y sus diferencias %.

El Salvador presenta dos estaciones climáticas, una seca y la otra lluviosa, por lo que se eligió un mapa mensual de cada estudio que represente cada estación para el análisis.

Análisis mes de Época Seca.

Mapa Enero actualizado.

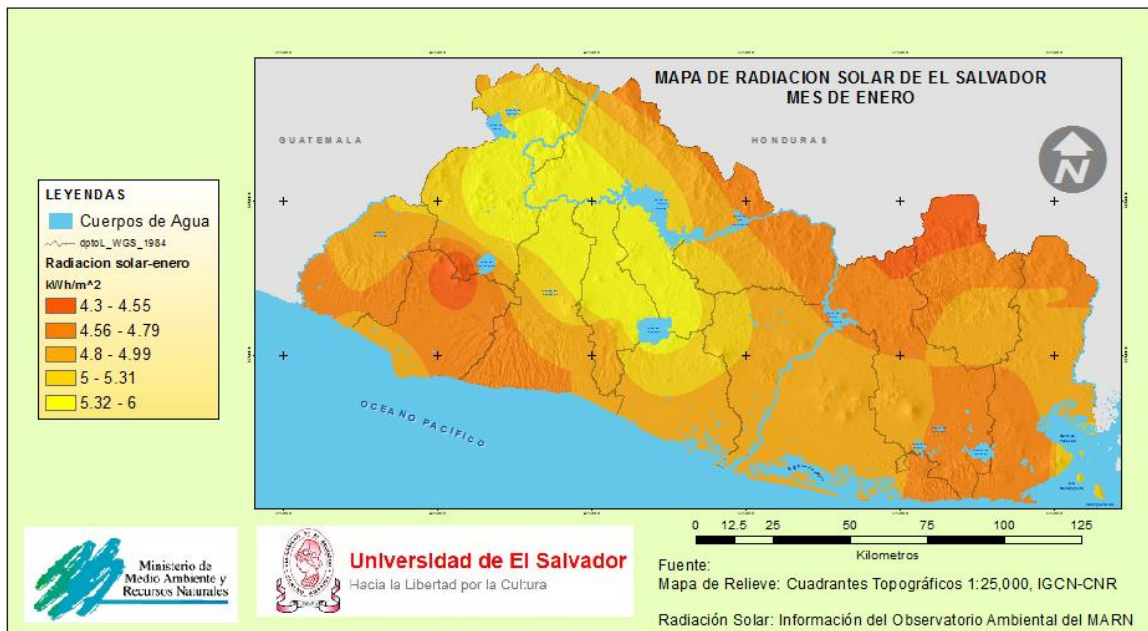


Figura 3.5.15 – Mapa de enero actualizado.

Mapa Enero SWERA.

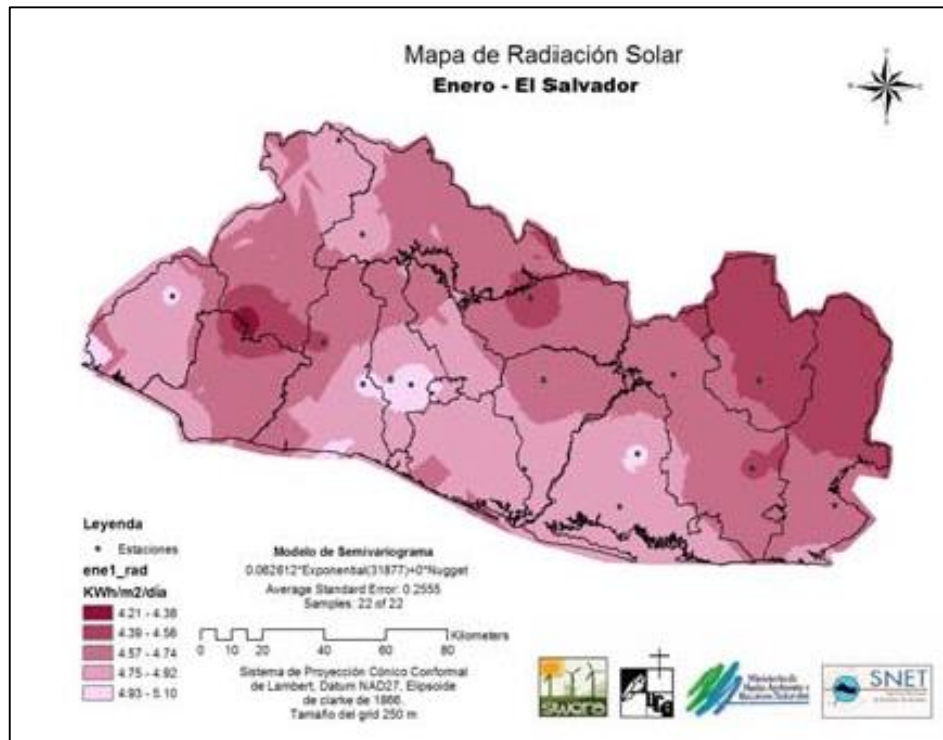


Figura 3.5.16 – Mapa de enero SWERA.

Observaciones: Se observa en la parte Nordeste de país en las regiones Occidental y Central que la radiación solar presenta valores alrededor de 5 a 6 kWh promedios diarios en el mapa actualizado y el SWERA alrededor de 4.57 a 5.10 kWh promedios diarios. También el zona norte de las regiones central y oriental presentan valores y comportamientos similares en los dos mapas que están alrededor de 4.20 a 4.7 kWh promedios diarios. Las zonas con geografía montañosa muestran una baja radiación, La zona costera de la región central y la oeste de la oriental presentan valores alrededor de 4.7 a 6 kWh en los dos mapas. Las ubicaciones que presentaron los valores más bajos fueron las zonas montañosas del departamento de Santa Ana y Morazán en ambos mapas.

En la época seca la zona con mayor potencial de radiación solar fue la parte Nordeste de país en las regiones Occidental y Central con valores entre 5 y 6 kWh promedios diarios.

Análisis mes de Época Lluviosa.

Mapa Junio actualizado.

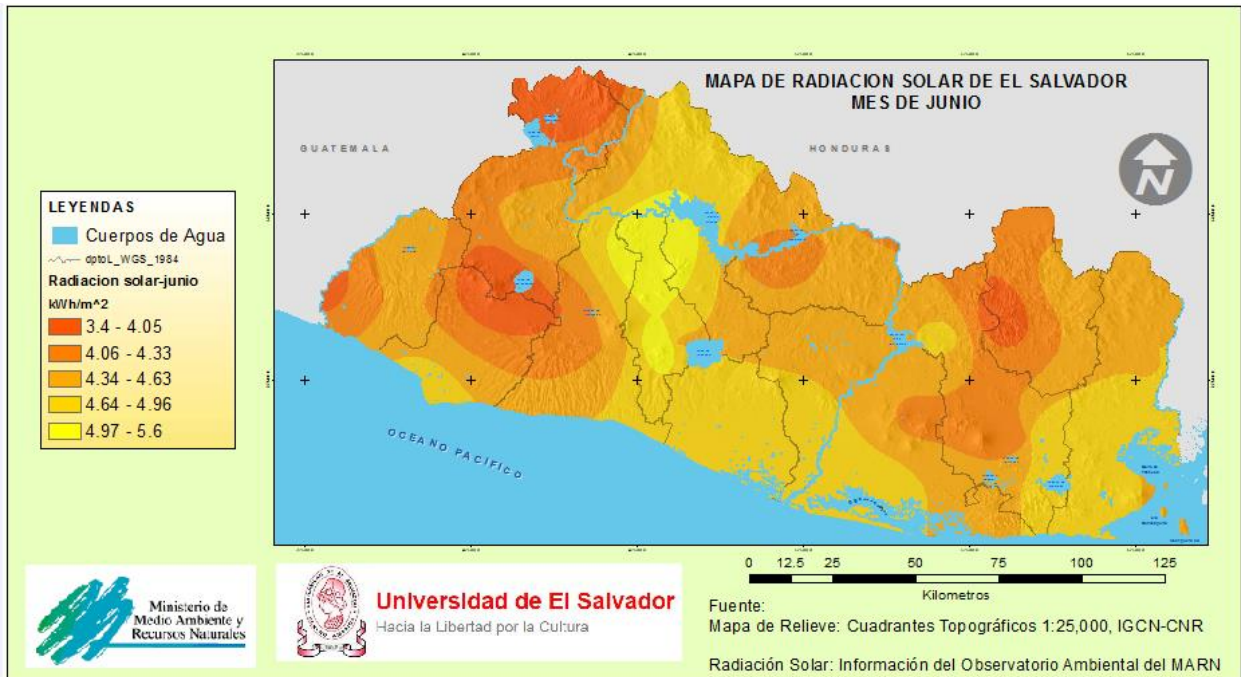


Figura 3.5.17 – Mapa de junio actualizado.

Mapa Junio SWERA.

