

**Mapa Solar del Uruguay**  
versión 1.0

**Memoria Técnica**

G. Abal, M. D'Angelo,  
Instituto de Física

J. Cataldo, A. Gutierrez  
Instituto de Mecánica de los Fluidos  
e Ingeniería Ambiental

**Facultad de Ingeniería**

**Universidad de la República**

4 de junio de 2010

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Datos disponibles</b>	<b>4</b>
2.1. Series de irradiación . . . . .	4
2.1.1. Series Uruguayas . . . . .	5
2.1.2. Datos regionales de irradiación . . . . .	6
2.2. Series de Heliofanía . . . . .	7
2.3. Pre-tratamiento de los datos . . . . .	13
2.3.1. Geometría Solar . . . . .	13
2.3.2. Irradiancia solar extra-atmosférica . . . . .	15
2.3.3. Normalización . . . . .	16
2.3.4. Filtrado de datos . . . . .	20
<b>3. Mapa Solar del Uruguay</b>	<b>23</b>
3.1. Metodología . . . . .	23
3.2. Mapas mensuales . . . . .	28
3.3. Análisis de incertidumbre . . . . .	42
3.4. Validación . . . . .	45
<b>4. Comentarios Finales</b>	<b>54</b>

# Índice de figuras

2.1. Heliofanía media mensual . . . . .	9
2.2. Ubicación de las series de datos utilizadas . . . . .	12
2.3. Movimiento aparente del Sol . . . . .	14
2.4. Heliofanía para Artigas . . . . .	16
2.5. Heliofanía relativa promedio . . . . .	17
2.6. serie ZUELA . . . . .	18
2.7. Índice de claridad diario . . . . .	19
2.8. Máximo móvil para series ZUELA y ARCHI . . . . .	21
2.9. Máximo móvil para series Melilla y Potrerillo . . . . .	22
3.1. Regresiones lineales . . . . .	24
3.2. Variación espacial de $a$ y $b$ . . . . .	26
3.3. Mapa Solar del Uruguay - Enero . . . . .	29
3.4. Mapa Solar del Uruguay - Febrero . . . . .	30
3.5. Mapa Solar del Uruguay - Marzo . . . . .	31
3.6. Mapa Solar del Uruguay - Abril . . . . .	32
3.7. Mapa Solar del Uruguay - Mayo . . . . .	33
3.8. Mapa Solar del Uruguay - Junio . . . . .	34
3.9. Mapa Solar del Uruguay - Julio . . . . .	35
3.10. Mapa Solar del Uruguay - Agosto . . . . .	36
3.11. Mapa Solar del Uruguay - Setiembre . . . . .	37
3.12. Mapa Solar del Uruguay - Octubre . . . . .	38
3.13. Mapa Solar del Uruguay - Noviembre . . . . .	39
3.14. Mapa Solar del Uruguay - Diciembre . . . . .	40
3.15. Mapa Solar del Uruguay - Anual . . . . .	41
3.16. Error relativo para Jaguarão y Bagé . . . . .	46
3.17. Error relativo para localidades argentinas . . . . .	47
3.18. Ubicaciones para estimadores del modelo UM-SBR . . . . .	49
3.19. Mapa UM-SBR, Enero a Junio . . . . .	52
3.20. Mapa UM-SBR, Julio a Diciembre . . . . .	53

# Índice de cuadros

2.1. Series de irradiación uruguayas analizadas . . . . .	6
2.2. Series de irradiación del INMET . . . . .	7
2.3. Localidades Argentinas . . . . .	7
2.4. Irradiación diaria promedio . . . . .	8
2.5. Datos de heliofanía analizados . . . . .	10
2.6. Localidades con datos de heliofanía . . . . .	11
2.7. Estaciones del INIA . . . . .	11
2.8. Datos de heliofanía utilizados . . . . .	12
2.9. Heliofanía relativa usada . . . . .	17
2.10. Datos de índice de claridad usados . . . . .	20
3.1. Valores de $a$ y $b$ . . . . .	25
3.2. Valores de $a$ y $b$ para localidades con heliofanía . . . . .	27
3.3. Estimadores de irradiación global . . . . .	27
3.4. Error efectivo mensual . . . . .	43
3.5. Incertezas de los coeficientes $a$ y $b$ . . . . .	43
3.6. Incerteza en irradiación estimada . . . . .	45
3.7. Estimadores de irradiación diaria . . . . .	46
3.8. Estimadores modelo UM-SBR . . . . .	50
3.9. Comparación MSU con modelo UM-SBR . . . . .	50

# Capítulo 1

## Introducción

A raíz del impulso que están recibiendo las fuentes de energía renovables en nuestro país, se ha planteado con fuerza la necesidad de contar con un conocimiento adecuado del recurso solar promedio de que se dispone en diferentes zonas del país. La información de calidad sobre la radiación solar incidente es un insumo clave para diseñar cualquier equipamiento para la conversión de la energía solar en energía útil (ya sea eléctrica o térmica). Por otra parte, en un país esencialmente agrícola, un conocimiento detallado del recurso solar es útil para estimar el rendimiento de las cosechas, diseñar dispositivos para el secado de productos vegetales o para planificar estrategias de irrigación.

Es una práctica común en el mundo presentar la información sobre la distribución del recurso solar promedio en forma de mapas solares o mapas de irradiación media. Esta presentación visual hace la información más accesible al usuario, que puede aprovecharla en forma inmediata. El desarrollo de mapas de radiación solar ha sido llevado a cabo en Europa [PAW01], EEUU [GM99, MGW99], Méjico [AL75] y, posteriormente, en Argentina [GS07, GG98b, GG98a] y Brasil [TFL<sup>+</sup>97, Tib04, CP98], entre otros países. En todos los casos, estos mapas son el resultado de una actividad incremental que ha insumido décadas de trabajo de varios equipos científicos y a la cual confluyen aportes desde diferentes abordajes. Los márgenes de error se reducen progresivamente, a medida que se cuenta con series de datos de radiación más largas y confiables y con modelos atmosféricos más detallados y precisos. En los últimos años se han comenzado a incorporar los datos de irradiación solar estimados a partir de modelos físicos que describen la interacción entre la radiación incidente y el sistema tierra-atmósfera integrando información obtenida a partir de imágenes satelitales. Esta metodología permite estimar con períodos de horas, o incluso minutos, el grado de nubosidad sobre áreas de territorio con una resolución espacial de unos pocos kilómetros.

Los sensores de radiación solar de calidad son costosos y requieren un mantenimiento adecuado durante los largos períodos de tiempo (varios años) necesarios para tener datos con significancia estadística. Por esta razón, las series de irradiación de largo adecuado y buena calidad son escasas. A nivel mundial se estima que 1 de cada 500 estaciones de medida agrometeorológica incluyen mediciones de irradiación solar y cuando lo hacen suele ser con sensores de baja calidad y con poco mantenimiento. Sin embargo, la mayoría de las estaciones de medida toman registros diarios de Heliofanía (horas radiación solar en suelo que superan cierto umbral) utilizando heliógrafos de Campbell-Stokes, un instrumento sumamente robusto que no requiere de mayores cuidados, más allá de mantenerlo limpio. Desde 1924 se conoce que existe una correlación lineal, conocida como la ecuación de Angstrom-PreScott [Ang24, Pre40], entre la media de heliofanía relativa y la media de irradiación normalizada. Una práctica usual [DB06] para estimar la irradiación global media sobre grandes extensiones territoriales a partir de pocas medidas, consiste en especificar la correlación para estaciones en las cuales existen simultáneamente medidas de heliofanía y de radiación solar y luego extrapolarla a estaciones donde existen medidas de heliofanía, pero no de irradiación solar. Este método ha sido usado extensamente en la región [Tib04, RGGR04, GGR05, GG98b, GG98a] para estimar la distribución espacial y estacional de la irradiación global media incidente.

En el Uruguay, las estaciones de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) y las cinco del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) tienen largos registros diarios de heliofanía, con una adecuada cobertura geográfica de nuestro territorio. Grossi Gallegos y su equipo han llevado a cabo valiosos trabajos sobre estos datos de heliofanía analizando su variabilidad espacial y temporal y verificando su consistencia desde un punto de vista estadístico [RGR06, RF06, GS07]. En cuanto a medidas de irradiación, en Uruguay existen hoy pocas series con significación estadística y las mismas están muy concentradas espacialmente. Para este trabajo hemos considerado cuatro series de irradiación. Luego de un análisis de los datos, dos de estas series fueron utilizadas. El mapa solar ha podido ser elaborado gracias a que el territorio uruguayo es relativamente pequeño y uniforme y a que hemos podido contar con los datos de irradiación de países vecinos.

Las principales dificultades que se encuentran al intentar acceder a información de calidad sobre la variación espacial y estacional de los promedios de irradiación solar en el Uruguay se resumen en tres puntos:

- Se dispone de pocos datos estadísticamente significativos sobre irradiación solar.
- la calidad de los datos existentes es muy variable.

- existe un rezago en cuanto al modelado del recurso solar, en relación a otros países del mundo e incluso de la región.

Este trabajo es un primer paso en la dirección de revertir esta situación. El mismo se enmarca dentro de las actividades del Convenio “Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización” entre la Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear (DNETN) del Ministerio de Industria y Energía y la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, cuyos responsables son los Profs. J. Cataldo y V. Nunes. En el marco de este convenio, se está montando una red automatizada de monitoreo de irradiación en al menos tres puntos del interior del país. Además, se está instalando un banco de pruebas para paneles solares térmicos en la Facultad de Ingeniería de la UdelaR.

Este documento tiene la siguiente estructura. En el Capítulo 1 se describe la situación mundial y especialmente, regional, en cuanto a la caracterización del recurso solar. En el Capítulo 2 se realiza un relevamiento y se describe el pre-tratamiento de los datos disponibles. En el Capítulo 3 se describe la metodología utilizada para elaborar el Mapa Solar del Uruguay, se presentan los mapas mensuales, se realiza un análisis de incerteza y se comparan los resultados obtenidos con datos de la región y con los resultados de otros modelos. En el Capítulo 4 se incluye un resumen conceptual de los resultados y una breve descripción de la perspectiva a futuro.

# Capítulo 2

## Datos disponibles

Existen en Uruguay varias series de datos de irradiación y de heliofanía, algunas de acceso público y otras de acceso restringido. Las series de irradiación global diaria u horaria son escasas, tanto en cuanto a su distribución geográfica como temporal. La calidad de los datos es variable y algunas de ellas pueden estar afectadas por errores sistemáticos. En cuanto a los datos de heliofanía<sup>1</sup>, la situación es otra. En general, las estaciones de la Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay (DNM), que tienen una adecuada cobertura geográfica del territorio nacional, llevan registros de heliofanía diaria utilizando heliógrafos de Campbell-Stokes y tienen series digitalizadas que abarcan largos períodos de tiempo. Hasta donde sabemos la DNM no tiene registros digitalizados de irradiancia diaria<sup>2</sup>. El Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) también registra heliofanía en sus cinco estaciones distribuidas en el territorio nacional y los datos se encuentran disponibles públicamente en su página web.

### 2.1. Series de irradiación

Para este trabajo se consideraron cuatro series de irradiación registradas en el Uruguay y ocho registradas en los países vecinos. De este conjunto de datos, se utilizaron cuatro series de irradiación como base para el mapa solar y cinco series de países vecinos fueron reservadas para una validación posterior.

---

<sup>1</sup>Definida, de acuerdo a la Organización Meteorológica Mundial (WMO), como el tiempo durante el cual la irradiancia esta sobre el umbral de  $120 \text{ W/m}^2$ .

<sup>2</sup>Si bien hemos constatado (G.A.) que la DNM almacena una serie con registros de más de 20 años de irradiancia diaria, en bandas de papel, para la localidad de Bella Unión.

### 2.1.1. Series Uruguayas

A continuación se detallan las cuatro series de irradiación consideradas para el Uruguay, incluyendo la información disponible<sup>3</sup> sobre los antecedentes y metadatos asociados.

- **Serie ZUELA**

Datos de irradiación global diaria para el período 1969-1979. Medida en la estación meteorológica de “La Estanzuela” (Colonia) del Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger (CIAAB) (actual INIA), dependiente del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). Se utilizó un piranómetro Kipp & Zonen, se registró sobre banda de papel y se planimetró para obtener los registros de irradiación diaria. Este trabajo fue realizado por el Dr. Walter Corsi. Esta serie es pública y está disponible completa en la página web de la Mesa Solar, <http://www.mesasolar.org>.

- **Serie ARCHI**

Esta serie de medidas de irradiación Solar global diaria, fue obtenida en la Facultad de Arquitectura de UdelaR (Montevideo) a partir de una iniciativa de la Directora del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, Irene W. de Ewenson. Los datos diarios abarcan el período 1980-1984 y se utilizó un piranómetro Eppley Black and White con registro sobre banda de papel. Esta serie incluye registros parciales de radiación directa medidos con un Pirheliómetro Eppley provisto de un mecanismo de seguimiento automático. El mantenimiento del equipo estuvo a cargo del Instituto de la Construcción de Edificios de la Facultad de Arquitectura (Arq. Rivero) y el procesamiento de los datos (incluyendo la digitalización de los mismos) fue realizado en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería. Esta serie es pública y está disponible completa en la página web del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería <http://www.fing.edu.uy/solar>, así como también en la de la Mesa Solar, <http://www.mesasolar.org>.

- **Series Melilla**

Medidas de irradiación global horaria obtenidas en el Despacho de Cargas de UTE en la localidad de Melilla, Montevideo. Se utilizó un sensor fotovoltaico Davis con registro digital por data logger. La serie correspondiente a los últimos cuatro años (10/2005 -. 09/2009) es propiedad de UTE y fue cedida a la Facultad de Ingeniería para la realización de

---

<sup>3</sup>Utilizamos aquí la nomenclatura y los metadatos aportados por el Ing. J. Duomarco y disponibles en la página de la Mesa Solar.

nombre	localidad	LAT	LON	período	años	instrumento	institución
ZUELA	Colonia	-34.6	-58.3	10/1969 – 11/1977	8	Kipp & Zonnen <sup>1,3</sup>	INIA
ARCHI	Montevideo	-34.9	-56.2	01/1980 – 12/1984	5	Eppley Black& White <sup>1,3,4,5</sup>	UdelaR
MELILLA- $\alpha$	Montevideo	-34.8	-56.3	10/2005 – 09/2009	4	Sensor fotovoltaico Davis <sup>2,4</sup>	UTE
POTRERILLO- $\alpha$	Rocha	-34.0	-53.6	01/2007 – 07/2009	2.5	Fotodiodo ES2 <sup>2,4</sup>	Probides

**Notas:**

- (1) registro original en banda de papel, luego digitalizada.
- (2) registro electrónico automático.
- (3) disponible públicamente en <http://mesasolar.org>
- (4) serie con registros horarios
- (5) incluye medidas de componente directa

Cuadro 2.1: Series de irradiación uruguayas analizadas para este trabajo.

este estudio. En este trabajo nos referiremos a estos datos como la serie Melilla- $\alpha$ . Existe un período corto de aproximadamente 18 meses (8/97 – 01/99) que es de libre acceso, al que nos referiremos como Melilla- $\beta$ , y que se encuentra disponible en la página de la Mesa Solar.

### ■ Series Potrerillo

Esta serie de medidas de irradiación global horaria fue obtenida en la Estación Biológica de PROBIDES en el Potrerillo de Santa Teresa, Rocha. Allí funciona una estación de registros meteorológicos automáticos Delta-T devices, basada en un data logger DL2. El piranómetro es fotovoltaico, modelo ES2 de Delta-T devices. Se cuenta con registros horarios de irradiación solar, temperatura media del aire, precipitaciones y humedad relativa ambiente. Estos datos son procesados por la Unidad de Clima de la Facultad de Agronomía, quienes los han cedido para este estudio los datos correspondientes al período 01/2007 – 07/2009. Nos referimos a esta serie como Potrerillo- $\alpha$ , para diferenciarla de los registros anteriores de irradiación global (01/96-06/97) disponibles públicamente en la página de la Mesa Solar, a los que nos referiremos como Potrerillo- $\beta$ .

En la Tabla 2.1 se indican las cuatro series nacionales consideradas para este estudio y se dan las ubicaciones (latitud y longitud, en grados sur y oeste, respectivamente) y otras características de los aparatos de medida.

### 2.1.2. Datos regionales de irradiación

Se solicitaron datos de irradiación diaria y heliofanía al INMET (Instituto Nacional de Meteorología) de Basil, que opera cientos de estaciones de medida automáticas y convencionales. Se recibieron datos de irradiación diaria para

<b>código</b>	<b>localidad</b>	<b>LAT</b>	<b>LON</b>	<b>ALT (m)</b>	<b>período</b>	<b>años</b>
<b>A804</b>	Livramento	-30.8	-55.6	328	11/2001 – 09/2009	7.8
<b>A836</b>	Jaguarão	-32.6	-53.4	47	01/2007 – 09/2009	2.6
<b>A827</b>	Bagé	-31.3	-54.0	230	01/2007 – 09/2009	2.6
<b>A899</b>	Chuí	-33.7	-53.4	26	03/2008 – 09/2009	1.5

Cuadro 2.2: Series de irradiación diaria recibidas del INMET - Brasil. Los códigos corresponden a la clasificación del INMET.

<b>código</b>	<b>localidad</b>	<b>LAT</b>	<b>LON</b>	<b>ALT</b>	<b>años</b>
<b>MCa</b>	Monte Caseros	-30.3	-57.7	54	
<b>CUr</b>	Concepción del Uruguay	-32.5	-58.3	25	
<b>Gua</b>	Gualedaychú	-33.0	-58.6	21	
<b>SGA</b>	Salto Grande (Arg.)	-31.2	-57.9	37	

Cuadro 2.3: Localidades Argentinas para las cuales se usaron datos de la Red Solarimétrica Argentina reportados en la Ref. [GGR05]. Las coordenadas están en grados (sur y oeste), la altura en metros; no se dispone de información sobre el período. Los correspondientes valores medios de irradiación figuran en la Tabla 2.4.

cinco localidades Brasileñas cercanas al Uruguay. Los detalles se muestran en el Cuadro 2.2.

Para contar con datos del litoral oeste se recurrió a valores de irradiación media utilizados para el Atlas Solar Argentino por H. Grossi Gallegos y su equipo [RGGR05, GG98b, GG98a] y que fueran publicados en la versión electrónica del mismo [GGR05]. En el Cuadro 2.3 se resumen los detalles de las localidades Argentinas consideradas para este trabajo.

En suma, fueron consideradas cuatro series de irradiación Uruguayas, cuatro series Brasileñas (INMET) y valores medios para cuatro localidades Argentinas, usados para el Atlas Solar Argentino y basados en medidas de la Red Solarimétrica Argentina. Luego de un proceso de filtrado y análisis de consistencia, como se describe más adelante, algunas de las series regionales series fueron reservadas para una validación posterior del mapa y algunas de las nacionales no fueron utilizadas para este trabajo.

## 2.2. Series de Heliofanía

Los datos de heliofanía diaria (horas de sol sobre el umbral de 120 w/m<sup>2</sup>) son relevados hace décadas en todas las estaciones de la Dirección Nacional de

código	uso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	anual
<b>ZUELA</b>	B	6.8	6.0	5.1	3.8	2.7	2.2	2.3	3.3	4.5	5.7	7.0	7.0	4.7
<b>Melilla-<math>\alpha</math></b>	B	6.1	5.4	4.3	3.4	2.4	1.9	2.0	2.7	3.5	5.1	6.4	6.5	4.1
<b>A804</b>	B	6.9	6.1	5.0	3.9	3.0	2.4	2.7	3.3	4.1	5.2	6.6	7.0	4.7
<b>A836</b>	V	6.8	6.2	4.9	4.0	2.7	2.1	2.4	2.9	3.7	4.8	7.1	7.1	4.6
<b>A827</b>	V	6.9	6.4	5.2	4.5	3.2	2.4	2.8	3.3	4.0	4.8	7.4	7.6	4.9
<b>MCa</b>	V	6.9	6.1	5.2	4.1	3.1	2.5	2.7	3.3	4.2	5.6	6.5	7.0	4.8
<b>CUr</b>	V	6.7	6.1	5.0	3.9	2.9	2.4	2.5	3.2	4.3	5.4	6.5	6.9	4.7
<b>Gua</b>	V	6.6	5.9	4.5	3.7	2.6	2.0	2.2	2.9	3.7	5.0	6.2	6.3	4.3
<b>SGA</b>	B	6.9	6.1	4.9	3.9	3.0	2.4	2.5	3.3	4.1	5.5	6.3	6.8	4.6

Cuadro 2.4: Irradiación diaria promedio (en kWh/m<sup>2</sup>) de cada mes. Los códigos indican la localidad, ver Cuadros 2.1, 2.2 y 2.3 con los metadatos. La última columna muestra el promedio anual de irradiación diaria. Los datos argentinos son de la Ref. [GGR05]. Las cuatro series indicadas (B) fueron usadas como base para el mapa. Los datos de las cinco estaciones indicadas (V) fueron reservadas para validación posterior.

Meteorología (DNM) y también en las cinco estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). De modo que para la heliofanía, se puede afirmar que existe una buena cobertura geográfica y temporal. Sin embargo, en este caso, la dificultad reside en la calidad de los datos. Por ejemplo, para una localidad dada, hay muchas series de datos de diferentes procedencias y los valores medios mensuales muestran que no siempre son consistentes entre sí.

Se consideraron para este trabajo datos de heliofanía para el Uruguay procedentes de 17 estaciones de la DNM y 5 estaciones del INIA que, en conjunto, corresponden a 18 localidades en el territorio nacional. Los datos provienen de cuatro fuentes, que denominaremos (DNM-1, DNM-2, DNM-3 e INIA), para los períodos que se detallan en el Cuadro 2.5.

