

# Red de Medida Continua de Irradiancia Solar

## Laboratorio de Energía Solar – Uruguay

Autores: G. Abal, R. Alonso, D. Aicardi, L. Dovat, A. Laguarda

Abril 2015 - versión 18 de agosto de 2015

Publicación electrónica:  
Laboratorio de Energía Solar (LES), Universidad de la República

<http://les.edu.uy>





# Índice general

Índice general	I
Índice de figuras	II
Índice de cuadros	III
1 Antecedentes	2
1.1. Mapa Solar del Uruguay - versión 1 (MSUv1)	3
1.2. Estaciones de primera generación (G1)	6
1.2.1. Electrónica y telecomunicaciones	7
1.3. Modelado de irradiancia solar en base a imágenes de satélite	9
1.3.1. Base de Imágenes de la serie GOES	10
1.3.2. Modelo BD-JPT para estimación de GHI	11
1.3.3. Estimación de DNI e irradiancia en plano inclinado	12
1.3.4. Validación del modelo satelital	13
1.3.5. Segunda versión del Mapa Solar del Uruguay (MSUv2)	17
2 Estaciones de Medida de segunda generación	20
2.1. Funcionalidad de las estaciones G2	21
2.2. Distribución espacial y otras características	28
2.3. Post-procesamiento y control de calidad	29
2.3.1. Productos	29
2.3.2. Control de calidad	30
2.4. Calibración de Radiómetros y Termómetros	34
2.4.1. Calibración de radiómetros	34
2.4.2. Calibración de termómetros	36
3 Perspectivas a corto y mediano plazo	38
3.1. Líneas de trabajo en el LES	38
3.2. Medidas complementarias	40
3.3. Mejora continua en controles de calidad	41
3.4. Accesibilidad de la información	41
3.5. Año Meteorológico Típico (AMT)	44
Appendice A Certificados de calibración	46
Appendice B Equipo de trabajo del LES	50
Bibliografía	52

# Índice de figuras

1.1. Isolíneas de los parámetros $a$ y $b$ . . . . .	4
1.2. MSUv1 para el mes de Enero. . . . .	5
1.3. Características técnicas de una estación G1 . . . . .	7
1.4. Ubicación de las estaciones de medida de irradiancia solar . . . . .	8
1.5. Estaciones G1 instaladas . . . . .	8
1.6. Validación del MSUv2 . . . . .	14
1.7. Distribución espacial anual de GHI . . . . .	18
1.8. Distribución espacial anual de DNI . . . . .	19
2.1. Adquisidor Datataker DT80LM3 . . . . .	21
2.2. Estación G2 en Treinta y Tres . . . . .	21
2.3. Interfaz web del los adquisidores G2 . . . . .	22
2.4. Datos generados en una estación G2 . . . . .	23
2.5. Media de radiación difusa sin partes móviles . . . . .	24
2.6. Medidas de DNI . . . . .	25
2.7. Tabla de datos del Solis2 . . . . .	26
2.8. Tabla de datos del RSR2 . . . . .	27
2.9. Mapa de ubicación de estaciones de medida . . . . .	28
2.10. Estructuras de datos . . . . .	31
2.11. Plataforma de calibración del LES . . . . .	35
2.12. Plataforma de calibración del LES . . . . .	35
2.13. Medida de DNI en el LES . . . . .	36
A.1. Certificado de calibración del adquisidor DT80 . . . . .	47
A.2. Certificado de calibración del Estándar Secundario CMP22 . . . . .	48
A.3. Certificado de calibración del LES . . . . .	49

# Índice de cuadros

1.1. Estimadores de irradiación global . . . . .	4
1.2. Estaciones de primera generación . . . . .	9
1.3. Descripción de la base de imágenes GOES-East del LES . . . . .	11
1.4. Estimativos satelitales vs datos tierra . . . . .	15
1.5. Estimativos satelitales vs datos tierra . . . . .	16
1.6. Estimativos satelitales vs datos tierra . . . . .	16
1.7. Comparación con los datos generados por el modelo NASA/SSE. . . . .	17
2.1. Ubicación y capacidades actuales de las estaciones G2 . . . . .	29
2.2. Productos generados automáticamente . . . . .	30
2.3. Secuencia de filtros aplicados a datos de DHI y GHI . . . . .	33



## Antecedentes

Uruguay es un país que despierta tarde a la importancia del recurso solar. A partir de 2008 se comienza a trabajar en el contexto de una política energética bien definida y con un horizonte a 20 años. En este plan, la diversificación de la matriz energética, el desarrollo de capacidades locales y la independencia energética del país son elementos centrales. Las energías renovables en general y la solar térmica y fotovoltaica en particular, reciben un decidido impulso en el marco de esta estrategia. En este contexto general, se comienzan a requerir por parte de los diseñadores de políticas y por parte de los usuarios e inversionistas datos fiables sobre el recurso solar del Uruguay. En aquel momento, queda claro que los datos disponibles son muy escasos y poco fiables.

En 2008 se suscribe un Convenio de colaboración entre el Ministerio de Industria, Minería y Energía (Dirección Nacional de Energía, MIEM/DNE) y la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería, Udelar/FING) titulado “Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización”. Entre los objetivos de este primer acuerdo, hay tres que son relevantes como antecedente para la Red de Medidas de Irradiancia Solar (RMI):

- i) Elaborar una estrategia para la evaluación del potencial solar térmico en todo el país, incluyendo los modelos matemáticos u otras herramientas a desarrollar o utilizar, los programas para recolectar y organizar las secuencias históricas de las variables climáticas y otras a considerar, la determinación de las mediciones de radiación solar adicionales necesarias para validación, considerando la información ya disponible, y los sistemas de medición que pudieran ser requeridos, incluyendo las instalaciones de medición existentes en el país.
- ii) Recolección y procesamiento de la información histórica y de las nuevas mediciones: El consultor deberá relevar, recolectar y organizar la información histórica disponible requerida para la evaluación del potencial solar térmico y la resultante del sistema de medición que se haya implementado. El programa de procesamiento de la información disponible y la resultante de las nuevas mediciones no deberá exceder los dos años.
- iii) Evaluación del potencial solar térmico: En base a las mediciones realizadas y a las series históricas que se dispongan, se deberán caracterizar los potenciales energéticos disponibles en el territorio nacional. Se deberán proporcionar mapas que especifiquen el potencial estimado que permitan identificar estacionalidades y evoluciones temporales. Se deberá especificar los resultados en términos de potencia y de energía.

Los responsables del acuerdo por la Facultad de Ingeniería fueron los Profs. José Cataldo (IMFIA) y Ventura Nunes (IIE). En el marco de este acuerdo, se llevó adelante el diseño y

la instalación de los tres primeros puntos de medida (descritos en la Sección 1.2). Además, se requirió la colaboración de investigadores del Instituto de Física, para el análisis y procesamiento de datos terrestre de heliofanía y e irradiación solar diaria que luego cristalizaron en el primer mapa solar del Uruguay, tal como se describe sucintamente en la siguiente Sección.

## 1.1 Mapa Solar del Uruguay - versión 1 (MSUv1)

El equipo que llevó adelante este trabajo se conformó por investigadores del Instituto de Física (Gonzalo Abal, Mauro D'Angelo) e investigadores del Instituto de Mecánica de Flúidos e Ingeniería Ambiental (José Cataldo y Alejandro Gutierrez). El Mapa Solar del Uruguay publicado en 2009 [Abal et al., 2009, Abal et al., 2010, D'Angelo et al., 2011] fué el primer resultado del análisis sistemático de toda la información de tierra sobre el recurso solar disponible hasta 2008. Los detalles sobre este trabajo y sus resultados se encuentran en la Memoria Técnica [Abal et al., 2009] disponible en línea <http://les.edu.uy>. Aquí damos un breve resumen.

Se analizaron por consistencia varias series disponibles de irradiación solar diaria para Uruguay y países vecinos. De este análisis, quedaron solo tres series de irradiación solar diaria utilizables de entre 5 y 9 años de duración. Dos de ellas correspondientes a medidas de la zona sur del país (Colonia y Canelones) y la restante obtenida del INUMET (Brasil) para la localidad fronteriza de Rivera-Livramento. Hubiera sido imposible obtener información sobre la variabilidad espacial del recurso solar en Uruguay de no ser por el hecho de que es un territorio sin grandes variaciones orográficas predominantemente conformado por pasturas y suaves ondulaciones. Por otro lado, se adquirieron y analizaron por consistencia los largos registros de heliofanía (horas de sol) recabados durante más de 30 años por la Dirección Nacional de Meteorología y por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

Es bien conocido que, para un mes y una localidad dadas, existe una relación lineal (relación de Angström-Prescott) entre la helofanía promedio normalizada,  $\bar{n}$ , y el índice de claridad diario promedio,  $\bar{K}_t$ , de modo que

$$\bar{K}_t = a\bar{n} + b \quad (1.1)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes para un lugar dado y se asumen independientes de la época del año. Una vez conocidos los coeficientes  $a$  y  $b$  para aquellos lugares en los que se cuenta simultáneamente con datos de irradiación y heliofanía, se utilizaron técnicas de interpolación para estimar la variación espacial de estos coeficientes en el territorio nacional. El resultado se indica en la Fig. 1.1.

A partir de este resultado, se eligen 12 localidades con registros confiables de heliofanía y se utilizan los valores de  $a$  y  $b$  estimados para las mismas para generar, a partir de la ec. (1.1), irradiación solar global promedio (GHI) sobre plano horizontal para cada mes del año en cada una de estas localidades. El resultado se muestra en la Tabla 1.1.

La información sobre promedios mensuales diarios de GHI para 12 localidades, contenida en la Tabla 1.1, constituye el “soporte” del mapa solar del Uruguay, versión 1. A partir de esta información, es posible por interpolación generar mapas codificados conteniendo información sobre irradiación global diaria promedio, para cada mes, en cada punto del territorio. En la Fig. 1.2 se muestra el mapa resultante para el mes de Enero. Los valores varían entre 5.9 kWh/m<sup>2</sup> en el Sureste del territorio y 6.9 kWh/m<sup>2</sup> en el Noroeste del mismo.

Los valores que figuran en la Tabla 1.1 muestran que el valor típico de la irradiación global diaria (promedio anual sobre el territorio uruguayo) es de 4.4 kWh/m<sup>2</sup>. La variación estacional es grande en relación a la variación espacial, con valores mínimos en torno a 2 kWh/m<sup>2</sup> para el mes de Junio y valores máximos que llegan a 7 kWh/m<sup>2</sup> en los meses de verano. La variación espacial es bastante menor y las medias anuales muestran un mínimo en el Sudeste del país (Rocha, con 3.9 kWh/m<sup>2</sup>) y un máximo de 4.7 kWh/m<sup>2</sup> en la zona Norte (Artigas, Salto). La variación debida

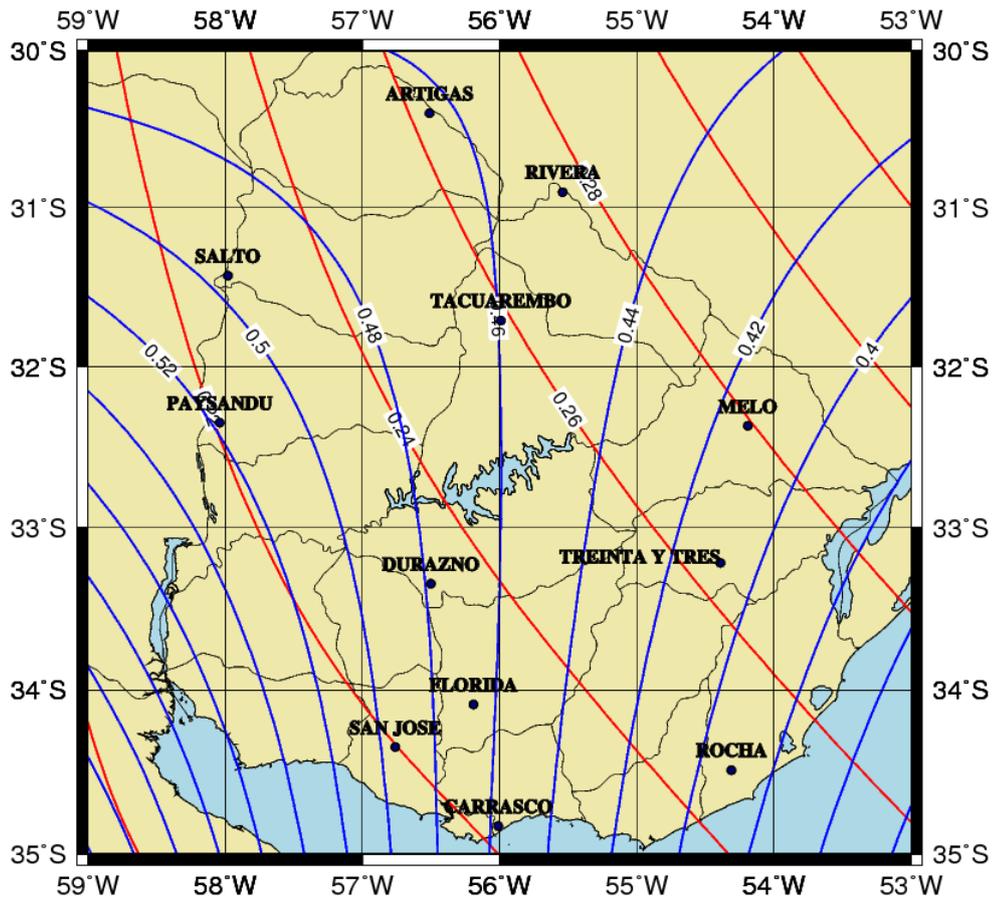


Figura 1.1: Isolíneas de los parámetros  $a$  y  $b$  para el territorio del Uruguay. Se indican las 12 localidades utilizadas como soporte para el MSUv1.

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	4.4

Cuadro 1.1: Estimadores de irradiación global media diaria (GHI, en  $\text{kWh/m}^2$ ) calculados utilizando la Ec. (1.1). Las columnas numeradas indican los meses del año. La ubicación aproximada de las estaciones donde se midió heliofanía se indica en la Fig. 1.1.

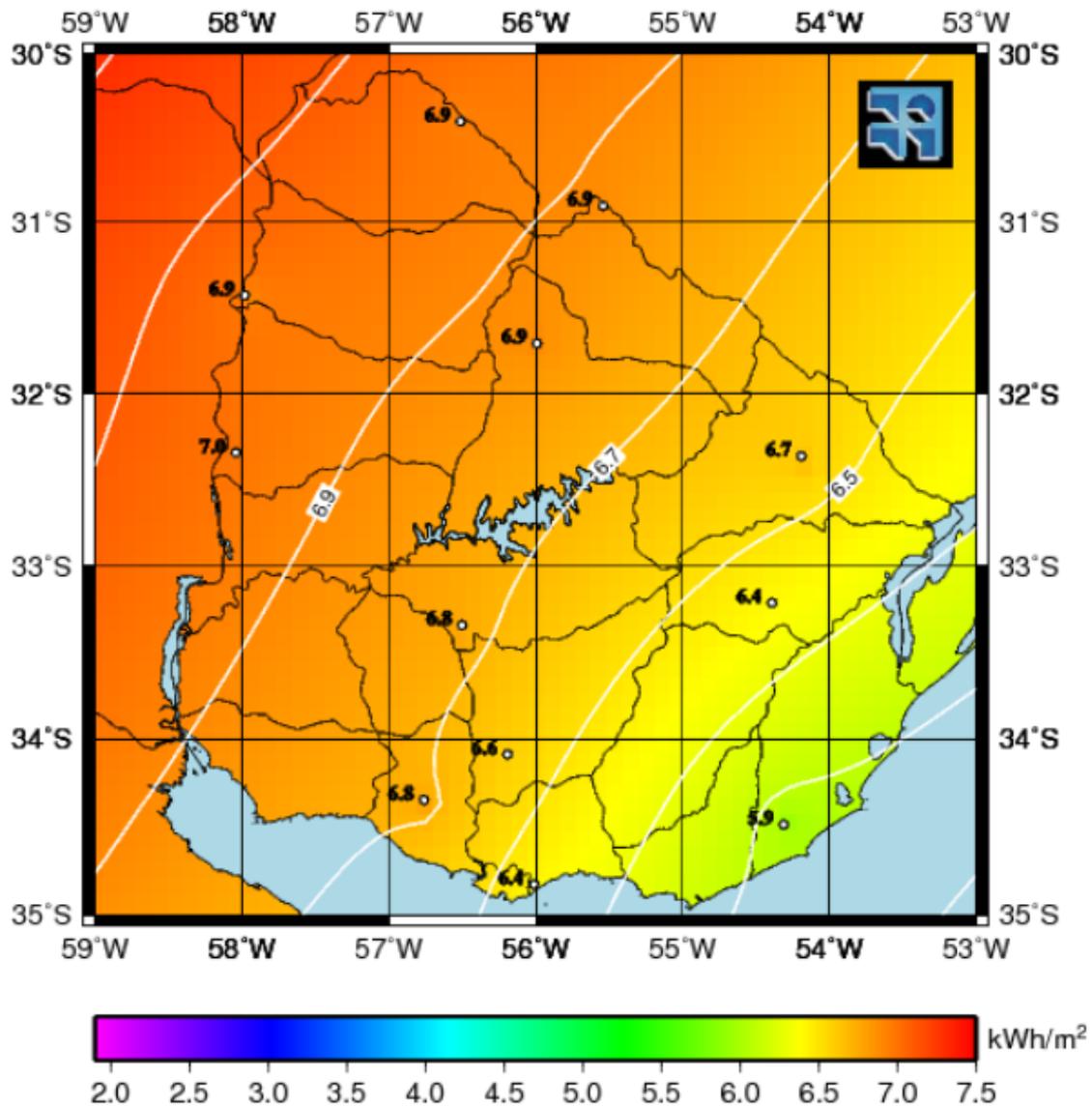


Figura 1.2: Mapa de irradiación solar global diaria promedio para el mes de Enero.

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%). Una característica emergente de este estudio es la rotación estacional de las isótopos de irradiación media diaria constante. En los meses de invierno, aparecen predominantemente alineadas con los paralelos. A medida que se avanza hacia el verano, se observa una rotación de las isótopos en sentido antihorario, de modo que en los meses de verano presentan una orientación predominante SW-NE, y son aproximadamente paralelas a la costa oceánica (Fig 1.2. Esta rotación de las isótopos se presenta aún mas marcada en mapas obtenidos a partir de estimativos de irradiación global basados en datos satelitales, como por ejemplo el del modelo NASA/SSE (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

Esta primer caracterización del recurso solar en Uruguay dejó en claro la necesidad de avanzar en un programa de medidas de tierra de calidad controlada, de modo de poder mejorar la caracterización del recurso solar. Esto dió inicio a un programa de medidas continuas de largo

plazo cuyas primeras estaciones comenzaron a medir GHI en 2010.

### 1.2 Estaciones de primera generación (G1)

Las tres estaciones de primera generación se construyen bajo la dirección del Dr. José Cataldo en el marco del Convenio “Evaluación del potencial solar térmico en Uruguay y análisis de la factibilidad de su utilización” mencionado antes. Se diseñan de forma de que sean autónomas y con tecnología local, de modo que puedan ser reparadas y mantenidas localmente sin dificultad. Los criterios de diseño fueron:

- i) Tecnología y mano de obra local
- ii) Envío remoto de datos con frecuencia diaria
- iii) Autonomía energética
- iv) Medida de GHI (irradiancia global sobre plano horizontal) con período de medición de menos de cinco minutos.
- v) Resiliencia frente a eventos que llevan a pérdida de datos.

Algunos de estos criterios se alcanzaron plenamente (por ejemplo, las estaciones han medido ininterrumpidamente desde 2010 hasta su baja en 2015, durante más de cinco años con mantenimiento mínimo). La Fig. 1.2 muestra el interior del gabinete estanco de una de estas estaciones, donde se identifica la placa de protección contra descargas atmosféricas (placa superior) y la placa de adquisición adq-vx. También se enumeran algunas características técnicas del sistema de adquisición.

Por motivos de seguridad y de acceso a registros de datos complementarios (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección de viento, entre otras variables), todas las estaciones G1 se ubican o bien en las estaciones experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) o bien en estaciones H24 (es decir, con dotación humana las 24 horas) del INUMET (Meteorología). Esta opción permite además aprovechar la posibilidad de limpieza periódica por personal de las estaciones. La seguridad es buena: en cinco años de operación, hubo un único evento de vandalismo menor en una de las estaciones (INIA Las Brujas en Canelones). Los tres equipos iniciales se ubicaron en las estaciones experimentales de Canelones, Treinta y Tres y Salto.

