Proyecto ANII FSE-110011:

"Evaluación del potencial de generación termoeléctrica por concentración solar en el Uruguay"

Responsable: Dr. Gonzalo Abal, Co-Responsable: Dr. Pedro Galione Klot

Informe Técnico: Modelado y análisis de variabilidad de la componente directa (DNI) de irradiación solar en el Uruguay.

27 de agosto de 2019

Equipo de trabajo: G. Abal, R. Alonso-Suárez, G. Giacosa, I. Piccioli, N. Márquez, A. Monetta, M. Visca





Índice general

Ín	ndice general	Ι
Ín	ndice de figuras	II
Ín	ndice de cuadros	III
1	Introducción 1.1. Objetivos 1.2. Metodología 1.3. Descripción de la información utilizada 1.3.1. Información pre-existente 1.3.2. Información derivada de imágenes satelitales 1.3.3. Nueva información	$2 \\ 2 \\ 3 \\ 5 \\ 5 \\ 8 \\ 12$
2	 Validación de estimativos satelitales 2.1. Estimación de GHI y DNI por satélite	$14 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 17 \\ 19$
3	Variabilidad inter-mensual e inter-anual 3.1. Variabilidad espacial de GHI y DNI	22 22 22 29
4	Conclusiones	32
В	ibliografía	34

Índice de figuras

1.1.	Estaciones SG	6
1.2.	Mapa de ubicación de estaciones de medida	6
1.3.	Medidas de radiación difusa	7
1.4.	Imagen de Factor de Reflectancia y Reflectancia planetaria	10
1.5.	Procesamiento satelital implementado	11
1.6.	Nueva medidas de DNI	12
1.7.	Nueva medida de DNI	13
2.1.	fracción difusa modelada	16
2.2.	Estimativos diarios de GHIi y DNIi	20
3.1.	Series diarias	23
3.2.	Mapa DNI	24
3.3.	Medias de largo plazo (2000-2017)	26
3.4.	DNI	26
3.7.	Totales anuales para el período 2000-2017	29
3.8.	(a) Anomalías en los totales anuales para 2000-2017. (b) Distribución de anomalías anuales	
	(DNI en naranja, GHI en azul).	30
3.9.	Anomalías extremas en los promedios móviles con ventanas de 1 a 17 años. El último coincide	
	con el promedio de largo plazo. Arriba: GHI, abajo: DNI. Las lineas horizontales corresponden	01
	a anomalias de $\pm 5\%$.	31

Índice de cuadros

1.1.	Ubicación y capacidades actuales de las estaciones G2	7
1.2.	Resumen de los datos de tierra disponibles	8
1.3.	Características del radiómetro del satélite GOES-13, en uso previo a 2018	8
1.4.	Base de imágenes del LES, desglosada por satélite físico.	11
2.1.	Indicadores de desempeño para el modelo JPTv2, de [AS16, Apéndice D]. Los indi- cadores se expresan con un porcentual del promedio indicado	15
2.2.	Estaciones usadas para la segunda validación diaria de los estimados por satélite (2000 a 2014) realizada en 2016. Las variables registradas incluyeron GHI y DHI	10
	(irradiancia difusa) registradas hasta 2014 inclusive.	18
2.3.	Resultados de la segunda validación (diaria y horaria) de los estimados por satélite interpolados (2000 a 2014) realizada en 2016. La última fila contiene los indicadores	
	promedio (ponderados por el número de días) en todo el territorio	18
2.4.	Estaciones para 3er validación	19
2.5.	Resultados de tercer validación (GHI y DNI diaria). LE es la única estación con	
	medidas de irradiancia directa en incidencia normal (DNI).	19
3.1.	Medias mensuales y anuales de GHI de largo plazo (2000-2016) para las capitales	
	departamentales, expresadas en MJ/m^2	25
3.2.	Medias mensuales y anuales de DNI de largo plazo (2000-2016) para las capitales	
	departamentales, expresadas en MJ/m^2	25

1 Introducción

En este informe técnico se describe la metodología utilizada y se resumen los resultados obtenidos en la componente de análisis del recurso solar (DNI y GHI) del Proyecto ANII FSE 2015-110011, "Evaluación del potencial de generación termoeléctrica por concentración solar en el Uruguay" financiado por el Fondo Sectorial de Energía de ANII en el llamado 2014. La ejecución del proyecto se llevó adelante entre Agosto 2016 y Marzo 2019. A lo largo de los 30 meses de duración, colaboraron con el proyecto varios estudiantes e investigadores del Instituto de Ingeniería Mecánica y de Producción Industrial (IIMPI) de la Facultad de Ingeniería junto a investigadores y estudiantes del Laboratorio de Energía Solar (LES) del Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR.

Además de la componente que se describe en este informe, ejecutada en el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Facultad de Ingeniería, el proyecto contó con otras dos componentes, en las cuales se realizaron simulaciones de desempeño de plantas por concentración solar basadas en diferentes tecnologías CSP y en diferentes ubicaciones del territorio. En una de ellas se analizó el potencial de la tecnología CSP para la generación eléctrica y en la otra, para la generación de calor para uso industrial. Estas dos componentes fueron ejecutadas por el equipo del IIMPI de la Facultad de Ingeniería. Las tres componentes del proyecto han avanzado en forma coordinada a lo largo del mismo y la información generada sobre la componente directa de la radiación solar (DNI) se ha utilizado como insumo para las simulaciones de las otras componentes. Por razones de claridad conceptual, se han preparado tres informes técnicos separados.

Los informes correspondientes a las otras dos componentes pueden encontrarse en línea: http://les.edu.uy/report/InformeCSP_final.pdf para el potencial CSP de generación eléctrica y http://les.edu.uy/report/InformeCSP_finalCalor.pdf para el potencial CSP para generación de calor de uso industrial. Asimismo, la versión actualizada de este informe puede descargarse de http://les.edu.uy/report/Info_recursoDNI.pdf.

1.1 Objetivos

El objetivo general de esta componente del proyecto es alcanzar una caracterización de la radiación solar directa en incidencia normal (DNI) con niveles de incertidumbre que permitan extraer conclusiones sobre el desempeño esperable de diferentes tecnologías de concentración solar en diferentes partes del territorio.

Los objetivos específicos para esta componente del proyecto pueden resumirse en tres elementos:

- i) Mejorar las capacidades de medida de DNI en Uruguay.
- ii) Estimación de DNI diaria, mensual y anual en varios puntos del territorio, utilizando diferentes técnicas, que permitan una razonable aproximación a la distribución espacial de DNI media. Calcular lo mismo para GHI a modo de comparación.

- iii) Estimar la incertidumbre asociada a los diferentes estimativos de DNI y GHI.
- iv) Estimar la variabilidad inter-mensual e inter-anual característica de las variables DNI y GHI en el Uruguay.

1.2 Metodología

Idealmente, a efectos de conocer la variabilidad de DNI en el territorio, se necesitan series de medidas sub-horarias de calidad controlada (calibraciones periódicas de los instrumentos, limpieza diaria, filtrado posterior, entre otras medidas) de extensión suficiente para que sus promedios tengan una validez climatológica¹. Esta extensión varía entre 10 y 30 años de datos, sin huecos importantes. A modo de ejemplo, el año meteorológico típico en EEUU (TMY3) se construye a partir de series de 30 años de datos minutales, tanto para GHI (irradiancia global horizontal) como para DNI [WM08]. En Uruguay, la primer medida sistemática de DNI comienza en el LES en 2016 y la segunda, en Artigas en 2018. En cuanto a GHI, el programa de medidas de calidad controlada que lleva adelante el LES en el territorio comienza en 2010 con medidas en tres sitios (Canelones, Treinta y Tres y Salto) por lo cual, si bien existe una mayor cantidad de datos que para DNI, las series mas largas llegan a 8-9 años y tampoco se cuenta con series de validez climatológica aún. Si bien son cortas y no tienen significancia climatológica, las series de medidas de DNI pueden usarse a efectos de validar los estimativos de DNI obtenidos por otros métodos y para estimar la incertidumbre asociada al uso de estos métodos.

El único método capaz de proveer series de GHI de casi 20 años de longitud se basa en el uso del conjunto de imágenes del satélite GOES-East. Estos satélites operados por la NOAA, como se describe más adelante, generan imágenes del territorio Uruguay con cadencia aproximada de dos por hora desde el año 2000 en forma ininterrumpida, si bien con muchos huecos debido a diversos factores. En el canal visible de estas imágenes se cuenta con información valiosa de la cobertura nubosa (media en la hora) sobre el territorio con resolución espacial de pocos km. Utilizando un modelo ajustado a datos de GHI de tierra desarrollado por el LES [ASASM11, ASASM12], es posible generar estimativos horarios de GHI sobre el territorio del Uruguay con incertidumbre² de 13 % de la media de las medidas. Estos estimativos, en series de casi 20 años, son la base para el cálculo de DNI horaria.

La DNI esta relacionada con la GHI y la irradiancia difusa, DHI por la ecuación de clausura,

$$GHI = DNI \times \cos \theta_z + DHI \tag{1.1}$$

donde θ_z es el ángulo cenital del Sol, que puede calcularse a partir de la fecha, hora y ubicación geográfica del punto de medida. A partir de esta relación, es posible obtener DNI si se conoce GHI y DHI,

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \theta_z} \tag{1.2}$$

siempre que $\cos \theta_z > 0$. En horas con Sol bajo (cercanas al atardecer y el amancer) $\cos \theta_z \ll 1$ y esto amplifica los errores experimentales asociados a las medidas de GHI y DHI, de modo que este un método imperfecto y puede generar altas incertidumbres en DNI al final y al comienzo del día. Lo que lo hace un método viable, es el hecho de que al acumular estimativos horarios en totales diarios y luego en medias mensuales y totales anuales, la incertidumbre se reduce considerablemente.