El conjunto DNM-1 contiene horas de sol acumuladas por mes, promediadas en el período 1981-1990, para las 12 estaciones de la DNM indicadas en el Cuadro 2.6. Estos datos se encuentran disponibles en línea<sup>4</sup>.

El conjunto DNM-2 contiene horas de sol acumuladas en el mes (no promediadas) para el período 1986-2005 y fué recientemente analizado por H. Grossi Gallegos<sup>5</sup> y colaboradores [RGR06, RF06, GS07]. Trabajando sobre este conjunto de datos, Grossi estudia la relación entre su variabilidad espacial y la distancia entre pares de estaciones en [RGR06]. Concluye que, con

<sup>4</sup> <http://www.meteorologia.com.uy/>

<sup>5</sup> Este conjunto fue solicitado a la DNM uruguaya por el Servicio Meteorológico Nacional argentino (SMN) a pedido de H. Grossi. En una etapa temprana de este trabajo, estos datos nos fueron gentilmente cedidos por H. Grossi con la autorización previa del SMN argentino.

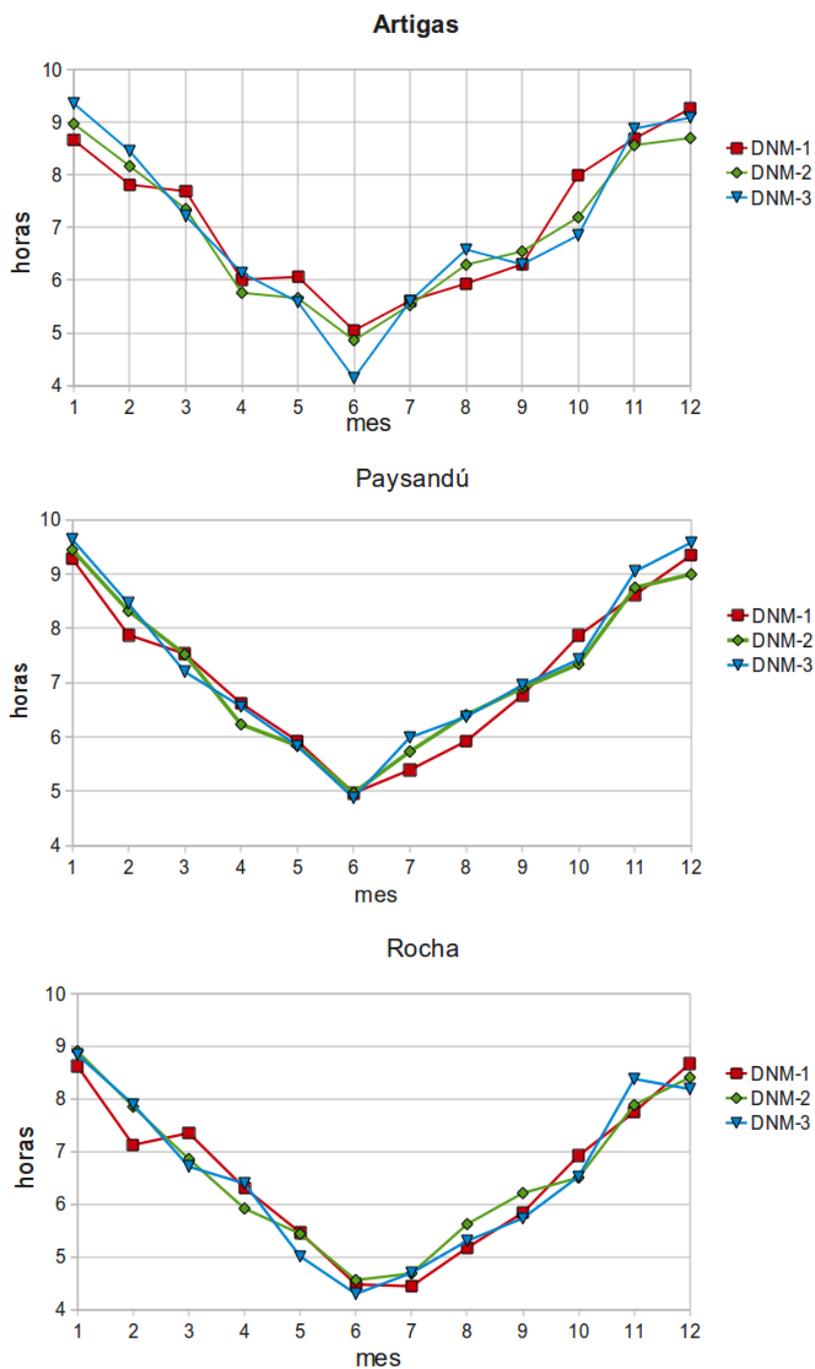


Figura 2.1: Heliofanía media mensual para tres localidades con datos son de los conjuntos DNM-1,2,3 según se indica.

<b>código</b>	<b>dato</b>	<b>estaciones</b>	<b>período</b>	<b>años</b>
<b>DNM-1</b>	promedio de total mensual	12	1981–1990	9
<b>DNM-2</b>	total mensual sin promediar	11	1986–2005	20
<b>DNM-3</b>	valor diario promedio	14	2000–2008	9
<b>INIA</b>	valor diario promedio	5	1971–2008	38

Cuadro 2.5: Conjuntos de datos de heliofanía analizados para este trabajo. Hay superposiciones entre las localidades, ver el Cuadro 2.6.

un nivel de confianza del 90 %, es posible extrapolar los valores obtenidos en las estaciones de medición de insolación en Uruguay hasta distancias de 285 km sin exceder un error del 15 %. Teniendo en cuenta que la distancia promedio entre las 11 estaciones consideradas en este estudio es de 290 km, concluye que el país tiene una cobertura adecuada, dada la homogeneidad de su territorio. En un segundo estudio [RF06], de carácter regional para la Pampa Húmeda y que incluye datos de heliofanía de Argentina, Uruguay, Paraguay y del sur de Brasil, Grossi et al. llegan a conclusiones similares. En un tercer estudio [GS07], buscando en las series de heliofanía uruguayas posibles variaciones temporales relacionadas con el Cambio Climático, Grossi y colaboradores analizan en este conjunto de datos (DNM-2) la existencia de tendencias en los promedios anuales. Trabajando con un intervalo de confianza de 95 %, concluyen que ninguna de las estaciones uruguayas analizadas muestra en sus series históricas tendencias significativas (al 5 %).

El conjunto DNM-3 es el mas reciente, contiene datos de heliofanía diaria promedio para el período 2000-2008. Este conjunto fué comprado a la DNM en octubre 2009 por la Facultad de Ingeniería de UdelaR, para la realización de este trabajo.

Finalmente, el conjunto INIA contiene datos de heliofanía promedio mensual para las cinco estaciones del INIA indicadas en el Cuadro 2.7. Estos datos se encuentran disponibles en línea<sup>6</sup>.

Ya que se disponía de datos de diversas fuentes para la misma localidad, se realizó un análisis de consistencia entre ellos, a nivel de medias mensuales. La Fig. 2.1 muestra esta comparación para tres de las localidades donde se contaba con datos de diversas fuentes y períodos de tiempo. Los datos presentan diferencias que llegan a ser de 1 hora, lo cual es sorprendente, ya que se trata de valores medios para el mes sobre varios años de datos diarios y que en definitiva, están basados en el mismo instrumento de medida ya que son todos datos DNM. Esto puede tener diversas causas. Los períodos de tiempo para cada conjunto de datos son diferentes y los datos han sido

<sup>6</sup><http://www.inia.org.uy/>

Estación	LAT	LON	ALT	DNM-1	DNM-2	DNM-3	INIA
ARTIGAS	-30,40	-56,51	121	x	x	x	
CARRASCO	-34,83	-56,01	33	x	x	x	
COLONIA	-34,46	-57,84	23	x	x	x	x
DURAZNO	-33,35	-56,50	93			x	
FLORIDA	-34,09	-56,19	67			x	
LAS BRUJAS (INIA)	-34,67	-56,33	32				x
MELO	-32,37	-54,19	100	x	x	x	
MERCEDES	-33,25	-58,07	17	x	x	x	
PASO DE LOS TOROS	-32,80	-56,53	76	x	x		
PAYSANDU	-32,35	-58,04	61	x	x	x	
PRADO	-34,86	-56,21	16	x			
RIVERA	-30,90	-55,54	242	x	x	x	
ROCHA	-34,49	-54,31	18	x	x	x	
SALTO	-31,40	-57,97	34	x	x	x	x
SAN JOSÉ	-34,35	-56,76	72			x	
TACUAREMBÓ	-31,71	-55,99	134			x	x
TREINTA Y TRES	-33,22	-54,39	47	x	x	x	x
YOUNG	-32,69	-56,65	81			x	

Cuadro 2.6: Localidades donde se cuenta con datos de heliofanía media diaria. Se indican las coordenadas en grados y la altura sobre el nivel del mar, en metros. Salvo para Las Brujas, la ubicación de las estaciones corresponde a las de la DNM. La ubicación de las estaciones del INIA se muestra en el cuadro 2.7.

procesados de formas diferentes. En definitiva, se ha optado por trabajar exclusivamente con datos del conjunto DNM-3, complementados en por datos de dos estaciones del INIA (Salto y La estanzuela), por la cercanía del heliógrafo con el piranómetro que registró la irradiación. Se consideró importante utilizar datos de heliofanía correspondientes a un período de tiempo definido (2000-2008), se optó por trabajar exclusivamente sobre los datos del conjunto DNM-3. En el Cuadro 2.8 se indican los valores medios mensuales utilizados, para cada localidad. La Fig. 2.2 muestra las ubicaciones de las series de datos utilizadas para este trabajo.

Estación	Departamento	LAT	LON	ALT	Inicio
La Estanzuela	Colonia	-34.33	-57.68	81	1965
Las Brujas	Canelones	-34.67	-56.33	32	1970
Salto Grande	Salto	-31.27	-57.88	50	1970
Treinta y Tres	Treinta y Tres	-33.23	-54.25	100	1970
Tacuarembó	Tacuarembó	-31.70	-55.82	140	1970

Cuadro 2.7: Detalles de las cinco estaciones del INIA. La ubicación esta en grados, la altura en metros. Se indica el año de inicio de los registros de heliofanía.

Localidad	Fuente	USO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Colonia	INIA	AP	9.1	8.6	8.0	7.4	5.6	4.8	5.1	6.1	7.2	8.1	9.6	9.6
Salto	INIA	AP	9.4	8.5	7.9	6.4	6.0	4.7	5.5	6.3	6.8	7.6	8.9	9.2
Salto	DNM-3	ER	9.6	8.5	7.5	6.3	5.6	4.1	5.7	6.4	6.8	6.8	9.1	9.4
Paysandú	DNM-3	ER	9.6	8.5	7.2	6.6	5.8	4.9	6.0	6.4	7.0	7.4	9.0	9.6
Carrasco	DNM-3	AP,ER	9.6	8.6	7.0	6.4	5.3	4.4	5.0	5.3	6.0	7.0	8.8	9.1
San José	DNM-3	ER	9.7	8.2	6.8	5.8	5.0	4.2	4.5	4.9	6.0	7.0	9.0	9.5
Florida	DNM-3	ER	9.5	8.4	6.8	6.1	5.1	4.3	4.5	5.2	6.0	7.3	9.0	9.2
Durazno	DNM-3	ER	9.8	8.6	7.3	6.3	5.2	4.5	5.4	5.8	6.7	7.2	9.1	9.7
Rocha	DNM-3	ER	8.8	7.9	6.7	6.4	5.0	4.3	4.7	5.3	5.7	6.5	8.4	8.2
Treinta y Tres	DNM-3	ER	9.2	8.0	6.6	6.1	5.0	4.3	4.9	5.3	5.7	6.9	8.6	8.9
Melo	DNM-3	ER	9.4	8.2	7.0	6.3	5.4	4.4	5.3	5.9	6.0	6.6	8.8	9.2
Rivera	DNM-3	AP,ER	9.1	8.1	7.0	5.8	5.3	4.0	5.5	6.1	6.3	6.7	8.3	8.7
Tacuarembó	DNM-3	ER	9.4	8.4	6.8	6.2	5.3	4.1	5.6	5.8	6.3	6.8	8.8	9.1
Artigas	DNM-3	ER	9.4	8.5	7.2	6.1	5.6	4.1	5.6	6.6	6.3	6.9	8.9	9.1

Cuadro 2.8: Datos de heliofanía diaria promedio utilizados en este trabajo. Las columnas numeradas indican el mes. En la columna USO, AP significa que fueron usados para determinar los coeficientes  $a$  y  $b$  de la correlación de Armstrong-Prescott y ER significa que fueron usados como estimadores de irradiación en la Ec. (3.2).

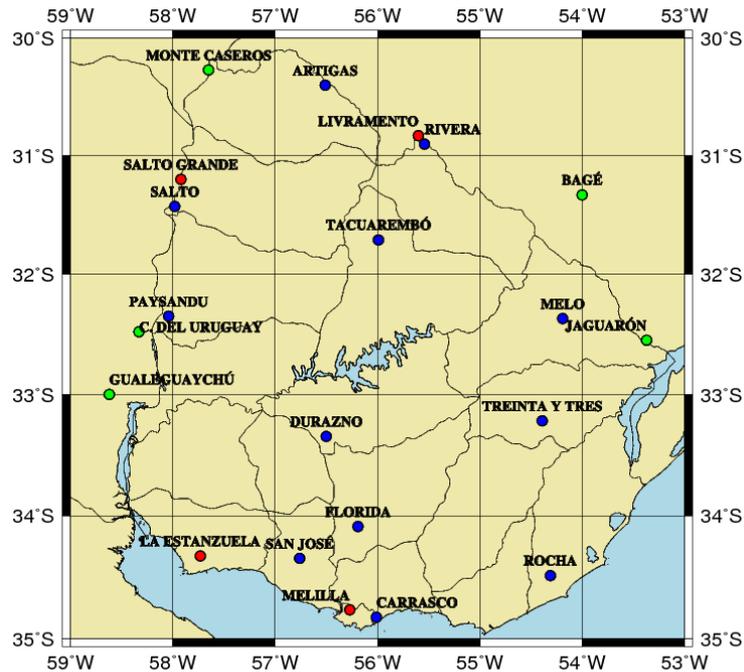


Figura 2.2: Ubicación de las series de datos usadas para este trabajo. En rojo se indican locales con datos de irradiación diaria promedio, en azul los locales con datos de heliofanía (DNM) y en verde, los locales con datos de irradiación diaria promedio que fueron usados para validación a-posteriori.

## 2.3. Pre-tratamiento de los datos

Los conjuntos de datos elegidos, se han sometido a un pre-tratamiento que implica por ejemplo su filtrado para detectar *outliers* y su normalización. Una parte importante de la dependencia estacional de los datos es trivial y puede eliminarse normalizando adecuadamente. A continuación definiremos los ángulos relevantes y damos las expresiones utilizadas para normalizar los valores medios mensuales de heliofanía e irradiación. Utilizaremos para este breve resumen la notación de [DB06], referencia que puede ser consultada por detalles adicionales.

### 2.3.1. Geometría Solar

La normal al plano orbital de la tierra define una dirección especial, con respecto a la cual el eje de rotación de la tierra (el eje N-S o eje polar) forma un ángulo de aproximadamente  $23,5^\circ$ . Este ángulo puede considerarse constante en la escala de tiempo de interés para este trabajo. La posición del eje polar relativa al Sol es responsable de los cambios estacionales en la irradiancia solar incidente en cada hemisferio terrestre.

El ángulo que forman el plano ecuatorial de la Tierra y la línea Tierra-Sol<sup>7</sup> cambia diariamente a medida que la tierra recorre su órbita, como se muestra en la Fig. 2.3. Este ángulo se denomina declinación solar,  $\delta$ , es nulo en los equinoccios (primavera y otoño) y es de aproximadamente  $\pm 23,5^\circ$  en los solsticios (verano e invierno). La declinación solar en grados esta dada, aproximadamente, por la expresión

$$\delta_n = 23,45^\circ \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$

donde  $n = 1, 2, \dots, 365$  es día en el ciclo anual. Esta expresión es adecuada para los propósitos de éste trabajo, pero existen expresiones más precisas, véase por ejemplo [DB06].

Para describir el movimiento aparente del sol, se usan dos ángulos: el ángulo zenital,  $\theta_z$ , es el ángulo que forma la línea Tierra-Sol con la vertical en el punto del observador y el ángulo horario,  $\omega$ , que indica el desplazamiento angular del sol de este a oeste, debido a la rotación de la Tierra. El ángulo horario es nulo en el mediodía solar, aumenta en  $15^\circ$  por hora y por convención se toma negativo en la mañana. Estos ángulos se relacionan con la latitud del observador,  $\phi$ , y con la declinación a través de la expresión,

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta_n \cos \omega + \sin \phi \sin \delta_n. \quad (2.2)$$

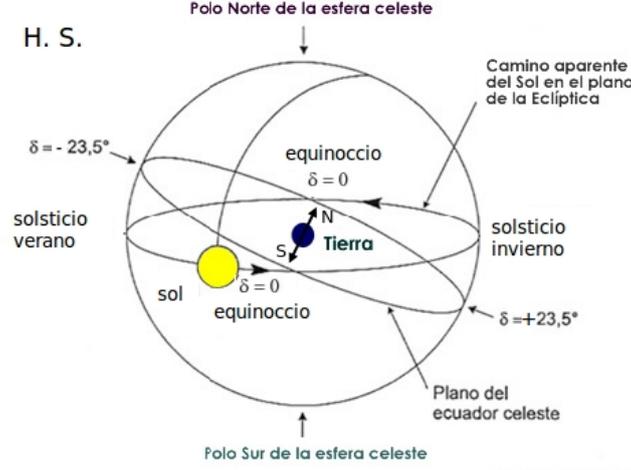


Figura 2.3: Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del Sol visto desde la Tierra. La línea Tierra-Sol forma un ángulo  $\delta \in [-23,45^\circ, 23,45^\circ]$  (la declinación) con el plano de la eclíptica. Referido al Hemisferio Sur,  $\delta = 23,45^\circ$  en el solsticio de invierno y  $\delta = -23,45^\circ$  en el solsticio de verano. En los equinoccios, la línea Tierra-Sol esta en el plano de la eclíptica y  $\delta = 0$ .

A la salida o puesta del sol, se tiene  $\theta_z = \pm 90^\circ$  y  $\cos \theta_z = 0$ , por lo que el ángulo horario a la salida o puesta del sol,  $\omega_s$ , cumple

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta_n. \quad (2.3)$$

Dado que el ángulo  $\omega$  aumenta en  $15^\circ$  por hora, el número máximo de horas de sol en un día y lugar dados es

$$N_0(\phi, n) = \frac{2\omega_s}{15} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta_n) \quad (2.4)$$

donde el arcoseno debe expresarse en grados.

Si llamamos  $\Omega_m$  al subconjunto de valores de  $n$  correspondientes al mes  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, 12$ ), el número medio de horas de sol en el mes,  $\bar{N}_0$ , está dado por

$$\bar{N}_0(\phi, m) = \frac{1}{|\Omega_m|} \sum_{n \in \Omega_m} N_0(n, \phi) \quad (2.5)$$

donde  $|\Omega_m|$  es el número de días en el mes  $m$ .

<sup>7</sup>Es decir, la línea que une los centros del Sol y de la Tierra

### 2.3.2. Irradiancia solar extra-atmosférica

La irradiancia solar incidente en el día solar  $n$  en un plano horizontal fuera de la atmósfera esta dada por [DB06],

$$G_0 = G_{sc} F_n \cos \theta_z \quad (2.6)$$

donde  $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$  es la Constante Solar, el primer factor

$$F_n \equiv \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360 n}{365} \right) \right] \quad (2.7)$$

es una corrección que tiene en cuenta la variación de la distancia Tierra-Sol debido a la eccentricidad de la órbita terrestre y el factor direccional  $\cos \theta_z$ , dado por la Ec. (2.2), resulta del producto escalar entre la dirección de incidencia y la normal a la superficie terrestre en el punto de incidencia.  $G_0$  representa el flujo de energía solar incidente fuera de la atmósfera para una ubicación dada en un instante dado. La dependencia en posición se da a través de la latitud,  $(\phi)$ , la dependencia temporal a través del día solar  $n$  y del ángulo horario  $\omega$ .

La irradiación diaria incidente fuera de la atmósfera en un día y latitud determinadas,  $H_0$ , se obtiene por integración de la Ec. (2.6), en  $\text{kJ/m}^2$  se expresa como

$$\begin{aligned} H_0(n, \phi) &= \int_{-t_1}^{t_2} G_0(\omega(t), \phi, n) dt \\ &= \frac{dt}{d\omega} \int_{-\omega_s}^{\omega_s} G_0(\omega, \phi, n) d\omega \\ &= K_0 F_n (\cos \phi \cos \delta_n \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta_n) \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde  $\omega_s$  en radianes, esta dado por la Ec. (2.3) y, dado que  $d\omega/dt = \pi/12$  rad/hora, resulta

$$K_0 \equiv \frac{24}{\pi} \times 1\text{h} \times G_{sc} \approx 37,6 \text{ MJ/m}^2 = 10,4 \text{ kWh/m}^2. \quad (2.9)$$

Esta es la máxima energía incidente en un día sobre la atmósfera. Debido a los efectos de la absorción y reflexión en la atmósfera, al suelo llegará una fracción de esta cantidad.