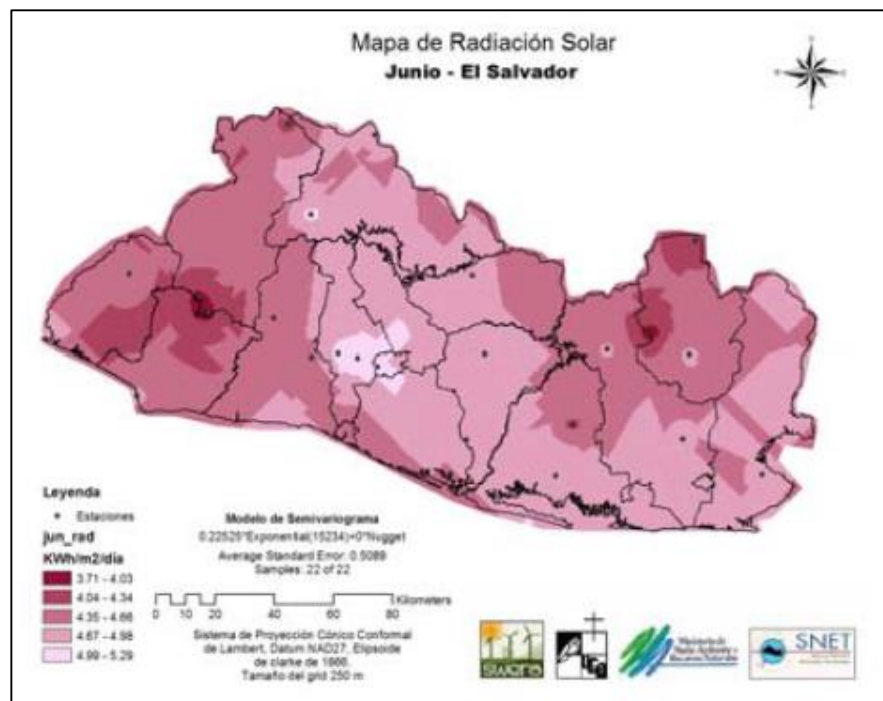


Figura 3.5.18 – Mapa de junio SWERA.

Observaciones: Para la estación lluviosa el comportamiento presentado en el territorio completo es similar en ambos mapas. En la zona occidental están alrededor de 3 a 4.7 kWh promedios diarios y la región central observa que el territorio con potencial se hizo más estrecho respecto al mes de enero, y su valor máximo se encuentra en San Salvador con un valor de 4.7 a 5.6 kWh promedio diarios. La zonas montañosas del país mostraron siempre valores bajos de radiación de 3 a 4.3 kWh promedios diarios.

En la época lluviosa la zona con mayor potencial de radiación solar fue la parte sur de país en las regiones Central y Oriental con valores entre 4 y 5.6 kWh promedios diarios para ambos mapas.

Análisis Anual.

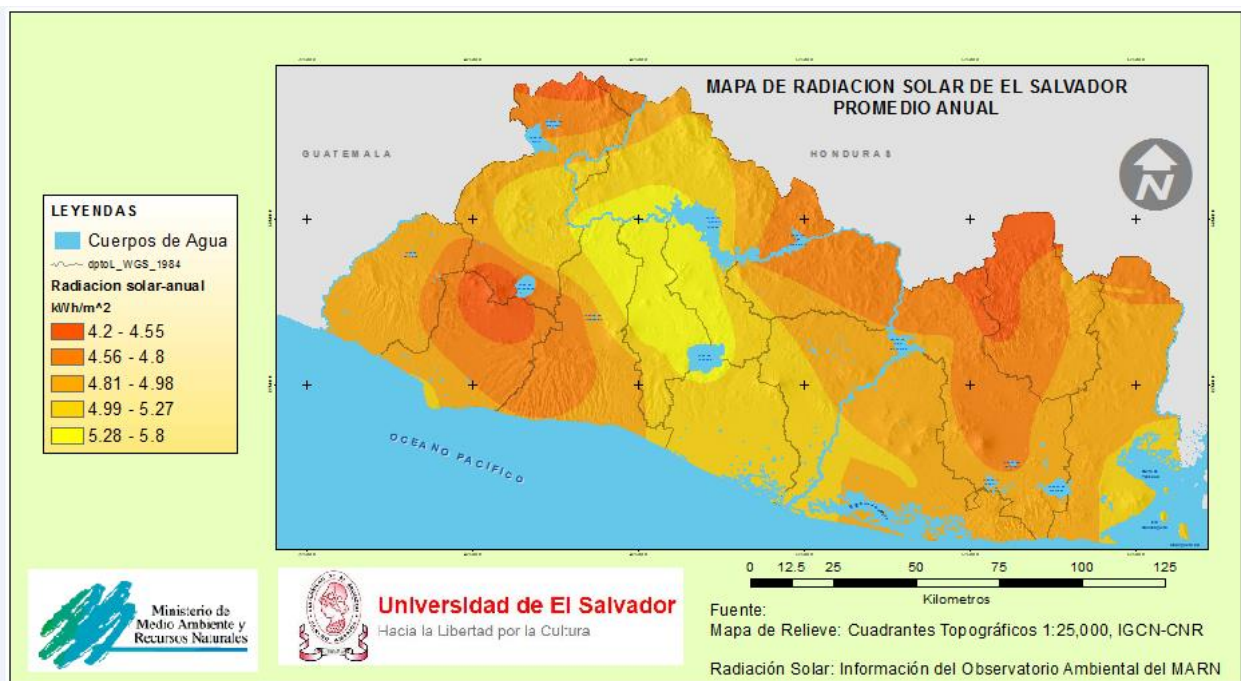


Figura 3.5.19 – Mapa anual actualizado.

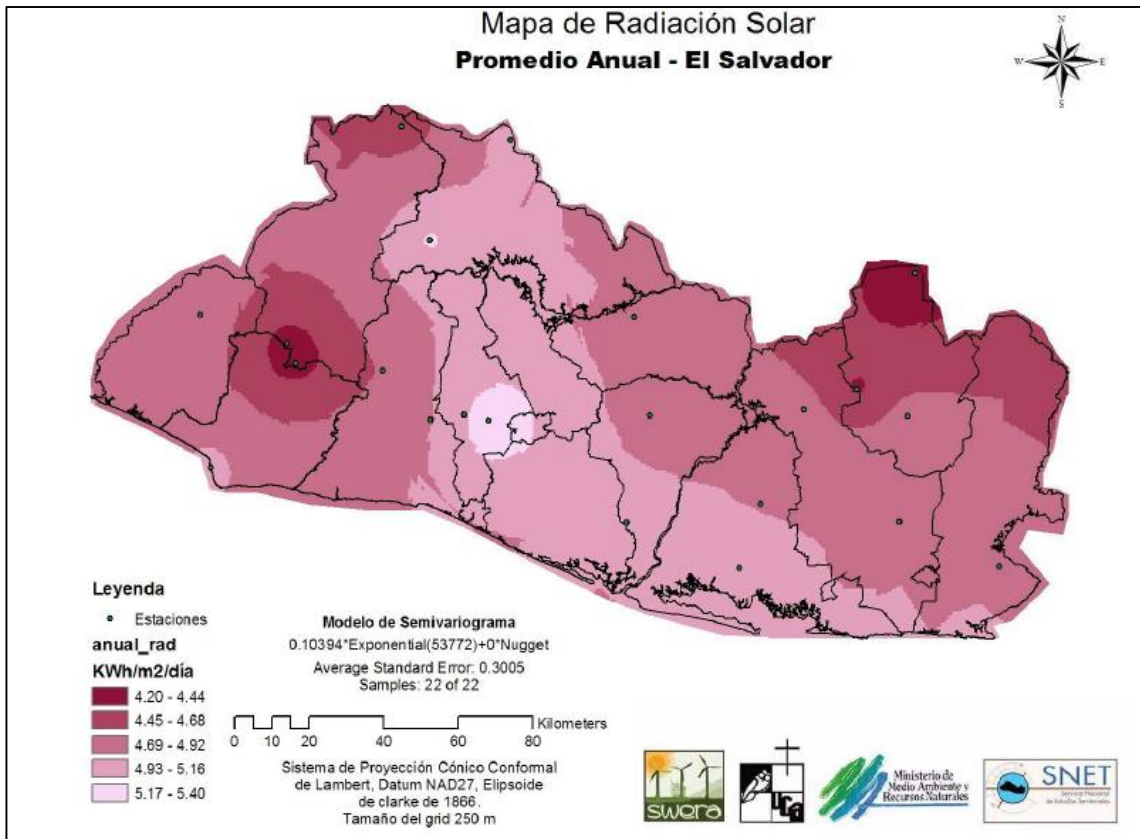


Figura 3.5.20 – Mapa anual SWERA.

Observaciones: La radiación solar anual en ambos mapas se presentó comportamientos muy similares, destacando que las zonas donde los valores más bajos fueron en la cadena montañosa central del occidente y en la parte norte de la regiones oriente y occidental del país donde las características del mapa de vida Holdrige respaldan dichas aseveraciones. Las regiones con el mayor potencial de radiación solar son la Nordeste de las regiones central y occidental del país con alrededor de 4 a 5.8 kWh promedio diario.

Las parte sur de la regiones Central y Oriental presentan también condiciones de gran potencial solar de alrededor de 4.8 a 5.3 kWh promedio diario.

La zona de San Salvador presenta el foco máximo de valor de radiación solar anual de 5.8 kWh promedios diario, esto puede deberse a que tiene en su zona mayor concentración de estaciones, por lo que se debe tomar en consideración a la hora de utilizar dichos valores estimados.

La parte norte de Usulután, San Vicente, San Miguel y la Unión, presentan en ambos mapas la segunda región con mayor potencial solar del país, alrededor de 4.5 y 5.2 kWh promedio diario.

3.6 Algunos usos de los mapas de radiación solar.

De manera general el uso de un mapa de radiación solar esta en conocer un valor de radiación en una determinada zona o región en un periodo de tiempo. Estos valores pueden ser utilizados para distintas aplicaciones según los intereses de la persona que los use. A continuación se mencionan algunos ejemplos del uso que se le puede dar a un de radiación solar:

EN LA AGRICULTURA.