El problema es que no contamos aún en Uruguay con un modelo satelital que estime directamente la proporción de radiación difusa (o la fracción difusa, $f_d = DHI/GHI$) en superficie,

¹Se busca evitar que estén dominados por ciclos de pocos años de clima seco o muy lluvioso

²Estimada por el desvío cuadrático medio RMSD.

por lo cual DHI no es conocida en las series de largo plazo obtenidas por satélite. Para subsanar este problema, en el mundo se utlizan diversos modelos fenomenológicos que permiten estimar DHI a partir de GHI y otras variables. Se conocen genéricamente como modelos de fracción difusa. El desempeño de estos modelos suele ser variable y depende de las características del clima promedio en que se utlizan. Al comienzo de este proyecto, no se sabía que modelos funcionaban bien para el clima del Uruguay, ni cual es la incertidumbre asociada a su uso, de modo que esta fué una de las componentes desarrolladas a lo largo del proyecto. Los resultados de este trabajo se publicaron a comienzos de 2018 [AASL17] y muestran que es posible usar un modelo propuesto por Ruiz-Arias et al [RAATPPV10] para estimar f_d a partir del índice de claridad k_t y de la masa de aire m, con incertidumbre relativa estimada en 18%. Usando este modelo, es posible entonces generar una serie de DHI horaria, a expensas de aumentar considerablemente la incertidumbre de partida de 13%, llevándola a 22% para la serie horaria de DHI estimada.

Finalmente, usando la Ec. (1.2) se puede estimar DNI a partir de GHI (13%) y DHI (22%), pero teniendo en cuenta que en puntos con Sol bajo, el error puede amplificarse considerablemente. De hecho, una propagación de error simple muestra que el error relativo δ_b asociado al estimativo de DNI por este método, depende de los errores relativos en GHI (δ_h) y DHI (δ_d) y de la fracción difusa f_d , en la forma

$$\delta_b = \frac{\sqrt{\delta_h^2 + f_d^2 \delta_d^2}}{1 - f_d}.$$
(1.3)

Esta ecuación no puede aplicarse en condiciones de alta nubosidad, cuando DNI = 0, GHI = DHI y $f_d = 1$. En la práctica, usando un valor medio de $f_d \approx 0.50$ adecuado para Uruguay, se puede esperar un error relativo medio en las series de DNI horaria de 34% con incertidumbres relativas mayores en condiciones de alta nubosidad (baja DNI). Esto es mas del doble de la incertidumbre relativa asociada a los estimativos de GHI por satélite (13%) y es elevada, pero manejable, en la medida en que estamos interesados en obtener medias mensuales y totales anuales y la incertidumbre en los acumulados será bastante inferior.

Visto las suposiciones y modelos involucrados en generar series horarias de estimativos de DNI de largo plazo, es necesario evaluar la incertidumbre de estos modelos contra datos reales de DNI registrados en tierra. Por lo tanto, la metodología seguida en este trabajo consta de los siguientes pasos:

- 1. Acumular los totales diarios, medias mensuales y totales anuales correspondientes a los datos de DNI disponibles para 2016-2018 en la estación del LES y calcular su incertidumbre procediendo por propagación a partir de la incertidumbre nominal de la medida experimental (1% para DNI, 3% para GHI).
- 2. Generar las series horarias de largo plazo (2000-2018) estimadas por satélite de DNI y GHI usando la ec. (1.2) y el modelo de Ruiz-Arias para f_d .
- 3. Comparar los valores (2) con los valores (1) a nivel horario, diario y mensual para estimar el error medio real cometido al usar la metodología (2). Asignar estos errores a los estimativos de largo plazo calculados en (2).
- 4. Calcular la variabilidad interanual e intermensual de ambas variables (DNI y GHI) para el Uruguay y compararlas con los valores reportados enla literatura para otros climas.

Esta metodología para generar estimativos de DNI por satélite ha sido usada para los productos de caracterización generados por el LES durante la ejecución del proyecto, como el Mapa Solar del Uruguay v2 [ASAMS14] y el Año Meteorológico Típico del Uruguay para aplicaciones en energía Solar [RBGM16] y se describe en detalle en la tesis de doctorado de R. Alonso-Suárez [AS16].

1.3 Descripción de la información utilizada

En esta sección se describen aspectos generales sobre la información de medidas de tierra y la información satelital usada en el estudio.

1.3.1 Información pre-existente

Previo a 2009, Uruguay no contaba con información confiable sobre medidas de irradiancia solar. El primer Mapa Solar del Uruguay se basó fuertemente en observaciones de heliofanía (horas de sol) registradas por la Dirección Nacional de Meteorología a lo largo de varias décadas y en unas tres series de irradiación solar global diaria, una de ellas registrada en Brasil por el INMET.

Al momento de formularse este proyecto, se contaba en Uruguay con una red de medidas de radiación solar de calidad controlada y en pleno funcionamiento (RMCIS). Esta red fué necesaria porque el Instituto Nacional de Meteorología (IMUMET) o sus precursores, no miden irradiancia solar en forma regular. Existen otras redes en operación, destacándo la de UTE, con gran cobertura (13 puntos con medida de irradiancia) pero con radiómetros de bajo costo y un esquema de calibración periódica que solo se regularizó recientemente. Existen algunas medidas del proyectos puntuales del INIA, pero sin calibración, ni continuidad, ni trazabilidad.

La RMCIS (Red de Medida Contínua de Irradiancia Solar) se inició con tres puntos de medida desde la Facultad de Ingeniería en 2010 a través de un convenio con el MIEM y a partir de 2014 el Laboratorio de Energía Solar (LES) asumió su operación y mantenimiento. Las estaciones SG (Segunda Generación) son en su mayoría autónomas (salvo en puntos donde tienen acceso a red eléctrica y red informática) alimentadas por un sistema de panel fotovoltaico y batería. Los adquisidores de datos miden varias señales de mV con frecuencia minutal durante años, trabajando a la intemperie en caja estanca y sin fallos. Todos están equipados con modem (o conexión ethernet) y envían los archivos de datos diariamente por la red celular (GSM) a un servidor central del laboratorio ubicado en Salto. El diseño es propio del LES y es el resultado de varios años de ensayos de prueba y error, para encontrar las combinaciones de equipamiento mas confiables. En general se siguen los protocolos internacionales de buenas prácticas para asegurar la calidad de los datos [SRM⁺10].

En todas estas estaciones se mide la radiación solar global sobre plano horizontal (GHI) en forma redunante, con un piranómetro Kipp & Zonen de Primera Clase o superior, de acuerdo a la clasificación de la norma [ISO90], y con un radiómetro fotovoltaico Licor 200 R a modo de chequeo adicional. Los radiómetros son calibrados cada 24 meses en el LES siguiendo la norma [ISO92] y con trazabilidad al patrón mundial de radiación (WRR) mantenido por el World Radiation Center en Davos, Suiza. En cada estación se mide además temperatura ambiente y en muchas se miden variables auxiliares, como irradiancia solar global en plano inclinado (GTI), irradiancia solar difusa (DHI) y, actualmente, irradiación solar directa en incidencia normal (DNI) en dos de ellas. Por más detalles sobre las estaciones, se puede consultar el informe técnico [AAA⁺15] realizado para la consultora internacional Sólida de España, que auditó en 2014 la red de medidas del LES por encargo del MIEM. La distribución espacial de los puntos de medida SG ha quedado en gran medida predeterminada por el criterio de dar continuidad a las medidas de primera generación. La cobertura de la red de tierra se puede ver en la Fig. 1.2.

El Cuadro 1.1 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.

Tres de las estaciones remotas SG cuentan con piranómetros modelo SPN1 fabricados por la firma inglesa Delta T, uno de ellos se muestra en la Fig. 1.3 (a). Estos equipos miden simultáneamente irradiancia global y difusa sobre plano horizontal (GHI y DHI) sin utilizar partes móviles. Utilizan una máscara fija especial y 8 sensores puntuales, de los cuales en todo momento hay



Figura 1.1: Estación de segunda generación en período de prueba en Treinta y Tres (TT). Al lado, la estación original de primera generación. El predio es mantenido por el INIA.



Figura 1.2: Ubicación aproximada de las ocho estaciones de medida de irradiancia solar del LES. La estación PY (Paysandú) nunca entró en operación por problemas de seguridad en el predio de la EEMAC.

Local	Cód.	LAT $(^{o})$	$\mathbf{LON}(^{o})$	ALT (m)	GHI1	GHI2	DHI	DNI	$\mathbf{GTI}(\beta)$	Inicio
Artigas	AR	-30.40	-56.51	136	•	•	•		35°	12/2011
Colonia	ZU	-34.33	-57.68	81	٠	•				05/2015
Canelones	LB	-34.67	-56.33	32	٠	٠			35°	01/2010
Montevideo	AZ	-34.92	-56.17	58	٠	٠				01/2011
Rocha	RO	-34.49	-54.32	30	٠	٠				12/2011
Salto	\mathbf{SA}	-31.28	-57.92	56	•	•	•	•	30°	05/2010
Tacuarembó	TA	-33.70	-55.82	140	•	•	•		45°	05/2015
Treinta y Tres	TT	-33.28	-54.17	26	•	•	•		45°	06/2010

Cuadro 1.1: Ubicación y capacidades de las estaciones G2. En la columna GTI se indica el ángulo del plano de la medida de irrdiancia 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. Por datos, gráficos y otros detalles, visitar http://les.edu.uy



(a) Piranómetro SPN1 en Treinta y Tres.

(b) Sistema de alta calidad basado en SOLYS 2.