Finalmente, el valor medio de la irradiancia diaria,  $\bar{H}_0$ , para un mes  $m$  se obtiene a partir de

$$\bar{H}_0(\phi, m) = \frac{1}{|\Omega_m|} \sum_{n \in \Omega_m} H_0(\phi, n) \quad (2.10)$$

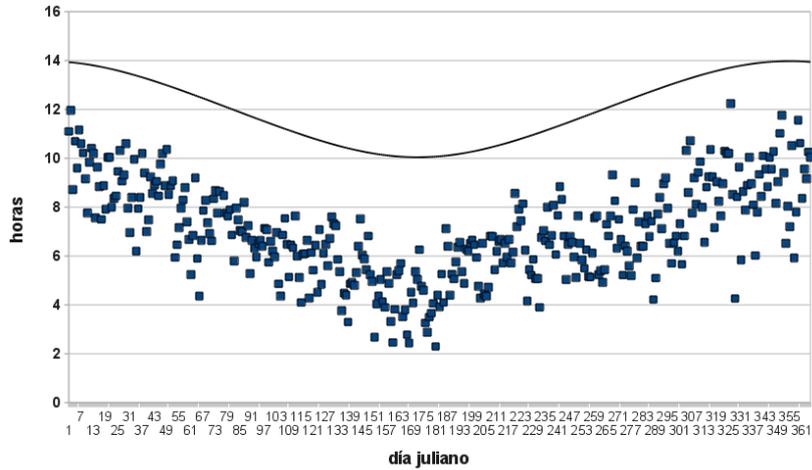


Figura 2.4: Promedios diarios de heliofanía para la ciudad de Artigas. Los promedios correspondientes al período 2000-2008 (conjunto DNM3). La curva continua muestra el máximo número de horas de sol para esta estación,  $N_0$ , dado por la Ec. (2.4).

donde  $|\Omega_m|$  es el número de días en el mes  $m$ . Las horas de sol promedio,  $\bar{N}_0$ , y la irradiancia diaria promedio,  $\bar{H}_0$ , para cada mes son las cantidades de interés para normalizar los datos de heliofanía e irradiación diaria, respectivamente.

### 2.3.3. Normalización

La normalización de la heliofanía diaria se lleva a cabo dividiendo entre el número máximo de horas de sol para la localidad y día del año de que se trate, dado por la Ec. (2.4). Definimos la heliofanía relativa diaria,  $n$ , como

$$n(\phi, i) \equiv \frac{N(\phi, i)}{N_0(\phi, i)}. \quad (2.11)$$

En el caso de la heliofanía media mensual, usamos el valor medio de  $N_0$  en el mes, dado por la Eq. (2.5), para normalizar. Definimos entonces la heliofanía relativa media para el mes  $m$  como,

$$n(\phi, m) \equiv \frac{\bar{N}(\phi, m)}{\bar{N}_0(\phi, m)}. \quad (2.12)$$

En el Cuadro 2.9 se indican los valores de heliofanía relativa media correspondientes al conjunto de datos DNM-3 utilizado para este trabajo.

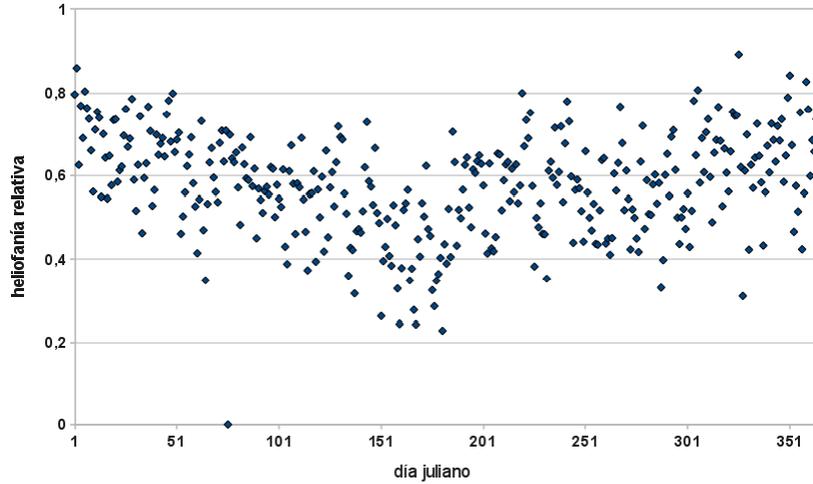


Figura 2.5: Heliofanía relativa promedio, calculada dividiendo los valores medios diarios mostrados en la Fig. 2.4 entre el valor de  $N_0$  calculado a partir de la Ec. (2.4).

Localidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Colonia*	0.65	0.65	0.66	0.66	0.55	0.50	0.51	0.57	0.61	0.63	0.70	0.67
Salto*	0.68	0.65	0.65	0.57	0.58	0.47	0.54	0.58	0.58	0.59	0.65	0.66
Salto	0.69	0.65	0.61	0.57	0.54	0.41	0.56	0.58	0.57	0.53	0.67	0.67
Paysandú	0.70	0.64	0.59	0.59	0.56	0.49	0.59	0.59	0.59	0.58	0.66	0.68
Carrasco	0.68	0.64	0.57	0.58	0.52	0.45	0.51	0.49	0.51	0.54	0.63	0.64
San José	0.70	0.62	0.56	0.52	0.49	0.43	0.45	0.46	0.50	0.55	0.65	0.67
Florida	0.68	0.63	0.56	0.55	0.50	0.44	0.45	0.48	0.51	0.56	0.65	0.65
Durazno	0.70	0.65	0.59	0.57	0.51	0.46	0.53	0.53	0.57	0.56	0.66	0.68
Rocha	0.63	0.60	0.55	0.57	0.49	0.44	0.47	0.49	0.49	0.51	0.61	0.57
Treinta y Tres	0.66	0.61	0.54	0.55	0.49	0.44	0.48	0.49	0.48	0.53	0.62	0.63
Melo	0.68	0.62	0.58	0.56	0.52	0.45	0.52	0.55	0.51	0.51	0.64	0.65
Rivera	0.66	0.62	0.57	0.52	0.51	0.40	0.54	0.56	0.53	0.52	0.61	0.62
Tacuarembó	0.68	0.64	0.56	0.55	0.51	0.41	0.55	0.53	0.53	0.53	0.64	0.65
Artigas	0.68	0.65	0.59	0.55	0.53	0.41	0.55	0.60	0.53	0.54	0.65	0.65

Cuadro 2.9: Datos de heliofanía normalizada diaria media utilizados en este trabajo. Las columnas numeradas indican el mes. Los valores, calculados con la Ec. (2.12), corresponden a los datos del conjunto DNM-3 (Cuadro 2.8) excepto los marcados (\*) que correspondientes a estaciones INIA.

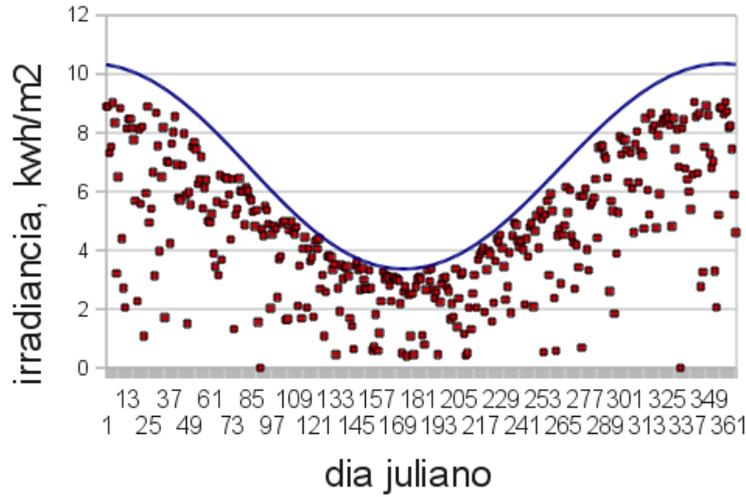


Figura 2.6: Datos de irradiación diaria,  $H$ , para el año 1971 de la serie ZUELA (la Estanzuela, Colonia) comparados con  $0,8 H_0$ , el 80 % de la irradiación diaria extraterrestre.

La irradiación diaria se normaliza adecuadamente usando la irradiación diaria incidente fuera de la atmósfera, dada por la Ec. (2.8). Esto define el índice de claridad diario,  $K_T$ ,

$$K_T(\phi, n) \equiv \frac{H(\phi, n)}{H_0(\phi, n)}. \quad (2.13)$$

Es un hecho empíricamente establecido que  $K_T < 0,8$ , ya que al menos el 20 % de la irradiación es absorbido o reflejado por la atmósfera en un día claro. Esto puede ser usado como un filtro simple, ya que datos que resultan en  $K_T > 0,80$  suelen corresponder a un instrumento mal calibrado o mal ubicado (que recibe irradiación reflejada por superficies cercanas). A modo de ejemplo, en la Fig. 2.6 se muestran los datos de irradiación diaria  $H$  para el año 1971 de la serie ZUELA (la Estanzuela, Colonia) comparados con el 80 % de la irradiación diaria extraterrestre,  $H_0$ . La Figura 2.7 muestra el índice de claridad diario para estos datos. Una comparación entre ambas figuras muestra como esta normalización elimina parte de la dependencia estacional de los datos.

Para trabajar a nivel mensual, se puede calcular el valor medio de la irradiación diaria del mes,  $\bar{H}$ , y normalizarlo usando el correspondiente promedio extraterrestre,  $\bar{H}_0$ , dado por la Ec. (2.10). Esto define un índice de claridad

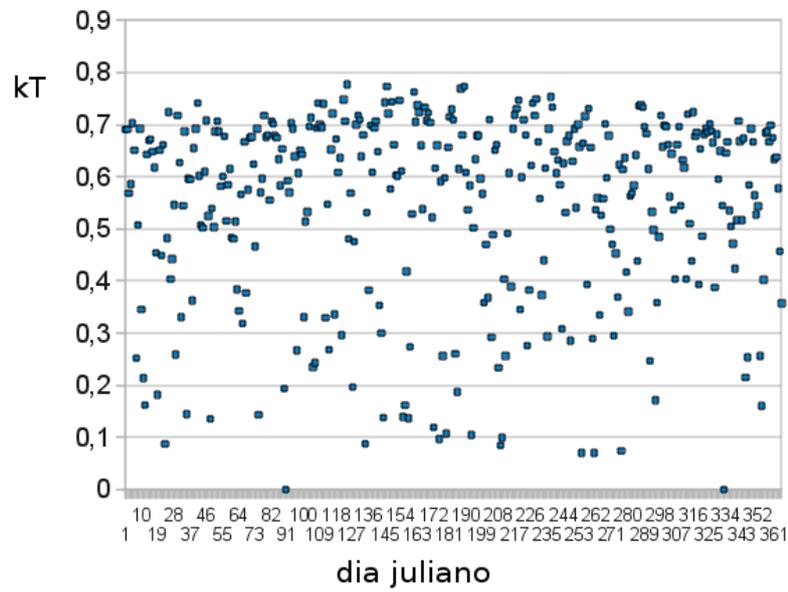


Figura 2.7: Índice de claridad diario,  $K_T$ , definido en la Ec. (2.13), para los datos de irradiación diaria del año 1971 de la serie ZUELA (la Estanzuela, Colonia) mostrados en la Fig. 2.6.

Serie irradiación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ZUELA	0.57	0.55	0.56	0.55	0.50	0.48	0.48	0.53	0.54	0.56	0.60	0.57
Salto Grande	0.58	0.56	0.52	0.53	0.52	0.48	0.47	0.50	0.48	0.53	0.54	0.56
Livramento	0.58	0.56	0.53	0.52	0.52	0.47	0.51	0.49	0.48	0.50	0.56	0.57
Melilla- $\alpha$	0.51	0.50	0.47	0.49	0.45	0.44	0.43	0.45	0.44	0.51	0.55	0.53

Cuadro 2.10: Datos de irradiación normalizada (índice de claridad) diaria promedio utilizados en este trabajo. Las columnas numeradas indican el mes.

mensual

$$k_T(\phi, m) \equiv \frac{\bar{H}(\phi, m)}{\bar{H}_0(\phi, m)}. \quad (2.14)$$

En el Cuadro 2.10 damos los valores del índice de claridad mensual correspondientes a las cuatro series de irradiación usadas para este trabajo.

### 2.3.4. Filtrado de datos

Un primer filtrado surge de las condiciones de normalización. Por definición, la heliofanía relativa diaria debe estar entre 0 y 1. Por otra parte, ya se mencionó que el índice de claridad debe ser inferior a 0,8. Prácticamente todos los datos utilizados cumplían estos criterios, realizando el descarte de muy pocos puntos.

Tanto los datos de irradiación como los de heliofanía fueron analizados además por el método de outliers a  $2,5\sigma$ , bajo la hipótesis de una distribución normal. A partir de un conjunto de  $N$  datos  $X_i$ , con  $i = 1 \dots N$ , se calcula el valor medio  $\bar{X}$  y la desviación estándar  $\sigma_X$ . Luego se marcan aquellos datos que se apartan de la media más de  $r\sigma$ , es decir se descartan aquellos  $X_j$  para los cuales

$$\frac{|X_j - \bar{X}|}{\sigma_X} > z \quad (2.15)$$

donde  $z$  es un parámetro. Si los datos están normalmente distribuidos, entonces fijando  $z$  se conoce la probabilidad  $P_{out}(z)$  de que se cumpla la condición (2.15). Por ejemplo,  $P_{out}(z = 1) = 0,317$  y  $P_{out}(z = 2,5) = 0,0124$ . Si la fracción de datos marcados es consistente con esta probabilidad, el conjunto se considera aceptable. Si es muy superior, los datos pueden no estar distribuidos normalmente. Hemos usado  $z = 2,5$ , valor para el cual una distribución normal predice que en media 1,24% de los datos satisfacen la condición (2.15). Los niveles de datos marcados han sido consistentes con la hipótesis de distribución normal, observándose en la mayoría de los casos  $\sim 1\%$  de outliers y en el peor caso, un 3% de outliers.

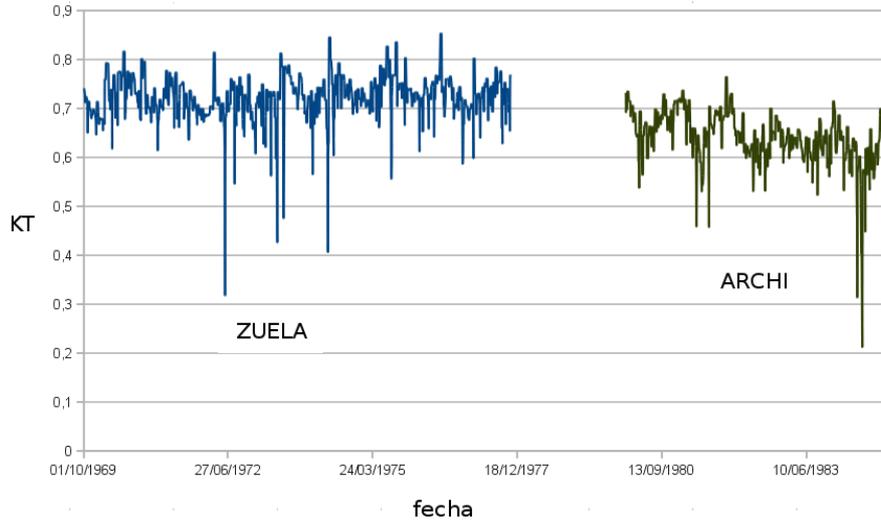


Figura 2.8: Máximo móvil (ventana de 10 días) del índice de claridad diario,  $K_T$  de las series de ZUELA (Colonia) y ARCHI (Montevideo) vs. fecha. La serie ARCHI no fué utilizada en este trabajo.

Es bien conocido que la presencia de unos pocos outliers espúreos (debidos a errores esporádicos de lectura, transcripción, suciedad en los sensores, etc), puede afectar fuertemente el valor de los parámetros de una regresión lineal. Existen métodos estadísticos, como el método de Grubbs [HA04], para identificar y descartar medidas que no se ajustan a la hipótesis de una distribución normal, trabajando a determinado nivel de confianza. En nuestro caso, dado que la proporción de outliers observada es consistente con la hipótesis de distribución normal, se ha considerado innecesario adoptar estos métodos. Alternativamente, hemos calculado las regresiones de dos formas:

- (i) usando estadística robusta a la presencia de outliers
- (ii) usando la regresión lineal usual sobre conjuntos datos de los cuales los outliers fueron depurados.

Al obtener consistencia entre ambos métodos de regresión, estamos seguros de que la presencia de outliers no afecta significativamente la determinación de estos coeficientes.

Finalmente, se ha realizado un chequeo de consistencia sobre los conjuntos de datos. En el caso de los datos de heliofanía, los datos son en general consistentes entre si y se ha optado por usar datos del conjunto DNM3, asociados a un mismo período temporal, como estimadores de radiación.

Para el caso de las cuatro series de radiación Uruguayas, hemos estudiado

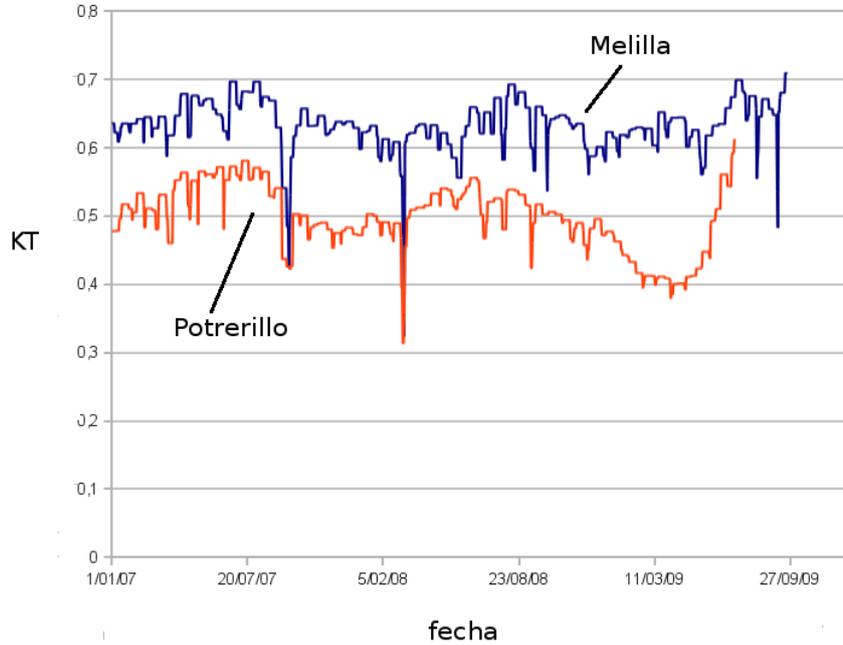


Figura 2.9: Máximo móvil (ventana de 10 días) del índice de claridad diario,  $K_T$  de las series de Melilla y Potrerillo (Rocha) vs. fecha. La serie Potrerillo no fué utilizada en este trabajo.

la consistencia entre si de los valores normalizados ( $K_T$ , índice de claridad diario). La Fig. 2.8 muestra una comparación de los valores máximos de  $K_T$  (en una ventana de 10 días) para las series más antiguas, ZUELA (Colonia) y ARCHI (Montevideo). Los valores máximos de la serie ZUELA permanecen estables en el tiempo, en tanto que los máximos de la serie ARCHI muestran una tendencia decreciente en el tiempo, posiblemente debida a la degradación de la calibración del piranómetro. Se optó por no utilizar la serie ARCHI para este trabajo. La Figura 2.9 muestra la misma comparación para las series más recientes, MELILLA-*alpha* y POTRERILLO (Rocha), en el tiempo en que son simultáneas. Los valores de  $K_T$  para la serie Potrerillo son anormalmente bajos, y la subida abrupta al final de la serie es inexplicable, a no ser que responda a un cambio o recalibración del sensor. Esta serie tampoco fue utilizada para este trabajo.

# Capítulo 3

## Mapa Solar del Uruguay

### 3.1. Metodología

La metodología utilizada en este trabajo se basa en la correlación lineal existente entre los promedios mensuales de irradiación diaria normalizada y los promedios mensuales de heliofanía normalizada

$$k_T = a + b n, \quad (3.1)$$

donde el índice medio de claridad,  $k_T$ , y la heliofanía relativa media,  $n$ , se definen en las Ecs. (2.12) y (2.14). Esta relación fue propuesta originalmente por Angström [Ang24] y luego modificada por Prescott [Pre40]. Dada la relativa abundancia de datos de heliofanía, la misma ha sido utilizada para estimar la variación espacial del recurso solar en la región [RGGR05, Tib04].

Una vez conocidos los coeficientes  $a$  y  $b$  para aquellos lugares en los que se cuenta simultáneamente con datos de irradiación y heliofanía, se utilizan métodos estándar de interpolación para estimar la variación espacial de los coeficientes en el territorio nacional. A partir de esta información, se estiman los valores de los coeficientes,  $a(x, y)$  y  $b(x, y)$  para aquellas localidades  $(x, y)$  en las cuales se dispone de datos de heliofanía. Utilizando los coeficientes específicos para cada localidad, se utiliza nuevamente la Ec. (3.1), ahora como estimador de la irradiación media,

$$\bar{H}(x, y) = \bar{H}_0(x, y) \left[ a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y)}{\bar{N}_0(x, y)} \right]. \quad (3.2)$$

para la localidad con coordenadas (longitud y latitud)  $(x, y)$ .