Para este rubro es necesario conocer los valores de radiación solar por ejemplo; para obtener mejores cultivos se debe de conocer los valores de radiación solar ya que no todas las plantas realizan la fotosíntesis al mismo nivel de energía recibida por el sol. Así de esta manera se puede seleccionar un cultivo en especial para determinada época y región. También se puede determinar si es necesario o no la implementación de un invernadero.

La temperatura del aire es otro factor afectado por la cantidad de radiación solar recibida por parte del sol. La temperatura del aire puede influir sobre la apertura y cierre de los estomas en el proceso de transpiración de la planta. Ambas temperaturas del aire y el suelo, asociadas a la humedad relativa pueden constituir factores desencadenantes de plagas y enfermedades cuando alcanzan niveles propicios para el desarrollo de esos patógenos.

EN EL AREA FOTOVOLTAICA.

En esta sector es muy útil conocer los valores de radiación solar ya que para evaluar la energía que un panel puede producir diariamente en una determinada localidad resulta útil el concepto del número de horas de sol pico (H.S.P.) del lugar en cuestión y que no es otra cosa que el valor de la energía H total incidente sobre una superficie horizontal de 1 m². El valor de HSP puede calcularse a por medio del valor de radiación solar de una determinada

región partiendo de la definición de que el significado de "horas de sol pico" es el de horas de sol a una intensidad de 1000W/m².

De manera que se puede calcular lo siguiente:

Horas de sol pico = *Radiación diaria total (Wh/m² día) / 1000 W/m².*

Conociendo el valor HSP se pueden hacer dimensionamientos de paneles para un sistema fotovoltaico de la siguiente forma:

$$N^{\circ} \text{ de Paneles} = \frac{\text{Demanda a cubrir}}{(\text{factor de correccion} = 0.9) * (\text{Potencia del panel}) * (\text{HSP})}$$

Y la energía diaria producida por un panel solar fotovoltaico puede determinarse multiplicando la potencia del panel por las HSP que sería lo mismo que multiplicar la potencia del panel por el valor de radiación solar dividido entre mil.

CONCLUSIONES.

- Se determinó por medio de los mapas de vida de Holdridge que es posible establecer una relación entre estaciones meteorológicas, aun cuando no se encuentren en la misma ubicación geográfica, permitiendo la asignación de los coeficientes de Angstrom a estaciones que cumplan las características de zona de vida. Esta herramienta puede ser utilizada en otros estudios de la misma índole, en los cuales se necesite migrar o trasladar información característica de dicha zona a otra.
- El control de calidad de los datos evidencio que estos son útiles para la evaluación del recurso solar, dado que al aplicar los distintos criterios de evaluación estadística los resultados fueron representativos. Los resultados estadísticos mostraron un comportamiento semejante a una curva normal, con niveles de simetría y curtosis de ± 5 . Además, la cantidad de datos fue aproximadamente de más del 90% de los datos esperados (datos por año). Por lo que se obtuvo una base de datos con suficiente información para realizar nuestro estudio.
- Por medio del análisis de correlación, se determinó que en el periodo del 2005 al 2013 las estaciones Z-02 y A-18 (San Francisco Gotera, Morazán y Finca Los Andes, Santa Ana) en los meses de octubre, noviembre y diciembre fueron afectadas por alta nubosidad y presencia de lluvias. Esto explica, por qué la disminución de la radiación solar respecto a los años anteriores, mostrados en el estudio del SWERA.
- A través de un análisis comparativo de los resultados de radiación solar estimados y los resultados provenientes del SWERA, se logró determinar que la tendencia en los meses de octubre, noviembre y diciembre es al alta, contrario al estudio del SWERA. Esta es una diferencia de aproximadamente 10% mensual y 5.2% respecto al valor anual.
- El objetivo de esta investigación es realizar los mapas en base a datos de radiación solar, pero debido a los problemas presentados en la información registrada (datos erro

neones por instrumento no calibrado, problemas de programación de las estaciones, etc.), se optó por utilizar el registro de datos de brillo solar (2005-2013) para hacer una conversión, mediante el análisis de regresión de Ångström y estimar los datos de radiación solar necesarios, poniendo en evidencia que dicho procedimiento es factible. Es de mencionar que este método ha sido implementado en estudios posteriores (estudio de Solarimetría y SWERA), lo que respalda aún más, los resultados obtenidos.

- Es de mucha importancia escoger el método adecuado de interpolación espacial o algún otro modelo matemático para realizar los mapas de radiación solar, debido que cada método se comporta de diferente manera ante la cantidad de información con la que se cuenta; métodos de interpolación como el IDW es funcional ante una gran cantidad de puntos de mediciones presentes, ya que este método aporta valores a su alrededor siendo menos preciso entre un punto y otro cuando están a una mayor distancia. Por otro lado, el método de kriging realiza un emparejamiento con cada punto de medición, asignando de esta manera un peso o valor entre un punto y otro a pesar de que estos puedan estar muy separados.
- Por medio de herramientas de software, análisis estadístico y geo procesamiento de la información de cada una de la serie de datos de las estaciones meteorológicas y puntos de medición de parámetros solares, se pudo lograr establecer una serie de procedimientos a seguir para la elaboración de un mapa de radiación solar. Los procedimientos descritos para la elaboración de los mapas de radiación solar en esta investigación pueden ser utilizados para elaboración de mapas de algún otro parámetro climático o tema de interés.
- A partir de los resultados obtenidos en los mapas de radiación solar, se pueden identificar las zonas del país con mayores niveles de radiación durante el año, las cuales son: la región central y en la parte norte de la región occidental (5.28-5.8 a 4.99-5.27 kWh/m²).

- La realización de mapas donde no se integren los datos del SWERA permite separar los posibles errores cometidos en el estudio anterior del actual, evitando así la incertidumbre del acarreo de los errores. Al no contar con toda la información sobre la metodología empleada en los estudios anteriores, solo fue posible comparar los valores estimados en los diferentes mapas realizados. El análisis se realizó sobre la evolución en la última década de la radiación solar en el país. Mostrando que los focos de radiación se encuentran en la región central del país y la parte noroeste de la región occidental y la oriental presenta las regiones más extensas de radiación solar uniforme sobre el territorio, no así en la regiones occidentales y la parte norte del territorio donde se encuentra cadenas montañosas de baja radiación solar respecto a los focos encontrados en la zona central.
- Las estaciones de Esquipulas y ceibita situadas en el país de Guatemala aportaron información complementaria de la última década que fue reflejada con mayor proporción en la zona occidental de país, esto contribuyó a mejorar la calidad de la información estimada, debido que Guatemala cuenta con una base de datos con respaldo gubernamental y oficiales.
- La realización de los diferentes mapas de radiación solar con la metodología y el uso de software de cartografía (SURFER, ARCGIS, etc.) en este estudio, presentaron avances significativos en el acceso de la información de la base de datos a cualquier interesado, como también los criterios seleccionados, y el proceso de calidad de datos con el que se evaluó la utilidad de dichos datos. Así mismo se presentó un el uso de los programas de cartografía y geoestadísticas para la realización de futuros mapas con el anexo de nueva información haciendo uso de los pasos seguidos en las herramientas computacionales.

GLOSARIO.

Irradiancia: es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2 .

Irradiación: Es la energía incidente por unidad de superficie en un determinado período de tiempo y se mide en J/m^2 o kWh/m^2 . (Aunque la irradiancia y la Irradiación son magnitudes físicas distintas, coinciden numéricamente cuando la unidad de tiempo es la hora. La irradiación puede medirse por ejemplo en J/m^2 año).

Radiación: es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

Reflectividad: Es la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

Geoestadística: Rama de la estadística que se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo, como: leyes de metales, porosidades, concentraciones de un contaminante, etc.

Piranómetro: Es un instrumento para medir la radiación solar a una superficie plana, en otras palabras, es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un cuerpo de 180° .

Multimodalidad: Característica de un conjunto de datos que posee más de dos valores modales.

Brillo solar: Representa el número de horas durante las cuales el nivel de irradiancia es superior a los 170 W/m² y es capaz de producir efectos útiles (calentar o generar electricidad).

Horas Sol Pico: Representa el tiempo en horas diarias con una radiación equivalente de 1,000 Watts/m².

Geografía Física: La geografía física (conocida en un tiempo como fisiografía) es la rama de la Geografía que estudia en forma sistemática y espacial la superficie terrestre considerada en su conjunto y, específicamente, el espacio geográfico natural.

La Geografía física se preocupa, según Strahler²¹, de los procesos que son el resultado de dos grandes flujos de energía: el flujo de radiación solar que dirige las temperaturas de la superficie junto a los movimientos de los fluidos, y el flujo de calor desde el interior de la Tierra que se manifiesta en los materiales de los estratos superiores de la corteza terrestre. Estos flujos interactúan en la superficie terrestre que es el campo del geógrafo físico.

Neologismo: Un neologismo puede definirse como una palabra nueva que aparece en una lengua, o la inclusión de un significado nuevo en una palabra ya existente o en una palabra procedente de otra lengua.

²¹ Arthur Newell Strahler (20 de febrero 1918 Kolhapur, India - 6 de diciembre 2002), fue un geógrafo y geólogo destacado en hidrología, geomorfología y climatología, miembro de la Asociación Americana de Geógrafos.