La instalación inicial y el mantenimiento y procesamiento de los datos se realizó por parte del Bach. Pablo Toscano, del Instituto de Ing. Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. La Fig. 1.2 muestra dos sistemas G1 completos instalados en Treinta y Tres (Izq.) y Canelones (Der.). A partir de 2010, el Grupo de Modelado y Análisis de Radiación Solar (GMARS) de la Facultad de Ingeniería asume el mantenimiento de la pequeña red y despliega tres nuevos puntos de medida, usando adquisidores LOGBOX-SD de ultra-bajo consumo Kipp & Zonen. Se agregan entonces medidas en las estaciones meteorológicas de Artigas y Rocha y en la propia azotea de la Facultad de Ingeniería en Montevideo. De este modo, se conforma la red de seis puntos de medida que, con mejoras varias y algunas reubicaciones, sigue en operación hasta hoy. La ubicación aproximada de estas estaciones se indica en la Fig. 1.2. Todas las estaciones fueron equipadas con piranómetros nuevos de Primera Clase o Estándar Secundario (clasificación ISO 9060). En su mayoría, los instrumentos de campo midiendo GHI son piranómetros Kipp & Zonen modelos CMP6, CMP10 o CMP11.

A partir de 2011, el GMARS adquiere un piranómetro Kipp & Zonen CMP22 que se utiliza solamente como Estándar Secundario para calibrar los piranómetros de campo. Este procedimiento se realiza en la Azotea de la Facultad de Ingeniería siguiendo en lo posible los requerimientos

the following characteristics:



- Supply voltage 6-18V.
- Stand-by consumption: 32 mA @ 12V. Continuous logging consumption: 110 mA @12V.
- GSM/GPRS modem.
- 5 analog inputs (0-5V).
- 8 digital inputs (0-5V).
- 4 digital outputs (0-3.3V).
- i2c bus.
- 1 AC/DC 60V 300mA relay output.
- 5V for sensor powering.
- 2 RS-232 ports, 1 USB host port.
- Surge, short circuit and over current protection.

**Fig. 3: ADQ-VX datalogger.**

All application control is made by the Gumstix embedded computer Verdex (400 MHz, 64MB RAM, 16MB FLASH). Communications are implemented via a GSM / GPRS Telit GM862 (850/900/1800/1900MHz).

Figura 1.3: Algunas características técnicas de una estación G1 basada en sistema adq-vx.

de la norma ISO 9847:1992. La calibración de los equipos de campo se realiza en forma bi-anual como recomienda el fabricante. Se cuenta en la época con tres equipos extra, para poder realizar las calibraciones en forma escalonada, sin interrumpir las medidas.

### 1.2.1 Electrónica y telecomunicaciones

Los adquirentes utilizados (Adq-vx) son el resultado de un proyecto estudiantil de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica, que diseña y construye un prototipo funcional que se replica en el marco de este acuerdo. Operan en base a un sistema linux que utiliza un pendrive USB para respaldo local de datos y almacenamiento permanente de los archivos del sistema. Las placas madre cuentan con un modem integrado que le permite enviar datos a un servidor por ftp utilizando la red telefónica. Además, los equipos responden remotamente a requerimientos y permiten que un usuario se logee (localmente o remotamente) en los mismos para revisar los datos disponibles localmente y hacer ajustes en su programación. Para estos equipos se realizó un contrato con la firma MOVISTAR que proporcionó 4 líneas de datos en su red GSM.

Los equipos están provistos de un panel solar (inicialmente de 12 w), un regulador de voltaje y una batería común de uso automotriz de entre 50 y 60 Ah de capacidad. El consumo real de potencia de estos equipos no es bajo. En ocasiones, debido a problemas en la red de comunicaciones, el modem queda iterando intentando mandar los datos y esto agota las reservas de energía cuando el panel no logra reponerlas. En el primer año de operación, los tres equipos cayeron durante el invierno, debido a la descarga gradual de sus baterías. Fue necesario agregar un segundo panel fotovoltaico (de 12 w) para que lograsen pasar el invierno sin caídas. Por otro lado, los equipos basados en adquirentes de bajo consumo (ubicados en Rocha y Las Brujas, Canelones) no contaban con capacidad de envío remoto, sino que almacenaban datos en tarjetas

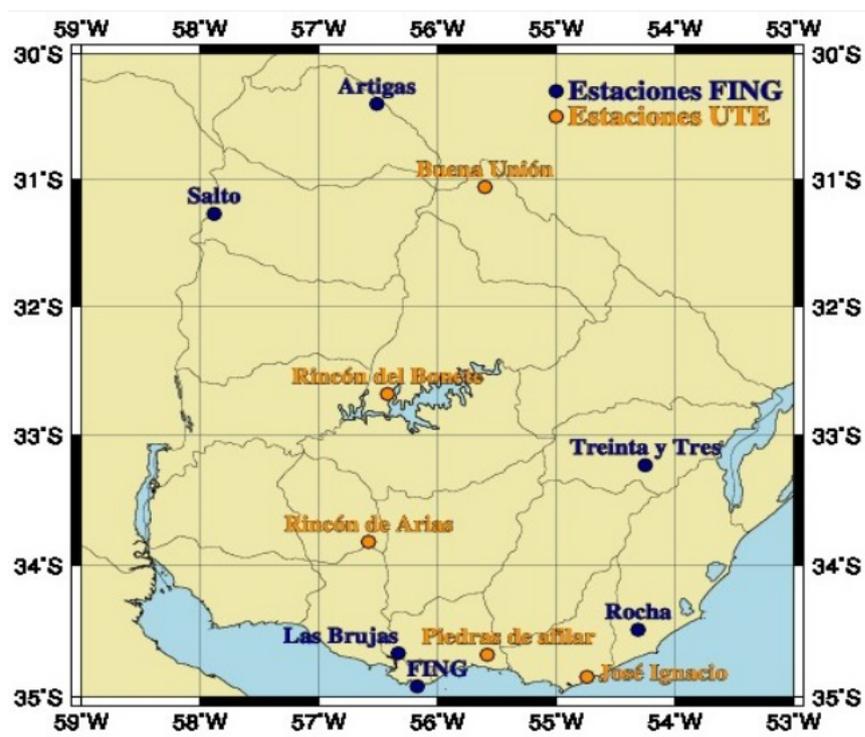


Figura 1.4: Ubicación de las estaciones de medida de irradiancia (en azul). En amarillo se indican la ubicación de las primeras estaciones de medida de la red UTE, que incluyen irradiancia solar.



Figura 1.5: Estaciones G1 instaladas en Treinta y Tres (Izq.) y Canelones (Der.) con un panel fotovoltaico de 12 w. En 2011 se reforzó con un segundo panel de 12 w en paralelo. El almacenamiento es en una batería convencional de 12 v y 50 o 60 Ah ubicada en la parte baja del soporte.

Localidad	Código	LAT (°)	LON (°)	ALT (m snm)	Inicio	Fin	adquisidor	Intervalo
Salto	SA	-31.27	-57.89	50	02/06/10	20/03/15	Adq-vx	1 min
Canelones	LB	-34.67	-56.34	37	07/03/10	14/08/13	Adq-vx	1 min
					14/08/13	01/07/14	LOGBOX-SD	3 min
Treinta y Tres	TT	-33.27	-54.17	35	28/05/10	21/02/15	Adq-vx	1 min
Rocha	RO	-34.49	-54.31	20	28/06/11	22/02/15	LOGBOX-SD	3 min
Artigas	AR	-30.40	-56.51	136	13/12/11	20/02/14	Adq-vx	1 min
Montevideo	AZ	-34.92	-56.17	58	28/12/10	24/10/14	LOGBOX SD Data Q Data Taker 80E	1 min

Cuadro 1.2: Algunos detalles de las estaciones de primera generación. En todas se mide al menos GHI. En algunas (TT, AZ, AR) se ha medido irradiancia difusa (DHI), irradiación global en plano inclinado (GTI) o irradiancia ultravioleta (A y Erithema) durante algunos períodos de tiempo. La última de estas estaciones fue desactivada y reemplazada por medidas de segunda generación el 20/03/2015.

removibles SD y requerían de visitas periódicas para el retiro manual de los datos. La capacidad de almacenamiento local y duración de la batería de estos equipos les otorga una autonomía de unos seis meses aproximadamente y los retiros programados de datos se realizaban cada dos meses. Este régimen se mantuvo entre 2012 y 2014.

Si bien los equipos adqx han resultado robustos durante los cinco años en que estuvieron en operación, los mismos presentaron algunos puntos débiles. Su software era artesanal (resultado como se dijo de un proyecto estudiantil de fin de carrera) y presentaba algunos defectos incómodos. Por ejemplo, no era posible configurarlos para que utilizaran hora estándar de Greenwich, ya que obtenían su hora de la red telefónica en forma automática. Al cambiar la hora legal (horario de verano) los equipos cambiaban su hora cuando conseguían conectar con la red, y esto podía ser al azar en las 40 horas siguientes al cambio de horario. Los registros enviados por diferentes equipos no tenían formato uniforme, sino que a veces usaban comas, a veces puntos, con diferentes cantidades de espacio separador. Esto hacía que el análisis de los datos fuera imposible de automatizar, requiriendo intervención humana. Esto, unido al hecho de que tres adquisidores eran de un tipo y tres de otro, hacía de la operación de la red una cosa compleja, que requería varias personas dedicadas a tareas repetitivas y pasibles de error. Finalmente, los adquisidores de estos equipos no estaban diseñados para señales en el entorno de pocos mV como las generadas por los piranómetros, por lo que se equiparon con amplificadores lineales construidos en el taller en base a chips amplificadores operacionales comerciales tipo AD620. Aparte de los problemas de precisión asociados a usar una placa de construcción casera, esto hacía que un simple cambio en la constante del equipo requiriese de una recalibración de la curva del amplificador para hallar los nuevos parámetros a alimentar en el software. Todo esto nos motivó a conseguir el financiamiento para equipar la red con nuevos adquisidores comerciales y nuevas capacidades (segunda generación). Esta red es la que está actualmente en operación y se discute en detalle en el Cap. 2.

Una herramienta importante para el control de calidad de los datos ha sido la capacidad desarrollada por nuestro grupo de obtener estimativos confiables de irradiación global horaria sobre plano horizontal en todo el territorio del Uruguay a partir de imágenes del satélite GOES operado por la NOAA. Este trabajo se describe en la siguiente sección.

### 1.3 Modelado de irradiancia solar en base a imágenes de satélite

La nubosidad es el factor determinante para la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre. Este es un elemento con variación rápida, por lo que la estimación del recurso solar basada en la interpolación de medidas de Tierra en algunos puntos dispersos es un método que produce estimativos con alta incertidumbre. Esta incertidumbre aumenta conforme se incre-

menta la distancia entre las estaciones de medida y el punto donde se quiere estimar. Por otro lado, en base a una imagen de satélite es posible estimar sobre una extensa región la irradiancia solar incidente a nivel de suelo con resolución espacial de pocos kilómetros. Desde el punto de vista de un usuario final, resulta más confiable el estimativo por satélite que la utilización de datos de una estación vecina a menos que ésta sea muy próxima al punto de interés. Para distancias entre estaciones mayores a 30 km (irradiación horaria) y 50 km (irradiación diaria) incluso modelos satelitales simples (con incertezas típicas a escala horaria del orden del 20% de la media del estimado) reportaban valores más confiables que la interpolación entre estaciones de tierra [Perez et al., 1997, Zelenka et al., 1999]. Las prestaciones de los satélites y los modelos de estimación se ha mejorado con el tiempo, por lo que estas distancias típicas entre estaciones son aún menores para las capacidades actuales. Un modelo de estimación del recurso solar por satélite utiliza información de imágenes satelitales para estimar la energía solar disponible en Tierra. Las medidas alta calidad de irradiancia solar adquiridas en superficie resultan ser un complemento fundamental para estos modelos, ya sea para ajustar parámetros para una región dada o para estimar la incerteza de los datos que genera un modelo físico. Usualmente los modelos se clasifican en físicos o estadísticos [Noia et al., 1993a, Noia et al., 1993b]. Los modelos físicos intentan describir, ya sea en detalle o en forma simplificada, los procesos de transferencia radiante en el sistema Tierra–Atmósfera y requieren un conocimiento detallado del estado de la atmósfera. Por otro lado, los modelos estadísticos son aquellos que dependen de una serie de parámetros ajustables a partir de datos medidos en Tierra. Existen varios modelos satelitales para la estimación del recurso solar que son ampliamente utilizados [Perez, 2002, Rigollier, 2004, Ceballos et al., 2004, Pinker y Laszlo, 1992], entre otros. Muchos modelos modernos tienen generalmente una naturaleza híbrida, donde la base del modelo es física pero constan de uno o varios parámetros ajustables a partir de datos de superficie.

Nuestro grupo comienza a trabajar sobre modelos satelitales a partir de 2010, en el marco de Proyectos de Investigación financiados por el Fondo Sectorial de Energía de ANII y por la Udelar. Utilizando los datos de irradiancia solar adquiridos por nuestra red de medida hemos desarrollado herramientas que permiten estimar por satélite las distintas componentes de la radiación solar. Actualmente el LES tiene la capacidad de generar por satélite estimativos de irradiación horaria (o irradiancia promedio en la hora) de las componentes global horizontal (GHI), directa en incidencia normal (DNI), global en un plano inclinado con un ángulo fijo especificable (GTI), y difusa y directa en plano fijo horizontal o inclinado. Estos estimativos se pueden generar con una resolución espacial de aproximadamente 2 km sobre el territorio del Uruguay. El estimado para GHI se realiza a través de un modelo satelital específicamente ajustado para el territorio nacional. Este ajuste se realizó utilizando las medidas de irradiancia solar de alta calidad adquiridas por el LES/UdelaR del período 2010 al 2014 en varios puntos del territorio. Las imágenes satelitales disponibles permiten generar datos de irradiación de largo plazo desde el año 2000 a la fecha. Las otras componentes son obtenidas a partir del valor de GHI, utilizando modelos bien documentados en la literatura y una correlación de fracción difusa específicamente ajustada a la región utilizando datos de buena calidad medidos en Uruguay y Argentina. En los siguientes apartados se explica con mayor detalle el modelo y los procedimientos utilizados.

### 1.3.1 Base de Imágenes de la serie GOES

De la red de satélites geoestacionarios de la World Meteorological Organization (WMO), el satélite GOES-East genera imágenes que incluyen el territorio de Uruguay<sup>1</sup>. Este satélite es controlado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/EEUU) y sus

---

<sup>1</sup>Las imágenes del satélite Meteosat también alcanzan el territorio de Uruguay, pero está ubicado en el borde de la ventana de visión de este satélite, lo que implica errores importantes debido al un ángulo de visión elevado. Además, las imágenes METEOSAT no son de libre acceso.

imágenes son públicas, pudiéndose adquirir libremente a través del sistema CLASS (<http://www.nsof.class.noaa.gov/>) de la NOAA. Nuestro grupo ha confeccionado un banco de imágenes GOES-East utilizando este servicio web. Actualmente contamos con más de medio millón de imágenes (contando el canal visible y los 4 canales infrarrojos) que cubren el período temporal desde el 01/01/2000 a la fecha. En régimen de operación normal, el satélite genera dos imágenes por hora con una resolución espacial sobre Uruguay de aproximadamente 2 km. La ventana espacial de las imágenes abarca el territorio de Uruguay y zonas vecinas, como la provincia de Buenos Aires, el estado de Río Grande do Sul y la pampa húmeda. En el cuadro 1.3 se muestra un detalle de este banco de imágenes al 31/12/2014.

satélite	inicio	fin	imágenes
GOES 8	01/01/2000	31/03/2003	123775
GOES 12	01/04/2003	14/04/2010	259445
GOES 13	14/04/2010	31/12/2014	230080
<b>total</b>	<b>01/01/2000</b>	<b>31/12/2014</b>	<b>613300</b>

Cuadro 1.3: Descripción de la base de imágenes GOES-East del LES.

Las imágenes son adquiridas desde el CLASS en registros (counts) de 10 bits que indican brillo observado por el radiómetro del satélite. El Cuadro 1.3 muestra que en el período 2000-2015 la serie GOES-East utilizó tres satélites diferentes. Los brillos de los radiómetros de estos satélites no son comparables entre sí. Para ser utilizadas como entrada para un modelo satelital deben ser calibradas y convertidas a una magnitud con sentido físico, como la radiancia  $L_S$ . Se implementó la calibración utilizada en forma operacional por la NOAA [Wu y Sun, 2005]. El resultado final de la calibración de las imágenes es la radiancia observada por el satélite,  $L_S$ , medida en  $W/m^2$  str. El modelo satelital que implementamos utiliza una forma normalizada de radiancia, el Factor de Reflectancia  $F_R$ . El mismo se calcula para el canal visible a partir de,

$$F_R = \frac{\pi L_s}{F_n S_{\Delta}^{GOES}} \quad (1.2)$$

donde el factor  $F_n$  es la corrección por la distancia Tierra-Sol debido a la excentricidad de la órbita terrestre, y  $S_{\Delta}^{GOES}$  es el espectro solar modulado por la respuesta espectral del canal visible del radiómetro del satélite. En resumen,  $F_R$  da una indicación del “brillo” de la escena en el visible, con información espacio-temporal y normalizado entre 0 y 100 %. Con el factor de reflectancia es posible utilizar conjuntamente datos de diferentes satélites físicos.

### 1.3.2 Modelo BD-JPT para estimación de GHI

El modelo desarrollado para la estimación de la componente global horizontal es de carácter estadístico y se basa en un modelo pre-existente [Justus et al., 1986]. En 2011 realizamos una implementación de este modelo base y detectamos que presentaba una subestimación sistemática en condiciones de cielo claro y una sobreestimación sistemática en condiciones de cielo cubierto [Alonso Suárez et al., 2011]. Desde esa fecha hemos realizado modificaciones al modelo que han solucionado este problema y han mejorado de forma sensible su desempeño [Alonso Suárez et al., 2012, Alonso Suárez et al., 2014]. El modelo, como originalmente fue propuesto por Tarpley y sus colaboradores, estaba planteado en términos de counts digitales. Como ya se mencionó, para poder integrar toda la estadística de imágenes disponible, donde en el tiempo han operado distintos dispositivos físicos en la posición geoestacionaria GOES-East, se debe utilizar como entrada valores de una magnitud física proveniente de imágenes calibradas. Por tanto, nuestra implementación del modelo utiliza los valores de Factor de Reflectancia en lugar de los brillos observados.

La irradiación global horaria en plano horizontal es parametrizada según,

$$I_{GHI} = I_{SC} F_n \cos \theta_z (a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z) + d (F_R^2 - F_{Ro}^2) \quad (1.3)$$

donde  $I_{SC}$  es el valor horario de la constante solar,  $F_n$  es la corrección por la distancia Tierra-Sol y  $\theta_z$  es el ángulo zenital.  $F_R$  es el valor de Factor de Reflectancia obtenido de la imagen de satélite y  $F_{Ro}$  es el valor de Factor de Reflectancia para el mismo punto e instante de tiempo, pero en condiciones de cielo despejado. El modelo consta de una serie de parámetros ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ ) que deben ser ajustados a las particularidades de la región utilizando medidas en Tierra. Utilizamos 3 sets de parámetros  $\{a, b, c, d\}$ , uno para cada condición del cielo: (i) para cielo despejado, (ii) para cielo cubierto y (iii) para cielo parcialmente cubierto. La decisión sobre en qué condición de cielo está un píxel dado, se realiza en base a la presencia de nubosidad en la imagen de satélite, por lo que una vez ajustados los parámetros del modelo, éste puede ser utilizado operacionalmente sólo en base a la información del canal visible del satélite. Para el ajuste de los parámetros se utilizaron datos horarios de las estaciones de SA, TT, LB, AR y RO para el período comprendido entre el 2010 y el 2014.

### 1.3.3 Estimación de DNI e irradiancia en plano inclinado

El resto de las componentes de la irradiancia solar se estiman, a partir de la GHI, utilizando modelos bien documentados o relaciones geométricas. El primer paso es lograr la separación de la componente global en plano horizontal en sus dos subcomponentes directa (BHI) y difusa (DHI). Se define, a escala horaria, la fracción difusa  $f_D$  y el índice de claridad  $k_T$  como,

$$f_D = \frac{I_{DHI}}{I_{GHI}} \quad k_T = \frac{I_{GHI}}{I_O} \quad (1.4)$$

donde  $I_O$  es la irradiación horaria en el tope de la atmósfera sobre un plano horizontal. Esta irradiación se calcula en base a la constante solar, la corrección por distancia Tierra-Sol y el coseno del ángulo cenital [Duffie y Beckman, 2006], por lo que  $k_T$  es una forma normalizada de GHI.