Esta metodología tiene en cuenta la variación espacial de los coeficientes  $a$  y  $b$ , pero descarta su variabilidad estacional, asumiendo que la misma es una corrección menor. Se podría incluir la dependencia temporal de los

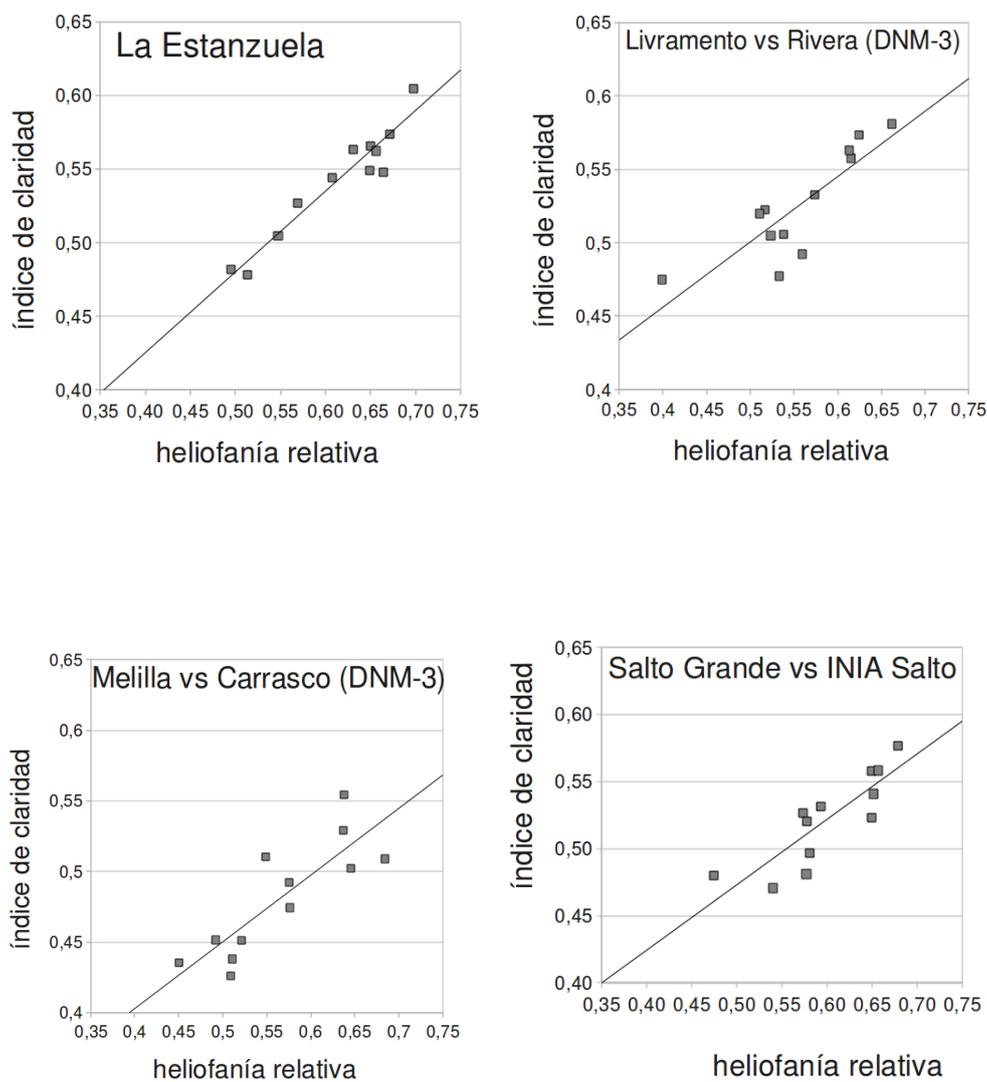


Figura 3.1: Regresiones lineales para determinar los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ec. (3.1) para cuatro ubicaciones en el territorio nacional.

<b>serie irradiación</b>	<b>serie heliofanía</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b><math>R^2</math></b>
ZUELA	Estanzuela (INIA)	0.21	0.55	0.92
Melilla	Carrasco (DNM-3)	0.22	0.47	0.70
Livramento	Rivera (DNM-3)	0.28	0.45	0.72
Salto Grande	Salto (INIA)	0.23	0.49	0.72

Cuadro 3.1: Series de datos utilizadas, valores de  $a$  y  $b$  obtenidos y se da el coeficiente de regresión,  $R^2$ , como indicativo del grado de correlación.

coeficientes reagrupando los datos y realizando ajustes de parámetros para cada estación, por ejemplo. Esto podría ser adecuado en caso de contar con series de datos más largas y de calidad controlada<sup>1</sup>.

Utilizando cuatro series de irradiación y cuatro de heliofanía, se estimaron cuatro pares de coeficientes  $a, b$  para el territorio nacional mediante regresión lineal. Los valores del índice de claridad y la heliofanía relativa utilizados se indican en los Cuadros 2.10 y 2.9, respectivamente. El ajuste se muestra en la Fig. (3.2) y los resultados se resumen en el Cuadro 3.1. Estos valores de  $a$  y  $b$  se extrapolan a todo el territorio nacional, utilizando para ello software estadístico de uso libre<sup>2</sup>. La Fig. /reffig:ayb muestra la variación espacial de los coeficientes  $a$  y  $b$  para el territorio uruguayo. La pendiente ( $b$ ) varía entre 0,40 y 0,56, con una tendencia creciente hacia el oeste del territorio. El parámetro  $a$  varía entre 0,21 a 0,26 con tendencia creciente hacia el noreste del territorio. Estos valores y tendencias son consistentes con las estimaciones, de base mensual, realizadas para el territorio argentino [RGGR04, RGGR05].

A partir de esta información se determinaron los valores de ( $a, b$ ) para las doce localidades con datos de heliofanía, tal como se indica en el Cuadro 3.2. Finalmente, utilizando los datos de heliofanía media diaria (Cuadro 2.8) y los valores de  $a$  y  $b$  locales (Cuadro 3.2), se estima la irradiación global media diaria para cada sitio,  $\bar{H}(x, y)$ , utilizando la Ec. (3.2). Estos valores de irradiación diaria media estimada se indican en el Cuadro 3.3.

<sup>1</sup>Entendemos que el largo de las series y el nivel de incerteza asociado no justifican seguir este procedimiento con los datos actuales.

<sup>2</sup>Más específicamente, se usó el software libre GMT (Generic Mapping Tools) y el paquete de estadística R, bajo una plataforma Linux estándar.

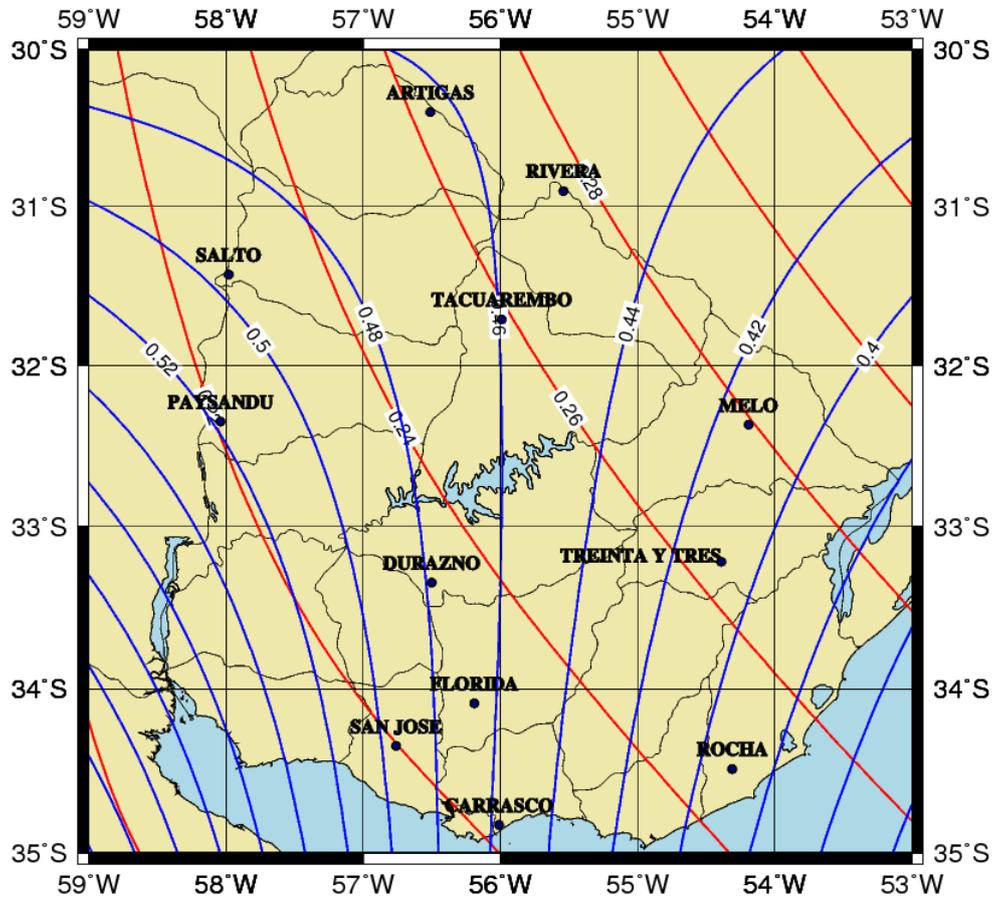


Figura 3.2: Isolinias que representan la variación espacial de los parámetros  $a$  (rojo) y  $b$  (azul) de la Ec. (3.1).

localidad	LAT	LON	a	b
Salto	-31.43	-57.98	0.23	0.50
Paysandú	-32.35	-58.04	0.22	0.52
Carrasco	-34.83	-56.01	0.22	0.46
San José	-34.35	-56.76	0.22	0.50
Florida	-34.09	-56.19	0.23	0.47
Durazno	-33.35	-56.50	0.23	0.48
Rocha	-34.49	-54.31	0.25	0.39
Treinta y Tres	-33.22	-54.39	0.26	0.41
Melo	-32.37	-54.19	0.28	0.41
Rivera	-30.90	-55.54	0.28	0.45
Tacuarembó	-31.71	-55.99	0.26	0.46
Artigas	-30.40	-56.51	0.26	0.46

Cuadro 3.2: Valores de  $a$  y  $b$  para las localidades con datos de heliofanía.

localidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	media
Salto	6.9	6.1	5.0	3.8	2.9	2.2	2.7	3.5	4.4	5.1	6.6	6.9	4.5
Paysandú	7.0	6.1	4.9	3.8	2.9	2.3	2.7	3.4	4.4	5.4	6.6	7.0	4.7
Carrasco	6.4	5.6	4.4	3.3	2.4	1.9	2.2	2.7	3.7	4.8	6.0	6.3	4.1
San José	6.8	5.7	4.5	3.3	2.5	2.0	2.2	2.8	3.9	5.0	6.4	6.8	4.3
Florida	6.6	5.7	4.5	3.4	2.5	2.0	2.2	2.9	3.9	5.1	6.3	6.6	4.3
Durazno	6.8	5.9	4.7	3.6	2.6	2.1	2.4	3.1	4.2	5.1	6.4	6.8	4.5
Rocha	5.9	5.2	4.2	3.3	2.3	1.9	2.1	2.7	3.6	4.6	5.7	5.8	3.9
Treinta y Tres	6.4	5.6	4.4	3.5	2.5	2.1	2.3	2.9	3.8	4.9	6.0	6.4	4.2
Melo	6.7	5.8	4.8	3.7	2.8	2.2	2.5	3.3	4.1	5.1	6.3	6.7	4.5
Rivera	6.9	6.1	5.0	3.8	3.0	2.3	2.8	3.6	4.5	5.4	6.5	6.8	4.7
Tacuarembó	6.9	6.1	4.8	3.8	2.8	2.2	2.7	3.3	4.3	5.2	6.5	6.8	4.6
Artigas	6.9	6.1	5.0	3.8	3.0	2.3	2.8	3.6	4.4	5.3	6.5	6.8	4.7
promedios	6.7	5.8	4.7	3.6	2.7	2.1	2.5	3.2	4.1	5.1	6.3	6.6	<b>4.4</b>

Cuadro 3.3: Estimadores de irradiación global media diaria (en kWh/m<sup>2</sup>) calculados utilizando la Ec. (3.2) con los coeficientes ( $a, b$ ) del Cuadro 3.2. Las columnas numeradas indican los meses del año.

## 3.2. Mapas mensuales

A partir de los estimativos de irradiación obtenidos para 12 localidades distribuidas en el territorio nacional (Cuadro 3.3), se utilizan técnicas de interpolación para estimar la variación de la irradiación media en una grilla de  $20 \times 20 \text{ km}^2$  sobre todo el territorio nacional. Se generan isolíneas de irradiación media y se representa la información utilizando un código de colores adecuado. El resultado de este proceso es la serie de 12 mapas mensuales de irradiación media diaria para el Uruguay, que se presenta a continuación. También se incluye un mapa correspondiente a la distribución espacial de la irradiación media anual.

A partir de los valores que figuran en el Cuadro 3.3 es posible concluir que el valor típico de la irradiación global diaria (el promedio anual sobre el territorio uruguayo) es de  $4,4 \text{ kWh/m}^2$ . La variación estacional es grande, con valores mínimos en torno a  $2 \text{ kWh/m}^2$  en el mes de Junio y valores máximos que llegan a  $7 \text{ kWh/m}^2$  en los meses de Diciembre y Enero.

La variación territorial resulta ser mucho menor a la estacional, debido a la relativa uniformidad geográfica de nuestro territorio. Por ejemplo, las medias anuales muestran un mínimo en Rocha ( $3,9 \text{ kWh/m}^2$ ) y un máximo ( $4,7 \text{ kWh/m}^2$ ) en la zona Norte (Artigas, Rivera, Paysandú). La variación debida al factor territorial es de solo  $0,8 \text{ kWh/m}^2$ . En términos relativos al promedio, la variabilidad territorial es algo mayor en invierno (llegando a 14%) que en verano (cuando es del orden de 8%). Los sitios costeros al sur del país (Rocha, Maldonado, Montevideo) son los que presentan menor irradiación media, en tanto los mayores valores aparecen en el norte (Artigas, Rivera, Salto, Paysandú). Una característica interesante emergente de este estudio es la rotación estacional de las isolíneas de irradiación constante. En los meses de invierno, aparecen casi alineadas con los paralelos. A medida que se avanza hacia el verano, se observa una rotación de las isolíneas en sentido antihorario, de modo que en tanto en los meses de verano presentan una orientación SW-NE, y son aproximadamente paralelas a la costa oceánica. Esta rotación de las isolíneas se presenta, aún mucho más marcada, en mapas obtenidos a partir de estimativos de irradiación global basados en datos satelitales (vea las Figuras en la Sección 3.4).

A continuación se presenta la serie de mapas de irradiación global media diaria para el territorio nacional.

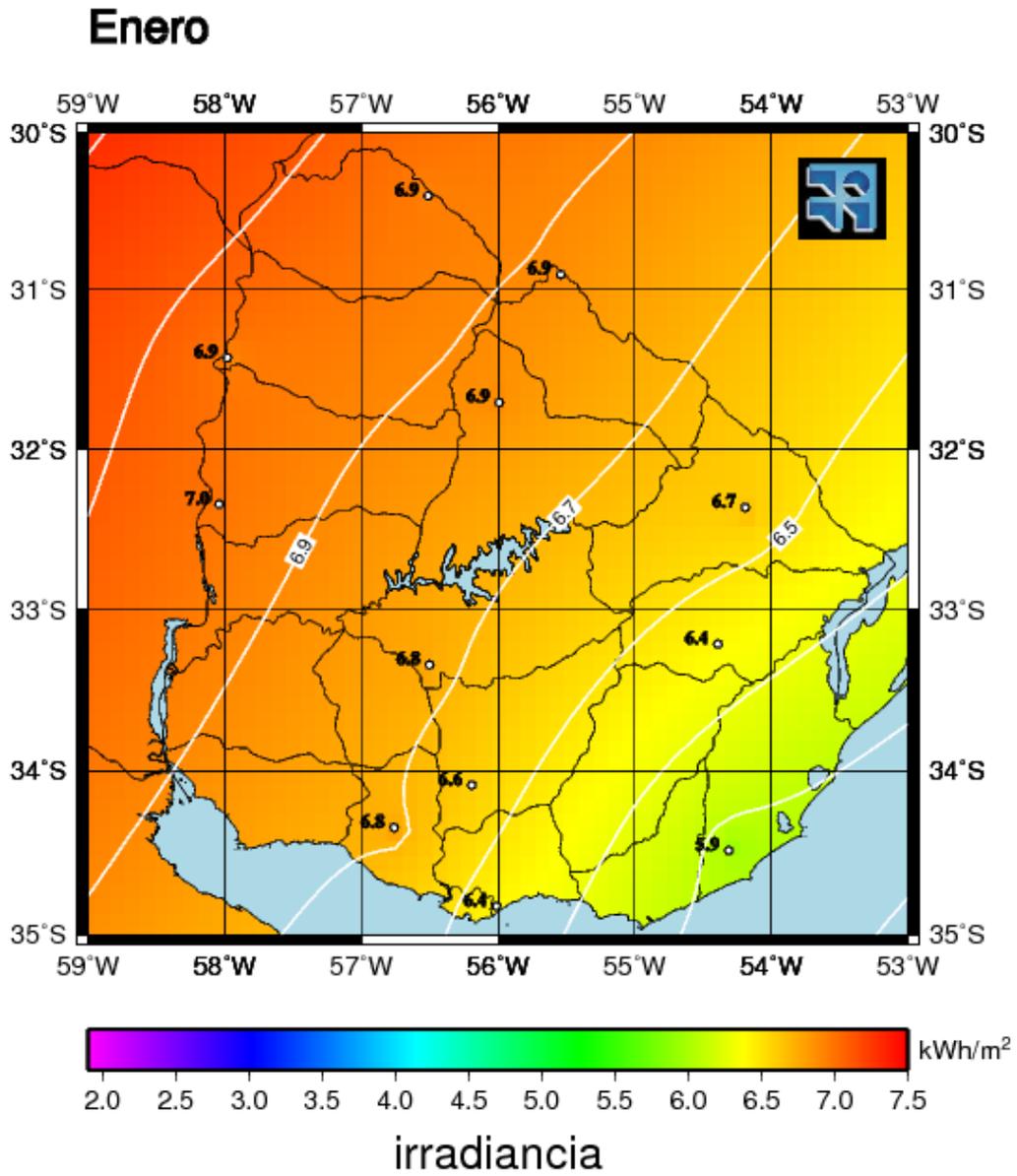


Figura 3.3: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Enero.

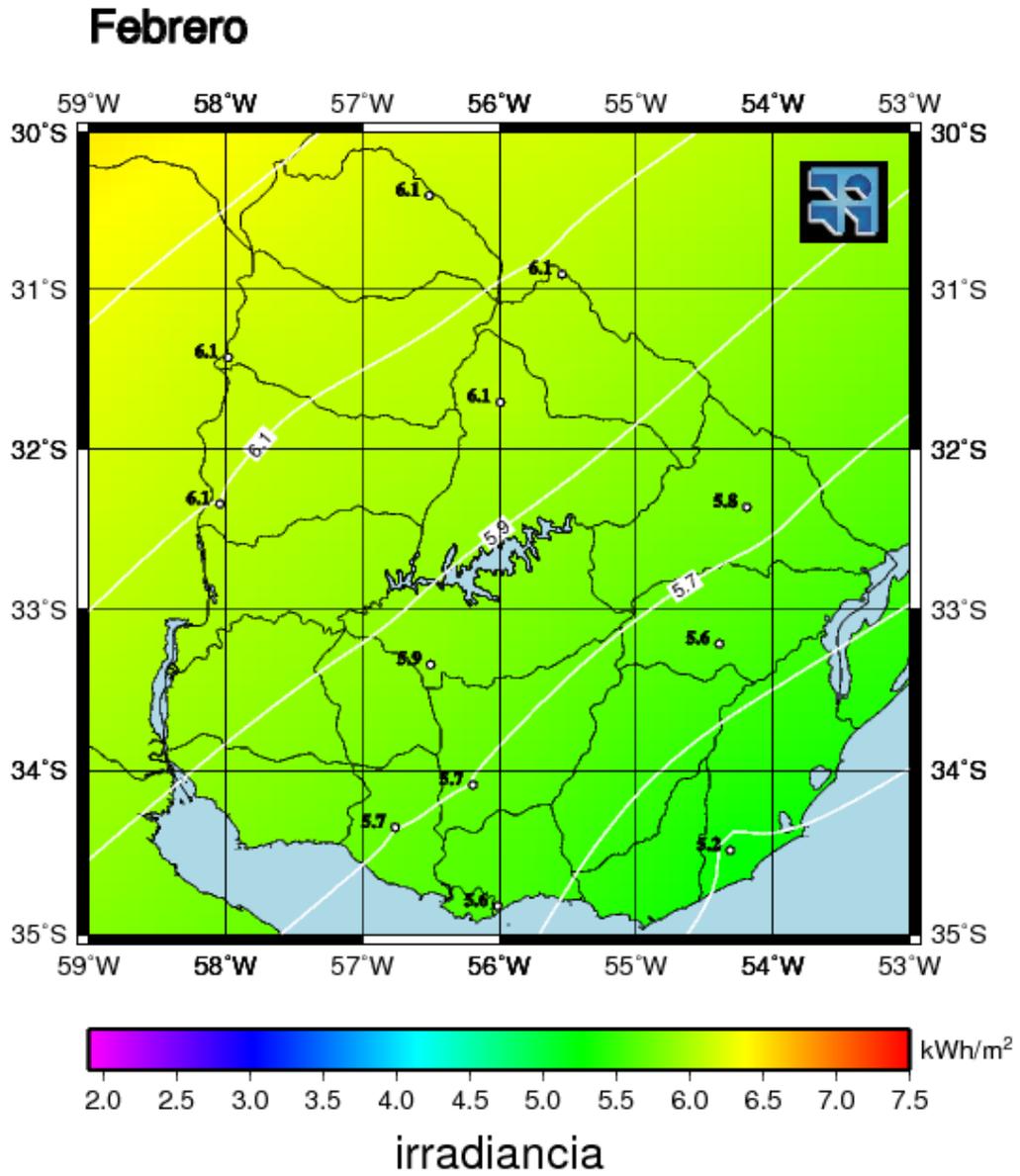


Figura 3.4: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Febrero.