BIBLIOGRAFÍA

- Departamento de Física, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador. **Proyecto Especial de Solarimetría**. San Salvador, 1987.
- Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Universidad “José Simeón Cañas” (UCA), Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). **Determinación del potencial solar y eólico de El Salvador**. San Salvador, 2005.
- Giraldo Henao, Ramón. **Introducción a la geoestadística, Teoría y aplicación**. Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2002.
- Martínez Aarón, Luis. **Energía Eléctrica y uso de la energía solar para su sustitución**. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, El Salvador.
- Febrero Bande, Galeano San Miguel, Gonzáles Díaz, Pateiro López. **Estadística, Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas**. Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Universidad de Santiago de Compostela, España, 2008.
- *Biblioteca de Ayuda* [en línea]. ArcGIS Resource Center, 2014. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//003r0000000600000>
- *Practica vectorial – Formato Shapefile* [en línea]. Juan Salinas Olloqui, Septiembre 2009. Disponible en: <http://www.geogra.uah.es/gisweb/practica-vectorial/Formato Shapefile.htm>
- *Sistema Geodésico Mundial WGS84* [en línea]. Blog Ingeniería Civil, 2009. Disponible en: <http://ingcivilcusco.blogspot.com/2009/09/sistema-geodesico-mundial-1984-wgs84.html>

ANEXOS.

4.1 Análisis Mapas de Radiación Series 2005-2013.

Para complementar el análisis del recurso solar en El Salvador, se realizó otra conjunto de mapas con información proveniente de las series de tiempo del año 2005 al 2013, de 11 estaciones meteorológicas del MARN, CEL y estaciones de Guatemala (Esquipulas y Ceibita), esto con el objetivo de examinar la última década y de evitar la adhesión de posibles errores que contengan los estudios anteriores y puedan afectar los resultados actualizados. La tabla 4.1.1 muestra las estaciones y sus respectivas coordenadas geográficas.

Estación	Código	Coordenadas		MSNM
		Lat	Long	
Finca Los Andes, Santa Ana	A-18	13.88°	-89.64°	1770
Los Planes Montecristo, Santa Ana	A-31	14.40°	-89.36°	1851
UNICAES, Santa Ana	A-37	13.98°	-89.55°	665
Cerrón Grande, Cabañas	B-10	13.94°	-88.91°	245
Nueva Concepción, Chalatenango	G-03	14.12°	-89.29°	320
La Hachadura, Ahuachapán	H-14	13.85°	-90.09°	43
San Andrés, La Libertad	L-04	13.81°	89.41°	460
UES, San Miguel	M-24	13.43°	-88.16°	108
CORSAIN, La Unión	N-02	13.32°	-87.81°	12
Aeropuerto, Ilopango	S-10	13.69°	-89.12°	624
San Francisco Gotera, Morazán	Z-02	13.70°	88.11°	250
Est. CEL (Centro de Gobierno)		13.70°	-89.19°	675
Est. Secundaria		13.95°	-89.19°	675
Est. La Ceibita, Guatemala		14.49°	-89.87°	959
Est. Esquipulas, Guatemala		14.55°	-89.34°	950

Tabla 4.1.1 – Estaciones meteorológicas para análisis 2005-2013.

Estación	Código	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Finca Los Andes	A-18	4.35	5.08	5.33	4.9	3.81	3.39	4.16	4.18	3.63	3.71	3.89	3.86	4.18
Los Planes Montecristo	A-31	5.2	5.3	5.17	4.6	3.59	3.51	4.17	4.01	3.71	4.26	5.03	5.06	4.45
UNICAES	A-37	5.54	5.74	5.89	5.4	4.62	4.56	4.99	5.04	5.17	5.29	5.54	5.42	5.27
Cerrón Grande	B-10	4.96	5.18	5.28	4.93	4.38	4.21	4.51	4.68	4.59	4.8	4.82	4.83	4.75
Nueva Concepción	G-03	5.51	5.83	5.81	5.43	4.85	4.53	4.85	4.99	4.98	5.2	5.37	5.25	5.21
La Hachadura	H-14	4.7	4.85	4.97	4.61	4.01	3.83	4.04	4.21	4.3	4.5	4.81	4.72	4.89
San Andrés	L-04	5.06	5.27	5.25	4.88	4.33	4.08	4.5	4.59	4.41	4.63	4.91	4.9	4.73
UES	M-24	4.76	5	5.13	4.82	4.27	4.14	4.35	4.72	4.77	4.74	4.74	4.57	4.66
CORSAIN	N-02	5.2	5.54	5.53	5.25	4.77	4.49	4.79	5.12	5.14	5	5.17	5.09	5.12
Aeropuerto	S-10	6.01	6.26	6.28	5.65	4.88	4.57	5.17	5.23	5.31	5.74	6.09	5.95	5.6
San Francisco Gotera	Z-02	5.01	5.33	5.3	4.9	4.34	4.18	4.5	4.68	4.65	4.65	4.7	4.73	4.73
Est. CEL		5.49	5.49	6.51	5.49	5.13	5.1	5.88	5.51	4.92	5.25	5.53	5.36	5.48
Est. Secundaria		5.63	5.96	6.86	6.09	5.87	5.7	6.27	6.03	5.65	5.46	5.8	5.12	5.87
Est. La Ceibita		2.78	3.05	3.22	3	2.27	2.11	2.46	2.5	2.37	2.46	2.71	2.49	2.67
Est. Esquipulas		2.08	2.63	2.99	2.89	2.33	2.01	2.23	2.44	2.3	2.07	1.86	1.63	2.33

Tabla 4.1.2 – Niveles de irradiación periodo 2005-2013 (kWh/m²).

Los mapas de la serie 2005 al 2013 brindan información valiosa sobre el comportamiento del recurso solar más cercano a la actualidad. Se recomienda que el proyecto de actualización de datos se realice cada año, con el objetivo de formar una sólida base de datos para futuros análisis.

Análisis:

De acuerdo a los mapas los focos de radiación se localiza en la parte central del país también la parte noroeste de la zona occidental y la mayor parte de la región oriental.

Las zonas montañosas presentan baja radiación característicos de la zona por la presencia de mayor nubosidad.

San Salvador, La Libertad y La Paz son los que en términos anuales presentan la mayor radiación de entre 5 y 5.6 kWh/m² promedios diarios.

A diferencia de los mapas de radiación solar presentados en la sección 3.5 (figuras de 3.5.1 a la 3.5.13), los mapas presentados a continuación presentan una menor cantidad de isolíneas, debido a la disminución del número de estaciones meteorológicas, haciendo que las franjas conformadas por las isolíneas sean más extensas.

Otra característica de los mapas de esta sección, es el número de años que conforman el registro de datos, la cual es de **9 años** (2005 al 2013). Los mapas de la sección 3.5 combinan los registros correspondientes al periodo 1969 a 1983 (Proyecto de Solarimetría, UES) y 1984 a 2004 (Proyecto “Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar”, UCA/SNET/SWERA).

Desde el punto de vista estadístico, una serie de tiempo con mayor cantidad de datos (más años) será predominante ante una de menor cantidad de datos (menos años), por lo que en los resultados se evidenciará, una mayor influencia por parte de la serie de datos mayoritaria, esto debido al aporte o peso del conjunto de datos. Proporcionando resultados con ciertos niveles de variación en la tendencia, variaciones cíclicas, estacionales e irregularidades²².

²² Medidas características de una variable aleatoria, pág. 28, Estadística Ingeniería Técnica en Informática de Sistemas.