Figura 1.3: Años disponibles de medidas de radiación solar global, difusa y directa con frecuencia minutal a diciembre de 2018.

algunos en sombra y otros al Sol directo. La electrónica interna del equipo desglosa a partir de estas medidas las componente difusa (DHI) de la irradiancia global utilizando un algoritmo simple. El desempeño de estos equipos para medir irradiancia solar global es similar al de un piranómetro de Primera clase. Hemos chequeado su desempeño para medir irradiación difusa contra una medida cuidadosa basada en banda de sombra y tienen un despeño aceptable con un desvío cuadrático medio del 7%. Los equipos Delta T SPN1 no son equipos de precisión, pero permiten estimar DNI a una fracción del costo de un equipo de referencia como el basado en un pirheliómetro y un seguidor Solys 2. No requieren mantenimiento (salvo la limpieza periódica de su cúpula) por no tener partes móviles y no presentan problemas de sensibilidad a la temperatura ambienta ya que están mantenidos a 25° por un sistema de calentamiento interno.

Además de las medidas indirectas de DNI montadas en tres de las estaciones remotas G2, el LES cuenta con una estación especial para medida de DHI y DNI en el predio de Salto. Esta medida de referencia del laboratorio, tal como se muestra en la Fig. 1.3 (b), utiliza un seguidor 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 cuarzo. Estos equipos miden GHI al 2% en forma redundante. Uno de los piranómetros tiene bloqueada la radiación directa por una bocha esférica especial, de modo que su sensor esta siempre en sombra y mide DHI al 2%. Además, el equipo cuenta con un pirheliómetros midiendo DNI al 1%. Desde 2015, cuando inició sus operaciones a modo de prueba, esta fué la única medida continua de DNI existente en Uruguay hasta 2018. En ese año comenzó operaciones un equipo gemelo de precisión montado en el predio del INUMET en

	(GHI	DHI		I	DNI
Estaciones	años	$\delta_u~(\%)$	años	$\delta_u~(\%)$	años	$\delta_u~(\%)$
AR	7	5	?	7	0	-
ZU	3.5	5	0	-	0	-
LB	9	5	0	-	0	-
AZ	8	6	0	-	0	-
RO	7	6	0	-	0	-
SA	8.5	5(3)	3	3	3	1
TA	3.5	5	3.5	7	0	-
TT	8.5	5	4	7	0	-

Cuadro 1.2: Años (aproximados) de datos de tierra disponibles a diciembre 2018 para cada variable u su incertidumbre asignada a nivel horario. En SA, a partir de 8/2015 se instala una estación de alta calidad y baja la incertidumbre en GHI a 3% de la media.

el Aeropuerto de Artigas (AR), financiado a través de este proyecto. El cuadro 1.2 resume la situación (a diciembre 2018) en cuanto a las medidas de tierra disponibles para cada variable.

1.3.2 Información derivada de imágenes satelitales

En el resumen del Cuadro 1.2 se puede apreciar que los datos de DHI son escasos y con alta incertidumbre y los de DNI aún mas escasos (una única estación con poca estadística). Para realizar estudios con validez climatológica, como la caracterización de variabilidad interanual, lo ideal sería contar con dos o tres décadas de datos de calidad controlada [WM08]. No existen en Uruguay series de datos de radiación solar con más de 10 años de duración. Por esta razón, se recurre a estimativos de radiación solar generados a partir de información satelital, los cuales alcanzan actualmente a 20 años de estimativos horarios de irradiación solar global.

El trabajo de referencia, donde se describe en detalle esta metodología, es la tesis doctoral de Rodrigo Alonso-Suárez, defendida en la Facultad de Ingeniería en marzo 2017 [AS16]. Para este fin, se utilizan imágenes de satélites geoestacionarios (se ubican sobre un punto fijo del ecuador terrestre) dado que la cadencia de sus imágenes es subhoraria. El satélite cuya ventana incluye el territorio del Uruguay es el GOES-East, ubicado en longitud 75° W y operado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de EEUU. Sus imágenes (aproximadamente dos por hora) se encuentran públicamente disponibles, desde el año 2000 al presente.

	principal	ventana espectral	número de	resolución
canal	uso meteorológico	(μm)	detectores	(km)
01	nubosidad diurna	0.54 – 0.71	8	1
02	nubosidad nocturna	3.73 - 4.08	2	4
03	vapor de agua	5.90 – 7.28	2	4
04	temperatura de tope de nube	10.19 - 11.18	2	4
06	altura y cobertura nubosa	13.01 - 13.71	2	4

Cuadro 1.3: Características del radiómetro del satélite GOES-13, en uso previo a 2018.

A lo largo de los años han operado distintos dispositivos físicos en la posición GOES-East: GOES-8, GOES-12, GOES-13 y actualmente GOES-R (cuya cadencia aumentó a 4 o 5 imágenes por hora en varias bandas espectrales). En lo que sigue, nos referiremos a la generación anterior a GOES-R, en operación hasta diciembre de 2017, que es la usada para este trabajo. Estos satélites generan imágenes en 5 bandas espectrales: una en el espectro visible y cuatro en el

espectro infrarrojo lejano (ver Tabla 1.3). Las imágenes se generan escaneando la Tierra con un array de detectores en forma de barrido. Como la resolución espacial es variable a lo largo de la imagen, lo común es referirse al ancho del píxel en la vertical del satélite, conocido como resolución nominal. En la Tabla 1.3 se describen las bandas espectrales del satélite GOES-13, la cantidad de detectores de cada banda y su resolución nominal, además del uso típico de la información de cada canal. La resolución espacial de los canales está dada por la cantidad de detectores de los arrays de barrido de cada una. Los satélites GOES-8, GOES-12 y GOES-13 han tenido especificaciones levemente distintas entre sí, pero en lo que respecta a la resolución nominal y cantidad de detectores de cada banda la especificación es la misma para los tres satélites.

El canal 01 (visible) mide únicamente radiación solar reflejada por la Tierra y la atmósfera circundante y es el único utilizado en este trabajo. La imagen del canal visible es esencialmente una foto monocromática (niveles de gris) del hemisferio terrestre que observa el satélite. Permite identificar la nubosidad, y diferenciarla de las masas de agua y del terreno firme. Debido a esta característica, es el principal canal utilizado en el contexto de modelos para estimar la irradiación solar. La nubosidad en este canal puede confundirse con la presencia de nieve u otros elementos de alta reflectividad, pero para Uruguay y regiones vecinas no se presenta este problema. La radiancia L_s observada por los canales del satélite rara vez es usada directamente para la elaboración de productos satelitales. En el canal visible la información es convertida en factor de reflectancia (F_R) o en reflectancia planetaria (ρ_p). La radiancia L_s^{vis} observada en el visible es normalizada respecto a lo que mediría el radiómetro si toda la irradiancia solar que llega a la Tierra fuese reflejada isotrópicamente. Denominamos a esta radiancia, correspondiente a reflectividad terrestre igual a 1, como L_{Δ}^{vis} , y se calcula como,

$$L_{\Delta}^{\rm vis} = \frac{\int_0^{\infty} L_{\lambda}^{\rm max} \Phi_{\lambda}^{\rm vis} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda}^{\rm vis} d\lambda} = \left(\frac{F_n}{\pi}\right) \times \frac{\int_0^{\infty} G_{sc\lambda} \Phi_{\lambda}^{\rm vis} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda}^{\rm vis} d\lambda} = F_n \times \left(\frac{G_{\Delta}^{\rm sc}}{\pi}\right), \quad (1.4)$$

donde $G_{sc\lambda}$ es la distribución espectral de la radiación solar incidente sobre la Tierra (espectro solar de referencia AMO, cuya integral resulta en la constante solar) y F_n es simplemente el factor de corrección orbital, debido a la eccentricidad de la órbita terrestre [Iqb83]. La constante G_{Δ}^{sc} es el resultado de modular el espectro $G_{sc\lambda}$ por la respuesta espectral del instrumento Φ_{λ}^{vis} , y su valor es brindado por la NOAA. Conocido este valor se puede calcular el factor de reflectancia y la reflectancia planetaria según,

$$F_R = \frac{L_s^{\text{vis}}}{L_\Delta^{\text{vis}}} = \frac{\pi L_s^{\text{vis}}}{G_\Delta^{\text{sc}} F_n},\tag{1.5}$$

$$\rho_p = \frac{L_s^{\text{vis}}}{L_\Delta^{\text{vis}} \cos \theta_z} = \frac{F_R}{\cos \theta_z} = \frac{\pi L_s^{\text{vis}}}{G_\Delta^{\text{sc}} F_n \cos \theta_z}.$$
(1.6)

El factor de reflectancia contiene información física similar a la radiancia observada, pero normalizada al rango [0,1] y corregida por la distancia variable Tierra-Sol. En particular, la imagen contiene información espacio-temporal según la posición relativa entre la Tierra y el Sol. En cambio, la reflectancia planetaria da una indicación de la reflectividad de los elementos en la imagen independiente de la posición de la Tierra, a menos de pequeños efectos de anisotropía en la reflexión. A la reflectancia planetaria también se la conoce como albedo terrestre. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de la información contenida en estas cantidades (expresadas en porcentual). Se presenta la imagen del banco local del LES del 16 de noviembre de 2016 a la hora 20:38 UTC. Esta es una imagen del final de la tarde en Uruguay donde el meridiano solar se encuentra al oeste. Debido a la posición Tierra–Sol las nubes se ven más tenues en la imagen de factor de reflectancia. En cambio, la normalización por $\cos \theta_z$ realza la nubosidad en la imagen de reflectancia planetaria. Por más detalles sobre la manipulación y calibración de las imágenes satelitales nos referimos a [AS16].



Figura 1.4: Factor de Reflectancia y Reflectancia planetaria para una imagen de Uruguay y la región para el 16/11/2016 20:38 UTC.