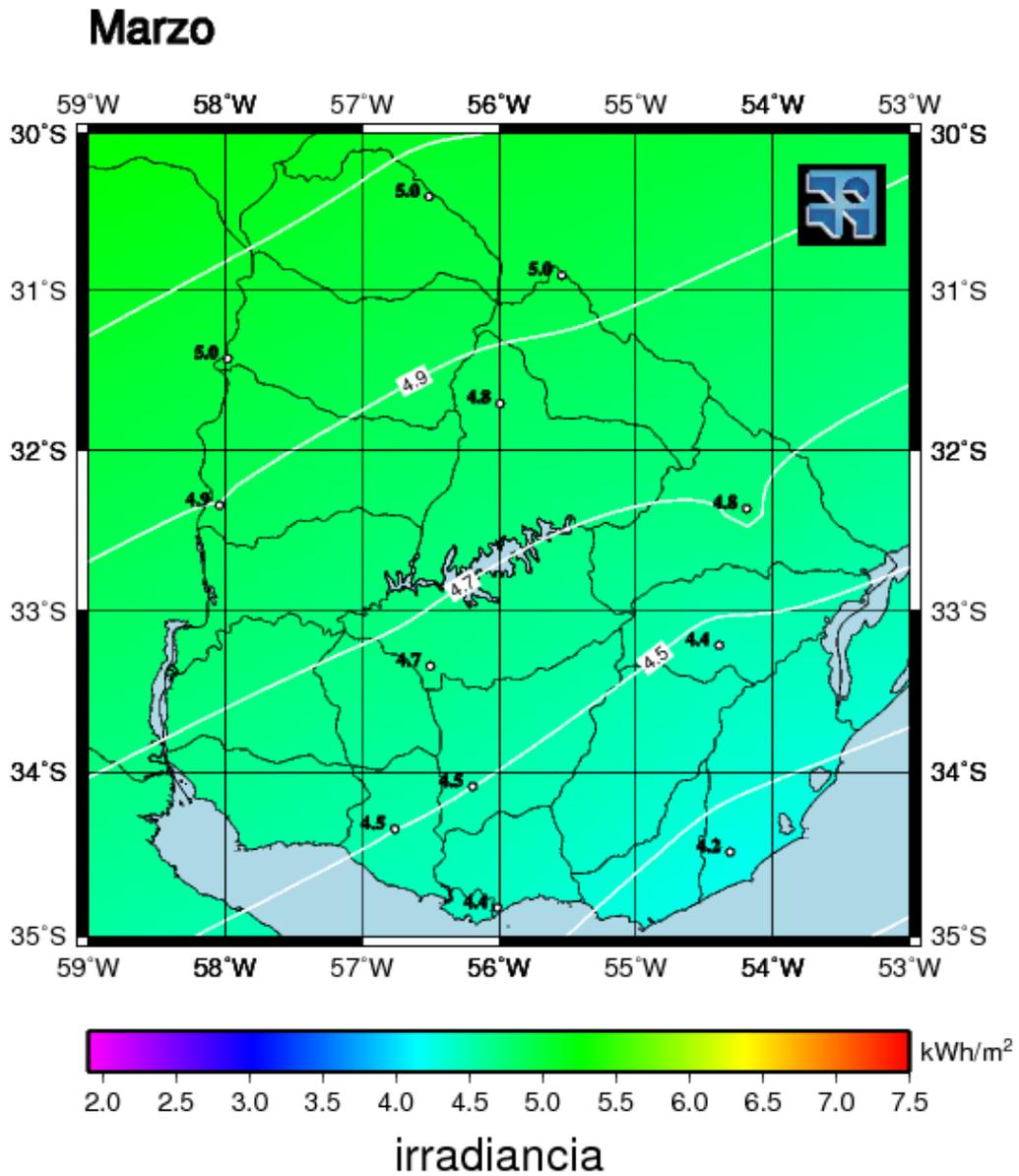


Figura 3.5: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Marzo.

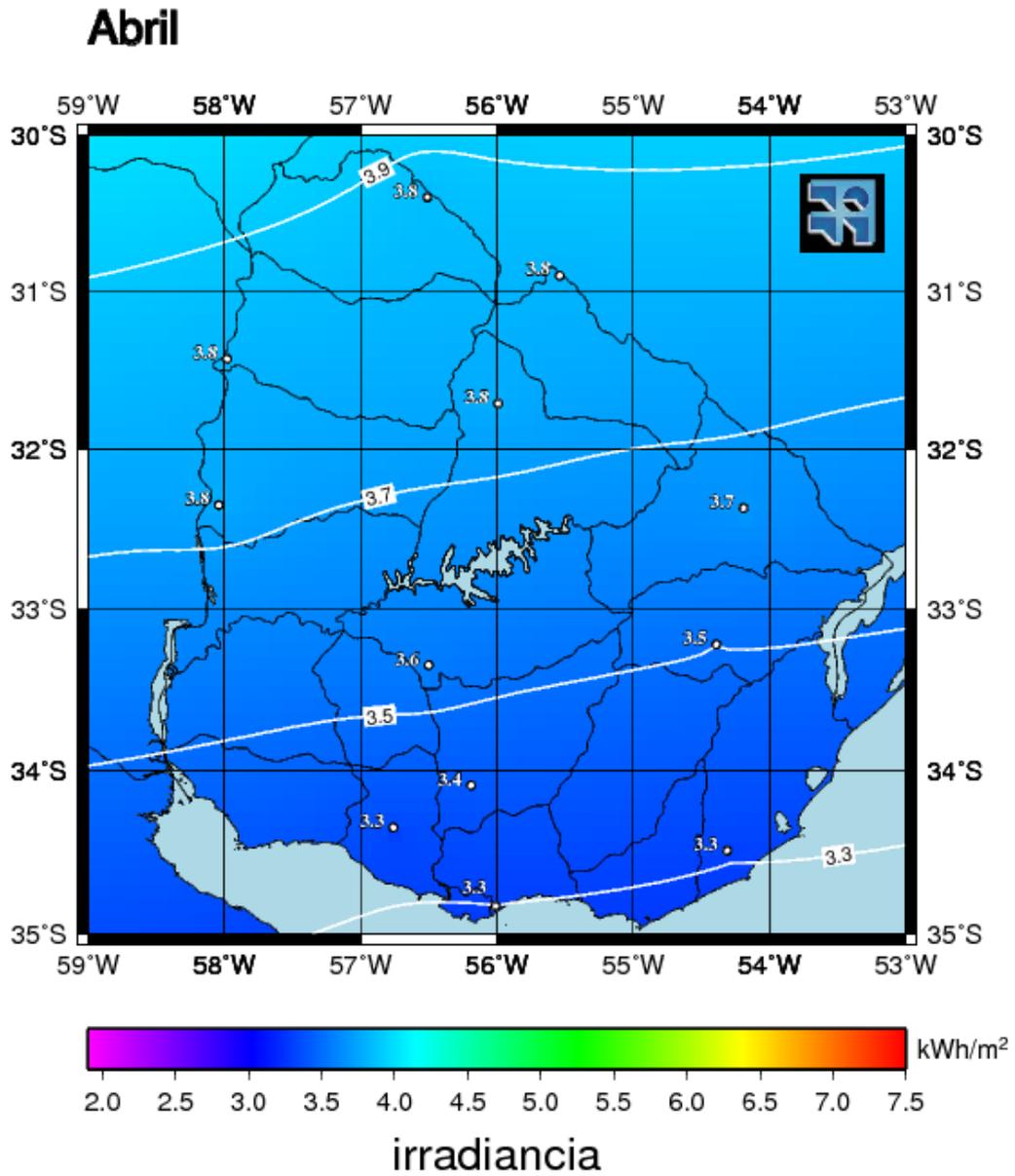


Figura 3.6: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Abril.

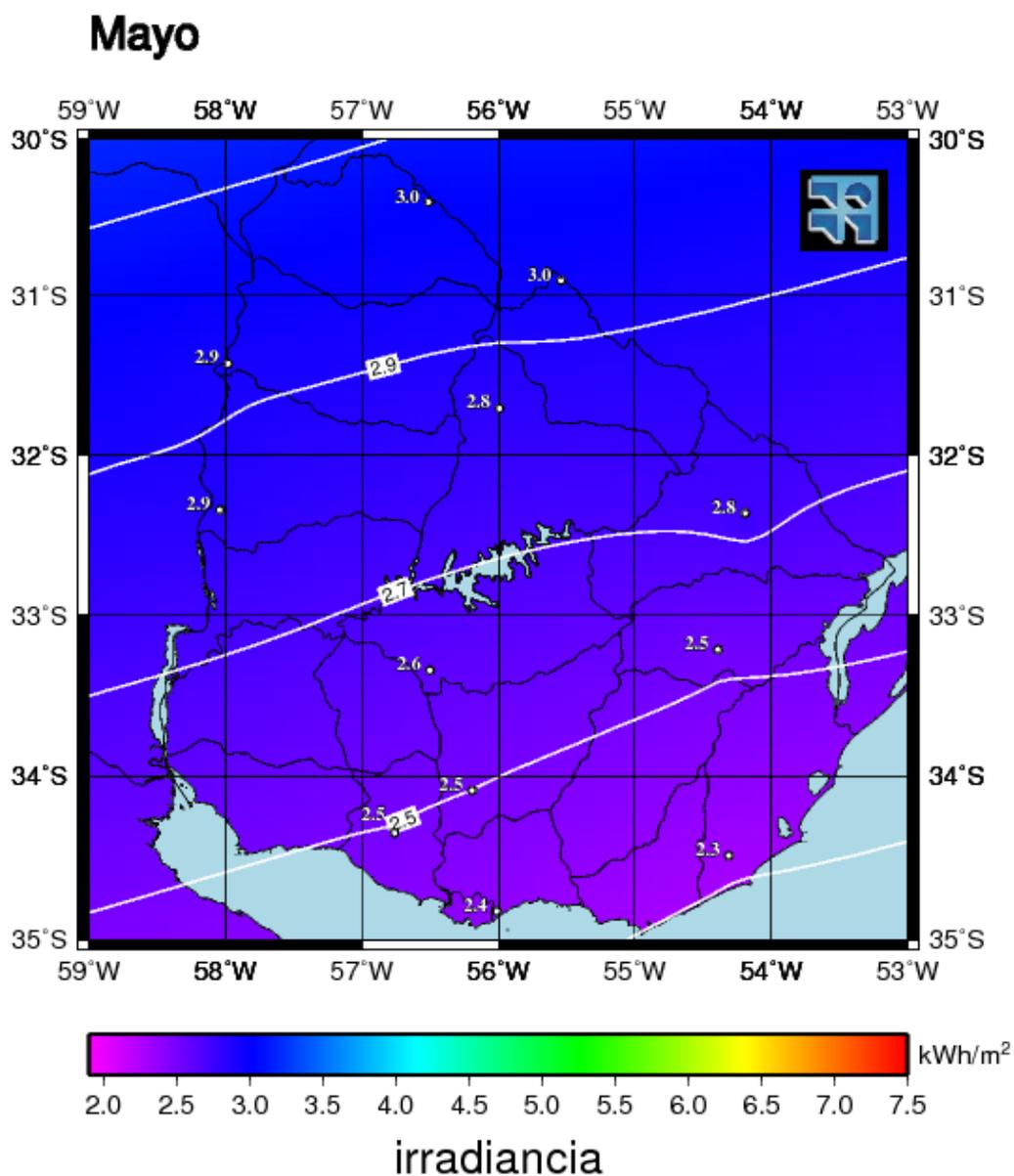


Figura 3.7: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Mayo.

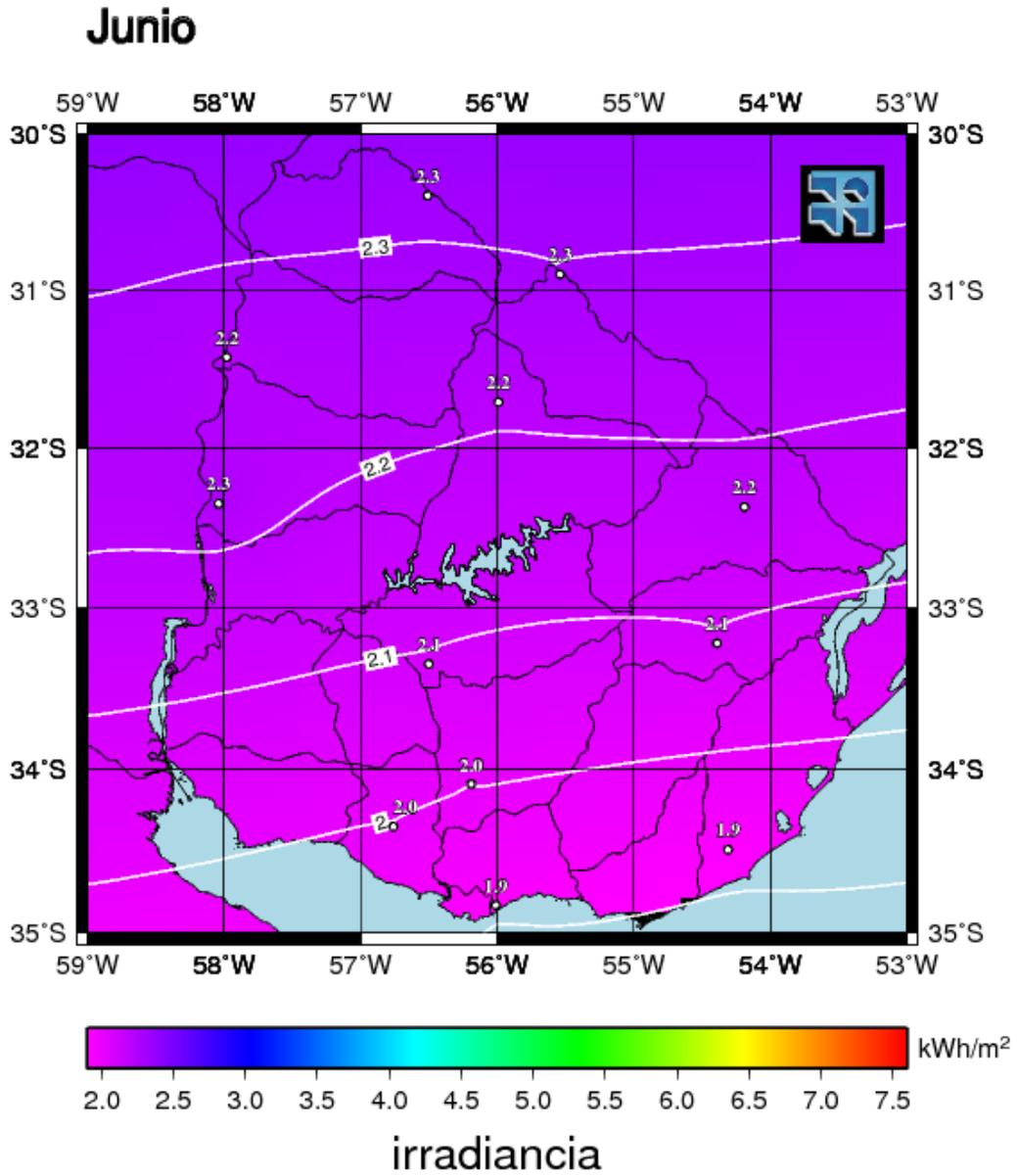


Figura 3.8: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Junio.

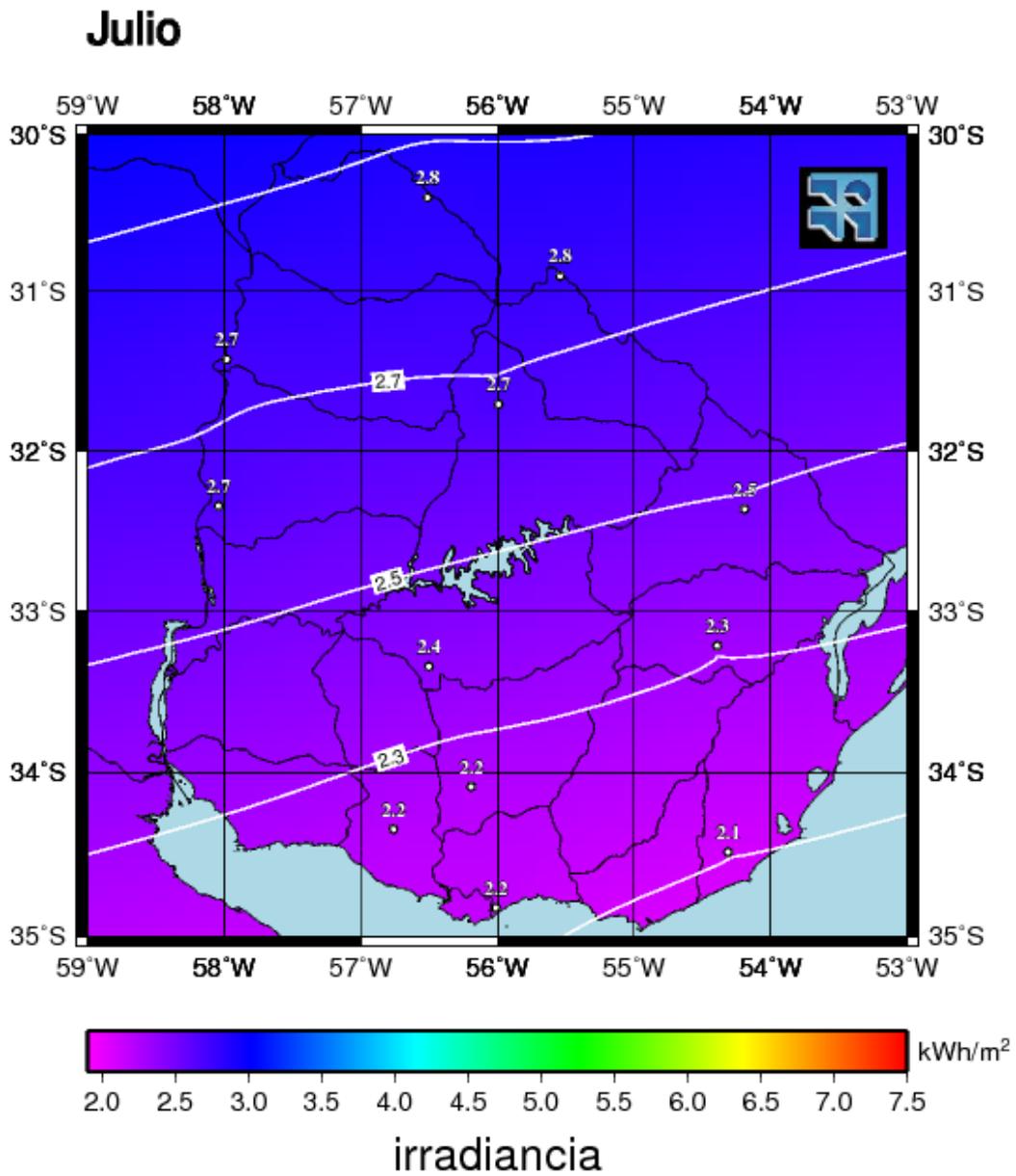


Figura 3.9: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Julio.

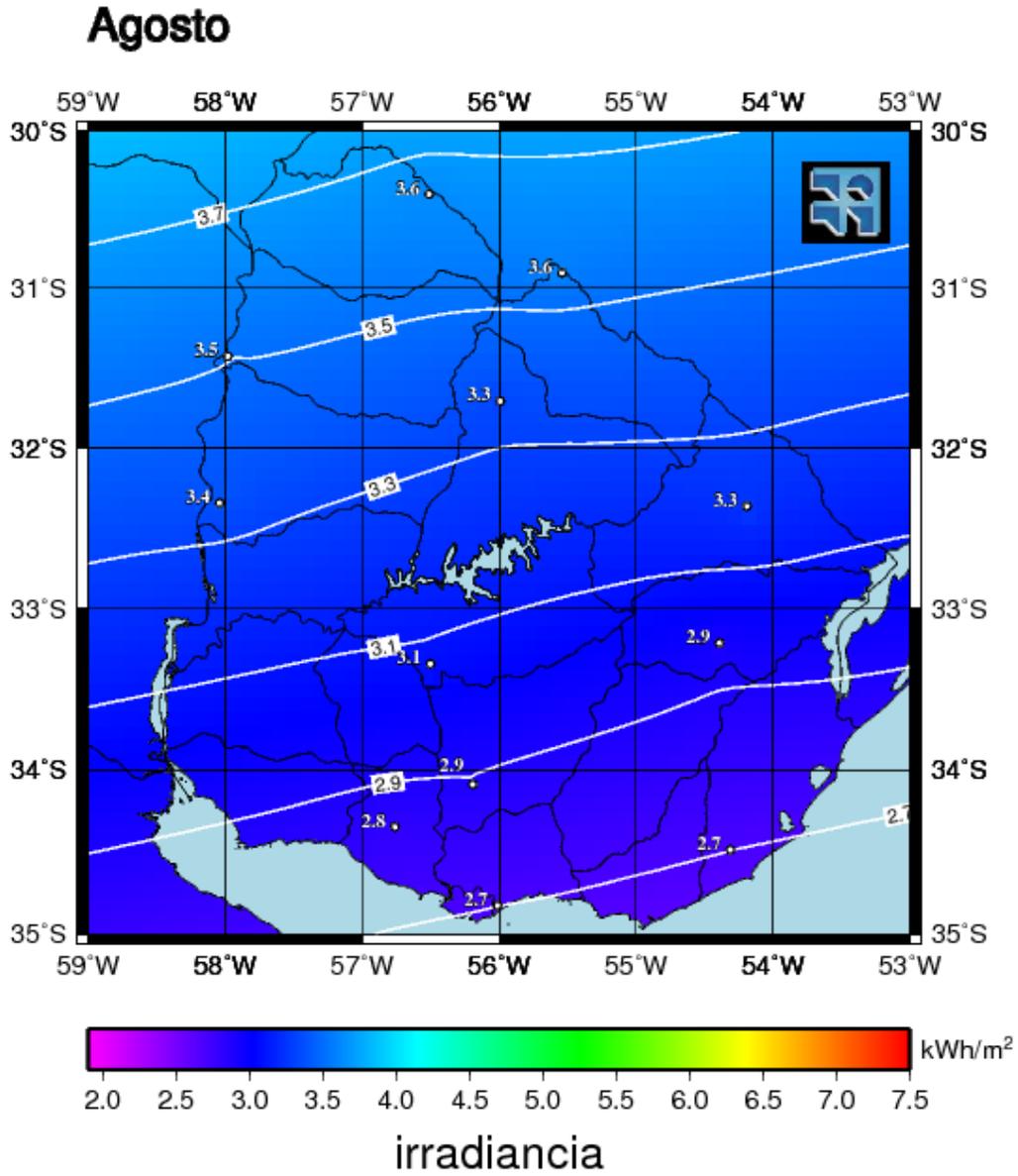


Figura 3.10: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Agosto.