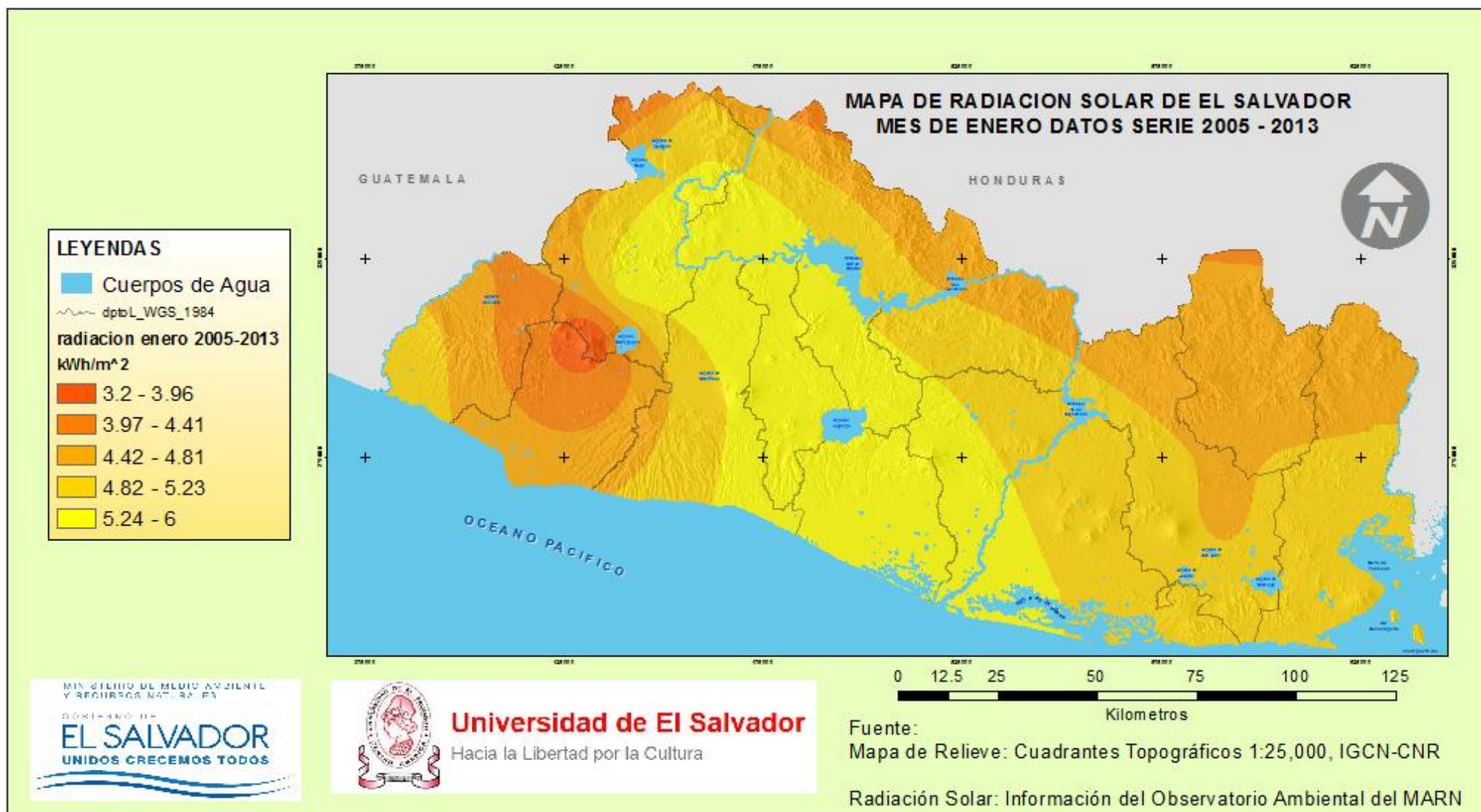


Figura 4.1.1 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Enero (Serie 2005-2013).



Figura 4.1.2 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Febrero (Serie 2005-2013).

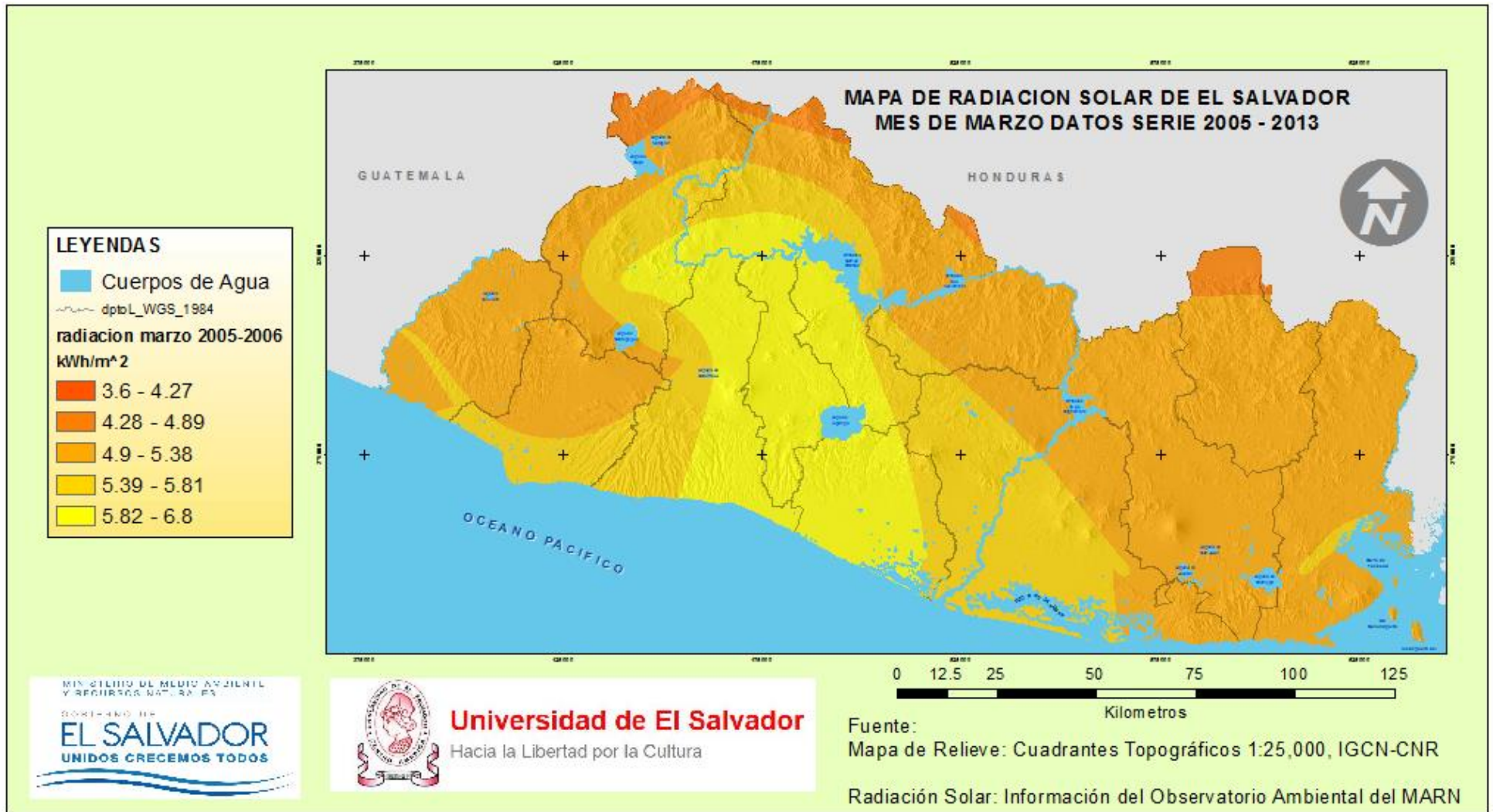


Figura 4.1.3 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Marzo (Serie 2005-2013).

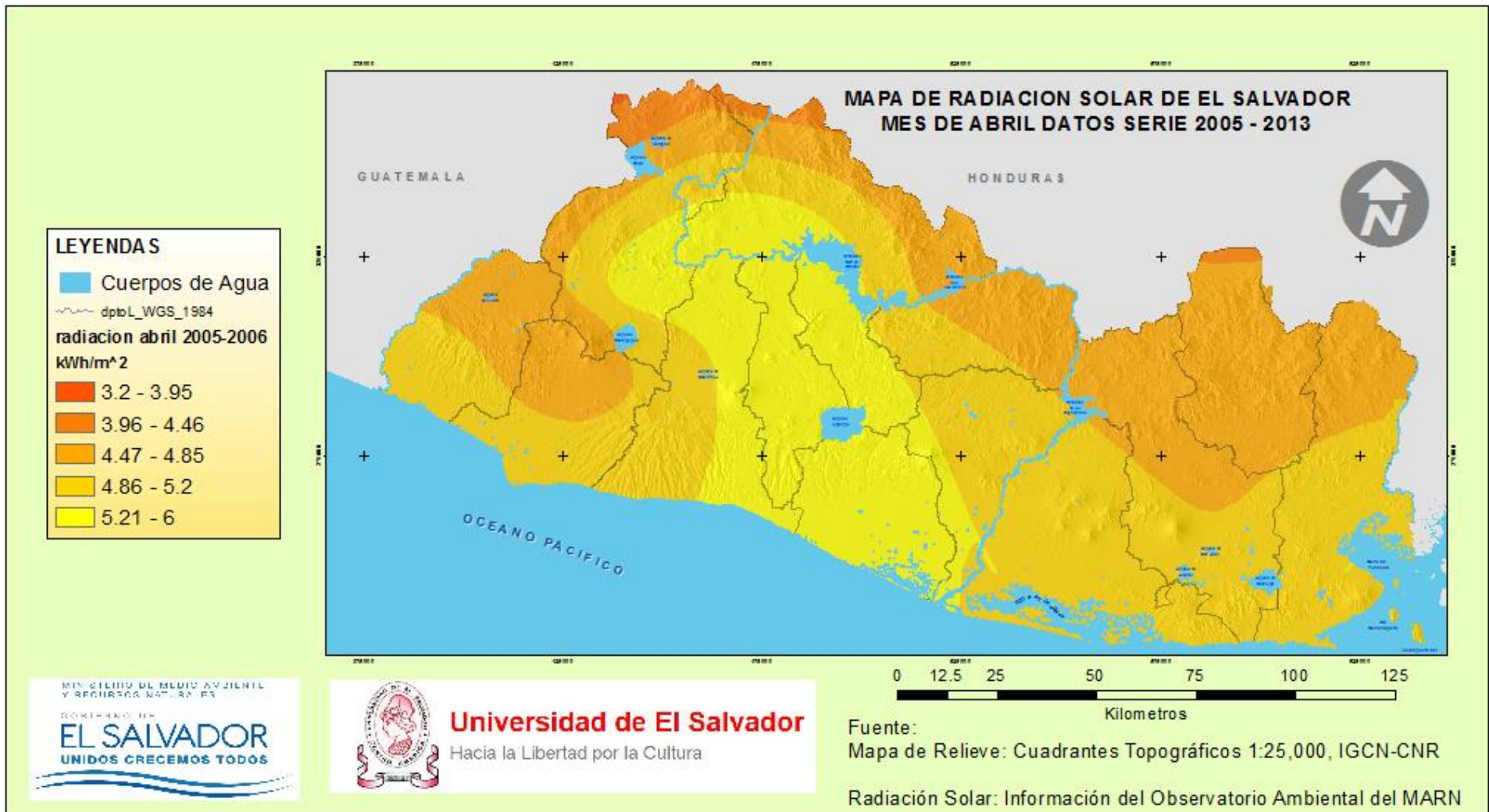


Figura 4.1.4 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Abril (Serie 2005-2013).