El procesamiento satelital que realizamos en el Laboratorio de Energía Solar (LES) se resume en la Fig. 1.5. Se parte de las cuentas digitales B_S^{vis} (VIS) y B_{Sx}^{irb} (IRB) para obtener la radiancia observada por el satélite L_S^{vis} y L_{Sx}^{irb} , y luego los valores de F_R y ρ_p para el canal visible y la temperatura de brillo T_x para los canales infrarrojos (la x denota cada uno de los cuatro canales infrarrojos). Este procesamiento genera dos tipos de insumos: (i) series temporales de información satelital para una lista de puntos pre-configurados (actualmente más de 300 ubicaciones que cubren Uruguay y la región con puntos de interés, como estaciones de medida, capitales departamentales, grilla de puntos equi-espaciados); (ii) para cada imagen se genera una nueva imagen en proyección regular (una grilla equi-espaciada en latitud-longitud), ya que las imágenes originales están en proyección irregular (ó proyección satélite) y constan de 3 matrices: dato, latitud y longitud. El procedimiento de pasaje a grilla regular se realiza promediando los píxeles de la imagen original en cada celda de una grilla regular. Se utilizan para ello algoritmos de arquitectura paralela desarrollados por investigadores del LES [ASN12]. Otros algoritmos, basados en las mismas bibliotecas, funcionan dando soporte al sitio http://les.edu.uy/online/, el cual opera automáticamente y permite visualizar las imágenes GOES-East en tiempo cuasi-real.

La base de datos de imágenes del satélite GOES-East del LES es única en el país y (a fines de 2016) contaba con más de 160 000 conjuntos de imágenes (1 x visible + 4 x infrarrojo), totalizando más de 800 000 imágenes que cubren el período temporal desde el 01/01/2000 hasta el presente. Las imágenes originales están en formato NetCDF (www.unidata.ucar.edu/netcdf/), un formato multi-plataforma específicamente orientado al almacenamiento y distribución de información científica y meteorológica. En la Tabla 1.4 se muestra la cantidad de imágenes y el espacio en disco necesario, desglosado por el periodo de operación de cada satélite físico, hasta fines de 2016. Las diferencias de espacio en disco se deben a que se ha ido aumentando



Figura 1.5: Procesamiento satelital implementado.

gradualmente el tamaño de la ventana espacial de las imágenes al aumentar la capacidad de almacenamiento del LES. Hasta la aparición del GOES-R en 2018, nuestra base de imágenes satelitales crecía a una tasa de $\simeq 1.5$ TB por año y la ventana espacial es la mostrada en la Figura 1.4. Actualmente, con el GOES-R, esto aumentó un orden de magnitud y se presentan nuevos desafíos.

satélite	inicio	fin	imágenes	disco
GOES 8	01/01/2000	31/03/2003	123775	242 GB
GOES 12	01/04/2003	14/04/2010	259445	586 GB
GOES 13	14/04/2010	31/12/2016	421653	$4113~\mathrm{GB}$
total	01/01/2000	31/12/2016	804873	4941 GB

Cuadro 1.4: Base de imágenes del LES, desglosada por satélite físico.

Las imágenes son adquiridas vía internet a través del servicio de descarga CLASS/NOAA (http://www.class.ngdc.noaa.gov) públicamente disponible. Hasta el 2015 este proceso de descarga se realizó, en parte, manualmente. A partir de 2016 utilizamos una suscripción donde se nos preparan las nuevas imágenes conforme se van generando y las descargamos automáticamente utilizando un script Bash desarrollado por el LES. Esta forma de recepcionar la información resulta en un retraso promedio de $\simeq 2$ horas entre que la información se genera y se recibe en nuestros servidores. El retraso se debe principalmente al tiempo de procesamiento que requieren los servidores de la NOAA para atender el pedido. Como se mencionó, en régimen de operación normal el satélite genera para Sudamérica dos imágenes por hora. Hasta agosto de 2014, cuando el satélite cambiaba al modo de operación de escaneo rápido (RSO, Rapid Scan Operation)³, en Sudamérica se disponía solo de las imágenes Full-Disk (escaneo de todo el disco terrestre) cada 3 horas, lo cual ocasiona huecos frecuentes en la serie de imágenes, especialmente en torno a la temporada de huracanes en el hemisferio norte. Luego de esa fecha, el problema fue parcialmente solucionado, y se dispone siempre de al menos 1 imagen por hora, cualquiera sea el modo de escaneo.

El modelo utilizado (BD-JPT) para convertir información de Factor de Reflectancia en estimados de irradiación solar horaria (producto de Nivel 2) se desarrolló y optimizó para la región utilizando datos de la red de medidas terrestres del LES. Los detalles de esta implementación pueden consultarse en detalle en [AS16] o en forma resumida en las publicaciones de nuestro grupo [ASDA12, ASASM11, ASASM12]. Este modelo se encuentra validado extensamente y ha

³El satélite se comanda a ese modo, por ejemplo, ante eventos meteorológicos extremos en la zona del Caribe.



Figura 1.6: Nueva medida de DNI, durante el período de prueba en el LES (Salto). En rojo, la DNI, en verde DHI y en naranja y azul dos señales (redundantes) de GHI. El registro corresponde al día 2/10/2017, despejado en la mañana y con nubosidad variable en la tarde.

sido la base de desarrollos de caracterización climática para Uruguay, como el Año Meteorológico Típico o el Mapa Solar del Uruguay (versión 2.0) [AS16].

1.3.3 Nueva información generada a partir del proyecto FSE-110011

A través de este proyecto, se adquirió una nueva estación de medida de DNI para ser ubicada en el Departamento de Artigas. La estación es gemela de la que opera en el LES desde 2016. Cuenta con los siguientes instrumentos:

- 2 Piranómetros Kipp & Zonen CMP10 (estándar secundario) para medida de irradiancia global (GHI) y difusa (DHI)
- 1 Pirheliómetro Kipp & Zonen CHP1 para medida de irradiancia directa (DNI)
- ventiladores de aire caliente para los piranómetros (evitan el depósito de polvo y gotas de agua en las cúpulas)
- sistema de seguimiento solar de precisión de 2 ejes Kipp & Zonen SOLYS2
- sensor de seguimiento fino (evita desalineaciones en tiempo real)
- Adquisidor de datos Fischer Scientific Datataker DT80M
- Sensor de temperatura ambiente, Pt1000 clase Y

Estos equipos fueron adquiridos y montados a modo de prueba en el Laboratorio de Energía Solar sobre una mesa metálica especialmente diseñada. El sistema se alimentó con 220 v ac para evitar la complejidad y el gasto asociado a una instalación autónoma con potencia suficiente para mantener todos los equipos en operación durante el invierno. Se constataron pequeños rudios eléctricos inducidos en el cableado y se trabajó durante varios meses realizando varias pruebas hasta lograr unas señales limpias y estables. La Fig. 1.6 muestra un ejemplo de medidas durante el período de prueba del equipo.

Luego el equipo fué desplegado y montado en la estación experimental del INUMET ubicada en el Aeropuerto de la ciudad de Artigas, donde se encuentra en operación continua desde fines de 2018 midiendo las variables indicadas con cadencia minutal (ver Fig. 1.7).



(a) SOLIS2 a prueba en Salto

(b) SOLYS2 instalado en Artigas

Figura 1.7: Equipo SOLYS2 midiendo en Salto (a prueba) y Artigas.

La instalación de esta nueva medida de precisión de irradiancia solar y de DNI en particular permitirá en el futuro conocer en mas detalle los niveles de radiación esperables en la zona norte del Uruguay. Además, robustece el sistema de medidas, ya que hasta 2018 en Uruguay se contaba con una única medida de irradiancia directa en el territorio. Los estudios de variabilidad del recurso GHI y DNI no utilizaron esta medida, ya que se requiere al menos de un año de medidas para comenzar a tener significancia.

2 Generación y validación de estimativos satelitales de GHI y DNI en el territorio

Dado que no existen datos de largo plazo de GHI y, especialmente, de DNI, es necesario estimar estas variables a nivel horario usando diversos modelos e información satelital. La estimación de la incertidumbre asociada a estos estimativos, tanto a escala horaria, diaria, de medias mensuales o totales anuales es esencial y requiere un proceso de validación de estos estimativos contra datos de tierra.

2.1 Estimación de GHI y DNI por satélite

En esta sección describimos brevemente la metodología seguida para estimar GHI y DNI a nivel horario a partir de información satelital del GOES-East descrita en la Sección 1.3.2. Además, se incluye una evaluación preliminar de estos estimativos contra datos de tierra registrados en la estación LE (Salto) entre 2015-2017.

2.1.1 Estimación de GHI por satélite - modelo JPTv2

La estimación a nivel horario de GHI por satélite utiliza el modelo JPTv2, tal como se describe en detalle en [AS16, Cap. 4],

$$GHI = I_{sc} F_n \cos \theta_z \left(a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z \right) + d \left(F_{Rm} - F_{Ro} \right)$$
(2.1)

donde $I_{cs} = 1367 \text{ Wh/m}^2$ es el valor convencional de la constante solar, F_n el factor de corrección por excentricidad orbital y θ_z el ángulo cenital solar calculado a partir de la ubicación, fecha y hora. F_{Rm} y F_{Ro} son los factores de reflectancia (real y de fondo) derivados de las imágenes satelitales para la ubicación de interés, Eq. (1.5). Su determinación es clave para el buen desempeño del modelo y se describe en detalle en [AS16] y en trabajos pevios de nuestro grupo [ASAMS14, ASASM12]. La diferencia entre la reflectancia real y la del fondo contiene información sobre la nubosidad media en la hora en el sitio de interés. Este modelo resulta ser el óptimo entre varias alternativas similares evaluadas y los coeficientes se ajustan a datos *GHI* de tierra de varios años. Los mismos presentan poca variación sobre el territorio del Uruguay, de modo que es posible usar la Ec. (2.1) con un único conjunto de coeficientes globales: a = 0.426, b = 0.693, c = -0.385 y d = -13.258 Wh/m². Este último es negativo, de modo que una mayor reflectancia (asociada a la presencia de nubes) resulta en una disminución de la irradiación horaria.