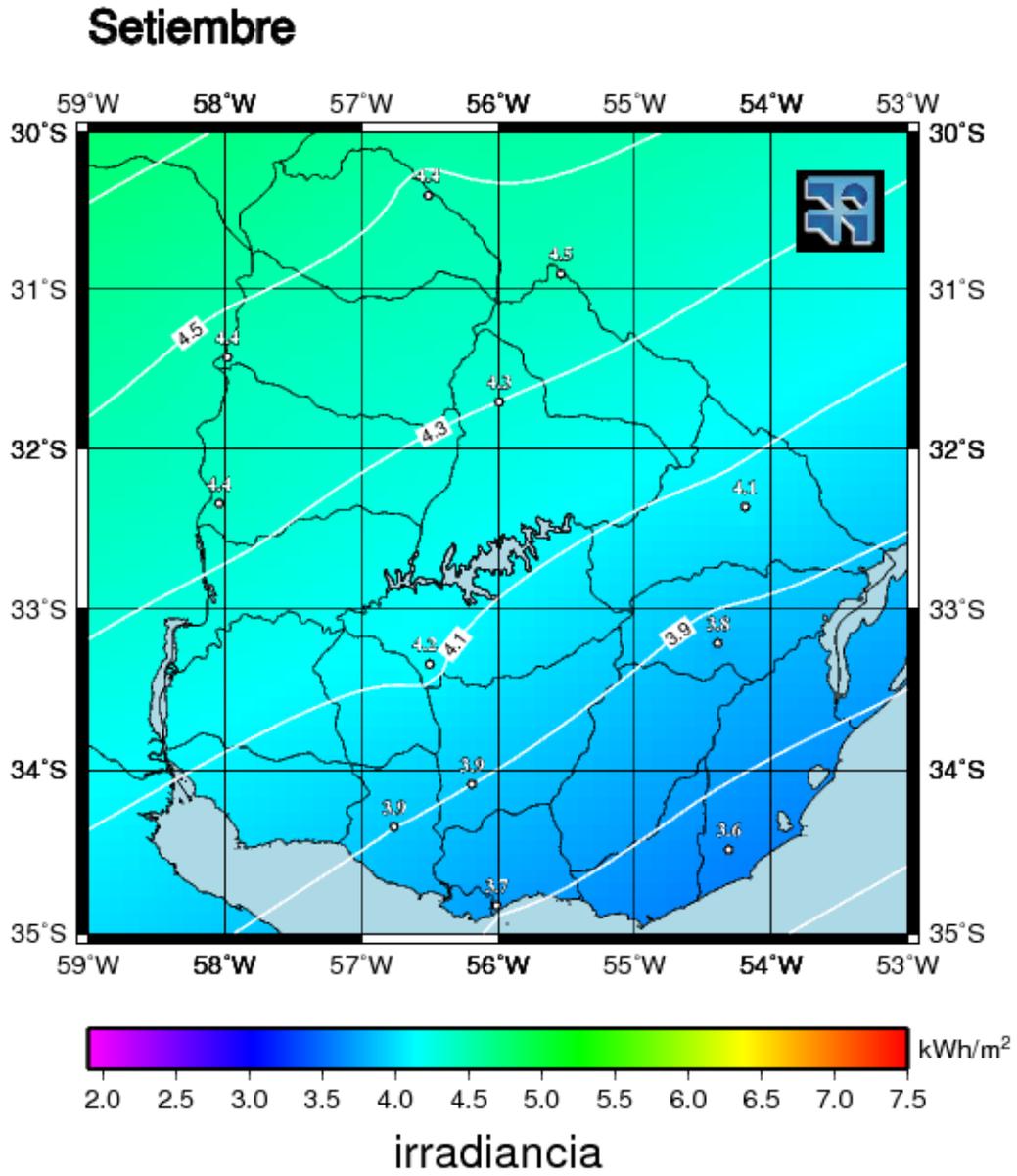


Figura 3.11: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Setiembre.

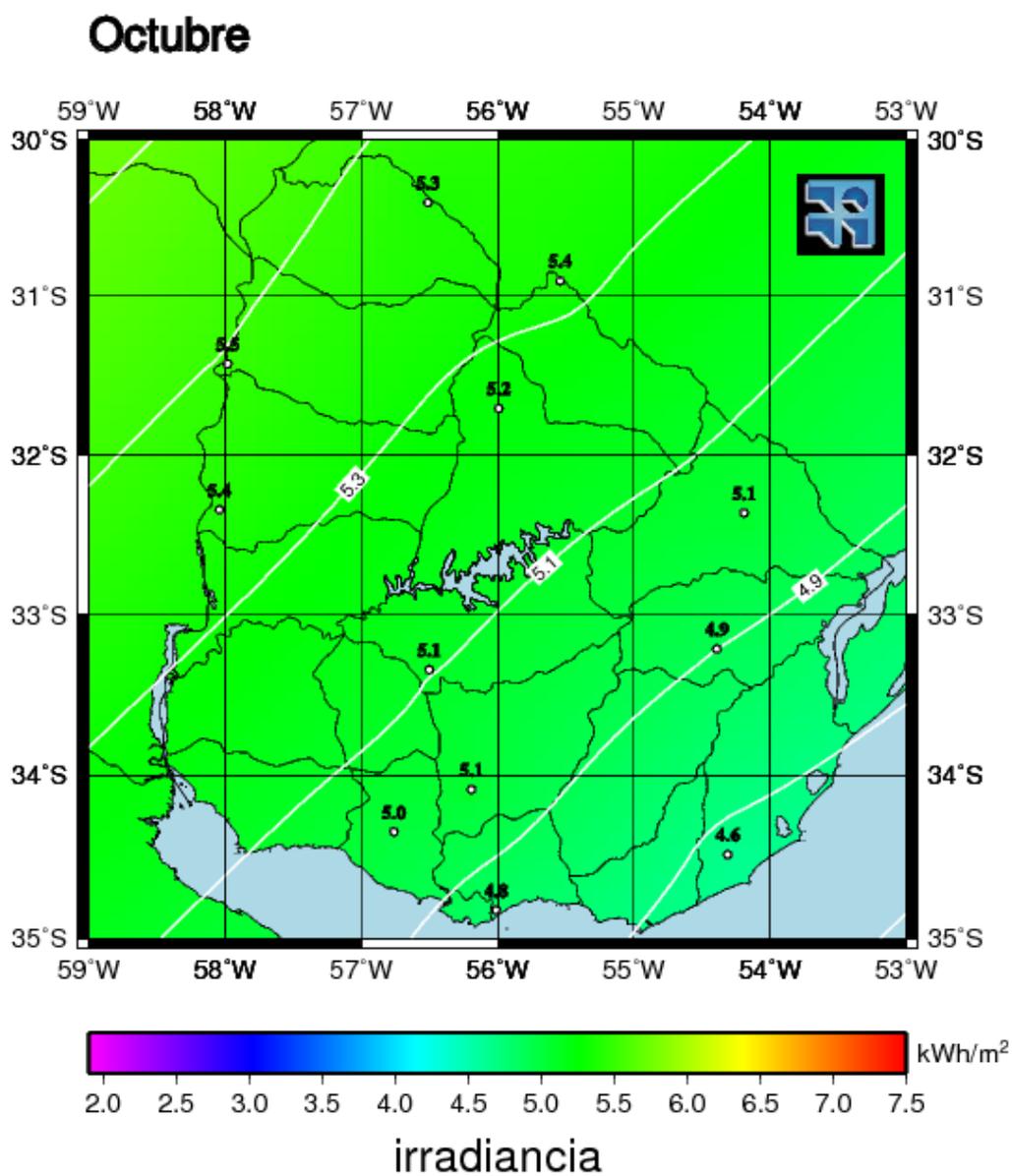


Figura 3.12: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Octubre.

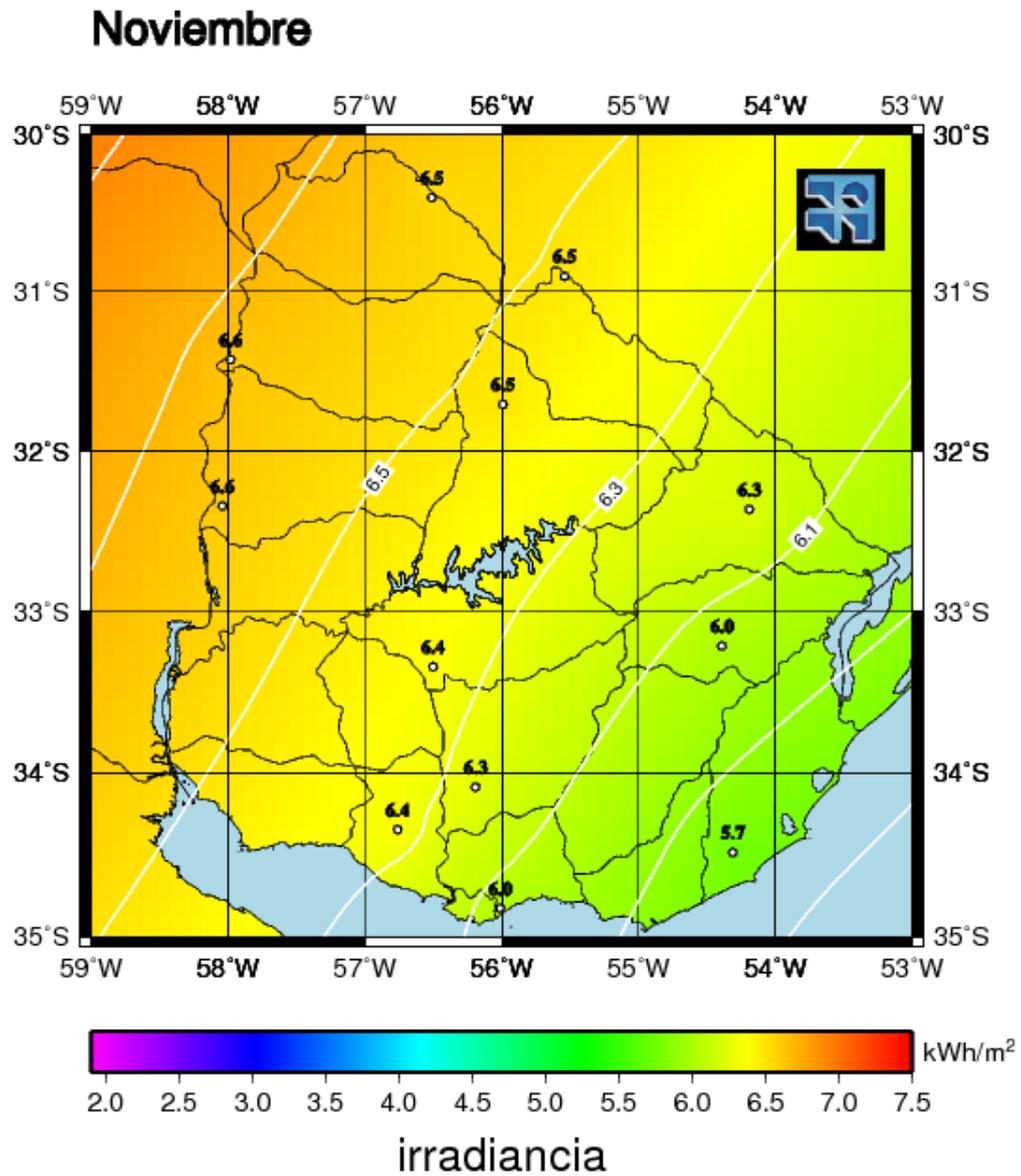


Figura 3.13: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Noviembre.

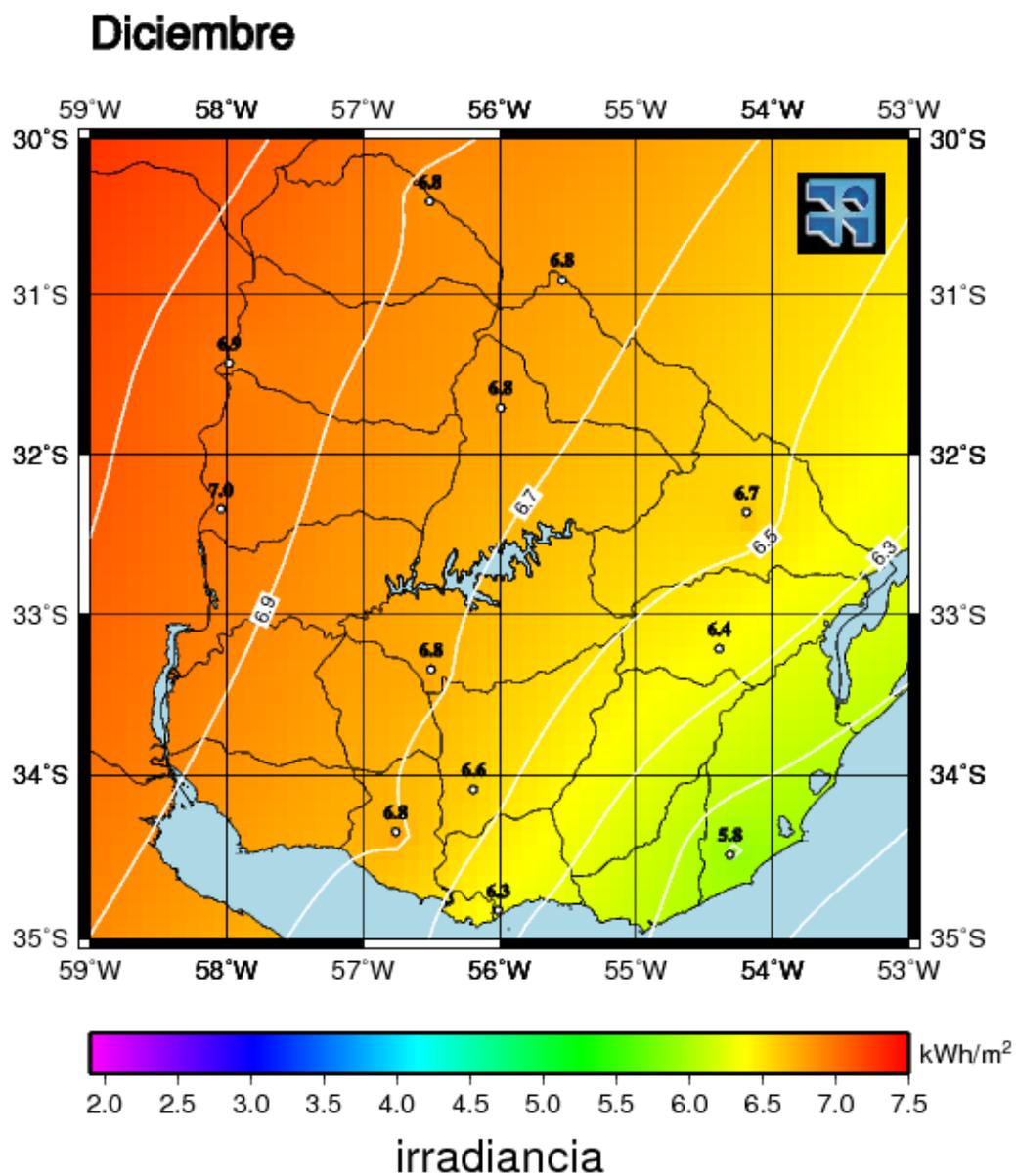


Figura 3.14: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria para el mes de Diciembre.

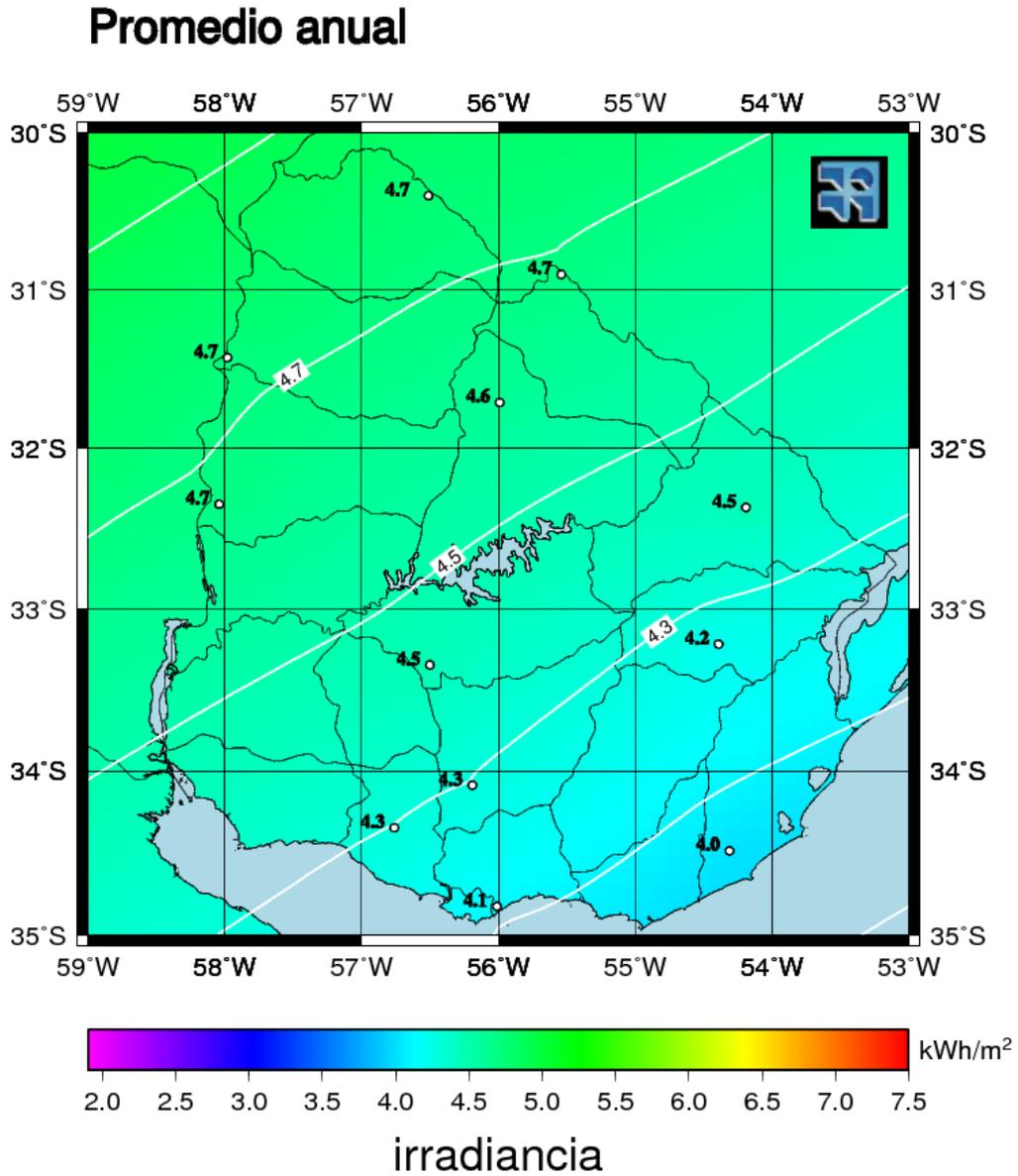


Figura 3.15: Mapa Solar del Uruguay: valores medios de irradiación global diaria promediados en el año.

### 3.3. Análisis de incertidumbre

La estimación de la incerteza asociada a los estimativos finales de irradiación global diaria resulta una tarea compleja, dado que no se dispone de la información necesaria para caracterizar el error de los datos usados como base para este trabajo. Adoptamos una hipótesis conservadora, asignando una incertidumbre  $\delta_N \simeq 1$  hora a todas las medidas de heliofanía diaria. Para todas las medidas de irradiación global diaria adoptamos una incerteza  $\delta_H \simeq 0,5$  kWh/m<sup>2</sup>. Estos valores, que corresponden aproximadamente al 10% del valor diario medio anual, son estimados teniendo en cuenta los metadatos disponibles, en especial sobre los instrumentos utilizados y las condiciones en las cuales se procesaron los datos.