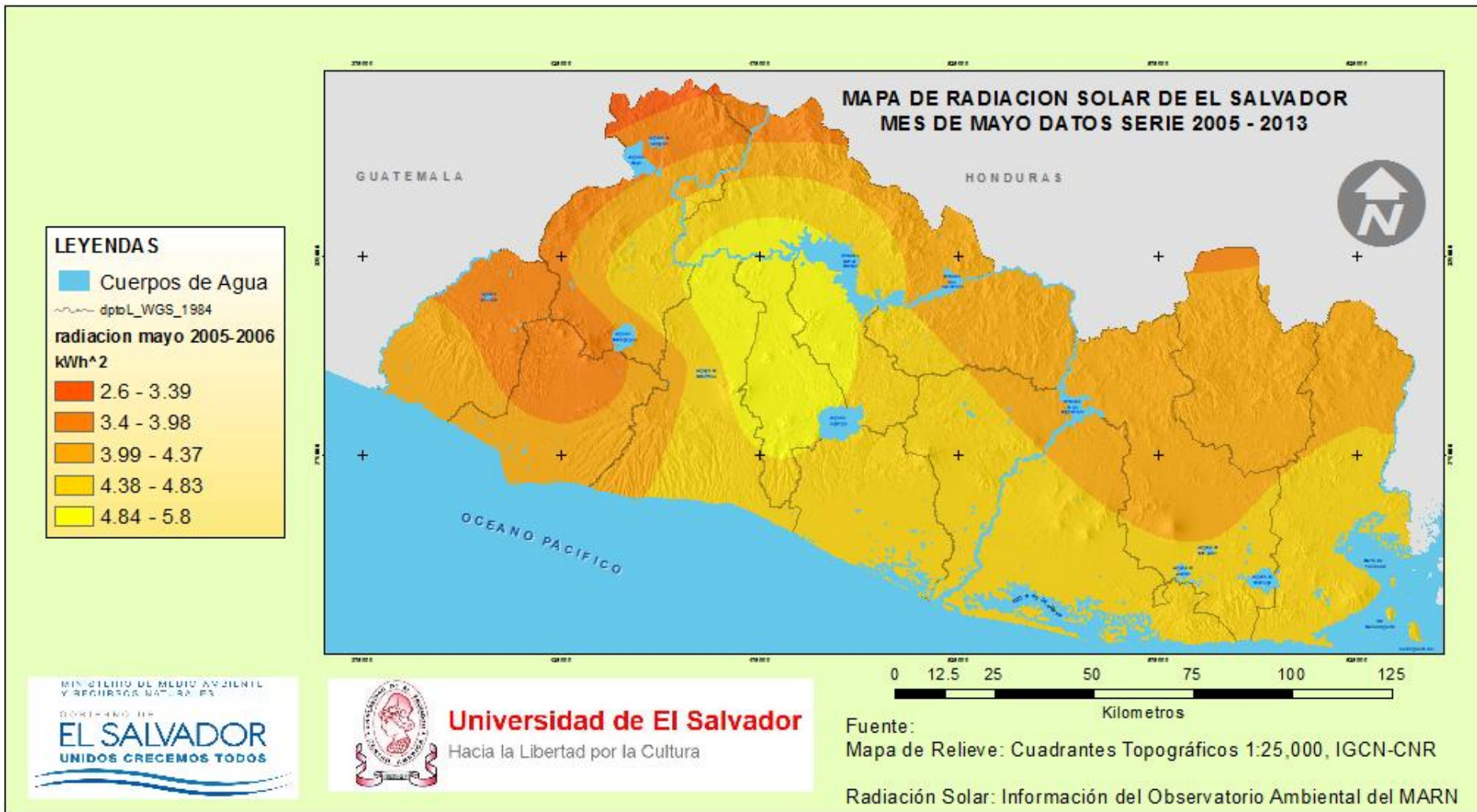


Figura 4.1.5 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Mayo (Serie 2005-2013)

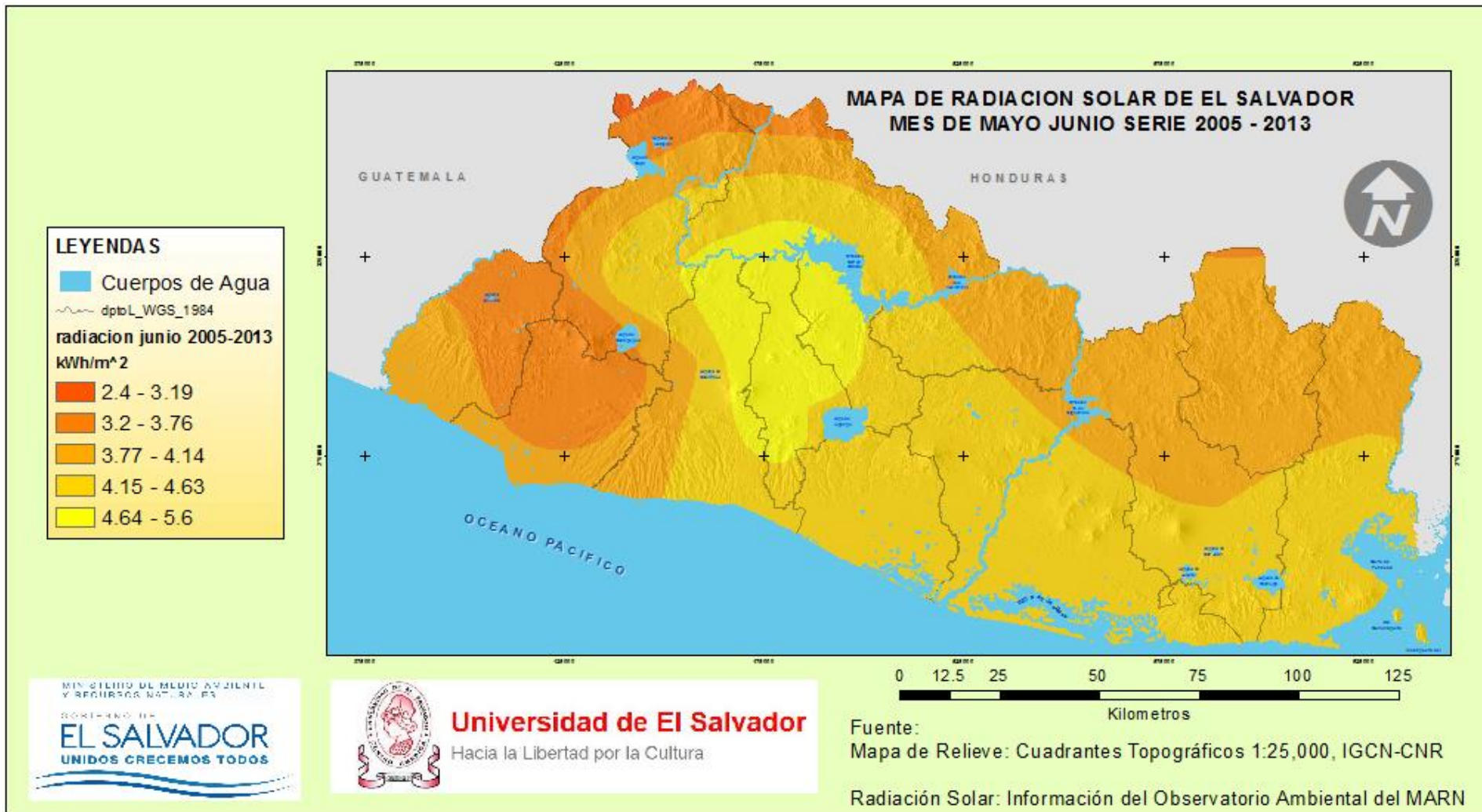


Figura 4.1.6 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Junio (Serie 2005-2013)