Existen varias propuestas en la literatura que buscan estimar la fracción difusa [Erbs et al., 1982, Reindl et al., 1990, Ridley et al., 2010, Ruiz-Arias et al., 2010]. Las más sencillas utilizan  $k_T$  como único predictor, pero existen propuestas más complejas que introducen múltiples predictores. Para la estimación de fracción difusa utilizamos una correlación que utiliza  $k_T$  y la masa de aire<sup>2</sup> como predictores [Ruiz-Arias et al., 2010]. Los parámetros de esta correlación han sido ajustados para su utilización en la región [Abal et al., 2013] utilizando medidas de la estación AZ del LES, del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) en Salto y del Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GerSolar) en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Utilizando esta correlación es posible estimar la fracción difusa basado en un dato de GHI, y estimar las componentes DHI, BHI y DNI de la irradiancia solar. A continuación se muestra un esquema de la conversión:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Modelo difusa} \\ I_{GHI} \end{array} \right\} \rightarrow f_D \rightarrow \left. \begin{array}{l} I_{DHI} = f_D I_{GHI} \\ I_{BHI} = I_{GHI} - I_{DHI} \end{array} \right\} \rightarrow I_{DNI} = \frac{I_{GHI} - I_{DHI}}{\cos \theta_z}$$

La estimación de la irradiancia en plano inclinado se realiza a partir de las componente en plano horizontal (GHI, DHI y BHI). El efecto de cada una de estas componentes sobre la superficie inclinada es distinto. En una superficie en plano inclinado incide radiación solar esencialmente de tres fuentes: (i) desde el disco solar (radiación directa y circumsolar), (ii) desde el resto de la bóveda celeste (radiación difusa) y (iii) desde el suelo (radiación global que es reflejada). Utilizamos el modelo HDKR [Duffie y Beckman, 2006] para realizar este transporte

<sup>2</sup>La masa de aire es el camino óptico de la luz al atravesar la atmósfera. Usualmente se aproxima como  $AM = 1/\cos \theta_z$ , que es el resultado para una atmósfera plana.

de irradiación en plano horizontal a plano inclinado. Actualmente, se lleva a cabo un programa de medidas simultáneas de irradiancia solar en plano inclinado en varios puntos del territorio. Con estos datos, se realizará un análisis exhaustivo de cual es el mejor modelo de transporte de plano horizontal a plano inclinado para las condiciones predominantes en el Uruguay y cual es la incertidumbre asociada.

#### 1.3.4 Validación del modelo satelital

La validación de los datos generados con el modelo satelital se ha realizado de dos formas: (i) utilizando medidas independientes de corto plazo en varios puntos del territorio (período 2010 a la fecha) y (ii) utilizando la salida de largo plazo de un modelo satelital aceptado internacionalmente como el NASA/SSE [Pinker y Laszlo, 1992]. Este modelo esta basado en una estadística de varias décadas y genera promedios mensuales en todo el globo con resolución espacial de 1 grado de longitud x 1 grado de latitud.

Para (i) se utilizaron medidas en Tierra adquiridas por la red de medida de la empresa de electricidad estatal (UTE, Uruguay). Los adquirentes de esta red toman datos cada 10 minutos y las estaciones están equipadas con radiómetros fotovoltaicos Li-Cor LI200SA de bajo costo. Las medidas están adquiridas en forma independiente por una empresa contratada por UTE y corresponden a ubicaciones diferentes a las utilizadas para ajustar los coeficientes del modelo. Los puntos de la red UTE se muestran en azul en la Fig. 1.6 Izq. En la misma figura se muestran en verde los puntos de medida de la red LES utilizados para el entrenamiento del modelo. Estas estaciones utilizan piranómetros Kipp & Zonen de Primera Clase o superior, calibrados periódicamente (cada dos años) y que reciben mantenimiento diario de limpieza de cúpulas. La validación utilizando datos medidos se realizó a escala horaria, diaria y mensual. Se incluyen, en los cuadros 1.4, 1.5 y 1.6, los indicadores de performance en todos los puntos donde hay medidas. Los indicadores calculados son el desvío promedio (MBD), el desvío absoluto promedio (MAD), el error cuadrático medio (RMSD) y la integral de Kolmogórov-Smirnov (KSI), definidos cómo,

$$\begin{aligned} \text{MBD} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{I}_j - I_j) & \text{MAD} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\hat{I}_j - I_j| \\ \text{RMSD} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{I}_j - I_j)^2} & \text{KSI} &= \int_0^{I_{max}} (CDF_{\hat{I}} - CDF_I) dI \end{aligned}$$

donde  $\hat{I}$  es el estimativo satelital,  $I$  es el valor medido en Tierra, y  $CDF_{\hat{I}}$  y  $CDF_I$  son las Funciones de Probabilidad Cumulativa de los datos de satélite y las medidas respectivamente. Para los indicadores MBD, MAD y RMSD, se muestran los valores relativos a la media de los valores medidos.

A efectos de estimar la incertidumbre del modelo, se utiliza sólo la comparación con medidas no utilizadas en su ajuste. El modelo BD-JPT es capaz de generar datos horarios, diarios y mensuales sobre el territorio del Uruguay con una incerteza (RMSD) de 13,2%, 6,2% y 4,0%, respectivamente. El desvío promedio es de 1,5%, 1,8% y 1,4% respectivamente, menor al 2% en todas las escalas temporales. Debido a que el modelo está específicamente ajustado para una región geográficamente uniforme<sup>3</sup>, el desempeño es muy bueno. Por ejemplo, el RMSD horario reportado para Sudamérica por 3TIER, una empresa reconocida del sector que comercializa datos generados por modelos satelitales globales, es de 21% para valores de GHI [3TIER, 2013]. El mismo indicador para el modelo desarrollado en Uruguay es de 13,2%, aunque con la limitante de ser un modelo que puede ser aplicado sólo en la región y no globalmente.

<sup>3</sup>Uruguay es una llanura levemente ondulada, sin mayores accidentes geográficos, con similares características climáticas y sin ocurrencia de eventos de nieve.

## 1. ANTECEDENTES

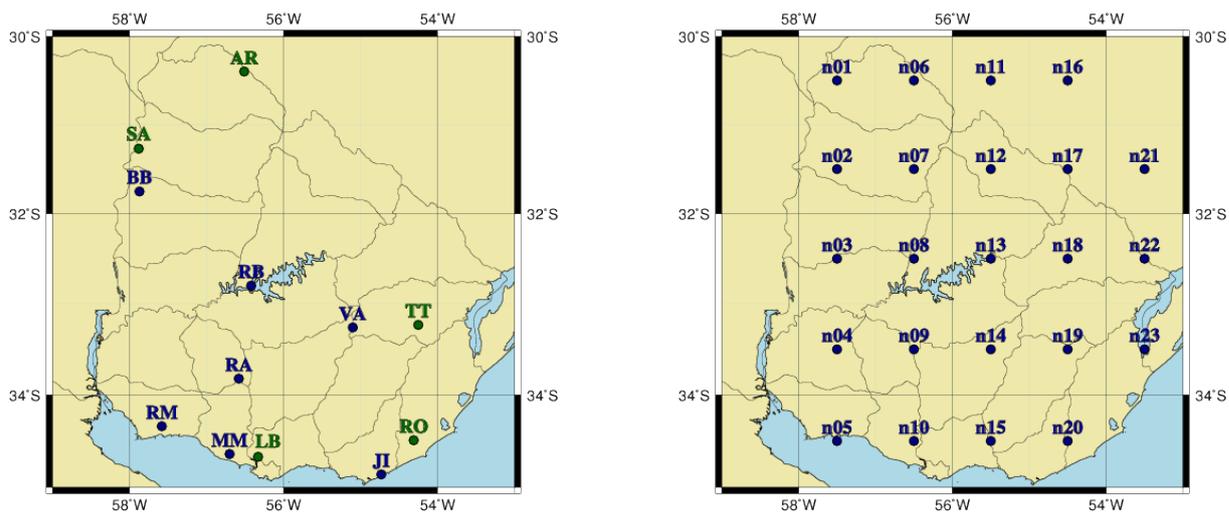


Figura 1.6: Izq: Ubicación de las medidas de tierra utilizadas para ajustar (verde) y validar (azul) el modelo satelital. Der: Ubicación de los puntos de validación del modelo satelital contra el SSE/NASA.

En el Cuadro 1.4 se presenta el detalle por estación de los indicadores horarios para GHI. En los Cuadros 1.5 y 1.6 se presentan los correspondientes indicadores a escala diaria y de promedios mensuales para GHI. Por contar con poca estadística de medidas de DNI, no hemos comparado aún los estimativos de DNI por el método indicado más arriba con los datos de tierra.

COD	período	# horas	kJ/m <sup>2</sup>		kJ/m <sup>2</sup>			%			kJ/m <sup>2</sup> KSI
			media	MBD	MAD	RMSD	rMBD	rMAD	rRMSD		
LB	03/2010-12/2014	15530	1409,7	0,8	115,3	172,9	0,1	8,2	12,3	20,8	
AR	12/2011-12/2014	8402	1506,8	11,2	121,1	175,7	0,7	8,0	11,7	19,6	
SA	06/2010-12/2014	15856	1484,3	5,9	112,5	175,4	0,4	7,6	11,8	21,2	
TT	05/2010-12/2014	16746	1431,8	0,9	128,0	187,9	0,1	8,9	13,1	20,5	
RO	06/2011-12/2014	12463	1399,6	-0,2	128,0	189,4	0,0	9,1	13,5	20,5	
		<b>68997</b>	—	<b>3,1</b>	<b>120,7</b>	<b>180,4</b>	<b>0,2</b>	<b>8,4</b>	<b>12,5</b>	<b>20,6</b>	
RB	04/2010-12/2014	17830	1446,8	26,3	121,3	179,3	1,8	8,4	12,4	27,8	
RM	05/2011-12/2014	13398	1445,6	12,4	133,4	193,7	0,9	9,2	13,4	23,5	
MM	04/2011-12/2014	13964	1407,5	31,3	119,9	177,3	2,2	8,5	12,6	31,4	
JI	07/2011-12/2014	13391	1429,2	1,0	134,6	194,1	0,1	9,4	13,6	18,4	
RA	02/2011-12/2014	13497	1486,1	14,7	129,9	193,7	1,0	8,7	13,0	20,8	
VA	09/2011-12/2014	12527	1468,9	10,6	146,7	211,0	0,7	10,0	14,4	19,9	
BB	02/2012-12/2014	10989	1424,8	56,2	126,9	185,6	3,9	8,9	13,0	56,2	
		<b>95596</b>	—	<b>21,3</b>	<b>129,9</b>	<b>190,0</b>	<b>1,5</b>	<b>9,0</b>	<b>13,2</b>	<b>27,7</b>	

Cuadro 1.4: Comparación horaria de los estimativos satelitales contra datos medidos.

COD	período	# días	MJ/m <sup>2</sup>		MBD	MJ/m <sup>2</sup>		rMBD	%		MJ/m <sup>2</sup>
			media	media		MAD	RMSD		rMAD	rRMSD	
LB	03/2010-12/2014	965	17,8	17,8	0,0	0,6	0,8	-0,1	3,5	4,7	0,2
AR	12/2011-12/2014	517	18,6	18,6	0,2	0,7	0,9	0,8	3,6	4,7	0,2
SA	06/2010-12/2014	966	18,4	18,4	0,1	0,7	0,9	0,4	3,7	4,9	0,2
TT	05/2010-12/2014	1037	17,9	17,9	0,0	0,7	0,9	0,2	3,9	5,1	0,2
RO	06/2011-12/2014	771	17,5	17,5	0,0	0,7	0,9	0,2	3,9	5,1	0,2
		<b>4256</b>	—	—	<b>0,0</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	<b>0,3</b>	<b>3,7</b>	<b>4,9</b>	<b>0,2</b>
RB	04/2010-12/2014	1106	18,1	18,1	0,4	0,8	1,1	2,0	4,6	6,1	0,4
RM	05/2011-12/2014	704	16,9	16,9	0,2	0,8	1,1	1,1	5,0	6,3	0,3
MM	04/2011-12/2014	842	18,1	18,1	0,4	0,8	1,0	2,5	4,3	5,7	0,5
JI	07/2011-12/2014	835	18,1	18,1	0,1	0,8	1,1	0,4	4,6	5,8	0,2
RA	02/2011-12/2014	804	18,9	18,9	0,2	0,8	1,1	1,2	4,3	5,7	0,3
VA	09/2011-12/2014	737	18,1	18,1	0,2	1,0	1,3	1,3	5,3	7,1	0,3
BB	02/2012-12/2014	700	17,8	17,8	0,7	1,0	1,2	4,0	5,4	6,9	0,7
		<b>5728</b>	—	—	<b>0,3</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,8</b>	<b>4,7</b>	<b>6,2</b>	<b>0,4</b>

Cuadro 1.5: Comparación diaria de los estimativos satelitales contra datos medidos.

COD	período	# meses	MJ/m <sup>2</sup>		MBD	MJ/m <sup>2</sup>		rMBD	%		MJ/m <sup>2</sup>
			media	media		MAD	RMSD		rMAD	rRMSD	
LB	03/2010-12/2014	44	16,4	16,4	0,0	0,2	0,3	-0,3	1,5	1,8	0,2
AR	12/2011-12/2014	22	18,1	18,1	0,0	0,3	0,4	0,1	1,7	2,3	0,3
SA	06/2010-12/2014	44	17,4	17,4	0,0	0,2	0,3	0,3	1,2	1,7	0,2
TT	05/2010-12/2014	49	16,6	16,6	0,0	0,3	0,3	-0,1	1,6	2,0	0,2
RO	06/2011-12/2014	37	15,9	15,9	-0,1	0,3	0,4	-0,3	2,2	2,6	0,3
		<b>196</b>	—	—	<b>0,0</b>	<b>0,3</b>	<b>0,3</b>	<b>-0,1</b>	<b>1,6</b>	<b>2,0</b>	<b>0,2</b>
RB	04/2010-12/2014	53	17,0	17,0	0,2	0,5	0,6	1,4	2,9	3,8	0,4
RM	05/2011-12/2014	29	15,8	15,8	0,2	0,5	0,7	1,1	3,4	4,3	0,5
MM	04/2011-12/2014	38	17,2	17,2	0,4	0,5	0,6	2,2	2,8	3,6	0,5
JI	07/2011-12/2014	39	17,0	17,0	-0,1	0,5	0,6	-0,3	3,0	3,5	0,5
RA	02/2011-12/2014	38	17,6	17,6	0,1	0,5	0,7	0,7	2,6	3,7	0,4
VA	09/2011-12/2014	31	16,5	16,5	0,2	0,6	0,8	1,4	3,7	4,8	0,6
BB	02/2012-12/2014	32	16,8	16,8	0,5	0,7	0,8	3,2	4,1	5,0	0,6
		<b>260</b>	—	—	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,7</b>	<b>1,4</b>	<b>3,1</b>	<b>4,0</b>	<b>0,5</b>

Cuadro 1.6: Comparación de promedios mensuales, mes a mes, de los estimativos satelitales contra datos medidos.

La comparación con el modelo NASA se realizó en los 23 puntos indicados en azul en la Fig. 1.6b. NASA opera el modelo global NASA/SSE que genera valores mensuales de largo plazo con una resolución espacial de 1 grado por 1 grado. Al comparar los valores anuales de largo plazo del modelo NASA/SSE con los de nuestro modelo, se encontró un rMBD y rRMSD de 1,0 % y 1,3 % respectivamente [Alonso Suárez et al., 2014]. Estos son valores promedio en los puntos de comparación. En el cuadro 1.7 se puede encontrar desglosada la comparación para los estimativos de largo plazo de cada mes del año.

		anual	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	set	oct	nov	dic
Media	MJ/m <sup>2</sup>	<b>16,6</b>	24,4	20,9	17,7	13,2	10,4	8,5	9,5	12,2	15,9	19,1	23,0	24,9
MBD	MJ/m <sup>2</sup>	<b>0,2</b>	1,1	0,8	0,5	0,9	-0,4	-0,4	-0,2	-0,7	-1,2	-0,3	0,9	0,9
RMSD	MJ/m <sup>2</sup>	<b>0,2</b>	1,2	0,9	0,6	0,9	0,4	0,5	0,3	0,7	1,2	0,4	0,9	0,9
rMBD	%	<b>1,0</b>	4,6	3,8	2,6	6,9	-3,7	-5,3	-1,9	-5,4	-7,3	-1,5	3,8	3,6
rRMSD	%	<b>1,3</b>	4,8	4,5	3,2	7,1	3,9	5,5	2,9	5,9	7,4	2,0	4,0	3,7

Cuadro 1.7: Comparación con los datos generados por el modelo NASA/SSE.

### 1.3.5 Segunda versión del Mapa Solar del Uruguay (MSUv2)

El modelo satelital descrito en esta sección es la base de la segunda versión del Mapa Solar del Uruguay. Este será uno de los principales resultados de este desarrollo y es la base de la tesis doctoral de R. Alonso Suárez. Esta segunda versión contará con información sobre GHI, DNI y GTI. Una versión preliminar de la distribución espacial del promedio anual de la irradiación diaria fue publicado en [Alonso Suárez et al., 2014]. En las Figs. 1.7 y 1.8 se muestran los mapas de GHI y DNI generados para el MSUv2. la resolución de espacial de estos mapas es de 20 km. La incertidumbre del modelo en la generación de DNI aún no ha sido estimada. Próximamente se comparará la salida DNI del modelo contra los pocos datos de DNI que existen en Uruguay. Se utilizarán las medidas de DNI adquiridas por el LES en Salto (tres meses y aún en carácter de prueba) y los datos de DNI obtenidos indirectamente a través de medidas simultáneas de global y de difusa en las estaciones de medida de TT y AR (aproximadamente un año).

En suma, desde la aparición del MSUv1 (2009) que solo contaba con promedios mensuales de GHI en doce localidades, se ha trabajado en la implementación de una red de medidas continuas de radiación solar de alta calidad y se han puesto a punto métodos que permiten usar la información de satélites geostacionarios para estimar irradiación horaria en superficie con muy buen desempeño. Estos avances han permitido generar el MSUv2 que cuenta con información sobre varias componentes de interés de la radiación solar, a escala horaria y con resolución espacial de hasta 5 km. La incertidumbre (RMSD) de 13 % asociado a los estimativos satelitales de GHI es mas baja que la de modelos comerciales para la zona y es considerada muy buena<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Una medida de campo horaria con un piranómetro de Primera Clase bien mantenido tiene una incertidumbre asociada en el entorno de 7%.

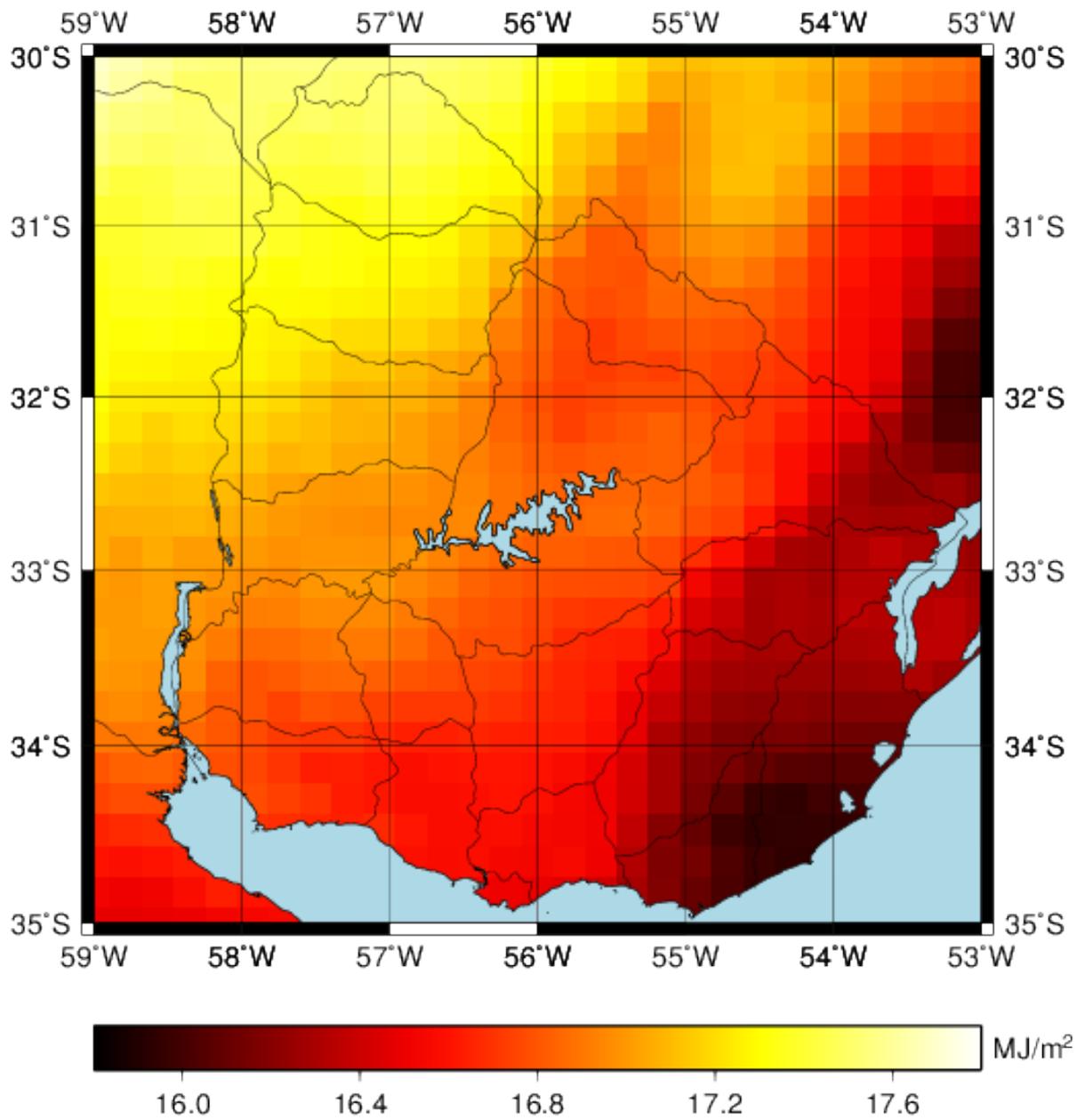


Figura 1.7: Distribución espacial del promedio anual de GHI con resolución 20 km.