Para estimar como estas incertezas en los datos de base afectan a los coeficientes  $a$  y  $b$  de la correlación entre la heliofanía y la irradiación global, se analizaron los casos de Melilla y La Estanzuela. A partir de la cantidad de días (para cada mes del año) con datos de irradiación  $L_H \gg 1$  y heliofanía  $L_N \gg 1$ , los valores medios,  $\bar{H}$  y  $\bar{N}$ , tendrán una distribución aproximadamente normal (Teorema Central del Límite, [Bev69]) con desviaciones estándar para el mes  $m$  (donde  $m = 1 \dots 12$ ),

$$\sigma_{H,m} = \frac{\delta_H}{\sqrt{L_H}}, \quad \sigma_{N,m} = \frac{\delta_N}{\sqrt{L_N}}. \quad (3.3)$$

A efectos de estimar el error en la regresión lineal, se asigna usualmente todo el error del punto  $(x_m, y_m)$  a la variable dependiente  $y_m$ , reasignando su incerteza como la media cuadrática de las incertezas en ambas variables [Bev69]. Es decir se supone la variable independiente afectada por una incerteza (error efectivo)  $\sigma_m = (\sigma_{x,m}^2 + \sigma_{y,m}^2)^{1/2}$  y se toma el valor de  $x_m$  como exacto. En el caso que nos ocupa la variable dependiente es la irradiación global diaria promedio y el error efectivo, en kWh/m<sup>2</sup>, para el mes  $m$  es

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{H,m}^2 + \left(\frac{\bar{H}_m}{\bar{N}_m}\right)^2 \sigma_{N,m}^2}. \quad (3.4)$$

Utilizando técnicas estándar de propagación de errores se calcula la incidencia de este error efectivo en los coeficientes de la regresión lineal [Bev69]. Resumimos los resultados, para el caso de los parámetros  $a$  y  $b$  para Melilla y La Estanzuela, en el Cuadro 3.4. El error efectivo es, en todos los casos, del orden de 0,05 kWh/m<sup>2</sup> y esto se traduce en las mismas incertezas  $\sigma_a = 0,02$  y  $\sigma_b = 0,03$  para ambos lugares. Asumiremos que estos valores se aplican también a los datos correspondientes a las ubicaciones de Salto-Salto Grande

Mes	La Estanzuela	Melilla
1	0.06	0.06
2	0.06	0.06
3	0.05	0.06
4	0.05	0.06
5	0.04	0.05
6	0.04	0.05
7	0.04	0.05
8	0.05	0.05
9	0.05	0.06
10	0.05	0.06
11	0.06	0.06
12	0.06	0.06
$\sigma_a$	0.02	0.02
$\sigma_b$	0.03	0.03

Cuadro 3.4: Error efectivo mensual (en  $\text{kWh}/m^2$ ) estimado a partir de la Ec. (3.4). Las dos últimas filas muestran como se propaga a incertezas en los parámetros (adimensionados)  $a$  y  $b$ , para las ubicaciones Melilla-Carrasco y La Estanzuela.

serie irradiación	serie heliofanía	a	b
ZUELA	Estanzuela (INIA)	$0,21 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,03$
Melilla	Carrasco (DNM-3)	$0,22 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,03$
Livramento	Rivera (DNM-3)	$0,28 \pm 0,02$	$0,45 \pm 0,03$
Salto Grande	Salto (INIA)	$0,23 \pm 0,02$	$0,49 \pm 0,03$

Cuadro 3.5: Incertezas (calculadas y asignadas) para los coeficientes  $a$  y  $b$  (Cuadro 3.1) para las cuatro ubicaciones consideradas.

y Rivera-Livramento. Por lo tanto, los valores de los parámetros  $a$  y  $b$  se suponen afectados por las incertidumbres indicadas en el Cuadro 3.5.

Para estimar como afecta la incerteza en los coeficientes  $a$  y  $b$  usados como base para la interpolación a los estimativos de irradiación global en cada ubicación, seguiremos el siguiente procedimiento. Obtendremos valores extremos de irradiación, para cada mes y cada localidad, usando los valores extremos de los coeficientes y de la heliofanía. A partir de ellos, estimamos la incerteza en el valor de irradiación global.

Definimos por lo tanto, los valores extremos

$$a_{\uparrow} = a + \sigma_a \quad b_{\uparrow} = b + \sigma_b \quad N_{\uparrow,m} = \bar{N}_m + \sigma_{N,m} \quad (3.5)$$

$$a_{\downarrow} = a - \sigma_a \quad b_{\downarrow} = b - \sigma_b \quad N_{\downarrow,m} = \bar{N}_m - \sigma_{N,m} \quad (3.6)$$

A partir de estos valores extremos, trabajando para cada mes  $m$ , utilizamos la Ec. (3.2) para estimar los valores extremos de irradiación global diaria media,

$$H_{\uparrow,m} = \bar{H}_{0,m} \left( a_{\uparrow} + b_{\uparrow} \frac{N_{\uparrow,m}}{\bar{N}_{0,m}} \right) \quad (3.7)$$

$$H_{\downarrow,m} = \bar{H}_{0,m} \left( a_{\downarrow} + b_{\downarrow} \frac{N_{\downarrow,m}}{\bar{N}_{0,m}} \right) \quad (3.8)$$

donde la dependencia espacial esta implícita. A partir de éstos valores extremos, estimamos la incerteza  $\Delta_{H,m}$  en la irradiación global como

$$\Delta_{H,m} \equiv \frac{1}{2} (H_{\uparrow,m} - H_{\downarrow,m}). \quad (3.9)$$

Las incertezas obtenidas para cada mes en cada localidad, se indican en el Cuadro 3.6. Examinando estos valores, que varían entre 0,4 y 0,9 kWh/m<sup>2</sup> se ve claramente que la variación estacional es mucho más relevante que la variación espacial. En la penúltima fila del Cuadro 3.6 se muestra la incertezas promedio para cada mes. Estas incertidumbres pueden expresarse también en términos relativos, como un porcentaje del valor estimado para cada mes en cada localidad,  $\bar{H}_m$ ,

$$\varepsilon_m = 100 \times \frac{\Delta_{H,m}}{\bar{H}_m}. \quad (3.10)$$

Estos errores relativos medios basados se presentan, para cada mes, en la última fila del Cuadro 3.6. Como es usual, los errores relativos varían desde 14% para los meses de verano y se incrementan hasta un 19% en los meses de invierno, debido a los menores registros absolutos. El promedio mensual de  $\varepsilon_m$  es  $\simeq 16\%$ , un valor que puede tomarse como un indicador global de la incertidumbre de los estimativos de irradiación, teniendo en cuenta que las incertezas dependen del mes de año y son diferentes para cada localidad.

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Salto	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
Paysandú	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
Carrasco	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
San José	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
Florida	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
Durazno	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
Rocha	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
Treinta y Tres	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9
Melo	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
Rivera	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
Tacuarembó	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	0.9	0.9
Artigas	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.9
<b>Promedio</b>	<b>0.9</b>	<b>0.8</b>	<b>0.7</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>0.9</b>	<b>0.9</b>
$\varepsilon_m$ (%)	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>16</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>14</b>

Cuadro 3.6: Incerteza estimada,  $\Delta_{H,m}$ , a partir de la Ec. (3.9) para cada mes del año y para cada estación, en kWh/m<sup>2</sup>. La penúltima fila muestra los promedios sobre todas las localidades. La última fila muestra los errores relativos asociados a estos promedios, definidos en la Ec. (3.10).

### 3.4. Validación

Para el proceso de validación se han seguido dos caminos diferentes. En primer lugar, se comparan los resultados obtenidos con datos disponibles para la región. Para este fin fueron reservadas cinco series de irradiación. En segundo lugar, se comparan los resultados obtenidos con los resultados de la NASA basados en un modelo de atmósfera y datos de imágenes satelitales.

#### Comparación con datos regionales

Los datos correspondientes a cinco estaciones regionales, indicadas con “V” en el Cuadro 2.4 han sido comparados, mes a mes, con los valores inferidos para cada localidad del Mapa Solar correspondiente. En el Cuadro 3.7 se registran estos valores de irradiación media. Las Figs. 3.16 y 3.17 muestran el error relativo (%) para cada mes para las cinco localidades, tomando como base el valor estimado. Los desvíos positivos indican valores medidos superiores a los estimados, los desvíos negativos indican valores medidos menores a los estimados. El mayor error relativo es de 20% y se observa para Bagé en el mes de abril. En general las diferencias están debajo de 15% y en tres localidades se observan meses donde coinciden el estimativo y los registros.

localidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Jaguarão	6.7	5.9	4.9	3.8	2.9	2.3	2.7	3.4	4.2	5.1	6.3	6.6
Bagé	6.4	5.6	4.6	3.6	2.7	2.1	2.4	3.1	3.9	4.9	6.0	6.4
M. Caseros	7.1	6.3	5.1	3.9	3.1	2.4	2.9	3.7	4.6	5.6	6.7	7.0
C. Uruguay	7.0	6.1	4.9	3.7	2.8	2.2	2.6	3.3	4.4	5.4	6.6	7.0
Galeguaychú	7.0	6.1	4.8	3.7	2.8	2.2	2.6	3.2	4.3	5.4	6.6	7.0

Cuadro 3.7: Valores medios de irradiación diaria (media mensual) estimados a partir del Mapa Solar para las localidades indicadas.

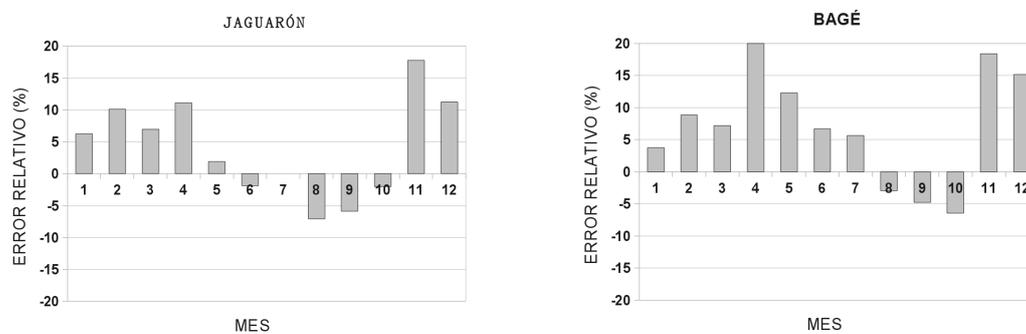


Figura 3.16: Error relativo entre los datos de irradiación media diaria (Cuadro 2.4) y los valores estimados (Cuadro 3.7) para las localidades Brasileñas de Jaguarão y Bagé. Los datos son del INMET-Brasil.

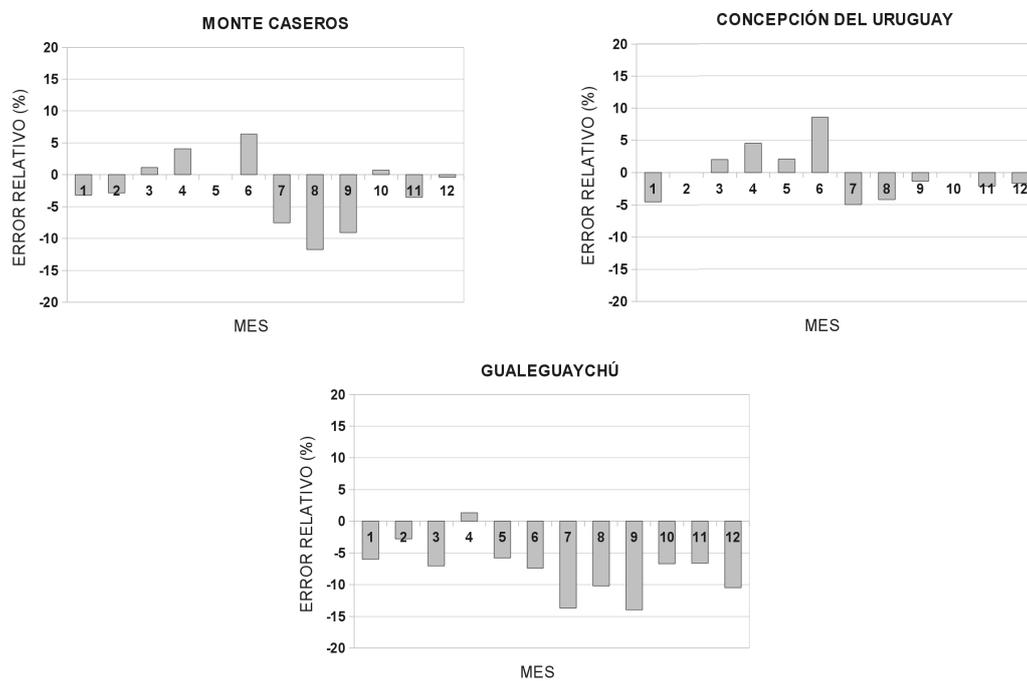


Figura 3.17: Error relativo entre los datos de irradiación media diaria (Cuadro 2.4) y los valores estimados (Cuadro 3.7) para las localidades argentinas de Monte Caseros, Concepción y Gualeguaychú. Los datos son de la Red Solarimétrica Argentina.

### Comparación con resultados basados en datos de satélite

Otra forma de validar los resultados obtenidos es compararlos con estimativos basados en metodologías, datos y modelos completamente diferentes. Una alternativa para estimar irradiación global en superficie esta basada en el uso de datos satelitales para estimar la nubosidad. Este tipo de metodologías han permitido el desarrollo de herramientas y servicios de información en línea a través de los cuales se accede a estimativos de irradiación solar para extensos territorios. A partir de este dato, con un modelo físico de los procesos de dispersión y absorción de la radiación en la atmósfera es posible obtener estimativos de irradiación incidente en el suelo.

Uno de estos modelos es el UM-SBR desarrollado por Pinker y Lazlo en la Universidad de Maryland, EEUU [PL92] y usado en la base de datos del Atmospheric Science Data Center de la Agencia espacial norteamericana NASA/SSE. A través de la implementación en línea de este modelo<sup>3</sup> se pueden obtener estimativos de irradiación global media diaria, mes a mes, con una resolución espacial de un grado en latitud y en longitud, lo cual corresponde a una resolución espacial  $d = R\theta \approx 111$  km, donde  $R = 6371$  km es el radio medio terrestre y  $\theta = \pi/180$  radianes. Los promedios están basados en datos sobre un período de 23 años (Junio 1983 a Junio 2006) y el modelo esta ajustado a las condiciones de las planicies de Winsconsin. Estimativos de medias mensuales de irradiación basados en este modelo fueron contrastados con datos reales para varias localidades Argentinas, encontrándose errores rms entre 4 y 25 % [GG99].

Hemos utilizado este modelo para generar estimativos de irradiación global diaria promedio para cada mes, sobre la grilla de ubicaciones mostradas en la Fig. 3.18. Los valores estimados se indican en el Cuadro 3.8. A partir de estos estimativos es posible interpolar, calcular isolíneas de irradiación y obtener la variación espacial de la irradiación media sobre el territorio uruguayo que implica este modelo. Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran los mapas de irradiación global para cada mes del año.

De acuerdo al modelo UMB-SR, el valor medio anual de irradiación global promediado sobre todo el territorio es de 4.6 kWh/m<sup>2</sup>. El correspondiente valor del Mapa Solar del Uruguay es de 4.4 kWh/m<sup>2</sup>. Dado que las incertezas, discutidas en la sección anterior, son mayores a 0.4 kWh/m<sup>2</sup> el acuerdo entre ambos valores parece muy bueno.

Dado que la mayor variación es la estacional, se puede hacer un análisis mes a mes de las diferencias  $\Delta \equiv \bar{H}_{NASA} - \bar{H}_{MSU}$  de ambos modelos. En el Cuadro 3.9 se indican estas diferencias y se observa que son siempre inferiores a 0.3 kWh/m<sup>2</sup>, por lo cual concluimos que ambos modelos son compatibles

<sup>3</sup>Ver <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>

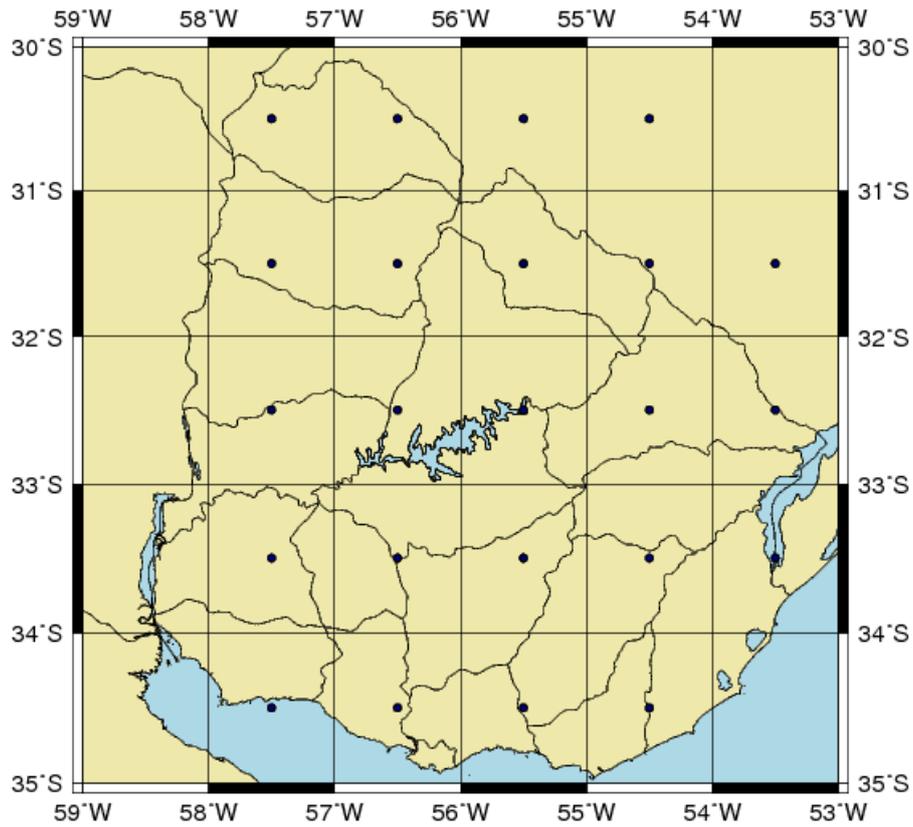


Figura 3.18: Ubicaciones para las cuales se estimó la irradiación media diaria a partir del modelo NASA. Los sitios distan entre sí un grado de latitud y un grado en longitud, correspondiente a una separación entre puntos vecinos de unos 111 km. Las coordenadas figuran en el Cuadro 3.8.

LAT	LON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	anual
-30.5	-57.5	6.8	5.9	5.1	3.7	3.1	2.5	2.9	3.7	4.6	5.4	6.5	6.9	4.8
-31.5	-57.5	6.9	5.9	5.1	3.7	3.0	2.5	2.8	3.6	4.6	5.5	6.5	6.9	4.7
-32.5	-57.5	7.0	5.9	5.1	3.7	2.9	2.4	2.7	3.5	4.6	5.4	6.5	6.9	4.7
-33.5	-57.5	7.0	5.9	5.0	3.7	2.8	2.3	2.5	3.4	4.5	5.4	6.5	7.0	4.7
-34.5	-57.5	6.9	6.0	4.9	3.6	2.7	2.2	2.5	3.3	4.5	5.4	6.5	7.0	4.6
-30.5	-56.5	6.8	5.9	5.0	3.8	3.1	2.5	2.9	3.7	4.6	5.4	6.5	6.9	4.8
-31.5	-56.5	6.9	5.9	5.0	3.7	3.0	2.5	2.8	3.5	4.5	5.4	6.5	6.9	4.7
-32.5	-56.5	6.9	5.9	5.0	3.7	2.9	2.4	2.7	3.4	4.5	5.4	6.5	6.9	4.7
-33.5	-56.5	6.9	5.9	5.0	3.6	2.8	2.3	2.5	3.3	4.4	5.3	6.5	7.0	4.6
-34.5	-56.5	6.9	5.8	4.8	3.6	2.7	2.2	2.4	3.2	4.3	5.2	6.3	6.9	4.5
-30.5	-55.5	6.7	5.8	5.0	3.7	3.1	2.5	2.8	3.6	4.5	5.4	6.4	6.9	4.7
-31.5	-55.5	6.7	5.7	4.9	3.7	3.0	2.4	2.7	3.5	4.4	5.4	6.4	6.9	4.6
-32.5	-55.5	6.8	5.7	4.9	3.6	2.9	2.3	2.6	3.3	4.4	5.3	6.4	6.9	4.6
-33.5	-55.5	6.9	5.8	4.9	3.6	2.8	2.3	2.5	3.3	4.4	5.3	6.4	7.0	4.6
-34.5	-55.5	6.9	5.8	4.8	3.5	2.7	2.2	2.4	3.1	4.3	5.2	6.3	6.9	4.5
-30.5	-54.5	6.6	5.7	4.9	3.7	3.1	2.5	2.8	3.6	4.4	5.3	6.4	6.9	4.6
-31.5	-54.5	6.6	5.7	4.9	3.7	2.9	2.4	2.7	3.4	4.3	5.3	6.4	6.9	4.6
-32.5	-54.5	6.7	5.7	4.9	3.7	2.9	2.3	2.6	3.3	4.3	5.3	6.4	6.9	4.6
-33.5	-54.5	6.7	5.7	4.8	3.6	2.8	2.3	2.5	3.2	4.3	5.2	6.3	6.9	4.5
-34.5	-54.5	6.7	5.7	4.7	3.5	2.6	2.1	2.3	3.1	4.2	5.1	6.2	6.8	4.4
-31.5	-53.5	6.5	5.6	4.8	3.7	2.9	2.4	2.6	3.4	4.3	5.2	6.2	6.9	4.5
-32.5	-53.5	6.6	5.6	4.8	3.6	2.9	2.3	2.6	3.3	4.2	5.1	6.2	6.8	4.5
-33.5	-53.5	6.6	5.6	4.7	3.5	2.7	2.2	2.4	3.1	4.2	5.1	6.1	6.7	4.4
		6.8	5.8	4.9	3.6	2.9	2.3	2.6	3.4	4.4	5.3	6.4	6.9	4.6

Cuadro 3.8: Estimadores de irradiación media diaria (en kWh/m<sup>2</sup>) para 23 puntos que cubren el territorio nacional obtenidos del modelo NASA. Las ubicaciones se muestran en la Fig. 3.18. La última columna indica las medias anuales para cada ubicación y la última fila valores promedio sobre todas las ubicaciones.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	anual
MSU	6.7	5.8	4.7	3.6	2.7	2.1	2.5	3.2	4.1	5.1	6.3	6.6	4.4
UM-SBR	6.8	5.8	4.9	3.6	2.9	2.3	2.6	3.4	4.4	5.3	6.4	6.9	4.6
$\Delta$	0.1	0.0	0.2	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2

Cuadro 3.9: Se reproducen, para cada mes, los estimativos de irradiación global diaria promediada en el territorio para el Mapa Solar del Uruguay, MSU (Cuadro 3.3), y para el modelo UM-SBR usado por NASA (Cuadro 3.8). La tercera fila muestra la diferencia absoluta  $\Delta \equiv \bar{H}_{NASA} - \bar{H}_{MSU}$  en kWh/m<sup>2</sup>. Las diferencias están por debajo de la incertezas asociadas, por lo que ambos modelos son consistentes entre sí.

dentro del margen de error de los estimativos. Finalmente, una inspección de las Figs. 3.19 y 3.20 que muestran la distribución territorial de la irradiancia global media para cada mes del año en el modelo UM-SBR, permite ver que la rotación de las isolíneas de irradiación constante también aparece en este modelo. Se observa una tendencia de las mismas a alinearse con los paralelos en invierno, rotando en sentido antihorario hasta alinearse con la dirección SW-NE en verano. La rotación aparece más acentuada en el modelo UM-SBR. Teniendo en cuenta que ambos modelos se basan en metodologías, períodos temporales y conjuntos de datos completamente diferentes, llegar a valores consistentes entre sí y a las mismas conclusiones cualitativas es un elemento de validación importante.