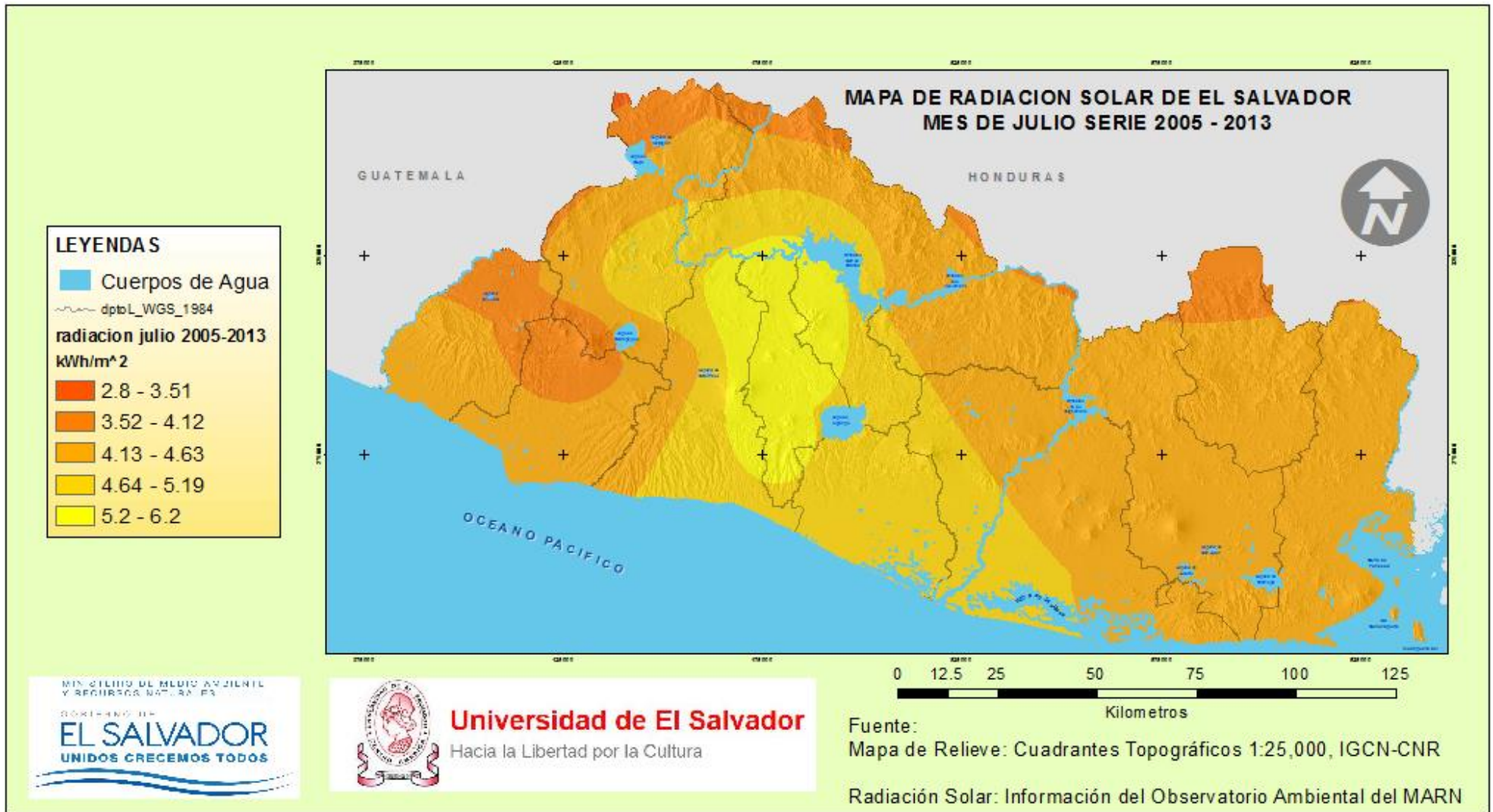


Figura 4.1.7 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Julio (Serie 2005-2013).

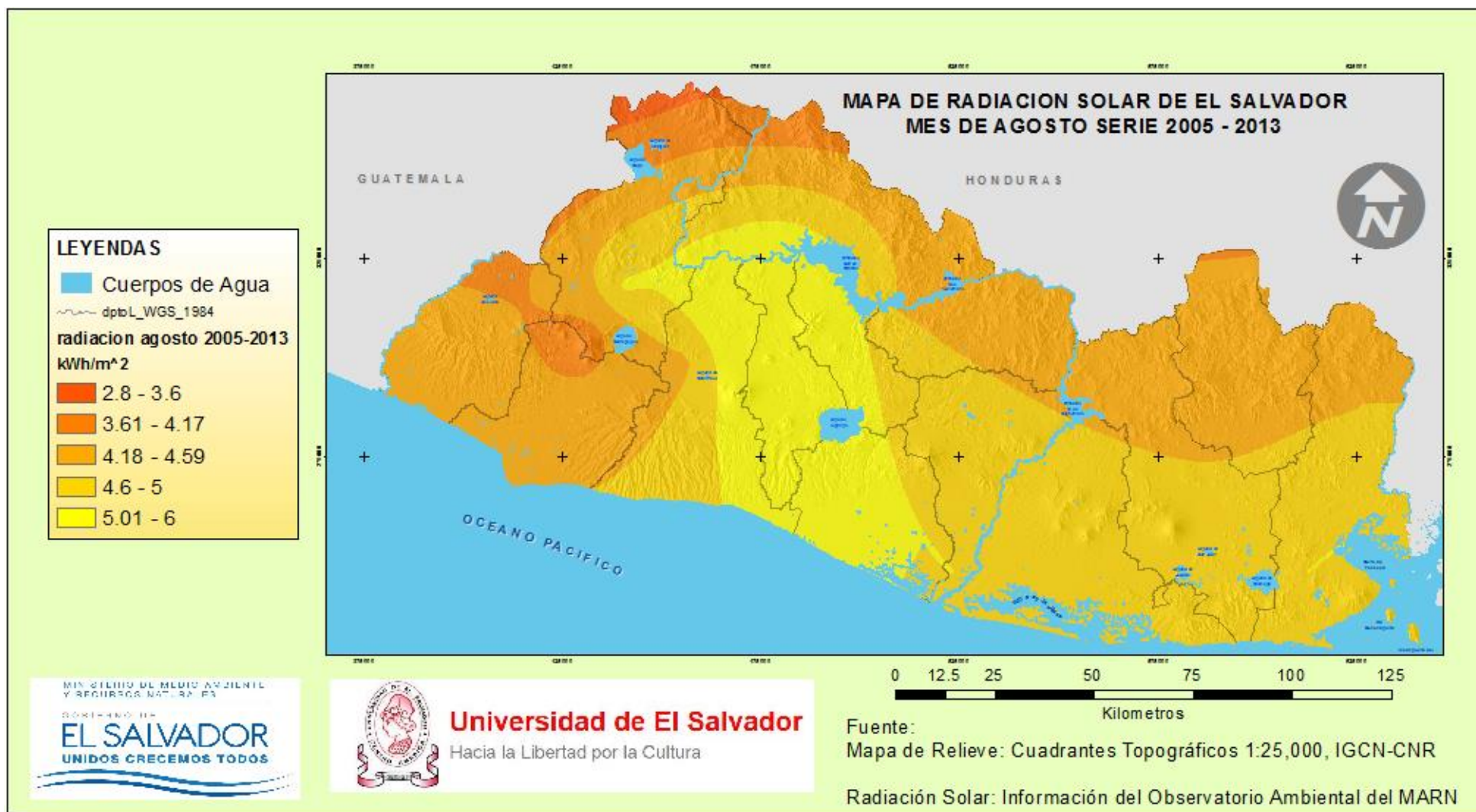


Figura 4.1.8 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Agosto (Serie 2005-2013).

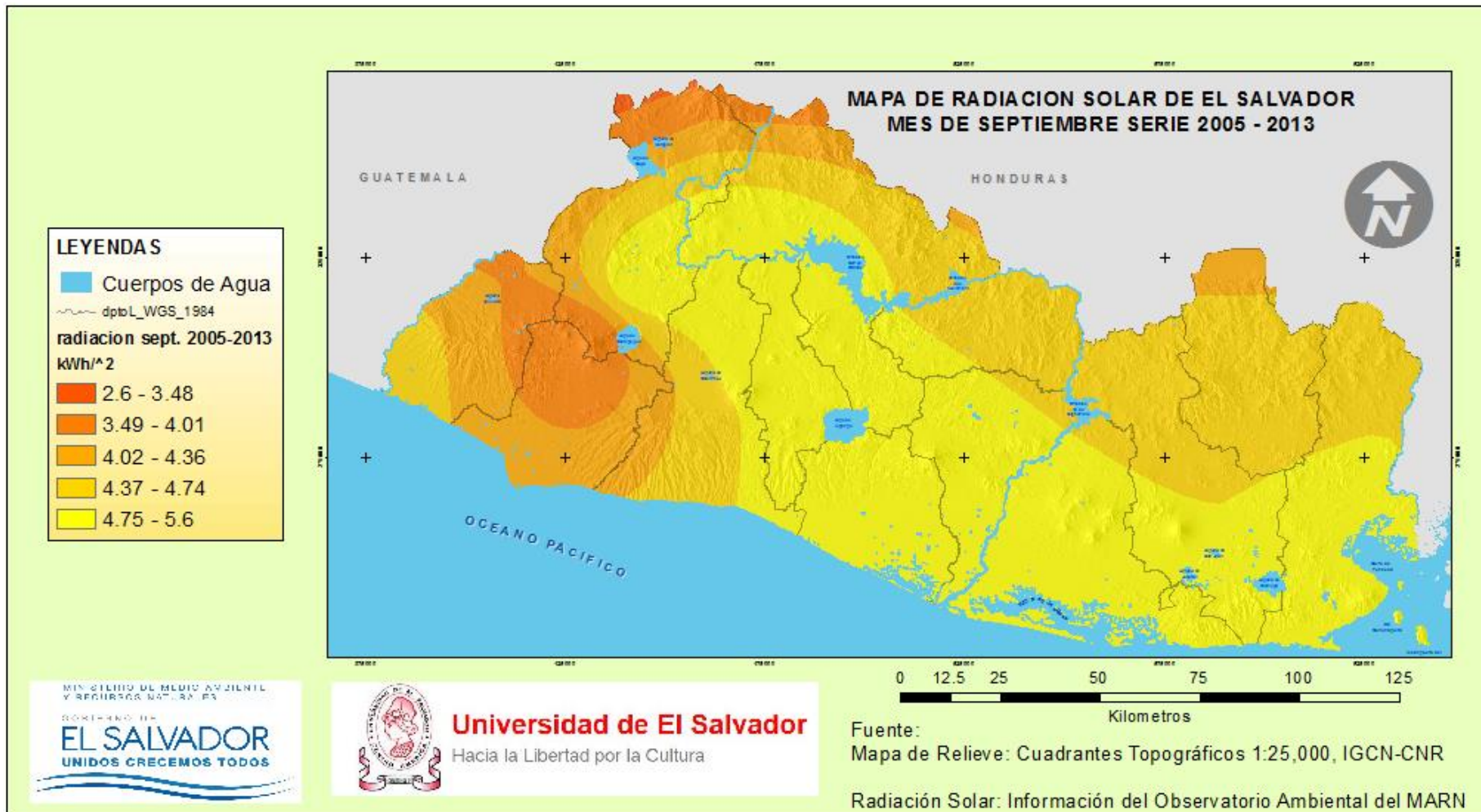


Figura 4.1.9 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Septiembre (Serie 2005-2013).