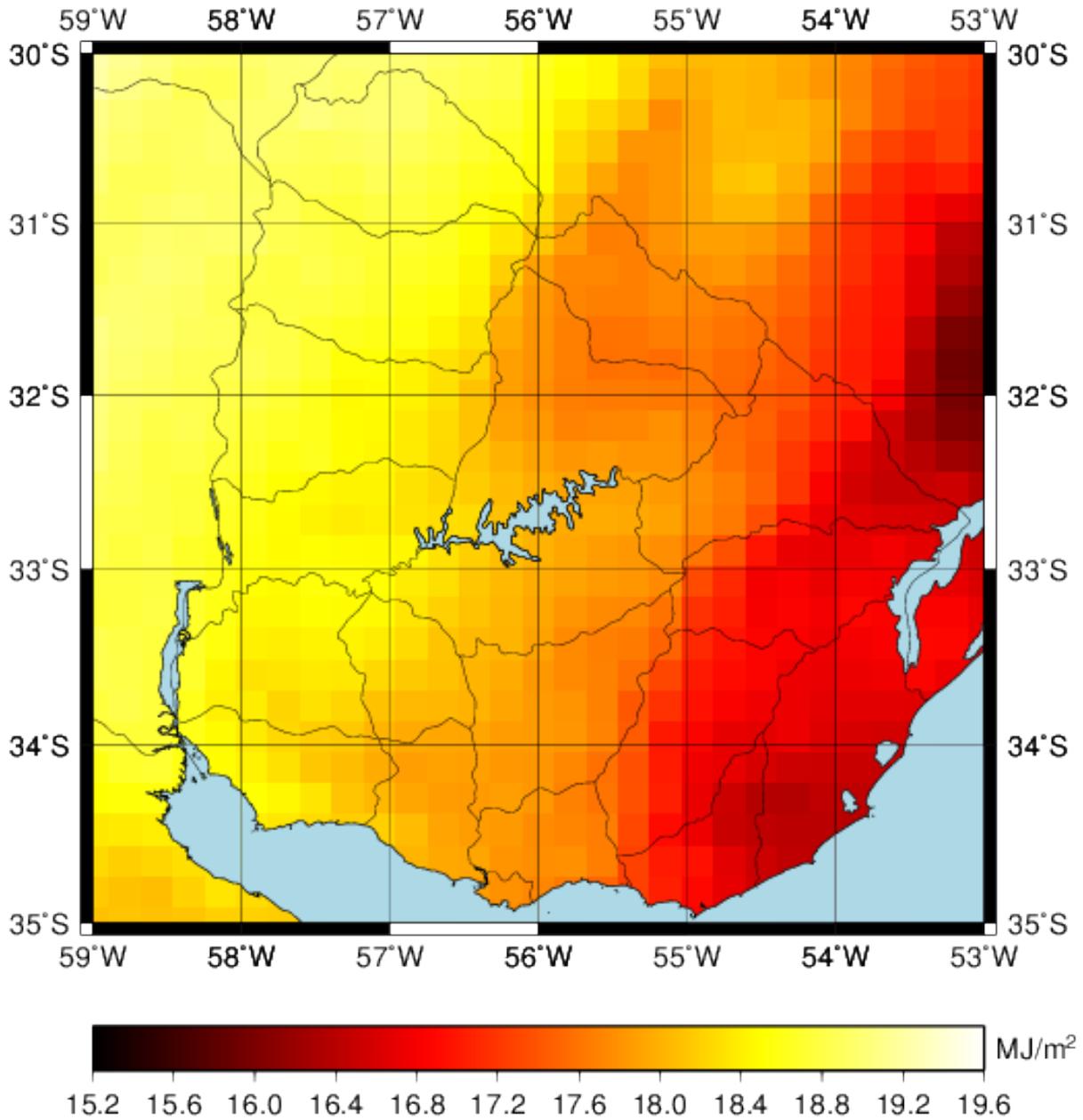


Figura 1.8: Distribución espacial del promedio anual de DNI con resolución 20 km.

## Estaciones de Medida de segunda generación

A partir de la experiencia adquirida entre 2010 y 2012 en la operación y mantenimiento de la red de medidas de primera generación (ver Cuadro 1.2), nuestro grupo comenzó a pensar y diseñar las nuevas estaciones de segunda generación, con los siguientes objetivos en mente:

- a) Sencillez de operación y bajo mantenimiento.
- b) Asegurar la calidad y simplificar el pos-procesamiento de los datos.
- c) Autonomía en cuanto a potencia y comunicaciones.
- d) Asegurar la continuidad temporal de las series de medidas, especialmente la de GHI.
- e) Prever una operación continua de largo plazo (al menos 10 años) para caracterizar la variable irradiancia solar.
- f) Flexibilidad para agregar medidas de diferente tipo y programar los adquisidores, sin depender de firmas comerciales o de los fabricantes.

El elemento central de la estación es el equipo de adquisición de datos. Después de una búsqueda exhaustiva se llegó a dos adquisidores comerciales con las capacidades necesarias: el Campbell Scientific CR800 con accesorios varios y el Fischer Scientific Datataker modelo DT80LM3. Si bien el primero es el estándar en laboratorios científicos y tenemos experiencia con tres CS CR1000 que miden en el Laboratorio de Energía Solar, debíamos adquirir al menos 10 adquisidores y consideraciones de costo global nos hicieron optar por el Datataker, de origen Australiano. Además de ofrecer similares prestaciones a un costo del orden de la mitad, estos equipos son muy robustos, todas sus funciones son programables remotamente via una página web y tienen el hardware de comunicaciones integrado (puerto usb, puerto Ethernet, modem GSM) por lo que su configuración es mucho más sencilla.

Se adquirieron inicialmente dos adquisidores Datataker y luego de un período de prueba de seis meses, se adquirió una partida de 10 equipos Datataker DT80M, cuyas características generales se indican en la Fig. 2.1. Cada uno de estos adquisidores viene con un certificado de calibración como el que se muestra en el Apéndice A. Estos costos fueron financiados parcialmente a través de un Proyecto de Investigación del Fondo Sectorial de Energía (ANII) en ejecución entre 2012 y 2014.

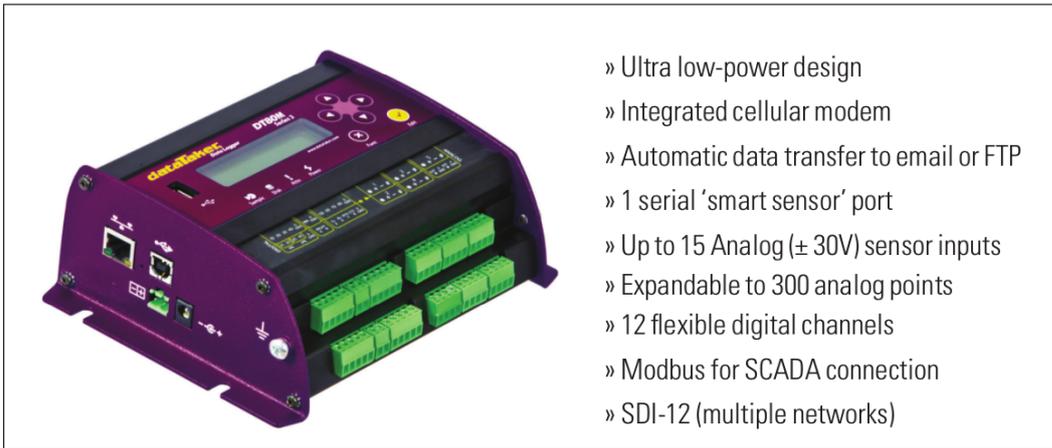


Figura 2.1: Adquisidor Datataker DT80LM3 de Fischer Scientific usado en todas las estaciones de medida G2. No requiere amplificación externa para señales de piranómetros y es completamente programable.



Figura 2.2: Izq. Estación G2 montada en Treinta y Tres. En el fondo, se ve la estación G1. El período de coexistencia de ambas estaciones se extendió por al menos seis meses. Der: Interior del gabinete estanco de una estación G2, mostrando el adquisidor, el regulador de voltaje y una batería de reserva de 17 Ah.

## 2.1 Funcionalidad de las estaciones G2

El concepto general de las estaciones G1 basadas en adquisidores Adqvx fue exitoso y se mantuvo en las estaciones G2. Cada estación consta de un soporte metálico con una plataforma elevada (la “mesa”) a 2 m de altura sobre el piso, donde se ubican los instrumentos (Fig. 2.2 Izq.). Un gabinete estanco para la electrónica de adquisición, potencia y comunicaciones y una batería de 50 o 50 Ah en un gabinete metálico al pie del equipo. La potencia la provee un panel fotovoltaico de 18 vdc entre 40 y 60 W y un regulador de voltaje de 12 v asegura el suministro a la batería. El interior del gabinete estanco con una batería de reserva de 17 Ah se muestra en la Fig. 2.2 Der.



Figura 2.3: Interfaz web generada por los adquirentes remotos G2. Permite acceder a los datos en tiempo real, descargar el histórico de medidas, configurar el adquirente por completo o correr autodiagnósticos.

### Conectividad y acceso a las medidas

Los equipos se conectan a la Red GSM usando chips de ANTEL (la empresa de telecomunicaciones nacional). Reciben una IP pública al conectarse a la red, lo cual los hace vulnerables desde el punto de vista de ataques informáticos mal intencionados. Estamos gestionando un convenio con ANTEL mediante el cual se proveerá al Laboratorio de Energía Solar sin costo de una VPN (Red Privada Virtual) con 100 chips para comunicaciones. De este modo, todos los adquirentes son parte de la red del laboratorio y no quedan expuestos a ataques externos. A cambio, el laboratorio provee a ANTEL de información detallada sobre el recurso solar en los puntos que ANTEL solicite (lo cual les permitirá dimensionar los equipos para proveer potencia fotovoltaica para sus estaciones retransmisoras remotas de la red GSM). La Fig. 2.3 muestra la interfaz gráfica que uno observa al conectar con un Datataker remoto desde una PC conectada a internet, via su IP público.

El acceso a las medidas en tiempo real puede realizarse en formato gráfico o en forma tabulada, como se muestra en la Fig. 2.4. Todos los días a las 00:00 horas locales, el equipo se conecta al servidor del LES y envía el archivo de datos del día por FTP. Estos datos son luego procesados para control de calidad y para integración de los productos horario y diario, como se describe en la Sección 2.3. Hasta la fecha existen instaladas cuatro estaciones remotas basadas en equipos Datataker y se preparan dos más para su despliegue en los próximos días. Las primeras estaciones G2 están en operación desde hace más de un año, sin inconvenientes. Por supuesto, las visitas de mantenimiento son más frecuentes al inicio ya que hay que realizar ajustes localmente, como la orientación de la antena en sitios muy remotos (Treinta y Tres es el más débil en cuanto a cobertura GSM) y allí fue necesario instalar doble antena, una direccional (Yaggy) y otra omnidireccional para evitar pérdida de comunicaciones.

Ru	Name	Value	Units	Alarm	Time stamp	Log	Input	Schedule
✓	CMP10(GHI1)_AV	125.61473	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	1*V	(A) Medida
✓	CMP10(GHI1)_SD	1.10279	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	1*V	(A) Medida
✓	L83700(G35)_AV	364.53592	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	3*V	(A) Medida
✓	L83700(G35)_SD	1.7440375	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	3*V	(A) Medida
✓	Pt1000(TA)	23.923828	C		2015-04-23, 20:12:00	✓	4*R	(A) Medida
✓	Pt1000(TA)_AV	23.876686	C		2015-04-23, 20:12:00	✓	4*R	(A) Medida
✓	Pt1000(TA)_SD	0.0337538	C		2015-04-23, 20:12:00	✓	4*R	(A) Medida
✓	SPN1(DHI)_AV	35.235138	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	2+V	(A) Medida
✓	SPN1(DHI)_SD	1.1883906	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	2+V	(A) Medida
✓	SPN1(GHI2)_AV	122.11523	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	2*V	(A) Medida
✓	SPN1(GHI2)_SD	1.8214577	W/m2		2015-04-23, 20:12:00	✓	2*V	(A) Medida
✓	T_int_AV	31.610365	C		2015-04-23, 20:12:00	✓	REFT	(A) Medida
✓	VBAT	13.253334	volt		2015-04-23, 20:12:00	✓	VEXT	(A) Medida
✓	VBAT_AV	13.253334	volt		2015-04-23, 20:12:00	✓	VEXT	(A) Medida

Figura 2.4: Datos generados minuto a minuto en la estación G2 de Treinta y Tres. Acceso en tiempo real a través de la interfaz del adquirente. En este caso, correspondiente al 23/04/2015 las 20:12 UTC o las 17:12 hora local, se observan dos medidas de GHI (GHI1, piranómetro Kipp & Zonen CMP10 y GHI2, Delta T SPN1) que difieren en  $4 \text{ W/m}^2$ , menos de 3%. Una medida de DHI (difusa) del SPN1 y una medida de GTI (global en plano inclinado a  $\beta = 35^\circ$ ) por un Licor SL200. Además, se observa la medida de temperatura ambiente (una Pt1000) y otras medidas secundarias.

Las visitas de mantenimiento se realizan con frecuencia semestral si no hay inconvenientes y se intenta responder en menos de 3 días cuando hay falla en la comunicación remota. Los equipos Datataker pueden almacenar los datos localmente por aproximadamente 90 días, por lo que este es el plazo límite de respuesta antes de comenzar a perder información.

## Medidas de DNI

Tres de las estaciones remotas G2 cuentan con piranómetros *inteligentes* modelo SPN1 fabricados por la firma inglesa Delta T (Fig. 2.5). Estos piranómetros miden simultáneamente GHI y DHI sin utilizar partes móviles. Se basan en un sistema de máscara y 8 sensores puntuales, de los cuales en todo momento hay algunos en sombra y otros sometidos a irradiancia global. La electrónica interna del equipo permite desglosar a partir de estas medidas las componente difusa (DHI) de la irradiancia global. Hemos chequeado el desempeño de estos equipos contra una medida cuidadosa de radiación difusa con banda de sombra y piranómetro y la estiman bastante bien con un desvío cuadrático medio del 6%. A partir de GHI y DHI, es posible estimar DNI

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \theta_z} \quad (2.1)$$

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital del Sol. Esta estimación de DNI no es confiable en las horas en que el Sol está bajo, ya que al amanecer y al atardecer el ángulo cenital se acerca a  $90^\circ$  y  $\cos \theta_z \approx 0$ . Los equipos Delta T SPN1 no son equipos de precisión, pero permiten estimar DNI con precisión razonable a una fracción del costo de un equipo de referencia como el basado en el Solis 2. No requieren mantenimiento (salvo la limpieza periódica de su cúpula) por no tener partes móviles.



Figura 2.5: Equipo SPN1 de Delta T midiendo radiación difusa sin partes móviles en la estación TT. Además, provee la medida GHI redundante. La principal es la del piranómetro CMP6 mostrado al fondo.

Además de las medidas indirectas de DNI montadas en tres de las estaciones remotas G2, el LES cuenta con dos estaciones especiales de medida de DNI en el propio laboratorio en Salto. La medida de referencia (Fig. 2.6 Izq.) utiliza un tracker automático Solys 2 de Kipp & Zonen, sobre el cual se montan dos piranómetros CMP11 (Estándar Secundario) provistos de unidades de ventilación que evitan el depósito de polvo o agua en las cúpulas de borosilicato. Uno de los piranómetros tiene bloqueada la radiación directa por una bocha esférica. Además, el equipo cuenta con dos pirheliómetros midiendo DNI. Uno de ellos, un CHP1 de Kipp & Zonen con calibración vigente del fabricante, el otro para dar redundancia, es un NIP de la firma Eppley. Los datos generados son registrados en un adquisidor Campbell Scientific CR1000 ubicado en el interior del laboratorio. La conectividad es provista por una interfaz Ethernet cableada con aislamiento de fibra óptica para evitar los daños a la red debidos a descargas atmosféricas.

El otro equipo, mostrado en la Fig. 2.6 Der. es un Rotating Shadowband Radiometer, fabricado por la firma Irradiance Inc. de USA. Esta es una estación meteorológica completa con GPS y un radiómetro Licor SL200 para medida de GHI. Además, el equipo esta provisto de una banda fina que bloquea periódicamente la radiación directa de modo que el radiómetro en ese momento mide la difusa<sup>1</sup>. El adquisidor de datos es un Campbell Scientific CR1000 que Irradiance Inc. entrega pre-programado y con el código esencial oculto. Este código corrige la medida del radiómetro teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas del momento y reporta los valores de GHI, DHI y DNI, basada esencialmente en la Ec. (2.1), por lo cual lo consideramos una medida indirecta de DNI. Este tipo de equipos han estado midiendo durante años en condiciones extremas en Chile, desde el desierto de Atacama hasta Usuahia en el extremo Sur, sin problemas. Dado que su costo es algo menor que el de un sistema Solis, hemos adquirido uno y lo tenemos a prueba al lado de la medida de referencia. Luego de un período de seis meses

<sup>1</sup>Los radiómetros fotovoltaicos tienen una respuesta rápida, de modo que permiten capturar el instante de sombra sin problemas.



Figura 2.6: Medidas de DNI directa e indirecta. Izq. Equipo de seguimiento Solis 2 con dos piranómetros con ventilación, dos pirheliómetros y una medida redundante de GHI con un radiómetro Licor SL200. Der. Equipo RSR2 de Irradiance Inc. basado en un radiómetro fotovoltaico y medidas meteorológicas anexas, que puede medir DNI al 5 % según el fabricante. Esta a prueba en el LES.

de prueba esta estación será desplegada en Paysandú.

Los adquirentes de ambos equipos están conectados a la red interna del LES con IP propio y aislación óptica. De modo que es posible monitorear las medidas en tiempo real a través de la red del LES. La Fig. 2.7 muestra una de las tablas de datos en tiempo real del Solis2. La Fig. 2.8 muestra una de las tablas de datos en tiempo real del RSR2.

### Tipos y costos de las estaciones de medida

El costo de cada una de las estaciones depende fuertemente de los instrumentos de medida que tienen sobre ellas. Podemos distinguir *grasso modo* tres clases de estaciones.