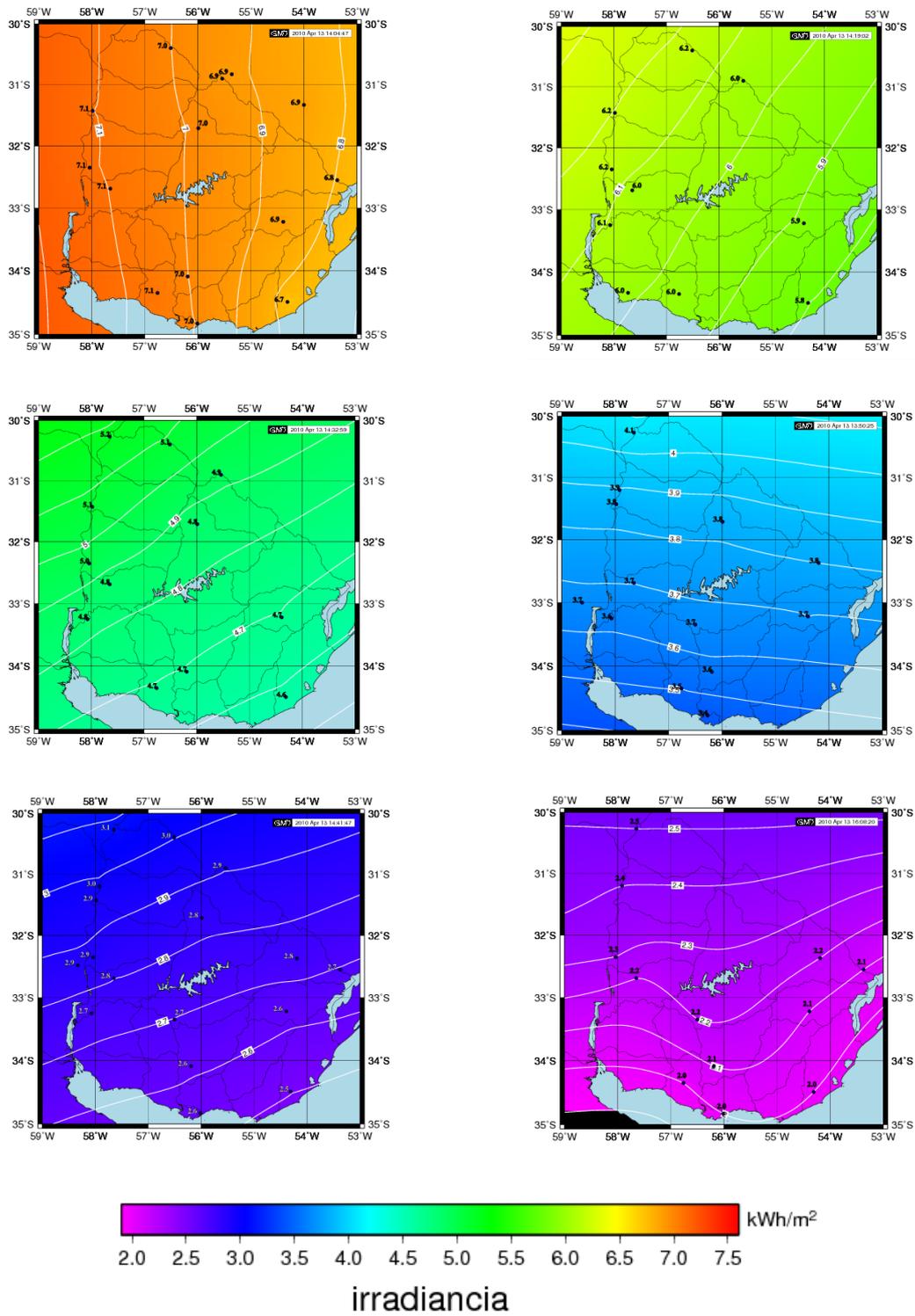


Figura 3.19: Estimativos de irradiancia media diaria basados en el modelo UMB-SR usado por NASA para los meses de Enero a Junio.

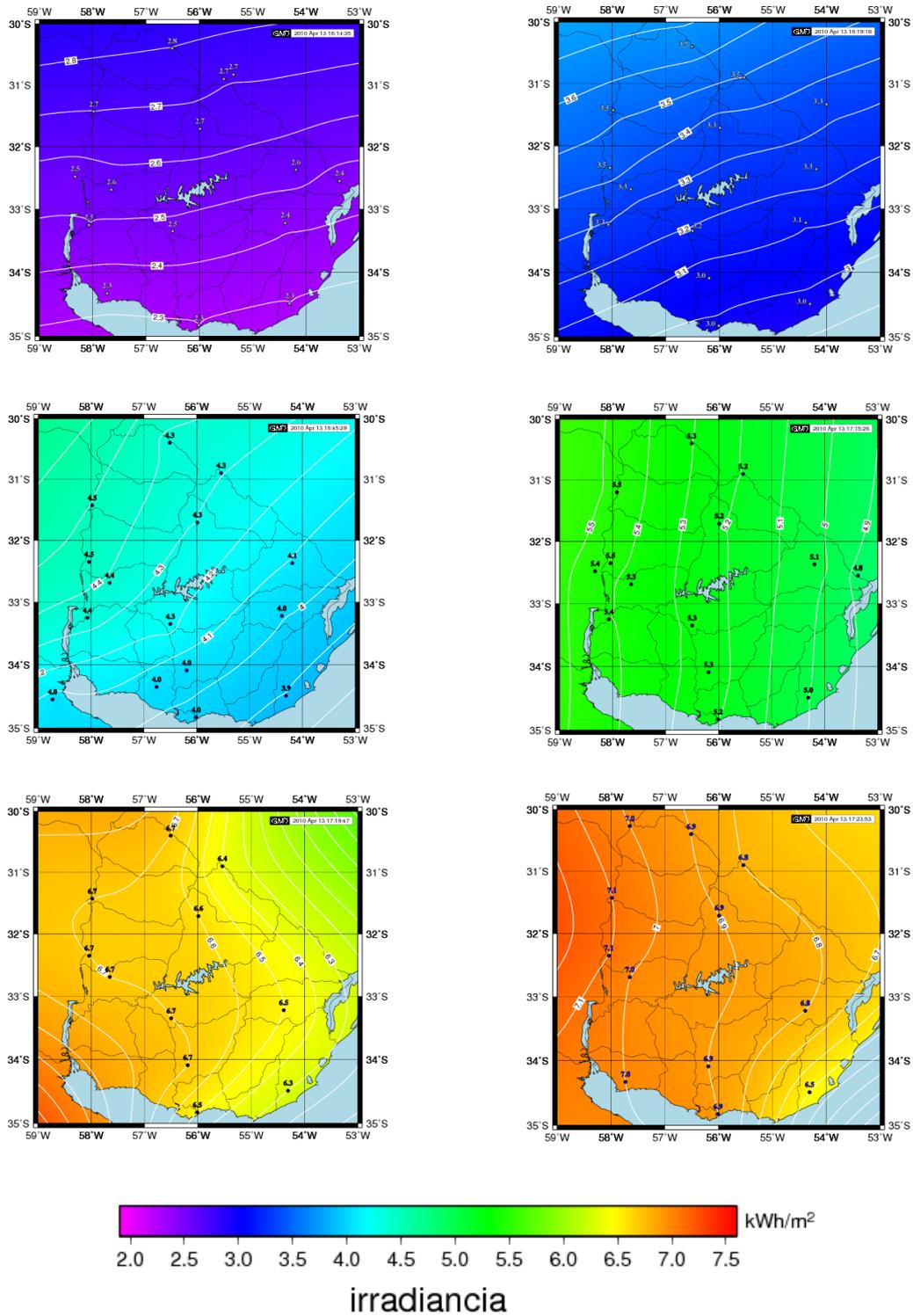


Figura 3.20: Estimativos de irradiancia media diaria basados en el modelo UMB-SR usado por NASA para los meses de Julio a Diciembre.

## Capítulo 4

# Comentarios Finales

En este trabajo se describen los pasos seguidos para elaborar la primer versión del Mapa Solar del Uruguay. Se analizaron cuatro series de irradiación y numerosas series de heliofanía (horas de sol) a nivel nacional. Se utilizaron dos series de irradiación nacionales y dos regionales como base para el mapa solar. La metodología seguida consistió en el uso de la correlación de Armstrong-Prescott entre los promedios normalizados de irradiación y heliofanía. A través de la misma, es posible estimar irradiación en lugares donde se cuenta con medidas de heliofanía. El procedimiento seguido implica analizar la variación espacial de los coeficientes de correlación y luego utilizar coeficientes locales para estimar la irradiación a partir de la heliofanía.

Se realizó una serie de mapas mensuales y uno anual, en los cuales se codificó en color la información sobre el estimativo de irradiación diaria promedio para cada punto del territorio, trabajando con una resolución de entre 10 y 30 km. Además, se trazaron isóneas de irradiación media en todos los casos. A partir de un análisis de incertidumbre, se estima que la incerteza en los valores del Mapa Solar varía entre el 14 y 19 % según el mes del año, con los errores relativos mayores asociados a los meses de invierno (con menor irradiación media). Los valores medios de irradiación global estimados para el territorio nacional varían entre  $2,1 \pm 0,4$  kWh/m<sup>2</sup> en Junio y  $6,7 \pm 0,9$  kWh/m<sup>2</sup> para Enero. El promedio anualizado es de  $4,4 \pm 0,7$  kWh/m<sup>2</sup>. Estos resultados fueron comparados con los promedios diarios correspondientes a cinco estaciones de la región cercanas a nuestras fronteras, pero ubicadas en Argentina y Brasil y se encontró que los estimativos son consistentes con las mediciones, dentro de estos márgenes de error.

Por otra parte, usando el modelo UM-SBR se puede estimar a partir de información satelital y de un modelo físico, la irradiación global diaria promedio para varios puntos de nuestro territorio. Partiendo de los datos generados con este modelo para una red de puntos que distan unos 110 km

entre si, se realizó un mapa solar basado en información satelital a los efectos de compararlo con el obtenido a partir de medidas en tierra. Se obtuvo una muy buena concordancia entre ambos estimativos, dentro del margen de error de ambos modelos.

La metodología utilizada es la misma que se ha usado para elaborar los primeros mapas solares en países vecinos [GG98b, GG98a, TFL<sup>+</sup>97, Tib04] y los resultados obtenidos son consistentes con los de estos primeros trabajos. Sin embargo, los márgenes de error que resultan de esta metodología son relativamente grandes. En la última década se han impuesto metodologías alternativas para estimar radiación solar a partir de información obtenida de imágenes de satélite. El radiómetro del satélite mide la irradiancia reflejada por la capa de nubes y por la superficie en diferentes bandas espectrales o canales. En el canal visible, el agua, siendo un un buen absorbente de la radiación, refleja poco y aparece oscura. En general, para las áreas de tierra, el albedo (en ausencia de nieve) es bastante menor que el de las nubes, lo cual lo hace un buen indicador del tipo la cobertura nubosa asociada a cada pixel de la imagen. Para cada pixel, puede complementarse esta información – dependiendo del modelo elegido – con la de los canales infrarrojo (IR) o ultravioleta (UV). Estas metodologías requieren de un modelo (físico o estadístico) que vincule la irradiancia detectada por el satélite (o alguna cantidad derivada derivada de la misma, como el albedo) con la irradiancia incidente en el suelo [MNR93a, MNR93b]. Los modelos estadísticos deben ser calibrados y controlados a partir de medidas en tierra. Los modelos físicos deben ser puestos a puntos y luego controlados en sus márgenes de error, también a partir de medidas de irradiación en tierra. La resolución espacial y temporal aportada por estos métodos es grande ya que se trabaja con grillas de pocos km de lado y se cuenta con datos diariamente a intervalos menores a una hora. En la región, Brasil muestra un importante grado de desarrollo en el tema a través del trabajo de J.C. Ceballos del Centro de Pesquisas Espaciales (CPTEC/INPE/MCT) [CM97, CBS04, CB04] y en Argentina este mismo investigador ha participado de varios trabajos sobre la aplicación de estas metodologías [CBG05, CB08, Ceb09]. En Uruguay, no se ha trabajado hasta el momento con modelos que permitan el uso de datos satelitales para estimar la irradiación global a nivel de suelo. Este es claramente un camino a seguir para lograr una nueva versión del Mapa Solar del Uruguay, con mayor resolución espacial y menores márgenes de error.

Por otro lado, tanto si la metodología usada se basa en datos satelitales, como si se utiliza la metodología más tradicional, basada en la correlación de Armstrong-PreScott, es esencial contar con medidas de irradiación de calidad controlada con una adecuada distribución en el territorio nacional. Los primeros pasos en esta dirección ya se están dando en el marco del Convenio

entre la Facultad de Ingeniería y la DNETN/MIEM, mediante el cual esta prevista la instalación de 3 estaciones de medida remotas en el interior del país equipadas con piranómetros Kipp & Zonen CMP 6. La primera de estas estaciones, en Las Brujas, Canelones, ya se encuentra en funcionamiento desde hace tres meses. Siguiendo estos primeros pasos, se tiene previsto instalar más sensores en los próximos años.

## Agradecimientos

Los siguientes individuos e instituciones han colaborado directa o indirectamente con este trabajo, aportando RRHH, datos, financiamiento, uso de equipamientos e instalaciones o asesoramiento:

- Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear, DNETN/MIEM
- PEDECIBA – Física
- UTE, Gerencia de Planificación de la Explotación
- Dirección Nacional de Meteorología – DNM, Uruguay
- GRAS (Clima), Unidad de Agro-clima y Sistemas de información del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIA
- Mesa Solar – Uruguay
- Dr. Hugo Grossi Gallegos, GER Solar, División Física, Depto. de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Argentina
- Ing. J. L. Duomarco
- Mag. Ing. Gabriel Cazes, IMFIA, Facultad de Ingeniería, UdelaR
- Ing. Pedro Galione
- Ing. Ventura Nunes, IIE, Facultad de Ingeniería - UdelaR
- Bach. Pablo Toscano, IIE, Facultad de Ingeniería - UdelaR
- Dra. Graciela Lesino y Dr. Luis Saravia, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de Salta (UNSA), República Argentina
- Servicio Meteorológico Nacional – SMN, Argentina.
- Instituto Nacional de Meteorología – INMET Brasil.
- PROBIDES
- Unidad de Sistemas Ambientales, Facultad de Agronomía, UdelaR
- Institutos de Física (IF), de Ingeniería Eléctrica (IIE), de Mecánica de Fluidos e Ing. Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay.

# Bibliografía

- [AL75] R. Almanza and S. López. Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación. Technical report, Instituto de Ingeniería, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 1975.
- [Ang24] A. Angstrom. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Q. J. Royal Meteorological Society*, 50(210):121 – 126, 1924.
- [Bev69] P.R. Bevington. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, New York, 1969.
- [CB04] J.C. Ceballos and Marcus Jorge Bottino. Estimativa de radiação solar por satélite: desempenho do modelo operacional gl1.2. In *XIII CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, 2004.
- [CB08] J.C. Ceballos and Marcus Jorge Bottino. Radiación solar en argentina estimada por satélite: algunas características espaciales y temporales. In *Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología*, Buenos Aires, 2008.
- [CBG05] J.C. Ceballos, Marcus Jorge Bottino, and H. Grossi Gallegos. Radiación solar en argentina estimada por satélite: algunas características espaciales y temporales. In *IX Congremet*, Buenos Aires, 2005.
- [CBS04] J.C. Ceballos, Marcus Jorge Bottino, and Jaidete Monteiro De Souza. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using goes 8 visible imagery. *Journal of Geophysical research*, 109:1–14, 2004.

- [Ceb09] J.C. Ceballos. Algunas características del régimen de radiación solar en argentina, período 1996-2006. In *X Congreso Argentino de Meteorología, Congremet*, Buenos Aires, 5-9 Octubre, 2009.
- [CM97] J.C. Ceballos and G.B.A. Moura. Solar radiation assessment using meteosat 4-vis imagery. *Solar Energy*, 60:209–219, 1997.
- [CP98] S. Colle and E. B. Pereira. Atlas de irradiacao solar do brasil, (1a versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície). Technical report, LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC, 1998.
- [DB06] J.A. Duffie and W.A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.
- [GG98a] H. Grossi-Gallegos. Distribución de la radiación solar global en la Argentina. I. análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 4:13–17, 1998.
- [GG98b] H. Grossi-Gallegos. Distribución de la radiación solar global en la Argentina. II. cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 5:33–42, 1998.
- [GG99] H. Grossi Gallegos. Comparación de los valores satelitales del surface solar energy (sse) data set version 1.0 con datos de tierra de la red solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 6:1–6, 1999.
- [GGR05] H. Grossi-Gallegos and R. Righini. Atlas Solar de la República Argentina. Technical report, Depto. de Ciencias Básicas de la Universidad de Luján, 2005.
- [GM99] R. George and E. Maxwell. High-resolution maps of solar collector performance using a climatological solar radiation model. In *Proceedings of the 1999 Annual Conference, American Solar Energy Society, Portland, ME*, 1999.
- [GS07] H. Grossi Gallegos and M. I. Spreafichi. Análisis de las series de promedios anuales de heliofanía (duración de la insolación) en Uruguay. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20:31–35, 2007.

- [HA04] V. Hodge and J. Austin. A survey of outlier detection methods. *Artificial Intelligence Review*, 22:85–126, 2004.
- [MGW99] E. Maxwell, R. George, and S. Wilcox. A climatological solar radiation model. In *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society, Albuquerque, NM*, 1999.
- [MNR93a] M. M.Ñoia, C.F. Ratto, and R. Festa. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 1. statistical models. *Solar Energy*, 51:449–456, 1993.
- [MNR93b] M. M.Ñoia, C.F. Ratto, and R. Festa. Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 2. physical models. *Solar Energy*, 51:457–465, 1993.
- [PAW01] J. Page, M. Albuissou, and L. Wald. The european solar radiation atlas: a valuable digital tool. *Solar Energy*, 71:81–83, 2001.
- [PL92] R.T. Pinker and I. Laszlo. Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale. *J. Appl. Meteorol.*, 31:194–211, 1992.
- [Pre40] J.A. Prescott. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. Sci. S. Austr.*, 64:114–118, 1940.
- [RF06] C. Raichijk and H. F. Variabilidad espacial de la heliofanía (duración de la insolación) en la pampa húmeda Argentina, Uruguay y sur del Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19:33– 37, 2006.
- [RGGR04] R. Righini, H. Grossi-Gallegos, and C. Raichijk. Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (Heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 14:23–31, 2004.
- [RGGR05] R. Righini, H. Grossi-Gallegos, and C. Raichijk. Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, 30:1241–1255, 2005.
- [RGR06] C. Raichijk, H. Grossi Gallegos, and R. Righini. Análisis de los datos de heliofanía en la República Oriental del Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10:101–105, 2006.

- 
- [TFL<sup>+</sup>97] C. Tiba, N. Fraidenraich, F.J.M. Lyra, A.M. Nogueira, H. Grossi Gallegos, Moszkowicz M., and E.S. Cavalcanti. Atlas solarimétrico do Brasil. relatório técnico final, vol. i a iv. Technical report, Convenio No. 004 Universidade Federal de Pernambuco/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – ELETROBRÁS., 1997.
- [Tib04] C. Tiba. Brazilian Solar Resource Atlas CD-ROM. *Renewable Energy*, 29(6):991–1001, mayo 2004.