En [AS16] se realizó una validación completa de este (y otros) modelos contra varios años de datos de tierra de 15 estaciones distribuidas en el territorio del Uruguay. La incertidumbre asignada a las medidas de GHI horaria es entre 5 % y 7 % del promedio, dependiendo de la calidad del instrumento de medida. Los inidicadores básicos utilizados son el sesgo promedio

$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (\hat{y}_i - y_i)$$
(2.2)

y el desvío cuadrático medio

RMSD =
$$\left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(\hat{y}_i - y_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
 (2.3)

donde \hat{y}_i representa el estimativo y y_i la medida correspondiente y N el número de medidas. Estos indicadores se pueden expresar en términos relativos, como un porcentaje de la media de las medidas. La Tabla 2.1 muestra los inidicadores relativos obtenidos para GHI obtenido de la Ec. (2.1) a nivel horario y para sus acumulados diarios y esto representa la **primer validació**n de los estimados de GHI por satélite contra datos de tierra. La misma se realizó por el procedimiento de muestreo aleatóreo y validación cruzada.

	N	\overline{GHI}	MBD (%)	RMSD ($\%$)
horario	$125033 \ { m h}$	$448\mathrm{Wh/m^2}$	0.1	12.0
diario	$11472 \ d$	$17.8\mathrm{MJ/m^2}$	0.2	5.5

Cuadro 2.1: Indicadores de desempeño para el modelo JPTv2, de [AS16, Apéndice D]. Los indicadores se expresan con un porcentual del promedio indicado.

En suma, el modelo JPTv2 es capaz de estimar GHI horaria con una incertidumbre típica de 12% de la media y presenta una incertidumbre típica de entre 5 y 6% de la media en los totales diarios. La incertidumbre típica en las medias mensuales es menor a 5%.

2.1.2 Estimación de DNI a nivel horario

A partir de los estimados horarios de GHI es posible estimar la irradiación horaria en incidencia normal o DNI usando modelos fenomenológicos para la fracción difusa, $f_d = DHI/DNI$. La DNI se obtiene de la Ec. (1.2),

$$DNI = GHI \times \frac{1 - f_d}{\cos \theta_z}.$$
(2.4)

La fracción difusa puede estimarse a partir del índice de claridad k_t y otras variables como la masa de aire o el ángulo cenital. El índice de claridad es una versión de GHI normalizada por la irradiación horaria incidente sobre un planto horizontal colocado fuera de la atmósfera (TOA),

$$k_t = \frac{GHI}{I_{cs}F_n\cos\theta_z}.$$
(2.5)

Se han probado 10 modelos en uso en la literatura para estimar f_d a nivel horario en Uruguay. Cada modelo se ajustó localmente y se caracterizó contra los datos de tierra de GHI y DNI obtenidos por el LES para varios sitios del país. Los detalles y resultados se han publicado en el journal Solar Energy [AASL17] por lo que no serán reproducidos en este informe. Teniendo en cuenta la simplicidad, el mejor modelo resulta ser el de Ruiz-Arias et al, [RAATPPV10]. Este modelo, en su variante RA2, es

$$f_d = a_0 + a_1 e^{-\exp a_2 + a_3 k_t + a_4 k_t^2 + a_5 m + a_6 m^2}$$
(2.6)

donde $m = 1/\cos\theta_z$ es la masa de aire. Esta cantidad debe corregirse, para horas de sol bajo, por los efectos d ela refracción atmosférica y usamos para ello la propuesta de Kasten y Young [Kas96]. Los coeficientes determRnados en [AASL17] para la estación LE son

$$a_0 = 1.00, a_1 = -1.40, a_2 = 3.25, a_3 = -6.19, a_4 = 1.62, a_5 = -0.19, a_6 = 0.01$$
 (2.7)

Como se muestra en [AASL17], este modelo es de estimar la fracción difusa a nivel horario en Uruguay con incertidumbre típica menor a 17 % y sesgo despreciable. La Fig. 2.1 muestra la fracción difusa estimada por este modelo para nube de puntos medidos en todo el territorio.



Figura 2.1: Fracción difusa horaria modelada con la Ec. (2.6). Figura de [AASL17].

Este método para estimar DNI esta afectado por tres tipos de incertidumbres:

- incertidumbre en GHI, del orden de 13% a nivel horario.
- incertidumbre en f_d , del orden del 17% a nivel horario.
- amplificación del error debido a la masa de aire en horas con sol bajo ($\cos \theta_z \ll 1$)

Si se excluyen las horas de sol bajo del análisis (medidas afectadas además por mayor error direccional) se espera una incertidumbre típica del 21% para los estimativos horarios de DNI obtenidos por este método. Este estimativo se obtiene combinando cuadráticamente las incertidumbres relativas en GHI y f_d .

A nivel de acumulados diarios, mensuales o anuales, la incertidumbre será significativamente menor debido a la cancelación de errores de signo contrario. Esto lo hace un método útil para estudios de caracterización, en ausencia de datos terrestres de largo plazo.

2.2 Validación de estimativos diarios de GHI y DNI por satélite

Usando los métodos descritos en la Sección anterior, se cuenta entonces con una base de información de 18 años sobre el territorio para GHI y DNI a nivel horario. Como se mencionó en la Sección 1.3.2, existe una cantidad significativa de imágenes faltantes en la serie horaria, debido a reorientaciones transitorias del satélite. A efectos de lograr medias mensuales y anuales significativas, se toma el criterio de 2/3 de los datos para definir un promedio (o suma) válido. Por lo tanto, es necesario contar con la mayor cantidad posible de horas para no perder valores totales diarios que luego afecten las medias mensuales o anuales. Esto lleva a la necesidad de interpolar las imágenes faltantes para reducir el número de huecos en la serie horaria.

2.2.1 Interpolación de imágenes satelitales

Normalmente existen dos imágenes por hora y se promedian para obtener el factor de reflectancia medio en la hora. Si existe una única imágen, se toma esta como definiendo el factor de reflectancia en la hora. Si no hay imágenes en la hora, pero si hay en las horas vecinas, se estima el factor de reflectancia en la hora con una interpolación lineal. A efectos de distinguir los estimativos sin interpolar (GHI) de aquellos que utilizan horas interpoladas, nos referiremos a estos últimos como GHIi. Es claro que la interpolación no genera nueva información, pero permite reducir el impacto de los huecos a nivel horario (por falta de imágen de satélite) que luego impactan en los acumulados diarios.

Evidentemente, el uso de series con interpolación implica una mayor incertidumbre en la estimación de GHI (y por tanto de DNI) horaria y la necesidad de validar estos estimativos contra datos de tierra. Este es el precio a pagar para contar con una serie horaria más completa que permita el posterior análisis de la variabilidad intermensual e interanual. Como ya se mencionó, la incertidumbre se reduce al acumular a totales diarios, mensuales y anuales y lo más importante es evitar sesgar la serie (efecto de los huecos) y contar con suficiente estadística.

2.2.2 Validación de estimativos GHIi y DNIi por satélite

El modelo JPTv2 ha sido validado para GHI a escalas horaria, diaria y medias mensuales [AS16]. Sin embargo, los estimativos de DNI, obtenidos con una metodología que implica el uso de un modelo fenomenológico, no han sido validados hasta ahora.

Como mencionamos, una primer validación de los estimativos GHI (sin interpolación) se realizó en el marco del segunda versión del Mapa Solar del Uruguay y esta documentado en [AS16]. Esta validación abarcó las medidas de GHI disponibles de todo el territorio nacional. De acuerdo a esto, se estima una incertidumbre media 12% de la media en el conjunto GHI horario por satélite (con sesgo despreciable de 0.1%). Se espera que el conjunto interpolado, GHIi, tenga indicadores por encima de este umbral.

En 2016 se realizó una comparación a nivel diario y horario de los estimativos satelitales con interpolación, usando datos de GHI y DHI de las estaciones indicadas en la Tabla 2.2 con los datos disponibles hasta fines de 2014. Las cinco estaciones están distribuidas en el territorio, con dos en el Norte (Salto, Artigas), dos en el Sur-oeste (Montevideo, Luján) y una en el Este (Treinta y Tres). Para aquellos días con irradiación diaria medida y estimada por satélite completas, se calcularon los indicadores RMSD y MBD, Ecs. (2.2) y (2.3). El resultado (para GHIi y DNIi) se indica en la Tabla 2.3, donde la última fila muestra los indicadores promedio en el territorio (ponderando por el número de días en cada sitio). A nivel horario, GHIi presenta una incertidumbre típica¹ de menos de 12 % y DNI una incertidumbre típica de aproximadamente 24 %. A nivel diario, estos indicadores se reducen a 6 % y 18 % para GHI y DNI, respectivamente. Esta validación es consistente con la anterior para GHI y es un primer indicador del margen de error asociado a la metodología de cálculo de DNI, aunque debe destacarse que DNI no se midió directamente, sino que se calculó a partir de medidas de DHI y la Ec. (2.4).

Sin interpolación de imágenes, el número total de días para la comparación es de 1560 (días en los cuales existe el total diario por satélite y el total diario medido en tierra). Es decir que la

¹En la medida en que se pueda asimilar el indicador de dispersión RMSD a una incertidumbre típica.