- A) **Estaciones tipo A:** miden DNI, DHI, GHI con redundancia. Utilizan radiómetros de clase Estándar Secundario con ventilación seca, adquirentes Campbell Scientific CR1000 y mecanismo de seguimiento de calidad. Reciben mantenimiento (limpieza) a diario y se ajustan al padrón de la BSRN (Baseline Solar Radiation Network). Las medidas tienen una incerteza asociada entre 1 % y 3 %. Tienen un costo aproximado de USD 25000.-
- B) **Estaciones tipo B:** miden DHI y GHI con redundancia. Utilizan radiómetros de Primera Clase o Estándar Secundario sin ventilación. La medida de DHI es automática, sin intervención humana. Puede basarse en un RSR o en un radiómetro inteligente SPN1. Los adquirentes son Datataker o Campbell Scientific CR1000 y seguimiento de calidad. Las medidas tienen una incerteza asociada entre 3 % y 5 %. Esto no es válido para DNI estimada, especialmente en horas con Sol bajo. Tienen un costo aproximado de USD 10000 para una medida con SPN1 o USD 15000 para una medida con RSR2.
- C) **Estaciones tipo C:** miden GHI redundante, y en algunas GTI (global sobre plano inclinado). Utilizan piranómetros CMP6 (Primera Clase) para la medida primaria de GHI, que tiene incerteza asignada de 6 %. Miden temperatura ambiente y son autónomas con comunicación basada en red GSM. Los adquirentes son Datataker DT80. Tienen un costo aproximado de USD 5000.-

**Table Name: RAD**

TimeStamp	Record	GHI1_Avg	GHI1_Std	GHI2_Avg	GHI2_Std	DHI_Avg	DHI_Std	DNI1_Avg	DNI1_Std	DNI2_Avg	DNI2_Std	GTI_Avg	GTI_Std
2015-04-23 16:52:00.0	173413	302.8	1.21	260.9	1.058	40.67	0.057	611.2	1.14	712.3	1.02	398.6	1.587
2015-04-23 16:53:00.0	173414	298.8	1.211	257.5	1.057	40.44	0.097	608.4	0.9440	709.1	1.058	393.8	1.347
2015-04-23 16:54:00.0	173415	294.8	1.066	254.2	0.9120	40.12	0.0880	605.6	0.55	706	0.636	389.6	1.068
2015-04-23 16:55:00.0	173416	291.3	1.025	251.3	0.8480	39.96	0.057	604.7	0.45	704.3	0.572	385.5	1.279
2015-04-23 16:56:00.0	173417	287.5	1.133	248.1	0.943	39.77	0.071	602.6	0.536	701.6	0.854	381.1	1.227
2015-04-23 16:57:00.0	173418	283.5	1.194	244.9	0.9780	39.42	0.131	599.7	0.836	698.4	1.063	376.9	1.254
2015-04-23 16:58:00.0	173419	279.6	1.086	241.8	0.892	39.08	0.059	597.7	0.612	695.6	0.627	366.2	10.6
2015-04-23 16:59:00.0	173420	276.1	1.092	239	0.9	38.88	0.063	596.2	0.563	693.9	0.648	260.7	47.03
2015-04-23 17:00:00.0	173421	272.3	1.107	235.9	0.9300	38.7	0.079	593.9	0.767	691.4	0.869	107.9	34.43
2015-04-23 17:01:00.0	173422	268.6	1.097	232.8	0.9120	38.37	0.082	591.6	0.487	688.8	0.6760	54.07	2.59
2015-04-23 17:02:00.0	173423	264.8	1.11	229.8	0.9130	38.08	0.156	589.2	0.9440	686.2	0.988	50.93	0.217
2015-04-23 17:03:00.0	173424	261	1.131	226.5	0.946	37.56	0.129	586.5	0.757	683.1	0.915	54.62	4.375
2015-04-23 17:04:00.0	173425	257	1.14	223.3	0.9040	37.23	0.132	583.6	1.048	679.8	0.97	101.5	23.83
2015-04-23 17:05:00.0	173426	253	1.165	220.1	0.989	36.85	0.0870	580.6	0.8850	676.4	0.975	201.1	31.28
2015-04-23 17:06:00.0	173427	248.9	1.147	216.7	0.9450	36.51	0.09	577.2	0.997	672.7	1.08	295.9	20.82
2015-04-23 17:07:00.0	173428	244.8	1.159	213.4	0.942	36.28	0.0730	573.9	0.984	668.8	1.051	330.4	1.652
2015-04-23 17:08:00.0	173429	241.1	1.082	210.4	0.8660	36.08	0.046	571.4	0.821	665.8	0.8880	328.1	1.453
2015-04-23 17:09:00.0	173430	237.4	1.051	207.3	0.859	35.84	0.107	568.4	0.8010	662.8	0.8420	291.7	25.33
2015-04-23 17:10:00.0	173431	233.4	1.198	204.1	0.9710	35.45	0.126	565	1.064	659.3	1.085	173.5	38.63
2015-04-23 17:11:00.0	173432	229.3	1.213	200.9	0.97	35.01	0.116	561.3	1.099	655.4	1.315	67.85	18.12
2015-04-23 17:12:00.0	173433	225.2	1.13	197.7	0.9300	34.89	0.028	558.1	0.791	651.2	1.234	47.29	0.477
2015-04-23 17:13:00.0	173434	221.3	1.161	194.4	0.951	34.8	0.115	554.2	1.408	646.8	1.445	46.2	0.146
2015-04-23 17:14:00.0	173435	217.5	1.147	191.3	0.946	34.48	0.112	550.7	0.9030	642.9	1.317	62.31	16.33
2015-04-23 17:15:00.0	173436	213.4	1.177	188.1	0.928	34.08	0.129	546.6	1.591	638.3	1.347	159.1	35.09

Figura 2.7: Tabla de datos en tiempo real del Solis2 instalado en la azotea del LES. La medida indicada DNI2 difiere de DNI1 porque el pirheliómetro NIP es antiguo y esta siendo recalibrado contra el equipo CHP1.

TimeStamp	Record	Global_Avg	Global_2_Avg	Direct_Avg	Diffuse_Avg	GHI_IS_Avg	DNI_IS_Avg	AirTemp_Avg	RH_Avg	Press_Avg	ZenDeg_Avg	WSpd_WVc(1)	WSpd_WVc(2)	WSpd_WVc(3)	WSmax_Max	Global_Raw_Avg	Direct_Raw_Avg	Diffuse_Raw_Avg
2015-04-23 19:53:00.0	108000	235.5	NAN	708	45.61	NAN	NAN	26.24	40.99	1027	72.76	1.719	275.8	5.042	2.145	254.1	748.1	32.31
2015-04-23 19:54:00.0	108001	232.5	NAN	706.7	45.28	NAN	NAN	26.21	40.78	1027	72.95	1.746	285.4	18.88	2.145	251	746.6	32.09
2015-04-23 19:55:00.0	108002	249.6	NAN	705	45.07	NAN	NAN	26.29	41.59	1027	73.14	1.4	312.3	34.78	1.879	248.1	745	31.99
2015-04-23 19:56:00.0	108003	246.2	NAN	702.3	44.74	NAN	NAN	26.35	41.96	1027	73.33	1.653	330.7	42.88	2.145	244.7	742.1	31.79
2015-04-23 19:57:00.0	108004	243.2	NAN	699.8	44.66	NAN	NAN	26.18	42.02	1027	73.52	1.107	23.61	51.12	1.346	241.6	739.4	31.83
2015-04-23 19:58:00.0	108005	240.3	NAN	698.4	44.37	NAN	NAN	26.27	41.8	1027	73.71	1.027	359.8	31.9	1.346	238.6	737.9	31.66
2015-04-23 19:59:00.0	108006	237.1	NAN	696.6	43.94	NAN	NAN	26.61	41.36	1027	73.9	1.014	320.7	28.83	1.346	235.5	736.2	31.36
2015-04-23 20:00:00.0	108007	234.2	NAN	693.6	44.1	NAN	NAN	26.91	40.94	1027	74.09	1.04	313.9	16.08	1.346	232.6	733.3	31.64
2015-04-23 20:01:00.0	108008	231.1	NAN	690.4	44.08	NAN	NAN	27.11	40.64	1027	74.28	0.8	40.08	69.81	1.346	229.5	730	31.74
2015-04-23 20:02:00.0	108009	227.8	NAN	688.7	43.51	NAN	NAN	27.15	38.61	1027	74.48	0.8	89.4	37.23	1.346	226.2	728.2	31.3
2015-04-23 20:03:00.0	108010	224.7	NAN	687.2	42.98	NAN	NAN	26.9	38.91	1027	74.67	0.53	98.2	43.93	1.346	223	726.4	30.9
2015-04-23 20:04:00.0	108011	221.5	NAN	683.9	42.86	NAN	NAN	26.76	38.63	1027	74.86	0.76	86.4	41.28	1.08	219.7	722.8	30.91
2015-04-23 20:05:00.0	108012	218.3	NAN	680.6	42.71	NAN	NAN	26.59	39.36	1027	75.05	0.97	52.48	26.5	1.346	216.4	719.2	30.9
2015-04-23 20:06:00.0	108013	215	NAN	678.1	42.27	NAN	NAN	26.4	40.04	1027	75.25	0.71	21.47	21.3	1.346	213	716.2	30.59
2015-04-23 20:07:00.0	108014	211.9	NAN	676.1	41.95	NAN	NAN	26.16	40.54	1027	75.44	0.73	308.4	69.23	1.08	209.8	713.7	30.4
2015-04-23 20:08:00.0	108015	208.9	NAN	674.2	41.63	NAN	NAN	26.3	40.16	1027	75.63	0.68	304.4	31.4	1.08	206.8	711.7	30.2
2015-04-23 20:09:00.0	108016	205.9	NAN	671.6	41.45	NAN	NAN	26.51	39.18	1027	75.83	0.45	281.4	40.51	0.81	203.8	709.1	30.16
2015-04-23 20:10:00.0	108017	202.3	NAN	667.4	41.09	NAN	NAN	26.78	38.59	1027	76.02	0.65	209.6	12.16	0.81	200.3	705	29.95
2015-04-23 20:11:00.0	108018	198.9	NAN	664.5	40.51	NAN	NAN	27.04	38	1027	76.21	0.44	246.1	27.07	0.55	196.9	702.3	29.52
2015-04-23 20:12:00.0	108019	195.6	NAN	659.1	40.73	NAN	NAN	27.36	37.94	1027	76.41	0.76	281.8	36.75	1.08	193.8	697.3	29.88
2015-04-23 20:13:00.0	108020	192.2	NAN	654.5	40.54	NAN	NAN	27.58	38.5	1027	76.6	1.053	290.9	14.88	1.346	190.4	693.1	29.84
2015-04-23 20:14:00.0	108021	188.9	NAN	651.6	40.1	NAN	NAN	27.55	38.75	1027	76.80	1.08	309.8	33.81	1.346	187.3	690.4	29.55
2015-04-23 20:15:00.0	108022	185.4	NAN	647.3	39.74	NAN	NAN	27.42	38.84	1027	76.99	1.16	333.2	27.16	1.346	183.9	686.4	29.34
2015-04-23 20:16:00.0	108023	182	NAN	643.8	39.24	NAN	NAN	27.23	38.68	1027	77.19	0.83	290.5	34.1	1.08	180.6	683.3	29

Figura 2.8: Tabla de datos en tiempo real del RSR2 instalado en la azotea del LES. Obsérvese que incluye medidas meteorológicas como velocidad y dirección de viento, humedad realtiva, temperatura del aire, entre otras. Los canales indicados NAN corresponden a medidas programadas, pero no habilitadas.

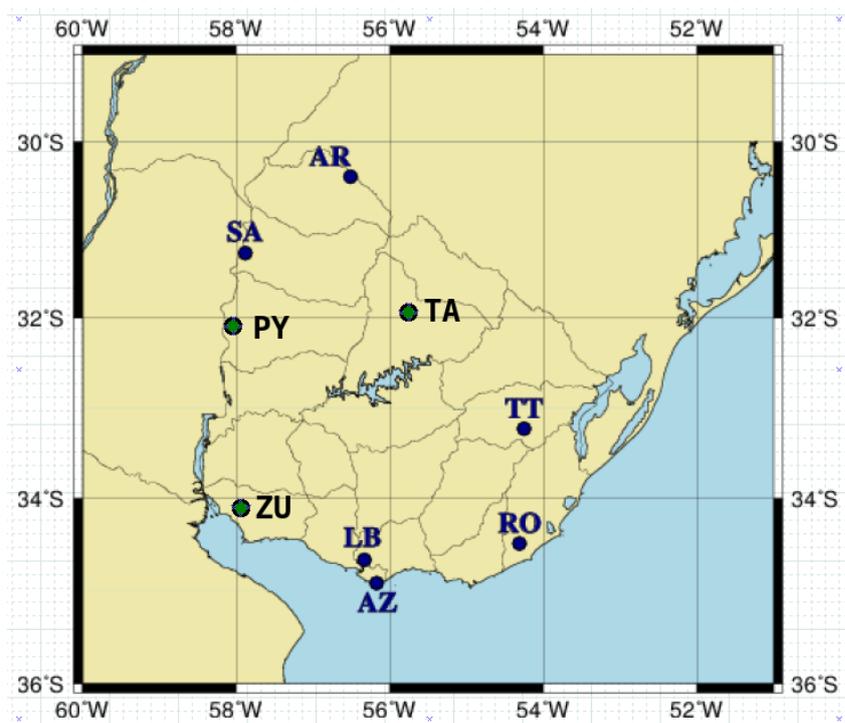


Figura 2.9: Ubicación aproximada de las estaciones de medida de irradiancia del LES (azul). En verde, se indican las estaciones que entrarán en operación en 2015.

La red de medidas del LES tiene actualmente una estación tipo A (aún a prueba), cuatro estaciones tipo B (dos de ellas aún a prueba) y cinco estaciones tipo C (una a prueba). Contando con los equipos en reserva para reemplazo de equipos que fallen, el costo instalado de la red de medidas es actualmente de unos USD 100000.- solo en equipamiento, sin contar los equipos Kipp & Zonen CMP22 y adquisidores usados para calibración de los radiómetros.

## 2.2 Distribución espacial y otras características

La distribución espacial de los puntos de medida ha quedado en gran medida predeterminada por el criterio de dar continuidad a las medidas de generación 1. Se ha continuado con el criterio de ubicar equipos en las Estaciones Experimentales del INIA, restándonos actualmente cubrir dos estaciones en Tacuarembó y Colonia, lo que está previsto concretar en los próximos meses. Las nuevas estaciones PY (Paysandú), TA (Tacuarembó) y ZU (Colonia) ya se encuentran en línea y a prueba en el predio del LES. Dos de ellas tienen capacidad de medir irradiancia difusa. Como se observa en la Fig. 2.9, la puesta en marcha de estas tres estaciones en su ubicación definitiva nos permitirá cubrir un “hueco” existente en nuestra red de medidas en la zona central del territorio del Uruguay.

El Cuadro 2.1 muestra las ubicaciones y capacidades de las estaciones G2. Se incluyen las nuevas estaciones, actualmente en fase de prueba, con sus ubicaciones tentativas. La fecha de inicio indicada corresponde a la medida inicial de GHI. En el período, se han medido en algunas estaciones otras variables durante períodos cortos, por ejemplo irradiancia UVA, UV-Erithema (índice UV) o irradiancia en el infrarrojo cercano.

No se planea expandir la red mucho más que a diez puntos. El énfasis está en la calidad y continuidad de las medidas. Con esta información es posible validar series de medidas de terceros, ajustar nuestro modelo satelital periódicamente y realizar nuestra actividad de investigación en

Local	Cód.	LAT (°)	LON (°)	ALT (m)	GHI1	GHI2	DHI	DNI	GTI( $\beta$ )	Inicio
Artigas	AR	-30.40	-56.51	136	•	•	•		35°	12/2011
Colonia (*)	ZU	-34.33	-57.68	81	•	•				05/2015
Canelones	LB	-34.67	-56.33	32	•	•			35°	01/2010
Montevideo	AZ	-34.92	-56.17	58	•	•				01/2011
Paysandú (*)	PY	-32.83	-58.05	53	•		•			07/2015
Rocha	RO	-34.49	-54.32	30	•	•				12/2011
Salto	SA	-31.28	-57.92	56	•	•	•	•	30°	01/2015
Tacuarembó (*)	TA	-33.70	-55.82	140	•	•	•		45°	05/2015
Treinta y Tres	TT	-33.28	-54.17	26	•	•	•		45°	06/2010

Cuadro 2.1: Ubicación y capacidades de las estaciones G2. En la columna GTI se indica el ángulo del plano de la medida de irradiancia sobre plano inclinado. En todas las estaciones se mide temperatura del aire (bulbo seco). Los datos se registran cada un minuto. La fecha de inicio corresponde a la medida inicial de GHI. Las estaciones aún en fase de prueba se indican por (\*). Por datos, gráficos y otros detalles, visitar <http://les.edu.uy>

temas vinculados a la caracterización y el modelado del recurso solar.

## 2.3 Post-procesamiento y control de calidad

Una vez que los datos se reciben en el servidor, son procesados para evaluar su calidad y etiquetados de acuerdo a una serie de criterios de calidad descritos a continuación. Además, en caso de pasar los criterios de base, son integrados a escalas 10-minutal, horaria y diaria y generados en una variedad de formatos para diferentes usos. Este proceso esta parcialmente automatizado.

Dado que el énfasis es en los procesos de control de calidad, los hemos descrito en cierto detalle. No obstante, dado que la red ha entrado en un proceso de reconfiguración recientemente, los controles a implementarse acompañarán estos cambios. Por ejemplo, a medida que se logra introducir redundancia en la medida de GHI en todas las estaciones, el control correspondiente (consistencia entre ambas medidas, dentro de la tolerancia asociada a la calidad de los sensores) se comience a implementar en todas las estaciones.

### 2.3.1 Productos

El Ing. Daniel Aicardi esta a cargo del procesamiento inicial de los datos de irradiancia solar. Los datos crudos enviados por los adquisidores remotos son recibidos en un servidor<sup>2</sup> y son luego almacenados en un servidor central en el cual se ejecutan las tareas de post-procesamiento y control de calidad primario. La ejecución de estas tareas es actualmente automática y no requiere intervención humana. Debe tenerse en cuenta que actualmente llegan diariamente al servidor central del LES datos minutales de seis estaciones de medida, con un promedio de cinco medidas diferentes por estación (irradiancia global, irradiancia difusa, temperatura ambiente, temperatura de referencia en el adquisidor, batería, DNI, irradiancia UV, irradiancia en infrarrojo cercano, etc). Esto hace a unas 43200 líneas de datos diariamente todos los días del año, lo cual implica que el procesamiento inicial debe ser automático. Además, a medida que la red crece en estaciones y funcionalidades, esta cifra aumenta con rapidez.

Para el post-procesamiento se diseñaron rutinas de software (en Python) que realizan las tareas que se indican a continuación:

<sup>2</sup>Actualmente, los datos llegan a un servidor comercial en USA, debido a que los servidores de Facultad de Ingeniería tienen severas restricciones de acceso desde fuera por motivos de seguridad informática. Desde allí, un script los baja automáticamente a las máquinas del LES en Facultad de Ingeniería. Se esta ahora configurando el servidor del LES en el nuevo laboratorio de Salto que recibirá estos datos en forma directa de los adquisidores.

- Una vez al mes se buscan datos nuevos en el servidor central y se inicia el procesamiento por cada estación, por cada variable. Solo se procesan meses completos, por lo tanto se consideran los datos hasta el mes anterior al que se ejecuta el programa (esto es, si el programa es ejecutado en Junio, procesa los nuevos datos obtenidos hasta Mayo inclusive).
- Se generan los archivos ART (alta resolución temporal). Los archivos ART contienen los datos enviados por los adquirentes en un formato uniforme<sup>3</sup> común. El formato utilizado es el CSV (texto, con campos separados por comas).
- A partir de los ART generados, se crean los archivos asociados a los productos secundarios. Estos son las integrales o promedios horarios (E10, E60, S60) en formato CSV y el P60 en formato Excel. Los totales acumulados diarios (D01, P01) en formatos CSV o planilla excel. Estos archivos excel están disponibles al público a través del sitio del LES <http://les.edu.uy>. El Cuadro 2.2 muestra los diferentes productos asociados a cada variable medida. Todos estos productos estarán disponibles para los usuarios – dependiendo de los permisos de acceso que tengan – a través de la base de datos en línea del LES (Sección 3.4).

Producto	Código	Formato
Alta Resolución Temporal (1 min o 3 min)	ART	CSV
Datos horarios, hora estándar (inicio)	E60	CSV
Datos horarios, hora estándar (inicio)	P60	Excel
Datos horarios, hora satelital (medio)	S60	CSV
Datos diarios	D01	CSV
Datos diarios	P01	Excel

Cuadro 2.2: Productos generados automáticamente para cada variable registrada. La hora estándar se corresponde con UTC-0 o tiempo Greenwich. Para los E60, la etiqueta horaria indica el inicio del intervalo de medida, para los S60 indica el punto medio del intervalo de medida y se utilizan en conjunto con las imágenes satelitales.

La Fig. 2.10 muestra un esquema de los diferentes productos y como se interrelacionan entre si. En esta figura se indica en forma detallada los campos de cada formato.

### 2.3.2 Control de calidad

Para un control de calidad efectivo, debe contarse con suficiente redundancia en las medidas. Por ejemplo, si se mide GHI dos veces en cada estación con instrumentos de similar calidad, es posible aplicar un filtro de consistencia. Por ejemplo, si los piranómetros son dos CMP6 de Kipp & Zonen, las medidas deberían coincidir a menos de 7%. Existe un problema de costo, por lo que actualmente en las estaciones del LES se mide dos veces GHI, pero la segunda medida es un radiómetro Licor. Esto nos permitirá un chequeo de consistencia adicional a escala horaria.

#### Filtrado con tres componentes

Cuando se mide simultáneamente las tres componentes de irradiancia horizontal, se pide que

$$|GHI - DNI \cdot \cos \theta_z - DHI| < \delta$$

<sup>3</sup>Hasta 2014 la red contenía al menos tres tipos diferentes de adquirentes y el formato en que llegaba la información al servidor era muy variable, lo cual complejizaba bastante la tarea de generar los ART. Hoy, los adquirentes son idénticos en todas las estaciones, pero aún hay particularidades por estación ya que las medidas difieren de una estación a otra.