Figura 4.1.10 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Octubre (Serie 2005-2013).

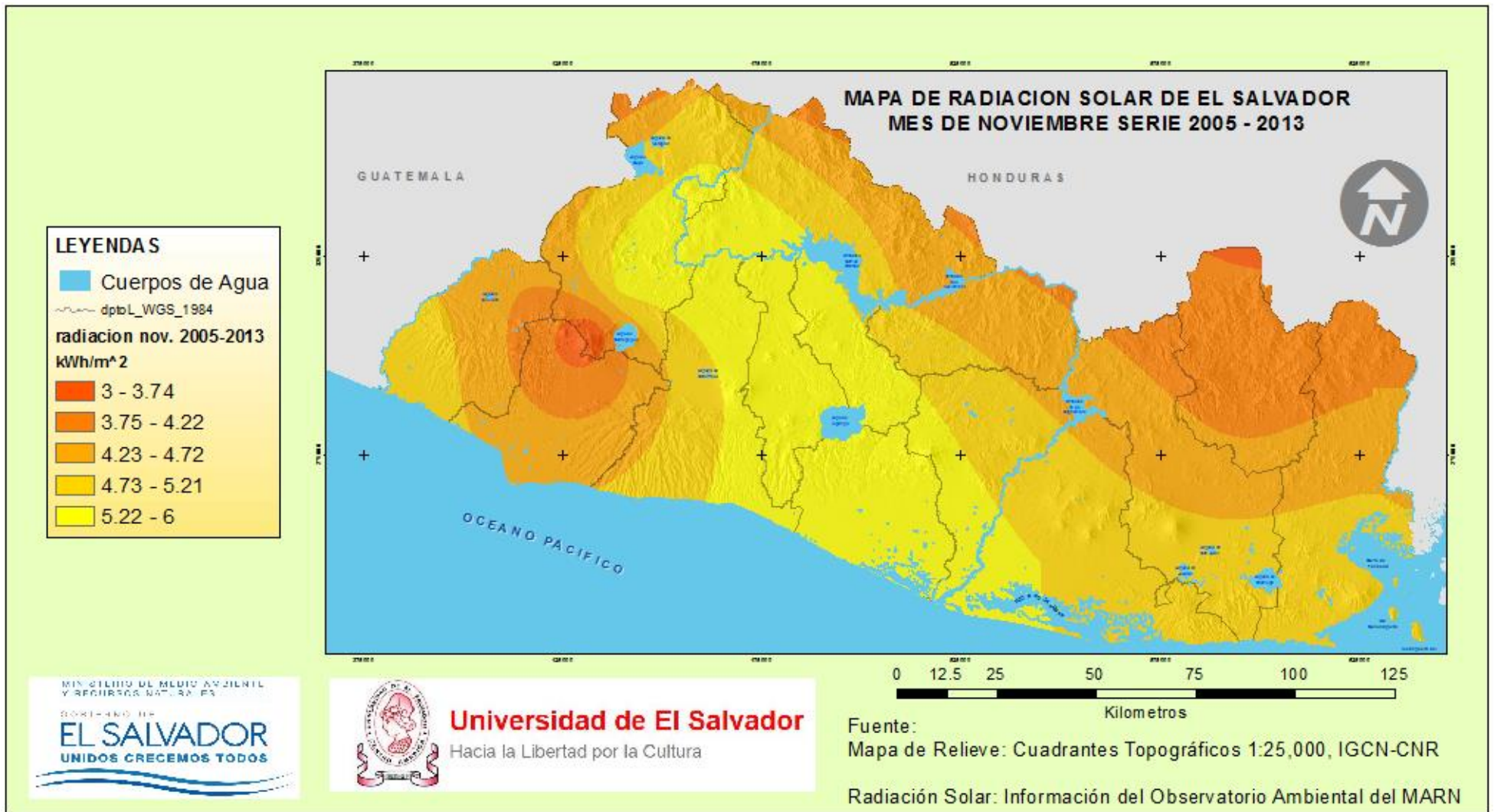


Figura 4.1.11 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Noviembre (Serie 2005-2013).

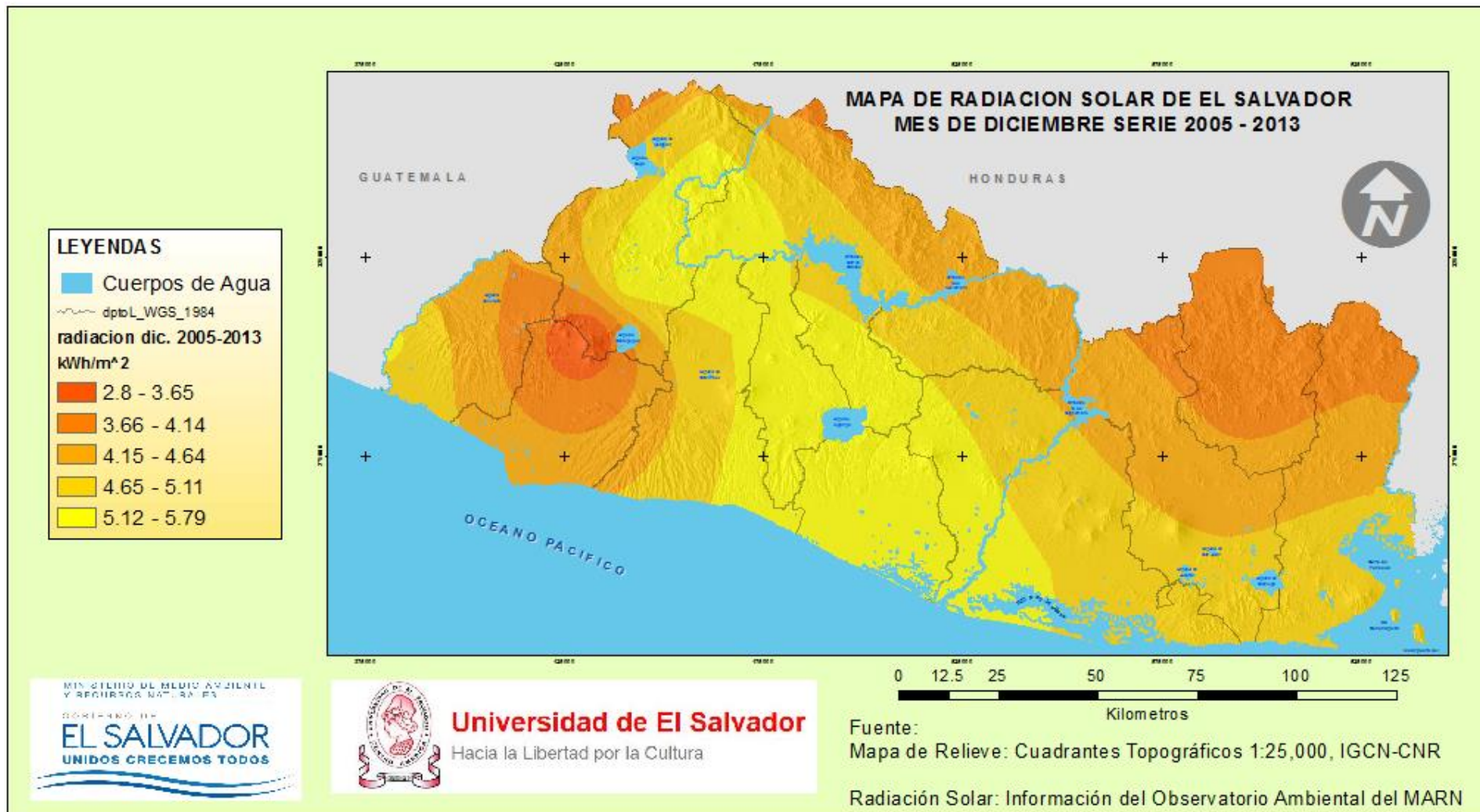


Figura 4.1.12 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Diciembre (Serie 2005-2013).



LEYENDAS

Cuerpos de Agua

dptbL_WGS_1984

radiación anual 2005-2013
kWh/m²

	2.8 - 3.65
	3.66 - 4.14
	4.15 - 4.64
	4.65 - 5.11
	5.12 - 5.79

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

GOBIERNO DE

EL SALVADOR

UNIDOS CRECEMOS TODOS

Universidad de El Salvador
Hacia la Libertad por la Cultura

Fuente:
Mapa de Relieve: Cuadrantes Topográficos 1:25,000, IGCN-CNR
Radiación Solar: Información del Observatorio Ambiental del MARN

Figura 4.1.13 – Mapa de Radiación solar de El Salvador-Anual (Serie 2005-2013).