Cod.	LAT	LON	ALT	inicio	duración	Ubicación/Operador
Est.	grados	grados	m snm	medida	años	
AZ	-34.92	-56.17	58	01-01-13	2	Facultad de Ingeniería, LES
SM	-31.44	-57.98	41	01-06-98	5.5	Nueva Espérides, Salto, INUMET
\mathbf{AR}	-30.40	-56.51	136	28-02-14	< 1	Aeropuerto Artigas, INUMET/LES
LU	-34.59	-59.06	20	01-2011	1.5	Luján, Argentina, UNLU (GerSolar)
TT	-33.28	-54.17	35	11-03-14	< 1	Paso Laguna, Treinta y Tres, INIA/LES

Cuadro 2.2: Estaciones usadas para la segunda validación diaria de los estimados por satélite (2000 a 2014) realizada en 2016. Las variables registradas incluyeron GHI y DHI (irradiancia difusa) registradas hasta 2014 inclusive.

Cod.	N	\overline{GHI}	MBD	RMSD	\overline{DNI}	MBD	RMSD			
Est.	días	MJ/m^2	%	%	MJ/m^2	%	%			
AZ	523	13.9	0.6	7.7	15.5	-2.7	19.2			
\mathbf{SM}	1004	17.0	0.7	6.3	18.1	-2.1	18.5			
AR	198	17.1	0.3	4.7	19.7	-1.1	13.1			
LU	378	18.3	0.7	5.2	19.9	7.2	20.7			
TT	174	15.1	0.2	5.3	16.6	2.7	16.2			
todas	2277	16.4	0.6	6.2	17.8	-0.2	18.4			
	(a) Validación a nivel diario									
Cod.	N	\overline{GHI}	MBD	RMSD	\overline{DNI}	MBD	RMSD			
Est.	horas	Wh/m^2	%	%	Wh/m^2	%	%			
AR	2698	451	0.4	10.9	499	0.7	22.4			
TT	2223	426	-0.6	12.0	458	1.7	26.4			
todas	4921	439	-0.1	11.5	479	1.2	24.4			

(b) Validación a nivel horar

Cuadro 2.3: Resultados de la segunda validación (diaria y horaria) de los estimados por satélite interpolados (2000 a 2014) realizada en 2016. La última fila contiene los indicadores promedio (ponderados por el número de días) en todo el territorio.

interpolación aumenta los días disponibles a 2277, es decir permite agregar 717 días aumentando el número de días disponibles en 47%. La estación AZ (ubicada en la Azotea de la Facultad de Ingeniería) presenta un promedio de GHI (13.9 MJ/m^2) anormalmente bajo. La media diaria de tres años en la estación Las Brujas (Canelones), distante unos 50 km de AZ, es de 17.9 MJ/m^2 y la obtenida en AZ es un 22% menor, lo cual sugiere problemas con la medida².

En suma, a nivel diario se estima GHI diaria por satélite en el territorio con incertidumbre de 6 % y un sesgo³ menor a 0.7 %. A nivel horario, con datos de solo dos estaciones, se obtienen sesgos menores a 1 % y dispersión entre 11 y 12 %. Estos resultados son consistentes con los indicados en la Tabla 2.1, calculados para GHI en [AS16] sobre un conjunto diferente de estaciones. Esta segunda validación se consideró aún preliminar, por la poca cantidad de datos utilizados y por no incluir medidas directas de DNI.

 $^{^{2}}$ Esta medida en sus primeros años se vió afectada por diversos ruidos electrónicos debidos a antenas y a intervenciones de obras y trabajos de manteniemiento realizados en la azotea.

³Los sesgos son pequeños, pero positivos en todas las estaciones, indicando una leve tendencia a la sobreestimación de GHI por satélite.

En 2018, se realizó una **tercer validación** de GHIi y DNIi por satélite que abarca todos los datos de GHI y DHI disponibles hasta diciembre de 2017 en la estación LE (Laboratorio de Energía Solar), con los detalles indicados en la Tabla 2.4. Esta validación incluyó la comparación a nivel diario y medias mensuales. Se integraron los datos minutales a nivel horario, diario y mensual y se seleccionaron aquellos días y meses que contaban con contraparte satelital, indicados en la Tabla 2.3). La estación LE (LES, Salto) se destaca por ser la única en la cual *se mide* DNI directamente. La validación a nivel diario contiene ahora un número representativo de días (mas de 3300) y hay suficientes medias mensuales para realizar una validación a este nivel. La validación realizada en las otras estaciones refiere a DNI calculada a través de medidas de DHI y la Ec. (2.4).

Cod.	LAT	LON	ALT	período			variables	
Est.	grados	grados	m snm	años	meses	días	medidas	ubicación
AR	-30.40	-56.51	136	2014-2017	34	1011	GHI, DHI	INUMET, Artigas
TT	-33.28	-54.17	26	2014-2017	27	1057	GHI, DHI	INIA, Treinta y Tres
TA	-31.71	-55.83	142	2015-2017	23	652	GHI, DHI	INIA, Tacuarembó
LE	-31.28	-57.92	56	2015-2017	29	749	GHI, DHI, DNI	LES, Salto Grande

Cuadro 2.4: Estaciones y datos usados para la tercer validación (diaria y mensual) de los estimados por satélite (hasta 2017) realizada en 2018. Los meses y días registrados son aquellos en los que existen datos e imágenes suficientes para calcular el total. Todas las estaciones son operadas por el LES.

La Tabla 2.5 muestra el resultado de esta comparación para GHI y DNI a nivel diario. Los resultados para GHI muestran sesgos menores a 0.5% y dispersiones en torno al 5% de la media de las medidas. Son compatibles con las dos validaciones anteriores y por tanto queda establecido que el modelo JPTv2 es capaz de **estimar GHI a nivel diario con incertidumbre típica de** 5% y sesgo despreciable. Los resultados para DNI muestran sesgos más importantes ($\pm 3\%$) y una **incertidumbre del orden de 14% de la media**, teniendo en cuenta que LE es la única comparación con DNI medida directamente.

Cod.	N	\overline{GHI}	MBD	RMSD	\overline{DNI}	MBD	RMSD
Est.	días	MJ/m^2	%	%	MJ/m^2	%	%
AR	1011	17.3	0.4	5.0	19.1	0.0	12.4
TT	1057	16.5	-0.4	5.2	17.3	2.0	14.6
ТА	652	19.0	-0.1	4.7	19.2	2.8	11.7
LE	752	19.0	-0.5	5.3	21.0	-2.4	13.8
All	3472	18.0	-0.2	5.1	19.1	-0.8	13.1

Cuadro 2.5: Resultados de tercer validación (GHI y DNI diaria). LE es la única estación con medidas de irradiancia directa en incidencia normal (DNI).

2.2.3 Propagación de incertidumbres

Al acumular del nivel diario al total mensual y luego al total anual, las incertidumbres de partida se reducen significativamente. Por ejemplo, el total mensual del mes m (m = 1, 2, ldots12) se calcula a partir de los totales diarios H_i como

$$H_m = \sum_{i=1}^{N_m} H_i \tag{2.8}$$



Figura 2.2: Diagrama de dispersión de estimativos diarios de GHIi y DNIi v
s datos para la estación LE.

donde N_m es el número de días (28, 30, 31) en el mes m. Si δ es la incertidumbre relativa típica en H_i , la incertidumbre en el acumulado es

$$\delta_m = \delta \times \frac{\sqrt{\sum_i H_i^2}}{\sum_i H_i} = \frac{\delta}{\sqrt{N_m}} \times \frac{\langle H_i^2 \rangle^{\frac{1}{2}}}{\langle H_i \rangle} < \frac{\delta}{\sqrt{N_m}}$$
(2.9)

Un estimativo conservador para la incertidumbre relativa al acumular a un nivel superior, es simplemente δ/\sqrt{N} . Así, la incertidumbre en totales mensuales de GHI será aproximadamente $\approx 5/\sqrt{30} = 1\%$ y para DNI $\approx 14/\sqrt{30} = 3\%$.

3 Variabilidad inter-mensual e inter-anual

El estudio de variabilidad intermensual e interanual se basa en el conjunto de estimativos horarios de GHIi y DNIi (es decir, basado en información de satélite con interpolación lineal a nivel horario) y abarca el período 2000-2017, inclusive (18 años). Se construyen los acumulados diarios a partir de los datos horarios, preservando el día siempre que cuente con todas las horas diurnas. Los acumulados mensuales o anuales se realizan promediando y luego multiplicando por el número de días del mes o año. Esto equivale a reemplazar días faltantes por el promedio mensual o anual correspondiente. Por esta razón, en meses o años donde falta más de 1/3 de los días, no se calcula el total.

Las series diarias de GHI
i y DNIi para LE se muestran en la Fig. 3.1. En este sitio la media de largo plazo del total mensual de GHI es
 $GHI_{lp} = 537.7 \,\mathrm{MJ/m^2}$ y la de DNI es $DNI_{lp} = 574.8 \,\mathrm{MJ/m^2}$. Esto representa un promedio de irradiación diaria de $GHI_{dia} = 17.8 \,\mathrm{MJ/m^2/dia}$
y $DNI_{dia} = 18.9 \,\mathrm{MJ/m^2/dia}$, respectivamente. Este nivel de DNI representa un total anual de 1.9 MWh/m², muy cercano al umbral de aplicabilidad de las tecnologías CSP (2.0 MWh/m²).

3.1 Variabilidad espacial de GHI y DNI

A efectos de analizar la variabilidad espacial de estas variables, a partir de los conjuntos diarios GHIi y DNIi, se calculan los promedios de largo plazo para el período 2000-2016 en las capitales departamentales¹. Los resultados se indican en las Tablas 3.1 y 3.2 para GHI y DNI, respectivamente. Los promedios mensuales de DNI, para un sitio dado, superan a los de GHI salvo en los meses de verano (Dic, Ene, Feb). A nivel de todo el territorio, la media de largo plazo de DNI es solo un 5% mayor que la de DNI. En el Sureste (Rocha) la diferencia es menor a 2% y en Artigas alcanza 6%.