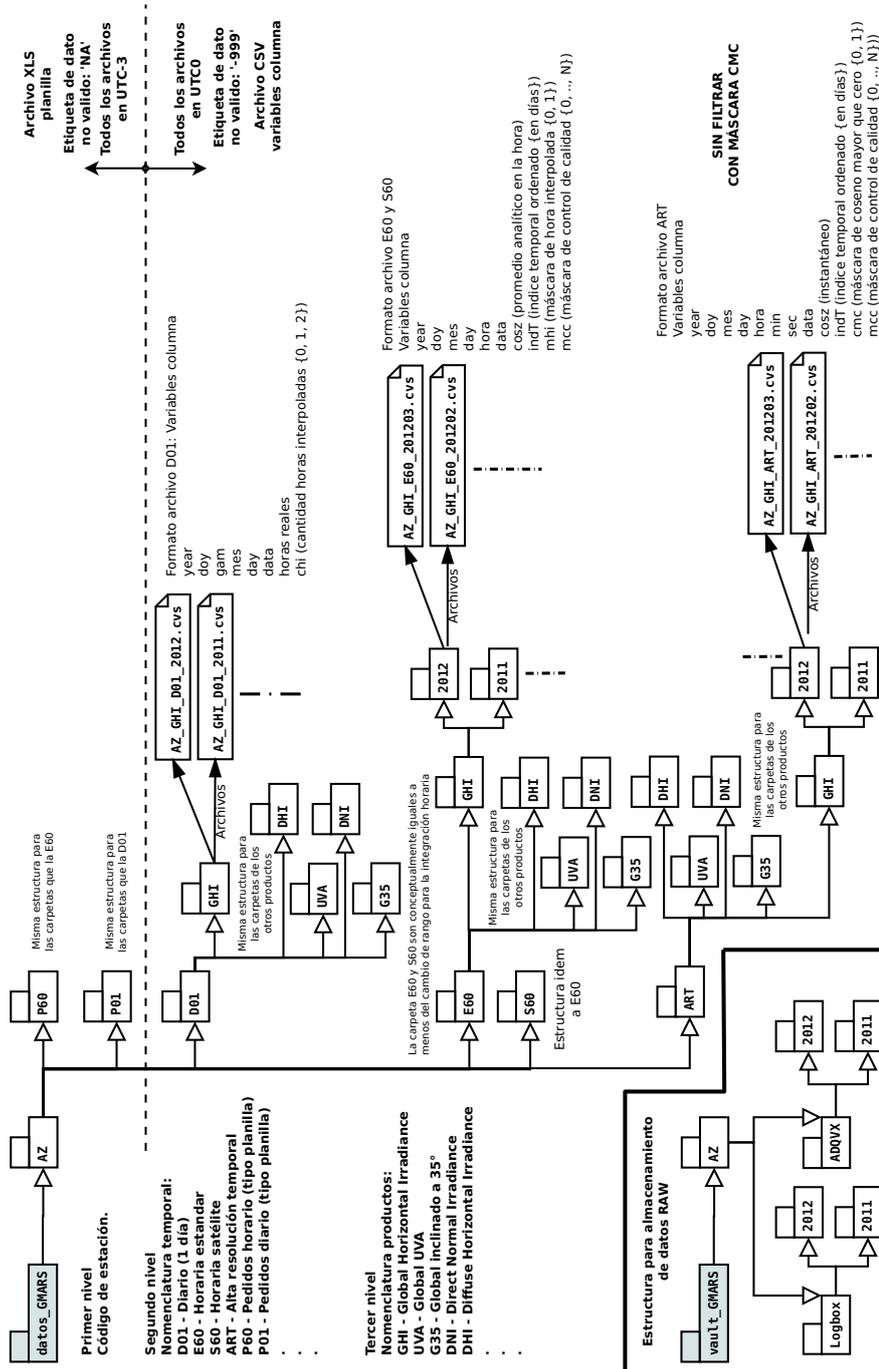


Figura 2.10: Esquema de los diferentes productos generados a partir de los archivos ART.

donde  $\theta_z$  es el ángulo cenital y  $\delta$  es una tolerancia adecuada a la calidad de los instrumentos utilizados. Se cuenta con una única medida de este tipo y muy reciente en LES (Salto), por lo que aún se ha utilizado este filtro, pero se implementará en forma rutinaria para estas medidas en los próximos meses.

### Filtrados con global y difusa

Cuando se trabaja con radiación difusa, realizar un control de calidad exhaustivo es especialmente necesario [Journée y Bertrand, 2011]. En los trabajos realizados sobre radiación difusa hemos aplicado una serie de filtros a los datos, en forma similar a lo que se realiza habitualmente en la literatura [C., 2012, Younes et al., 2005, Journée y Bertrand, 2010]. Actualmente, no todos estos filtros se aplican rutinariamente a todas nuestras estaciones con difusa, porque estas medidas son aún muy recientes, pero se hará próximamente. Antes de trabajar con datos de difusa, se aplican en forma secuencial a los datos horarios<sup>4</sup> una serie de filtros F0 a F5 que pasamos a describir brevemente.

- F0: selecciona las horas diurnas con  $\cos \theta_z > 0$  y con irradiación positiva  $GHI > 0$ .
- F1: Se eliminan las horas con el sol bajo (donde el error en la medida es más importante), imponiendo la condición  $\alpha_s > 7^\circ$  a la altura solar [Younes et al., 2005, Journée y Bertrand, 2010]. En la práctica, se impone la condición equivalente  $\cos \theta_z \geq 0.1219$  al ángulo cenital.
- F1a: Este filtro se aplica a los datos con  $F1 = 1$ . Se calcula el índice de claridad  $k_t$  para datos cuya altura solar cumple  $\alpha > 7^\circ$  y se verifica si cumple la condición  $0 < k_t < 0.85$ . Para los datos no considerados (nocturnos y horas con Sol bajo) se les asigna  $F1a = 1$ .
- F2: Se utiliza el modelo de Page de cielo claro [Muneer, 2004, Rigollier et al., 2000] con turbidez Linke para masa de aire  $m = 2$ ,  $T_{L2} = 2$ . Esto describe una atmósfera sin agua y muy limpia. El modelo de cielo claro permite asignar una frontera superior a los datos de GHI [Younes et al., 2005]. La irradiancia global de cielo claro se parametriza como en el modelo ESRA [Rigollier et al., 2000] y el resultado es el estimativo  $GHI_{max}$ . Se impone la condición  $GHI < GHI_{max}$ .
- F3: Se colocan fronteras por bajo y por alto para la irradiancia difusa. Por alto, se utiliza el estimativo de Page para cielo cubierto,  $DHI_{max} = 572 \text{ W/m}^2 \times \alpha$  con  $\alpha$  la altura solar en radianes (un argumento de plausibilidad para esta expresión puede encontrarse en [Muneer, 2004]) y el mínimo,  $DHI_{min}$ , asociado al modelo de cielo claro de Page. Se pide que  $DHI_{min} < DHI < DHI_{max}$ . Para los registros que pasan este filtro, se calcula la fracción difusa  $f_d = DHI/GHI$ .
- F4 Se pide que  $f_d < 1.07$ . Teóricamente  $0 \leq f_d \leq 1$ , pero se introduce una tolerancia de 7% asumiendo un error de 5% en las medidas de GHI y DHI.
- F5 Para trabajar con radiación difusa se requiere de ambas medidas simultáneas. Se pasa este filtro si el par  $(GHI, DHI)$  esta completo.

El Cuadro 2.3 muestra un ejemplo concreto de aplicación de estos criterios a un conjunto de datos, que incluyen: (i) una estación del LES (AZ) en la cual se midió GHI y DHI con un radiómetro Delta T SPN1 durante dos años, (ii) una estación del INUMET (SA) en la cual se midió GHI y DHI usando una banda de sombra durante 4 años y (iii) la estación del Gersolar en Luján, Argentina, indicada LU donde se midieron GHI, DHI y DNI durante 1,5 años.

<sup>4</sup>Los datos horarios ya contienen un filtrado, ya que si en una hora dada faltan más de 1/3 de los datos, esa hora no se integra y se interpola de las horas vecinas. Esto sucede muy ocasionalmente, asociado a tareas de mantenimiento en las estaciones de medida que insumen más de 20 minutos.

Filter	Condition	hours that pass			% of hours discarded			
		AZ	SA	LU	AZ	SA	LU	All
F0	$\cos \theta_z \geq 0 \ \& \ I_h > 0$	9314	21646	6392	-	-	-	-
F1	$\cos \theta_z \geq 0.1219$	7597	18393	5732	18.4	15.0	10.3	15.1
F2	$0 < I_h \leq I_c$	7212	17515	5344	5.1	4.8	6.8	5.2
F3	$I_{d,c} < I_d < I_{d,oc}$	6488	16023	5023	10.0	8.5	6.0	8.4
F4	$f_d < 1.07$	6485	15989	4918	0.0	0.2	2.1	0.5
F5	complete pair $(k_t, f_d)$	6160	15253	4560	5.0	4.6	7.3	5.2
All		6160	15253	4560	33.9	29.5	28.7	30.4

Cuadro 2.3: Secuencia de filtros F0 a F5 aplicados a tres conjuntos de datos de DHI y GHI. Aproximadamente un 30 % de las horas diurnas es descartado por estos filtros.

Actualmente, se realiza un control de calidad inicial sobre los datos horarios, que esta parcialmente automatizado y pensado para datos de GHI (sin redundancia). Es decir, se aplican los filtros F0 a F2 a los datos horarios de GHI y se asocia a cada dato un indicador de calidad ( $FF = F0 \oplus F1 \oplus F1a \oplus F2$ ), de modo que un valor  $FF = 15 = (1111)_2$ , indica que el dato pasó todos los filtros. Cada dato sale del Control de Calidad con un entero asociado que indica su nivel de filtrado (es decir, que filtros pasó). El sistema tiene la ventaja de ser escalable, es decir, se le pueden agregar nuevos filtros. Los datos no se eliminan, sino que se etiquetan (flags) de modo que el usuario puede seleccionar fácilmente los datos con el nivel de filtrado adecuado a su aplicación.

### Comparación con modelo satelital

El modelo BD-JPT (Sección 1.3) esta lo suficientemente maduro como para ser usado para control de datos de tierra. Con frecuencia anual se realiza una comparación a nivel horario entre los datos del último año y los estimativos del Modelo BD-JPT para todas las estaciones (además de calcular los indicadores usuales, se grafican los datos y los estimativos vs  $\cos \theta_z$  lo que permite observar claramente tendencias y agrupamientos extraños. Este procedimiento nos ha permitido detectar problemas en nuestra red. Por ejemplo, un piranómetro en Artigas tuvo problemas en sus juntas y estuvo midiendo con agua bajo la cúpula<sup>5</sup> durante meses, lo que invalidó seis meses de datos. También se han detectado con este procedimiento problemas de sombreado en algunas estaciones de la red de UTE, con quienes colaboramos ya que existe un interés común en que los datos generados por la red UTE sean confiables.

Esta previsto agregar nuevos filtros. Por ejemplo, se trabaja para poner a punto un modelo de cielo claro con parámetros mensuales ajustados a cada estación de medida. Esto da una estimativo de irradiancia global horizontal al 3% bajo condiciones sin nubosidad. Contamos con software desarrollado en el LES por Agustín Laguarda para detectar las condiciones de cielo claro en las series a escala minutal, horaria y diaria. En conjunto, estas herramientas nos permiten elaborar un filtro aplicable a condiciones de cielo claro que permite detectar precozmente problemas leves en el equipo de medida, como algo de suciedad o humedad en la cúpula.

Finalmente, aclaramos que nuestras estaciones de medidas conforman a las recomendaciones indicadas por la WMO para las medidas de irradiancia solar [WMO, 2008, Cap. 7]. Los piranómetros usados son todos de Primera clase o Estandar secundarios y reciben calibración cada dos años contra nuestro estándar secundario (un Kipp & Zonen CMP22) calibrado contra el patrón mundial en el PMOD/WRC, Davos en 2014. No usamos radiómetros fotovoltaicos salvo como medida redundante. Las estaciones del LES están ubicadas en estaciones experimentales del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) o en estaciones de Meteorología

<sup>5</sup>El piranómetro esta ubicado en una estación del Servicio Meteorológico y el personal de la estación limpiaba la cúpula diariamente. Pensaron que el agua en la cúpula era normal y no dieron aviso.

(INUMET) donde hay adecuadas condiciones de seguridad y reciben limpieza diaria de sus cúpulas vidriadas.

## 2.4 Calibración de Radiómetros y Termómetros

El Laboratorio de Energía Solar comenzó a operar en febrero de 2013. Aún restan algunas obras de infraestructura que continuarán durante 2015, pero las partes vinculadas a la calibración de radiómetros y termómetros ya están operativas. El laboratorio fue concebido, entre otras cosas, para dotar al Uruguay de un lugar donde la calibración de radiómetros pueda realizarse de forma segura. A estos efectos se lo ubicó en una zona rural en un predio cercado de 3 hás., con buena irradiancia solar y a 8 km de la ciudad de Salto (100000 hab). Se diseñó una plataforma metálica elevada sobre la azotea del edificio, cuya pasarela es independiente de la “mesa”, como se muestra en la Fig. 2.12 (Der.). De este modo, se asegura un horizonte despejado y una estabilidad de la mesa a  $0.1^\circ$  (tal como pide la norma) en todas las condiciones climáticas regulares.

### 2.4.1 Calibración de radiómetros

Para las calibraciones de piranómetros se sigue la norma ISO 9847:1992(E) “Calibration of field pyranometer by comparison to a reference pyranometer”. El piranómetro de referencia es un Kipp & Zonen, modelo CMP22, de tipo estándar secundario. El que se utiliza actualmente fue calibrado en el World Radiation Center (PMOD/WRC) en Davos en 2014. Este instrumento (y su gemelo) permanecen guardados en el interior y en sombra cuando no se utilizan para calibraciones. En el Apéndice A se muestran los certificados de calibración de este radiómetro y un ejemplo del certificado que emite el LES cuando calibra un radiómetro para terceros. El adquisidor utilizado para las calibraciones es un Datataker modelo DT85, con certificado de fábrica. Este adquisidor cuenta con 16 canales analógicos, cada uno con tres entradas con tierra común, de modo que admite hasta 48 conexiones diferentes o 32 si son conexiones totalmente independientes. El mismo está ubicado bajo la mesa de calibración en un gabinete estanco y conectado a la red del LES mediante un cable UTP y un puente de fibra óptica para prevenir daños a la red debidos a descargas atmosféricas<sup>6</sup>. Tanto el adquisidor, como los instrumentos que puedan requerir alimentación eléctrica, están protegidos por una unidad UPS durante la calibración. Los datos se adquieren durante aproximadamente dos semanas y luego se procesan por un software desarrollado en el LES que los filtra de acuerdo a todas las exigencias de la norma. Típicamente, de unos 50000 medidas, hay 13000 que pasan todos los filtros. Estas son procesadas de acuerdo a la norma, depurando outliers, para llegar a la sensibilidad del instrumento. La norma pide trabajar con un mínimo de 15 series de 40 medidas. En el LES se calibra usando unas 300 series de 40 medidas.

Hasta el momento, se han realizado dos rondas de calibraciones y se han calibrado instrumentos del INUMET (Servicio Meteorológico Nacional) y del LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay), quien tiene a su cargo la regulación de los aspectos de metrología en Uruguay. Se espera que el LATU delegue en el LES las calibraciones de radiómetros, supervisándolas con cierta periodicidad, ya que LATU no cuenta con instalaciones específicas para ello. Además, el LES calibra sus propios radiómetros de campo (típicamente Kipp & Zonen CMP6, CMP10 o CMP11) con una periodicidad de 2 años. Contamos con seis radiómetros y dos adquirentes

---

<sup>6</sup>Si bien el laboratorio está provisto de una instalación de tierra muy cuidada, con un anillo de cobre enterrado que conecta entre sí a todas las estructuras metálicas expuestas, a seis mallas dispadoras enterradas y a tres pararrayos de 15 m de altura que rodean el predio. Esta instalación está diseñada bajo norma, y protege la zona de calibración con probabilidad de 95%. Los tableros tienen todos descargadores de gas para proteger los equipos de un pico de corriente en la línea de entrada.



Figura 2.11: Izq. Edificio del LES en las fases finales de obra (Agosto 2014). Der. Plataforma de calibración del LES durante la primera calibración en febrero 2015.



Figura 2.12: Izq. Medida de irradiancia difusa con banda de sombra, durante una calibración de radiómetros (Marzo 2015). Der. Plataforma de calibración del LES durante la calibración de marzo 2015.

Datataker en reserva de modo de poder dar respuesta rápida a fallos imprevistos. En condiciones normales, estos radiómetros se van rotando en las estaciones, de modo de poder calibrarlos sin interrumpir las medidas.

Si bien el laboratorio cumple con todas los requisitos de la norma de calibración, no da trazabilidad al patrón mundial (WRR) en Davos, por no estar acreditado bajo la norma ISO/IEC 17025 “Criterios generales para la acreditación de laboratorios de ensayo y calibración”. Es intención de la dirección del laboratorio que, una vez terminada la fase de instalación de infraestructura, el LES comience a avanzar para la acreditar bajo esta norma de calidad. De este modo, las calibraciones serán trazables al patrón en Davos y será viable realizar calibraciones para los países vecinos.

El LES cuenta además con la capacidad de calibrar pirheliómetros, ya que cuenta con dos pirheliómetros Kipp & Zonen CHP1, con calibración vigente de fábrica. El mecanismo de seguimiento usado es un SOLYS2 (Fig. 2.13) que opera en forma continua con dos radiómetros CMP11 (uno con la directa bloqueada) y un pirheliómetro CHP1, todos de Kipp & Zonen. Se utiliza un radiómetro Licor como medida redundante de GHI. El mecanismo tiene un GPS y un fotodiodo para el ajuste fino del seguimiento solar y funciona sin mantenimiento alguno, ya que los piranómetros utilizan unidades de ventilación que evitan el depósito de polvo o agua en las cúpulas. Todo el conjunto está protegido por UPS contra fallas en la alimentación eléctrica.



Figura 2.13: Mecanismo de seguimiento Solys2 utilizado en el LES como medida de referencia de DNI, DHI, GHI.

### 2.4.2 Calibración de termómetros

Desde que se decidió colocar una medida confiable de temperatura del aire en nuestras estaciones de medida, se planteó el problema de como mantener la misma confiable en el tiempo. En el LES se ejecutan actualmente diversos proyectos vinculados a energía solar térmica, y todos ellos requieren soporte para controlar los sensores de temperatura. Hay mas de 60 sensores (en su mayoría Pt1000) midiendo temperatura en el LES.

Mantener todos ellos calibrados utilizando, por ejemplo, el servicio que presta el LATU resultaría muy oneroso. Se optó por invertir en un baño térmico seco y húmedo, con dos puntas RTD de referencia y un lector que permite medir temperaturas a 1/100 de grado. La uniformidad del baño es mejor que 3/100 de grado. Con esto, es relativamente fácil calibrar resistencias de platino de buena calidad (clase Y) y obtener una incertidumbre típica de 0.2°C en las medidas de temperatura.

Si bien hemos formado personal específicamente para realizar las calibraciones de temperatura, no se han realizado calibraciones de termómetros hacia fuera, ni es la intención del LES incursionar en esa línea.



## Perspectivas a corto y mediano plazo

En este capítulo esbozamos los planes de desarrollo para los próximos cinco años, teniendo en cuenta que las restricciones en cuanto a recursos humanos son bastante severas. El laboratorio cuenta actualmente con unas 10 personas trabajando, de las cuales solo tres son a tiempo completo para actividades académicas, que incluyen enseñanza y gestión académicas no vinculadas con las actividades del laboratorio. De este grupo, solo cuatro residen en Salto y trabajan habitualmente en el laboratorio. No se cuenta con apoyo administrativo de ningún tipo, salvo por el provisto por la Universidad a través de sus oficinas centrales. Dentro de este panorama, las perspectivas de ampliar la gama de temas de investigación o de servicios a proveer son muy limitadas.

A modo de ejemplo, existe una clara demanda en Uruguay por un laboratorio capaz de ensayar paneles fotovoltaicos y asesorar a usuarios sobre su correcto uso. Hay muchas líneas de investigación que podrían desarrollarse y serían de gran interés práctico: desde el modelado de sistemas fotovoltaicos al estudio de la degradación de su rendimiento debido al polvo depositado o al envejecimiento de las celdas, en Uruguay existe poco conocimiento y esta todo por hacer. No obstante, el LES se abstiene de incursionar en estos temas, hasta tanto no haya una expansión en sus capacidad de RRHH, especialmente los instalados en la zona y una duplicación de su área edilicia techada.

### 3.1 Líneas de trabajo en el LES

Las líneas que se intentan desarrollar actualmente en el LES y a las cuales se pretende dar continuidad y potenciar son las siguientes:

#### A) **Caracterización climatológica del recurso solar en Uruguay**

Esta actividad involucra las siguientes sublíneas:

- a) Plan de medida continua de irradiancia solar  
Ya hemos descrito en detalle las estaciones existentes y las que están por entrar en operación en breve. La idea central es mantener durante al menos una década una red de medida de irradiancia solar de alta calidad, con equipos controlados periódicamente y con redundancia en las medidas de GHI que permitan implementar controles de calidad automáticos.
- b) Modelado de irradiancia solar en superficie a partir de información satelital.  
En esta ya se cuenta con resultados muy satisfactorios usando el modelo estadístico basado en el modelo Tarpley. Este año se publicarán dos productos basados en este

modelo: el segundo Mapa Solar del Uruguay (MSUv2) que cuenta con información de DNI estimada y el Año Meteorológico Típico (AMT), cuyos detalles se presentan en la Sección 3.5. Se trabaja ahora en la implementación de modelos físicos, como el Modelo GL 1.3 usado en Brasil o el modelo Heliosat adaptado para usar imágenes del satélite GOES. Estos modelos, una vez ajustados, permiten estimar directamente el recurso DNI en superficie.

c) Análisis de variabilidad y complementariedad.

Se trabaja sobre los datos ya generados, y sobre estimativos satelitales de 15 años, para caracterizar la variabilidad interanual del recurso GHI. También se analiza<sup>1</sup> la complementariedad entre el recurso GHI, el recurso eólico y el recurso hidroeléctrico trabajando en diferentes escalas temporales.

d) Caracterización del recurso DNI para CSP

Se intenta fortalecer nuestra red de medida en cuanto a las capacidades de medida, directa o indirecta, de la componente DNI de la irradiancia solar. Este año se presentará un proyecto para poder contar con una segunda medida de calidad de DNI basada en un mecanismo de seguimiento SOLYS2 de Kipp & Zonen. El contar con único equipo de estas características en el país es una situación de alta vulnerabilidad en el mediano plazo.

## B) Forecasting del recurso solar

La predicción con pocas horas o incluso minutos de las variaciones en la nubosidad sobre una planta fotovoltaica es un problema de gran interés práctico. Las variaciones en la potencia eléctrica generada por una planta fotovoltaica suceden en pocos minutos y son rápidas (en relación a la potencia generada por generadores eólicos, por ejemplo). Estas deben ser rápidamente compensadas por otras fuentes, para mantener la estabilidad de la red eléctrica. Contar con avisos confiables que anticipen estas variaciones es importante para la administración de la red. Este problema puede atacarse desde varios ángulos:

- i) el uso de cámaras de cielo (all-sky) para monitorear el movimiento de las nubes en forma automática y anticipar las condiciones de sombreado parcial o total sobre una planta.
- ii) el uso de información satelital para el mismo fin. Actualmente, las imágenes GOES tienen una cadencia de 1/30 minutos, lo cual las hace inadecuadas para este fin. Esta previsto que un nuevo satélite, el GOES-R, entre en operación en 2018 con una cadencia de 1/10 minutos, lo cual nos permitiría usarlo para forecasting. La idea es llegar a ese punto con la infraestructura de recepción y procesamiento ya pronta para poner a punto un sistema de aviso.
- iii) Es posible trabajar con los datos de piranómetros en tierra en tiempo real, como si fuese un gran detector de nubosidad distribuido en el todo el territorio. Este “detector” distribuido puede incluir información de países vecinos y permite monitorear el avance de frentes nubosos en tiempo real. Para utilizar la información de las medidas en tiempo real es necesario contar con una red VPN (red privada virtual) que permita que las computadoras accedan a la información generada en tiempo real. Se tramita ahora un convenio con ANTEL (la empresa estatal de telecomunicaciones) para que provea este servicio sin costo al LES. Además, hay que tomar recaudos reforzando los paneles solares ya que en esta modalidad, el consumo de energía de las estaciones sería mucho mayor, al estar los modems conectados en permanencia durante las horas diurnas.

<sup>1</sup>En colaboración con otros investigadores de la Facultad de Ingeniería.

Además, existe el forecasting basado en modelos de clima, como el WRF. Para la irradiancia solar en el corto plazo, este modelo es poco efectivo. Es probable que una combinación de las tres técnicas sea el modo más efectivo de avanzar en un forecasting confiable.

#### C) **Energía Solar Térmica**

En el laboratorio se está desarrollando infraestructura, con el apoyo del MIEM, que permitirá medir la eficiencia de colectores solares y sistemas compactos bajo norma. Además, con el apoyo de la Agencia Nacional de Innovación e Investigación, se construye y evalúa el primer prototipo de concentrador solar (parabólico lineal) del Uruguay y se construye también un cuarto acumulador (muro Trombe) para ensayar técnicas de diseño solar pasivo, en conjunto con investigadores de la Facultad de Arquitectura. Actualmente, se comienza a analizar la posibilidad de desarrollar en Uruguay sistemas solares térmicos de bajo costo y baja complejidad, adecuados para la autoconstrucción.

## 3.2 Medidas complementarias

Existen un conjunto de medidas complementarias a la irradiancia solar, en las cuales el laboratorio pretende desarrollar capacidades de medida.

### Temperatura

Tanto para la simulación de sistemas solares, como para la corrección de los datos tomados con sensores fotovoltaicos, es importante contar con medidas simultáneas de temperatura ambiente confiable en todas las estaciones de medida. Los sensores utilizados son Pt1000 de alta calidad (clase Y) y se calibran previamente en el LES. Además, los proyectos de solar térmica involucran varias medidas de temperatura en líquidos, superficies o en el aire. El LES se ha equipado con un baño térmico con gran uniformidad, que permite calibrar sensores a 1/100 de grado, para temperaturas entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $120^{\circ}\text{C}$ .

### Irradiancia UV

El LES cuenta con dos equipos para medir irradiancia UV (bandas A, B y Erithema o índice UV). Esta medida es de importancia, debido a los impactos que la radiación UV-A tiene sobre la degradación de materiales plásticos, el secado de cultivos, etc. En el caso de la UV-B Erithema, es bien conocida su relación con el cancer de piel en seres humanos y animales. Conocer la distribución territorial de esta radiación es importante. El LES mantiene un equipo UV calibrado en el World Radiation Center (Davos) en 2014 y tiene la capacidad de calibrar radiómetros UV. Se espera correlacionar esta medida con las medidas de GHI, sobre las cuales se cuenta con relativamente más información, de modo de poder estimar las características de la irradiancia UV en nuestro territorio.

### Otras medidas

Se cuenta con un sensor de radiación PAR (Photosynthetically active radiation) que permite detectar la irradiancia solar relevante para el crecimiento vegetal y correlacionarla con la GHI. Este tipo de medidas es de interés para Agronomía.

Se cuenta con un pirgeómetro, que permite conocer la irradiancia en el infrarrojo cercano. Con este instrumento es posible realizar balances energéticos a nivel de superficie. Idealmente, sería necesario contar con dos de ellos, uno orientado al cielo, el otro orientado al suelo, de modo de tener un balance energético neto en tiempo real.

Muchas de las medidas de GHI redundantes son tomadas con radiómetros fotovoltaicos de bajo costo. Esto permitirá poner a punto métodos de corrección de esta medida, basados solamente en la temperatura del aire. A estos efectos, se realiza actualmente una experiencia en la cual se colocó un sensor de temperatura sobre la celda de Silicio de un radiómetro comercial (Licor) de modo de determinar la correlación entre la temperatura del aire y la temperatura de la celda. Como la dependencia de la sensibilidad de la celda con la temperatura es conocida, esta medida permitirá poner a punto un método de corrección simple para radiómetros fotovoltaicos.

### 3.3 Mejora continua en controles de calidad

El laboratorio está aún en fase de instalación de infraestructura. El edificio se entregó en Octubre de 2014 y aún restan obras en el predio. Una vez terminada esta fase, se comenzará a trabajar para implementar la norma ISO/IEC 17025 “Requisitos generales para la competencia de laboratorios de ensayo y calibración”. No obstante, es probable que para poder acreditar bajo esta norma, el laboratorio deberá fortalecer sus RRHH y contar con algún personal administrativo.

Lo que si es posible realizar con nuestras fuerzas, es tender a una mejora continua en la calidad de los datos de irradiancia solar. La estrategia para este fin es sencilla y se centra en los siguientes aspectos:

- i) mantener un dispositivo de respuesta rápida a fallos, que minimize el down-time de las estaciones de medida.
- b) medir las variables más relevantes en forma redundante.
- c) contar con reemplazos (en depósito) para todos los equipos utilizados, de modo de garantizar la continuidad de las medidas.
- d) mantener un programa de calibración bajo norma para radiómetros y termómetros.
- e) capacitar continuamente nuestros recursos humanos y participar de intercomparaciones siempre que sea posible.

la mayoría de estas medidas ya se implementan, al menos parcialmente. La medida (e) aún no se implementa, ya que estamos aún realizando las primeras calibraciones bajo norma en el laboratorio.

Los controles de calidad que se aplican a los datos que llegan de las estaciones de medida, son automatizados y básicamente catalogan los datos en 8 niveles de calidad, de acuerdo a los filtros que pasan. Uno puede trabajar con datos nivel 8 o nivel 3, según los fines buscados. Al usarse los datos con fines de investigación, los mismos son sometidos a controles adicionales por los investigadores. Estos controles han permitido detectar algunas condiciones anómalas menores, como reflejos a primera hora de la mañana en alguna de las estaciones de medida. De modo que una parte importante del control de calidad es el uso de los datos por investigadores calificados.

### 3.4 Accesibilidad de la información

En el marco del convenio FING/MIEM “Mantenimiento de la Red de Estaciones de Medida Continua de Radiación Solar y Generación de Información detallada sobre el Recurso Solar en el Uruguay” se ha trabajado en el desarrollo de un sistema de gestión de datos que permita el acceso en línea a toda la base de datos de radiación solar del LES a los usuarios que cuenten con los permisos adecuados. Para ello, se contó con los servicios de Liber Dovat, encargado de red del LES, quien ha avanzado bastante en este tema. La instalación definitiva se realizará cuando el servidor web del LES este en su destino final de Salto, lo cual debe ocurrir en Abril 2015.

### 3. PERSPECTIVAS A CORTO Y MEDIANO PLAZO

En una primera instancia, se diseñó e implementó una base de datos en la cual almacenar los datos obtenidos por los distintos equipos en las distintas estaciones, y luego se generaron scripts con los cuales se agregaron los datos crudos a dicha base. Para realizar la base de datos, se consideraron varias propuestas para el esquema a utilizar, y al final se eligió uno que reflejara mejor la realidad del problema y permitiera realizar las consultas de la forma más eficiente posible. Una vez ingresados todos los datos (esto es, los diferentes productos derivados de los datos crudos) en la base de datos, se procedió a desarrollar una página web dinámica utilizando el framework Slim, el cual trabaja sobre PHP. A través de dicha página se pueden realizar consultas a la base de datos, pudiendo desplegar el resultado en una tabla web, y que a su vez es posible descargar los resultados como un archivo con formato .csv.

La página web se encuentra publicada bajo la URL [les.edu.uy/datos](http://les.edu.uy/datos), bajo acceso privativo. Se adjuntan una serie de capturas de pantalla del prototipo, que da una idea de la funcionalidad que tendrá el servicio desarrollado.

**Sistema de gestión de datos LES/UdelaR**

**Parámetros**

Estación: FING  
Tipo de Medida: GHI  
Escala: D01  
Fecha de Inicio: 1/4/2013  
Fecha de Fin: 30/4/2013  
Enviar Consulta

**Tabla con los datos**

year	day	gam	mes	day	dato	hs_real	hs_intp	logger_id	equipos_id
2013	91	1.54928	4	1	13.4	15.96	11.6		
2013	92	1.56649	4	2	7.4	15.96	11.57		
2013	93	1.58371	4	3	8.2	15.96	11.53		
2013	94	1.60092	4	4	8.5	15.96	11.5		
2013	95	1.61814	4	5	14.6	15.96	11.46		
2013	96	1.63535	4	6	9.5	15.87	11.42		
2013	97	1.65256	4	7	19.7	15.96	11.39		
2013	98	1.66978	4	8	19.5	15.91	11.35		

Información Descargar datos

**Gráficas**

Previo Siguiente

Gráfico de barras que muestra la irradiación (W/m²) a lo largo del tiempo (fecha).

Sistema de gestión de datos **LES/UdelaR**

---

**Parámetros**

Estación:

Tipo de Medida:

Escala:

Fecha de Inicio:

Fecha de Fin:

[Enviar Consulta](#)

 **LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR**  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

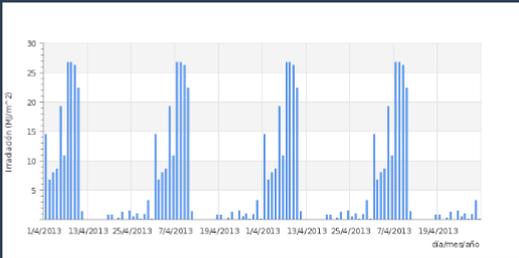
**Tabla con los datos**

year	doy	gam	mes	day	dato	hs_real	hs_intp	logger_id	equipos_id
2013	91	1.54928	4	1	14.5	11.6	11.6		
2013	92	1.56649	4	2	6.8	11.51	11.57		
2013	93	1.58371	4	3	8	10.89	11.53		
2013	94	1.60092	4	4	8.6	11.47	11.5		
2013	95	1.61814	4	5	19.2	11.38	11.46		
2013	96	1.63535	4	6	10.9	11.38	11.42		
2013	97	1.65256	4	7	26.7	11.33	11.39		
2013	98	1.66978	4	8	26.8	10.36	11.35		

[Información](#) [Descargar datos](#)

**Gráficas**

[Previo](#) [Siguiete](#)



Sistema de gestión de datos **LES/UdelaR**

---

**Parámetros**

Estación:

Tipo de Medida:

Escala:

Fecha de Inicio:

Fecha de Fin:

[Enviar Consulta](#)

 **LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR**  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

**Tabla con los datos**

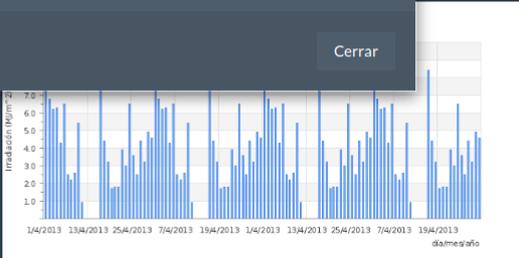
year	doy	gam	mes	day	dato	hs_real	hs_intp	logger_id	equipos_id
2013	91	1.54928	4	1	9.2	15.91	11.6		
2013	92	1.56649	4	2	6.8	15.96	11.57		
2013	93	1.58371	4	3	6.2	15.91	11.53		

**Información de las columnas**

- **year:** Año.
- **doy:** Día del año (ordinal día).
- **gam:** Gam.
- **mes:** Mes.
- **day:** Día del mes.
- **dato:** Dato. Unidades: MJ/m2.
- **hs\_real:** Cantidad de horas reales.
- **hs\_teo:** Cantidad de horas teóricas.
- **hs\_intp:** Cantidad de horas interpoladas.

[Cerrar](#)

[Previo](#) [Siguiete](#)



Sistema de gestión de datos LES/UdelaR

Tabla con los datos

year	day	gam	mes	day	dato	hs_real	hs_intp	logger_id	equipos_id
2013	91	1.54928	4	1	9.2	15.91	11.6		
2013	92	1.56649	4	2	6.8	15.96	11.57		
2013	93	1.58371	4	3	6.2	15.91	11.53		
2013	94	1.60092	4	4	6.3	15.91	11.5		
2013	95	1.61814	4	5	4.3	15.96	11.46		
2013	96	1.63535	4	6					
2013	97	1.65256	4	7					
2013	98	1.66978	4	8					

Gráficas

LABORATORIO DE ENERGÍA SOLAR  
UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

A través de esta interfaz se podrá acceder a cualquiera de los productos del LES en todas las escalas temporales. Además, es posible consultar sobre los datos (días o períodos) disponibles en cada estación, recibiendo respuesta en forma gráfica. Una vez seleccionado el tipo de dato, el período y otros detalles, los datos son exportados a planillas Excel que el usuario descarga.

La base de imágenes GOES (medio millón de archivos, que abarca del 2000 al 2015, con una imagen en promedio cada 30 minutos y en cinco canales espectrales) contiene información de interés para estudios de uso de suelo, irrigación, cultivos, análisis meteorológico retrospectivo, entre otras. En Convenio con ANTEL (la compañía nacional de Telecomunicaciones) el LES está trabajando para generar una base de datos con funcionalidad similar para hacer accesible a los usuarios las imágenes disponibles del satélite GOES.

Se espera el sistema este operativo con la base de datos de radiación solar a mediados de 2015 y completamente operativo, incluyendo la base de imágenes de satélite, a fines de 2015.

### 3.5 Año Meteorológico Típico (AMT)

Un año meteorológico típico (AMT) es una serie de datos anual que es representativa de la situación meteorológica típica de un sitio dado. Se parte de un conjunto de datos de varios años de variables meteorológicas y, a partir de él, se infiere una serie anual. Esta serie debe preservar el valor medio, la variabilidad típica y el comportamiento anual de las variables que hayan sido incluidas en su construcción. Debido a esto, es una herramienta de utilidad para evaluar y/o modelar emprendimientos humanos cuyo rendimiento depende del clima del sitio.

Para simular dispositivos de conversión de energía solar en energía útil con modelos adecuados, se requiere que un AMT que tenga resolución horaria. En Uruguay, las medidas de irradiancia solar de GHI son de corta estadística, las medidas de DNI son prácticamente inexistentes y los datos horarios de las variables complementarias (temperatura, humedad, viento, etc.) con estadística suficiente son escasos. En 2012, nuestro grupo trabajó con los datos diarios de irradiación disponibles en la época implementando la metodología del NREL para conformar un año meteorológico típico diario para la región sudoeste del Uruguay. El resultado se encuentra

disponible en la web <http://les.edu.uy/servicios/ano-meteorologico-tipico/>. Sin embargo, este trabajo no dió respuesta a la demanda para la necesidad de datos típicos a nivel horario. La falta de estadística de GHI y DNI puede ser solucionada utilizando datos generados por satélite. Sólo en algunas estaciones de medida existe una estadística adecuada para las variables complementarias, por lo que la confección de AMTs se debe restringir a algunos pocos puntos.

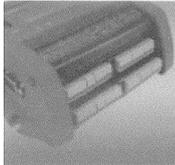
La norma nacional UNIT 1026:1999 divide el país en 3 zonas: la zona Sureste, la zona central y la zona Noroeste. Recientemente se ha iniciado la construcción de 4 AMTs con resolución horaria para Uruguay. 3 de estos 4 sitios se corresponden a cada una de las zonas climáticas mencionadas. Se utilizarán los datos de las estaciones del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET, Uruguay) de las ciudades de Salto, Mercedes y Rocha. El cuarto sitio se corresponde con la estación Carrasco (Montevideo) del INUMET, y representa la zona del país con mayor densidad de población. En estos sitios se dispone de medidas horarias de temperatura ambiente, humedad relativa, dirección y velocidad de viento con estadística suficiente como para determinar un AMT. Estos conjuntos de datos serán complementados con valores de GHI y DNI generados ad-hoc por satélite de la forma que se describió en la sección 1.3. De esta forma, el conjunto de datos resultante para la determinación del AMT constará de 15 años de información e incluirá las variables necesarias para simular sistemas de conversión de energía solar en energía térmica o fotovoltaica con y sin concentración solar.

Para la determinación de la serie anual “típica” se sigue la metodología TMY3 utilizada por NREL (National Renewable Energy Laboratory). La base fue propuesta en 1978 por SANDIA National Laboratories [Hall et al., 1978], y variaciones de la misma fueron utilizadas posteriormente para la elaboración del TMY2 [Marion y Urban, 1995] y del TMY3 [Wilcox y Marion, 2008]. Las diferentes versiones de los AMTs elaborados para EEUU difieren en la cantidad y calidad de los datos y en pequeñas actualizaciones de implementación. El AMT se construye concatenando los datos medidos de los 12 meses más “típicos”. Un posproceso de la serie se realiza al inicio y fin de cada mes para asegurar la coherencia de la serie temporal en la concatenación. Cada mes de datos de cada variable es caracterizada por su Función de Probabilidad (CDF) de largo plazo, estimada con los datos de toda la estadística disponible para ese mes. Si la CDF de un mes dado de una variable es más “cercano” a la CDF de largo plazo, quiere decir que ese mes de datos es más típico para esa variable. La proximidad de una CDF con la CDF de largo plazo es medida mediante el estadístico de Finkelstein-Schafer (FS) [Finkelstein y Schafer, 1971]. Para obtener un único estadístico para un mes de datos dado, los estadísticos FS de cada variable para ese mes son ponderados mediante pesos. Los pesos son escogidos de acuerdo a la importancia de cada variable en la simulación de aplicaciones de energía solar. En base al estadístico FS resultante para cada mes, se puede decidir qué mes resulta más típico para cada mes del año. Se realizan filtros de persistencia a los meses candidatos a integrar el AMT para asegurar que cada mes escogido tenga una autocorrelación adecuada para una serie de datos climáticos ya que esto no está asegurado por el procedimiento.