El estudio de variabilidad espacial se realiza generando los valores diarios por satélite en una grilla regular de $1^{o} \times 1^{o}$ de latitud x longitud (18 puntos) sobre el territorio continental del Uruguay. Utilizando técnicas de interpolación espacial es posible generar mapas como el de la Fig. 3.2, mostrando la variación espacial de los promedios de largo plazo. Los puntos (etiquetados como U01 a U18) pueden agruparse por zonas Sur y Norte, tomando el Río Negro como una división entre ambas. De este análisis, emerge el cuadro de variabilidad espacial de DNI mostrado en la Fig. 3.2. La tendencia es creciente del Sureste al Noroeste y la variación (promediada en el año) es apreciable, del orden de $\pm 9\%$ del promedio. Un cuadro similar se tiene para GHI (Mapa Solar del Uruguay, v2, disponible en http:les.edu.uy/productos/ mapa-solar-del-uruguay-2/.

3.2 Variabilidad inter-mensual de GHI y DNI

A modo de ejemplo, se muestran los resultados para el local del Laboratorio de Energía Solar (LE en la Tabla 2.4), dado que en este local existen 3 años de medidas de DNI para validar el

 $^{^1\}mathrm{No}$ se utilizó el año 2017 en este análisis porque el mismo se realizó en ese año.



Figura 3.1: Series diarias interpoladas basadas en información satelital para el sitio LE.



Figura 3.2: Mapa mostrando la distribución espacial del promedio de largo plazo de DNI en Uruguay. Figura de [AS16].

método. No obstante, la resolución del modelo satelital es de 5 km, por lo cual se podría hacer un estudio similar en cualquier punto del territorio.

Utilizando los totales diarios mostrados en la Fig. 3.1, se calculan los totales mensuales de cada mes de los 18 años (2000-2017). Los totales se calculan multiplicando el promedio del mes por el número de días en el mes para evitar el efecto de días faltantes². Si no existen al menos 2/3 de los días del mes, no se calcula el promedio. Las medias de largo plazo para cada mes se indican en la Fig. 3.3 (a) junto a las desviaciones estándar. Estas medias de largo plazo se muestran (para ambas variables) en la Fig. 3.3 (b), junto a las medias anuales de largo plazo (líneas horizontales a trazos).

Sustrayendo el promedio de largo plazo, se obtienen las anomalías mensuales. Es decir, en cuanto se desvía cada mes de la media de largo plazo que le corresponde. De este modo se generan las Figs. (3.5) y (3.6), donde las anomalías se expresan en términos relativos (%) a las medias de largo plazo de cada maes, indicadas en la Fig. 3.3 (a). En estas figuras, destacan los meses con mayores anomalías (tanto en exceso como en defecto). Queda claro que DNI presenta una variabilidad mayor que GHI. La Fig. 3.5 muestra el histograma de anomalías relativas para GHI y la Fig. 3.6 hace lo propio para DNI. Si las series de valores diarios son representativas de la tendencia climática de largo plazo, la distribución de anomalías debería ser aproximadamente Gaussiana o Normal y esto es lo que se observa. La desviación estándar

²Esto equivale a sustituir los días faltantes por el promedio del mes.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Media
Artigas	26,0	22,9	19,5	14,7	10,7	8,6	9,8	13,0	16,0	20,1	24,4	26,1	17,6
Canelones	26,0	22,1	18,2	13,4	9,2	7,6	8,2	10,8	14,7	19,2	24,0	26,2	16,6
Colonia	26,5	22,4	18,2	13,5	9,4	7,8	8,2	11,4	15,5	19,8	24,3	26,9	17,0
Durazno	26,3	22,4	18,5	14,0	9,6	8,0	8,7	11,5	15,4	19,7	24,3	26,2	17,0
Florida	26,0	22,1	18,3	13,6	9,4	7,8	8,4	11,1	15,0	19,4	24,2	26,3	16,8
Fray Bentos	26,8	22,5	19,0	14,0	9,9	8,1	8,9	12,0	15,9	19,9	24,5	26,3	17,3
Maldonado	26,1	22,2	18,0	13,0	8,9	7,5	8,0	10,6	14,6	19,1	23,9	26,3	16,5
Melo	25,5	22,0	18,3	13,9	9,9	8,2	8,9	11,5	15,1	19,1	24,0	25,6	16,8
Mercedes	26,6	22,4	19,0	13,8	9,9	8,1	8,8	11,8	15,8	20,1	24,4	26,2	17,2
Minas	25,8	21,7	18,1	13,2	9,2	7,7	8,1	10,7	14,6	19,1	24,0	26,0	16,5
Montevideo	26,5	22,5	18,2	13,3	9,2	7,6	8,0	10,6	14,7	19,2	23,9	26,4	16,6
Paysandú	26,4	22,6	19,1	14,1	10,1	8,3	9,3	12,2	16,3	20,1	24,7	26,3	17,4
Rivera	25,4	22,1	18,8	14,3	10,2	8,3	9,4	12,3	15,4	19,4	23,8	25,4	17,0
Rocha	25,3	21,2	17,5	13,0	9,2	7,7	8,1	10,6	14,4	$18,\! 6$	23,6	25,5	16,2
Salto	26,2	22,9	19,3	14,4	10,4	8,5	9,6	12,7	16,2	20,3	24,7	26,2	17,6
San Jose	26,0	22,2	18,0	13,4	9,3	7,7	8,2	11,0	14,8	19,3	24,1	26,4	16,7
Tacuarembó	25,6	22,3	18,6	14,1	10,0	8,2	9,3	11,8	15,2	19,6	24,2	25,8	17,0
T. y Tres	25,5	21,6	18,1	13,5	9,6	7,9	8,6	11,1	14,8	18,9	23,9	25,7	16,6
Trinidad	26,3	22,3	18,7	13,8	9,7	8,0	8,7	11,4	15,5	19,8	24,5	26,2	17,1
Media	26,0	22,2	18,4	13,7	9,6	7,9	8,6	11,4	15,2	19,5	24,2	26,1	16,9
Desv. Est.	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,6	0,7	0,6	0,5	0,3	0,4	

Cuadro 3.1: Medias mensuales y anuales de GHI de largo plazo (2000-2016) para las capitales departamentales, expresadas en MJ/m^2 .

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Media
Artigas	25,0	22,3	20,0	17,2	13,1	10,8	12,6	15,9	16,9	19,4	24,7	25,8	18,6
Canelones	25,6	21,5	18,8	15,9	11,3	10,3	10,4	12,6	15,5	18,3	24,1	25,7	17,5
Colonia	26,2	22,0	18,9	16,1	11,9	10,4	10,6	14,3	17,0	19,6	24,6	27,1	18,2
Durazno	25,5	22,1	19,2	16,8	11,8	10,7	11,2	13,9	16,4	18,9	24,6	26,0	18,1
Florida	25,3	21,5	18,8	16,2	11,6	10,6	10,8	13,1	15,9	18,3	24,3	25,7	17,7
Fray Bentos	26,7	22,7	20,5	17,3	12,5	10,7	11,5	15,2	17,3	19,5	24,9	26,0	18,7
Maldonado	25,6	21,6	18,4	14,8	10,8	10,2	10,0	12,0	15,2	17,8	23,5	25,6	17,1
Melo	24,0	20,4	17,9	15,6	11,9	10,7	11,6	12,9	15,3	17,6	23,1	24,3	17,1
Mercedes	26,2	22,5	20,5	16,9	12,4	10,7	11,4	14,9	17,2	19,7	24,7	26,0	18,6
Minas	24,7	20,3	18,2	15,1	11,0	10,4	10,3	12,2	15,1	17,9	23,6	24,9	17,0
Montevideo	26,3	22,3	19,0	15,9	11,3	10,3	10,2	12,3	15,3	18,0	23,7	25,9	17,5
Paysandú	26,0	22,8	20,2	17,1	12,5	10,8	12,1	15,3	17,6	19,6	25,0	25,9	18,7
Rivera	23,8	20,6	18,5	16,3	11,9	10,2	11,8	14,5	16,0	18,2	23,3	24,4	17,4
Rocha	24,0	19,5	17,3	14,6	11,3	10,6	10,4	11,8	14,9	17,1	22,9	24,1	16,5
Salto	25,4	22,7	20,2	17,3	12,9	10,7	12,3	15,8	17,2	19,7	24,9	25,8	18,7
San Jose	25,4	21,8	18,7	16,0	11,6	10,5	10,6	13,2	15,8	18,5	24,2	25,9	17,7
Tacuarembó	24,4	21,5	18,6	16,5	11,8	10,4	11,8	13,8	15,7	18,5	24,1	25,0	17,6
T. y Tres	23,9	19,9	17,5	15,3	11,6	10,5	10,8	12,2	15,0	17,3	23,1	24,5	16,8
Trinidad	25,7	22,1	19,5	$16,\! 6$	12,0	10,6	11,1	14,0	$16,\! 6$	19,2	24,9	25,8	18,2
Media	25,3	21,6	19,0	16,2	11,8	10,5	11,1	13,7	16,1	18,6	24,1	25,5	17,8
Desv. Est.	$_{0,9}$	1,0	1,0	0,8	0,6	0,2	0,8	1,3	0,9	0,8	0,7	0,7	

Cuadro 3.2: Medias mensuales y anuales de DNI de largo plazo (2000-2016) para las capitales departamentales, expresadas en MJ/m^2 .

observada en las anomalías cuantifica la variabilidad intermensual. Con un nivel de confianza de 95% (factor de cobertura k=2) se puede ver que la variabilidad mensual de GHI es de aproximadamente 16% del promedio de largo plazo³. En forma similar, existe una probabilidad de aproximadamente 5% de que el total mensual de DNI se aleje del promedio de largo plazo (para ese mes) más que $\pm 28\%$.