Aplicando esta metodología por separado a los cuatro sets de datos mencionados, se obtendrán 4 AMTs para Uruguay. Estos AMTs estarán basados en medidas en Tierra y datos de irradiancia por satélite, y serán de utilidad para la simulación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar o del comportamiento térmico de construcciones y edificios.

## Certificados de calibración

Se incluyen aquí algunos certificados de calibración relevantes.



## Certificate of Traceable Calibration

### Product Description

Model: DT80LM3-3

Serial: 099083

Kernel Assembly: AS1236C0 1589-032

Terminal Assembly: AS1244C0 1586-044

Firmware: 80 Version 9.08.3932

### Calibration Details

Calibration Date: 2013/04/18 15:21:51

Test Location: Apptek, Unit 1, 2 Pinnacle Street Brendale QLD 4500

Ambient Temperature: 27.6 °C

NATA Certified Reference: Fluke 8840A Serial 5141011

Calibration Reference: DT8x Tester JIG-273 Version 1.49.0023, Calibrated 2013/04/03 10:25:35

### Calibration Results

The following table lists measurements performed against traceable references.

Range	Channel(options)	Reference	Actual Reading	Allowable Error <sup>1</sup>	Error	Status
+30 V	1+HV(GL30V)	+2.4957 V	+2.4960	± 0.1 %	0.013 %	PASS
+3000 mV	1*V(GL3V)	+2500.2 mV	+2500.1	± 0.1 %	-0.004 %	PASS
+300 mV	1+V(GL300MV)	+250.02 mV	+250.04	± 0.1 %	0.006 %	PASS
+30 mV	1-V(GL30MV)	+24.996 mV	+25.001	± 0.1 %	0.021 %	PASS
-30 V	1+HV(GL30V)	-2.4957 V	-2.4954	± 0.1 %	-0.012 %	PASS
-3000 mV	1*V(GL3V)	-2498.7 mV	-2499.6	± 0.1 %	0.037 %	PASS
-300 mV	1+V(GL300MV)	-249.88 mV	-249.94	± 0.1 %	0.023 %	PASS
-30 mV	1-V(GL30MV)	-24.991 mV	-24.994	± 0.1 %	0.012 %	PASS
10 k Ω	1R(4W,I)	100.0000 Ω	100.017	± 0.2 %	0.017 %	PASS

<sup>1</sup>Allowable Error indicates the maximum allowable difference between the Reference and the Actual Reading, specified as a percentage of the Actual Reading, when the ambient temperature is between 5°C and 40°C.

The product covered by this certificate meets or exceeds the required performance specified by Thermo Fisher Scientific Australia Pty. Ltd.

The measurements performed to generate this certificate are traceable to Australian national standards of measurement.

This product has been manufactured under an ISO9001:2008 quality system.

file:///G:/dt80/reports/DT80LM3/hml/DT80LM3-099083 18-04-2013 3-21-51 PM.html 18/04/2013

Figura A.1: Certificado de calibración de un adquisidor DT80LM3 de Fischer Scientific.

**pmod** wrc

*Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos  
World Radiation Center*

Certificate No. 2014-C-02

### Calibration Certificate

No. 2014-C-02

<b>Calibration Item</b>	<b>Pyranometer</b>
Manufacturer	Kipp & Zonen
Type	CMP22
Serial Number	110282

<b>Customer</b>	<b>Calibration Mark</b>
Laboratorio de Energia Solar - Instituto de Física Facultad de Ingeniería - UDELAR Herrera y Reissig 565, CP 11300 Montevideo Uruguay	2014-C-02

Davos Dorf, 29 April 2014

*N. Mingard*  
N. Mingard  
in charge of calibration

*Dr. W. Finsterle*  
Dr. W. Finsterle  
Head WRC section solar radiometry

PMOD/WRC follows the requirements for the competence of testing and calibration laboratories according to ISO/IEC 17025. PMOD/WRC is a designated institute of the Swiss Confederation for the Mutual Recognition Arrangement (MRA) for Weights and Measures - Mutual Recognition Arrangement.

Calibration certificates without signature are not valid. This calibration certificate shall not be reproduced except in full, without the written approval of the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center.

Page 1 of 2

**Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos  
World Radiation Center**

Certificate No. 2014-C-02

### Calibration procedure

This pyranometer was compared with the sun and sky radiation as source under mainly clear sky conditions using the "continuous sun-and-shade method". The direct solar radiation is determined using the PMO2, member of the World Standard Group (WSG) and the diffuse radiation is measured using the shaded standard pyranometer of the World Radiation Center (WRC). The measurements were performed in Davos (latitude: 46.8143°, longitude: -9.8458°, altitude: 1588m). The readings are referred to the World Radiometric Reference (WRR) as stated in the WMO Technical Regulations. The originally estimated uncertainty of the WRR relative to SI is ±0.3%.

The inclination of the receiver surfaces versus their horizontal position were set to 0.0 degrees, the instrument signal wire to the north. During the comparisons, the instrument received global radiation intensities ranging from 699 W/m<sup>2</sup> to 1043 W/m<sup>2</sup>, with a mean of 854 W/m<sup>2</sup>. The angle between the solar beam and the normal of the receiver surface varied from 36.3 degrees to 49.9 degrees, with a mean of 41.7 degrees. The ambient temperature ranged from 1.7 °C to 15.3 °C, with a mean of 7.8 °C. The sensitivity calculation and the single measurements deviation (σ) are based on 236 individual measurements. The obtained sensitivity value is valid for similar conditions.

### Calibration results

**Sensitivity:    s = 8.94 μV / (Wm<sup>-2</sup>)**

**Uncertainty:    u = ± 0.06 μV / (Wm<sup>-2</sup>)**

The reported expanded uncertainty of measurements is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor k=2, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.

### Calibrations Remarks

Reference:    WRR represented by the absolute pyrheliometer: PMO2  
                  WRR-Factor of PMO2: 0.99623  
                  (from the last International Pyrheliometer Comparison, IPC-2010  
                  Diffuse radiation: Pyranometer CM22 S/N: 020059 with calibration factor: 8.88  
                  (Ventilated with heated air, automatic shading disk, instrument-wire opposite sun)

### Comments

Instrument Condition:    The calibration item was received fully functional and did not show any erratic behavior or irregularities during calibration.

Page 2 of 2

Dorfstrasse 35, CH-7260 Davos Dorf  
Phone: +41 81 417 51 11, Fax: +41 81 417 51 00  
www.pmodwrc.ch

Figura A.2: Certificado de calibración del Estándar Secundario CMP22 del LES en el PMOD/WRC fechado el 07/04/2014.

## Certificado de Calibración CAL 201503

### Instrumento

Fabricante Kipp & Zonen  
Modelo CMP11  
Número de serie 128605

### Propietario

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU)  
Av. Italia 6201, CP 11500, Montevideo, Uruguay  
Contacto: Pedro Tomoni, [ptomoni@latu.org.uy](mailto:ptomoni@latu.org.uy)

### Calibración

Periodo de registro de datos: 28 marzo al 13 de abril de 2015  
Técnico responsable: G. Abal

Se sigue la norma ISO 9847:1992(E) "Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer". El piranómetro se compara con el piranómetro de referencia usando la irradiancia global natural sobre plano horizontal bajo condiciones de cielo predominantemente claro. Las medidas se toman en la plataforma de calibración del Laboratorio de Energía Solar en Salto Grande (latitud: -31.2828°, longitud: -57.9181°, altitud: 50.0 m snm). El piranómetro de referencia es un Kipp & Zonen modelo CMP22, número de serie 110282, con sensibilidad  $8,94 \mu\text{W}/\text{m}^2 \pm 0,06 \mu\text{W}/\text{m}^2$ . Este instrumento fue calibrado con trazabilidad a la referencia radiométrica mundial (WRR) en el Physikalisch-Meteorologisches Observatorium de Davos (PMOD), World Radiation Center (WRC) el 29/04/2014. No se aplicaron correcciones por temperatura o por error direccional. Ambos instrumentos se posicionaron con inclinación de  $0,0^\circ$  respecto al plano horizontal y con su cable apuntando en dirección Sur. La sensibilidad asignada esta basada en un subconjunto de 12320 medidas individuales que satisficieron los requerimientos de la norma y la misma es válida para uso en condiciones similares a las reportadas.

### Condiciones durante la calibración

Los datos utilizados para calibración incluyen datos antes, durante y después del mediodía solar, bajo condiciones en las cuales los instrumentos recibieron irradiancia solar global entre  $286 \text{ W}/\text{m}^2$  y  $932 \text{ W}/\text{m}^2$  con un promedio de  $659 \text{ W}/\text{m}^2$ . El ángulo cenital solar varió entre  $34^\circ$  y  $70^\circ$  con un promedio de  $49^\circ$ ; la temperatura del aire varió entre  $14,4^\circ\text{C}$  y  $31,0^\circ\text{C}$  con un promedio de  $24,1^\circ\text{C}$ .

### Resultados

Sensibilidad:  $s = 8,65 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$   
Incertidumbre expandida:  $\sigma = \pm 0,18 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$   
Incertidumbre total:  $u = \pm 0,19 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$

La incertidumbre expandida es la resultante de las medidas con factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre total es la suma cuadrática de la incertidumbre expandida más las incertidumbres asociadas por el fabricante del instrumento al error direccional (0.5%) y al proceso de calibración por comparación (0.5%).

Salto, 14 de abril de 2015

Este certificado consta de dos fojas y no es válido sin la firma del responsable de la calibración y el sello del Laboratorio de Energía Solar.

El Laboratorio de Energía Solar trabaja siguiendo los lineamientos de la Norma INT/ISO/IEC 17025:2005 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración".

### Comentarios adicionales

#### Condición general del instrumento

El instrumento se recibe sin cable, ni conector. Se utiliza un cable original de piranómetro Kipp & Zonen CMP11 de 10 m de longitud para la calibración. El uso de cables no originales puede alterar la sensibilidad del instrumento, ya que el cable y conector forman parte integral del mismo.

Previo al inicio de la calibración se reemplaza la Silica Gel.

Durante el período de calibración no se observa comportamiento errático, ni irregularidades en las medidas.

#### Radiación difusa

Durante la calibración, la radiación difusa se midió con un piranómetro Kipp & Zonen modelo CMP22 (número de serie 120420) provisto de una banda de sombra Kipp & Zonen CM121 a la cual se aplicó el factor de corrección 1.10 por la tracción de cielo bloqueada de acuerdo a recomendación del fabricante.

#### Temperatura ambiente

La temperatura del aire se mide en una zona próxima a la mesa de calibración, utilizando un sensor Pt1000 (Clase Y, sensor #LES\_06) calibrado en el LES en febrero 2015) en el Laboratorio de Energía Solar. La incertidumbre expandida de este sensor es de  $0,1^\circ\text{C}$ .

Figura A.3: Certificado de calibración emitido por el LES para un tercero.

## Equipo de trabajo del LES

El Laboratorio de Energía Solar (LES) es un laboratorio universitario concebido como una unidad de investigación. Depende del Departamento de Física del CENUR del Litoral. Desde su génesis, el proyecto nace y se desarrolla a partir del Grupo de Modelado y Análisis de Radiación Solar (GMARS), que trabajaba desde 2010 en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería en Montevideo. Actualmente, este grupo se ha disuelto y su equipo pasa a integrar el LES, que funciona en forma distribuida entre instalaciones básicas en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería en Montevideo y la sede del laboratorio en Salto.

El equipo de trabajo del LES es el siguiente:

Por más detalles consultar en [les.edu.uy](http://les.edu.uy)

### **Gonzalo Abal**

Doctor en Física, es Profesor Titular en UDELAR, investigador de PEDECIBA (G5) y del SNI (N2). Es director del Laboratorio de Energía Solar y del Depto. de Física del CENUR del Litoral. Se especializa en medidas y modelado de radiación solar.

### **Italo Bove**

Doctor en Física, es Profesor Adjunto en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, investigador del PEDECIBA (G3) y del SNI (N3). Tiene a su cargo varios proyectos en temas de solar térmica. En especial, está montando y evaluando un concentrador parabólico lineal en el predio del LES.

### **Rodrigo Alonso Suárez**

Es Ingeniero en Telecomunicaciones, es Profesor Adjunto en el CENUR y se encuentra en las últimas etapas de su doctorado en modelado del recurso solar a partir de datos satelitales. Además, tiene a su cargo los aspectos de control y comunicaciones del Banco de Ensayos de Colectores Solares Térmicos que se construye en el LES durante 2015.

### **Ricardo Siri**

Es Profesor Agregado en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería. Colabora con el LES en la creación, mantenimiento y administración del banco de imágenes del satélite GOES, además de participar de varios proyectos de investigación.

### **Ignacio Texeira**

Trabaja como ingeniero jefe de gestión de activos en la represa binacional de Salto Grande. Es colaborador del LES en temas de energía solar térmica desde hace años. Actualmente tiene a su cargo, junto con Alonso, la supervisión del diseño y construcción del Banco de Ensayos de Colectores Solares Térmicos.

---

**Agustin Laguarda** Es Licenciado en Física, realiza su maestría en Ingeniería de la Energía, con una tesis en modelado del recurso solar usando modelos físicos. Trabaja como Ayudante en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería. Su perfil es teórico, trabajando en modelos matemáticos de procesos en la atmósfera.

**Daniel Aicardi** Es Ingeniero Electricista y realiza un posgrado en Ingeniería Eléctrica en el área de Procesamiento de señales. Tiene a su cargo la integración y el control de calidad inicial de los datos de la red de medidas del LES.

**Liber Dovat** Es estudiante avanzado de la carrera de Ingeniería en Computación en la Facultad de Ingeniería y trabaja como encargado de red en el Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería. Tiene a su cargo la administración primaria de la red del LES, incluyendo la puesta a punto de los servidores que reciben los datos de los adquirentes remotos. Además, trabaja en la interfaz y base de datos para servir los datos de radiación y las imágenes de satélite via internet.

Existen además otros colaboradores de nivel estudiante avanzado de grado, contratados en proyectos puntuales. Existe también un cargo de técnico en instrumentación del LES que se encuentra en proceso de ser provisto, debido a la renuncia del anterior ocupante. En general, se trata de un grupo de trabajo muy chico para la multiplicidad de tareas a encarar, con varios integrantes cuya principal tarea es en otra actividad no vinculada al LES. Uno de los principales problemas para trabajar con mayor efectividad, es la carencia de recursos humanos formados en temas de energía solar<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>Uruguay no tiene una formación específica en energía solar, aunque algunas carreras técnicas ofrecen cursos formales en estos temas.

# Bibliografía

- [WMO, 2008] (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation. Technical Report 8, World Meteorological Organization, WMO. 7th Ed.
- [3TIER, 2013] 3TIER (2013). 3tier global solar dataset: Methodology and validation. *Publicación de 3TIER, Octubre 2013*.
- [Abal et al., 2013] Abal, G., Aicardi, D., y Alonso Suárez, R. (2013). Estimation of the diffuse component of solar irradiation in uruguay. *Poster en el ISES Solar World Congress 2013*.
- [Abal et al., 2009] Abal, G., D'Angelo, M., Cataldo, J., y Gutierrez, A. (2009). Memoria Técnica del Mapa Solar del Uruguay. Technical report, Facultad de Ingeniería.
- [Abal et al., 2010] Abal, G., D'Angelo, M., Cataldo, J., y Gutierrez, A. (2010). Mapa Solar del Uruguay. En *Anales de la IV Conferencia Latinoamericana de Energía Solar (IV ISES-CLA)*, pages 1–12, Universidad Nacional del Cusco, Perú.
- [Alonso Suárez et al., 2011] Alonso Suárez, R., Abal, G., Siri, R., y Musé, P. (2011). Global solar irradiation assesment in Uruguay using Tarpley's model and GOES satellite images. En *Annals of the Solar World Congress (SWC 2011)*, Kassel, Germany.
- [Alonso Suárez et al., 2012] Alonso Suárez, R., Abal, G., Siri, R., y Musé, P. (2012). Brightness-dependent tarpley model for global solar radiation estimation using goes satellite images: application to uruguay. *Solar Energy*, 86:3205–3215.
- [Alonso Suárez et al., 2014] Alonso Suárez, R., Abal, G., Siri, R., y Musé, P. (2014). Satellite-derived solar irradiation map for uruguay. *Energy Procedia*, 57(0):1237 – 1246. 2013 ISES Solar World Congress.
- [C., 2012] C., R. (2012). Control de calidad de mediciones de radiación solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16:11.17–11.22.
- [Ceballos et al., 2004] Ceballos, J., Bottino, M. J., y Souza, J. M. D. (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using goes 8 visible imagery. *Journal of Geophysical research*, 109:1–14.
- [D'Angelo et al., 2011] D'Angelo, M., Toscano, P., Abal, G., y Ceballos, J. (2011). Spatial distribution of daily mean global solar irradiation in Uruguay. En *Solar World Congress (SWC 2011) (Poster)*, Kassel, Germany.
- [Duffie y Beckman, 2006] Duffie, J. y Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, third edition.
- [Erbs et al., 1982] Erbs, D., Klein, S., y Duffie, J. (1982). Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *Solar Energy*, 28:293–302.

- [Finkelstein y Schafer, 1971] Finkelstein, J. y Schafer, R. E. (1971). Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika*, 58:641 – 645.
- [Hall et al., 1978] Hall, L., Paire, R., Aderson, H., y Boes, E. (1978). Generation of typical meteorological year for 26 SOLMET stations. Technical report, Sandia National Laboratories.
- [Journée y Bertrand, 2010] Journée, M. y Bertrand, C. (2010). Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51:881–893.
- [Journée y Bertrand, 2011] Journée, M. y Bertrand, C. (2011). Quality control of solar radiation data within the rmib solar measurements network. *Solar Energy*, 85:72–86.
- [Justus et al., 1986] Justus, C., Paris, M., y Tarpley, J. (1986). Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America. *Remote Sensing of Environment*, 20(1):57–83.
- [Marion y Urban, 1995] Marion, W. y Urban, K. (1995). Users manual for TMY2 typical meteorological years derived from the 1961-1990 NSRDB. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [Muneer, 2004] Muneer, T. (2004). *Solar radiation and daylight models*. Elsevier-Butterworth-Heinemann, Oxford, 2nd ed. edition.
- [Noia et al., 1993a] Noia, M., Ratto, C., y Festa, R. (1993a). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 1. statistical models. *Solar Energy*, 51:449–456.
- [Noia et al., 1993b] Noia, M., Ratto, C., y Festa, R. (1993b). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 2. physical models. *Solar Energy*, 51:457–465.
- [Perez, 2002] Perez, R. (2002). A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation. *Solar Energy*, 73(5):307–317.
- [Perez et al., 1997] Perez, R., Seals, R., y Zelenka, A. (1997). Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data. *Solar Energy*, 60(2):89 – 96.
- [Pinker y Laszlo, 1992] Pinker, R. y Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale. *J. Appl. Meteorol.*, 31:194–211.
- [Reindl et al., 1990] Reindl, D. T., Beckman, W. A., y Duffie, J. A. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar Energy*, 45:1–7.
- [Ridley et al., 2010] Ridley, B., Boland, J., y Lauret, P. (2010). Modelling diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy*, 35:478–483.
- [Rigollier, 2004] Rigollier, C. (2004). The method heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, 77(2):159–169.
- [Rigollier et al., 2000] Rigollier, C., Bauer, O., y Wald, L. (2000). On the clear sky model of the esra with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, 68:33–48.
- [Ruiz-Arias et al., 2010] Ruiz-Arias, J., Alsamamra, H., Tovar-Pescador, J., y Pozo-Vázquez, D. (2010). Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51(5):881 – 893.
- [Wilcox y Marion, 2008] Wilcox, S. y Marion, W. (2008). Users manual for TMY data sets. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL).

- [Wu y Sun, 2005] Wu, X. y Sun, F. (2005). Post-launch calibration of goes imager visible channel using modis. En *Proc. SPIE 5882*.
- [Younes et al., 2005] Younes, S., Claywell, R., y Muneer, T. (2005). Quality control of data: present status and proposed new approaches. *Energy*, 30:1533–1549.
- [Zelenka et al., 1999] Zelenka, A., Perez, R., Seals, R., y Renné, D. (1999). Effective accuracy of satellite-derived hourly irradiances. *Theoretical and Applied Climatology*, 62:199–207. 10.1007/s007040050084.