 $^{^3}$ En otras palabras, existe una probabilidad de 5 % de que el total mensual de GHI de un mes dado se aleje del promedio de largo plazo (para ese mes) más que $\pm 16\,\%$



18-year average monthly totals for GHI and DNI

Figura 3.3: Medias de largo plazo (2000-2017) para los totales mensuales de GHI y DNI en MJ/m2. Los meses corresponden a la fila y se indican también la incertidumbre estimada en cada caso. En (b) se muestran las medias anuales de largo plazo para el conjunto de los meses (líneas horizontales a trazos).



Figura 3.4: Distribución de anomalías relativas en los totales mensuales.



Figura 3.5: Anomalías mensuales en GHI. La desviación estándar es de aproximadamente $8\,\%$ del promedio de largo plazo.



Figura 3.6: Anomalías mensuales en DNI. La desviación estándar es de aproximadamente $14\,\%$ del promedio de largo plazo.



Figura 3.7: Totales anuales en MJ/m2 para GHI y DNI. Las líneas a trazos indican los promedios de largo plazo.

3.3 Variabilidad inter-anual de GHI y DNI

Un estudio preliminar de variabilidad interanual de GHI se realizó en el contexto del Mapa Solar v2 y esta documentado en [AS16]. Otro estudio, realizado en 2017 como trabajo preliminar en el marco de este proyecto arrojó resultados similares.

Los totales anuales se construyen acumulando los totales mensuales. Los totales anuales de GHI y DNI conforman la serie de 18 años que se muestra en la Fig. 3.7. Los promedios de largo plazo en el total anual son $\overline{GHI}_{ta} = 6452 \text{ MJ/m}^2 \text{ y } \overline{DNI}_{ta} = 6898 \text{ MJ/m}^2$. Estos números pueden ponerse en contexto con los de otras ubicaciones: en Potsdam (Alemania), la energía solar media es 3600 MJ/m^2 y la recibida en Europa anualmente es, en promedio, 4320 MJ/m^2 . En el Oriente Medio, la energía solar media anual varía entre 6480 MJ/m^2 y 8280 MJ/m^2 [IEA11].

En media, la energía anual incidente en forma de DNI es solo un 7% mayor que en forma de GHI. Las anomalías interanuales se muestran en la Fig. 3.8. Las anomalías para GHI oscilan entre $\pm 5\%$ con la excepción del 2001 en el cual se observó un déficit de 7%. Esto es consistente con lo reportado para otros sitios templados. La variabilidad de DNI casi duplica la de GHI y las anomalías están entre $\pm 10\%$, con la excepción del año 2001. La distribución de anomalías se muestra en la Fig. 3.8 (b). El desvío estándar es 2.8% para GHI y 5.4% para DNI. Es decir que, con nivel de confianza 95%, podemos esperar una variabilidad año a año de 5.6% del total en GHI y de 10.8% del total para DNI.

Una forma útil de analizar la variabilidad interanual consiste en la siguiente metodología [HK10, IEA11]. A partir de la serie de $N_t = 18$ totales anuales, se generan los promedios móviles con ventanas de $N_v = 1, 2, \dot{N}_t$ años. Para cada serie de promedios móviles generada, se calculan las anomalías porcentuales extremas A_{max} y A_{min} y se grafican vs el número de años del promedio móvil, Nv. El resultado son gráficos como los de la Fig. 3.9, en los cuales se observa directamente el efecto de incluir determinado número de años en el promedio de largo



(a) Anomalías anuales porcentuales



(b) Distribución de anomalías porcentuales

Figura 3.8: (a) Anomalías en los totales anuales para 2000-2017. (b) Distribución de anomalías anuales (DNI en naranja, GHI en azul).



Figura 3.9: Anomalías extremas en los promedios móviles con ventanas de 1 a 17 años. El último coincide con el promedio de largo plazo. Arriba: GHI, abajo: DNI. Las líneas horizontales corresponden a anomalías de $\pm 5\%$.

plazo. La Fig. ?? muestra un cálculo similar realizado para GHI anual en la ciudad de Potsdam en Alemania [IEA11], un lugar con menor nivel de irradiancia anual y mayor variabilidad. La Fig. 3.9 muestra que en Uruguay, la variabilidad de GHI es tal que un promedio de totales anuales de 3 o más años está dentro del ± 5 % del promedio de largo plazo. Para DNI, se requieren incluir al menos cinco años en el promedio para que sea significativo en este sentido.

4 Conclusiones

Este estudio es el primero realizado en el Uruguay sobre variabilidad de DNI. Se consideraron los totales mensuales para los 18 años y, para cada mes, se calcularon las anomalías relativas con respecto al total promedio de largo plazo de cada mes. Las anomalías aparecen distribuidas en forma aproximadamente Gaussiana con desviación estándar $\sigma_{GHI,mes} = 7.9 \%$ y $\sigma_{DNI,mes} =$ 14.1 %, mostrando que la variabilidad en DNI prácticamente duplica la de GHI. Con nivel de confianza 95 % el intervalo de variación del total mensual es de 16 % para GHI y de 28 % para DNI. Las conclusiones de este análisis son consideradas preliminares ya que se basan en modelos satelitales. El análisis de variabilidad debería repetirse usando datos de tierra de GHI y DNI de calidad controlada con una extensión similar a la considerada aquí (18 años). Hasta el momento, existen dos puntos de medida de DNI, uno en Salto (4 años) y otro en Artigas (1 año), este último adquirido y montado en el marco de este proyecto.

Se utilizó un modelo localmente ajustado por nuestro grupo (JPTv2) para obtener irradiación global horaria sobre plano horizontal (GHI) a partir de imágenes del satélite GOES-E para el período 2000-2017. Los númerosos huecos debidos a imágenes no disponibles se interpolaron a nivel del índice de claridad, siempre que el faltante fuese menor a dos horas. Con esta información, se utilizó el modelo de Ruiz-Arias (RA2s) para estimar la fracción difusa de irradiación global y obtener un estimativo para la irradiación en incidencia normal (DNI) horaria. La validación del modelo satelital para DNI se realizó utilizando los 3 años (2015-2017) de medidas pirheliométricas de tierra disponibles en el LES en Enero 2018.

Los cálculos reportados son para la ubicación del Laboratorio de Energía Solar (LES), a 10 km al Norte de la ciudad de Salto. La media de largo plazo para GHI es 1.8(1) MWh/m² y la media de largo plazo para DNI es 1.9(2) MWh/m². El nivel de referencia para el aprovechamiento de la tecnología CSP en la literatura es de 1.8 MWh/m². Se puede concluir que en el Norte del país (Salto, Artigas, Rivera) la tecnología CSP puede ser marginalmente rentable. Es esperable que la tendencia a la reducción de costos en estas tecnologías continue y existe la ventaja comparativa de mayor eficiencia y almacenamiento térmico integrado que permite desplazar la oferta de energía a momentos de alta demanda (primeras horas de la noche).

Se calcularon los totales anuales de GHI y DNI para los 18 años considerados y se analizaron las anomalías relativas de cada año en relación a la media de largo plazo. Las desviaciones estándar de las anomalías son de 2.8 % para GHI y 5.4 % para DNI. Es decir que, con nivel de confianza 95 %, el total anual de GHI estará dentro de un intervalo de ± 5.6 % del total de largo plazo y el de DNI estará en un intervalo de ± 10.8 % del total anual de largo plazo. Se analizó además la curva de anomalías extremas en función del número de años usado para determinar el total anual. Este análisis muestra que, con nivel de confianza 95 %, para GHI 3 años son significativos para estimar el total anual de largo plazo en tanto para DNI se requieren 5 años.

El trabajo de caracterización de DNI en Uruguay recién comienza. Es necesario contar con medidas de tierra de varios años y con una metodología que permita estimar DNI por satélite directamente, sin pasar por una estimación fenomenológica de la fracción difusa. El LES continuará desarrollando esta línea de trabajo en los próximos años.

Bibliografía

- [AAA⁺15] G. Abal, R. Alonso, D. Aicardi, L. Dovat, and A. Laguarda. Red de Medida Contínua de Irradiancia Solar Laboratorio de Energía Solar- Uruguay. Informe Técnico para la consultora Sólida (España), Laboratorio de Energía Solar, UDELAR, 2015.
- [AASL17] G. Abal, D. Aicardi, R. Alonso Suárez, and A. Laguarda. Performance of empirical models for diffuse fraction in uruguay. *Solar Energy*, 141:166–181, 2017.
- [AS16] Rodrigo Alonso-Suárez. Estimación del recurso solar en uruguay mediante imágenes satelitales, marzo 2016.
- [ASAMS14] R. Alonso-Suárez, G. Abal, P. Musé, and R. Siri. Satellite-derived solar irradiation map for Uruguay. In *Elsevier Energy Procedia*, volume 57, pages 1237–1246, 2014.
- [ASASM11] R. Alonso Suárez, G. Abal, R. Siri, and P. Musé. Global solar irradiation assesment in Uruguay using Tarpley's model and GOES satellite images. In Annals of the Solar World Congress (SWC 2011), Kassel, Germany, 28 August–4 November 2011.
- [ASASM12] R. Alonso Suárez, G. Abal, R. Siri, and P. Musé. Brightness-dependent tarpley model for global solar radiation estimation using goes satellite images: application to uruguay. *Solar Energy*, 86:3205–3215, 2012.
- [ASDA12] R. Alonso Suárez, M. D'Angelo, and G. Abal. Distribución espacial y temporal de la irradiación solar en el Uruguay. In Proceedings IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES, Sao Paulo, Brazil, 18-21 September 2012.
- [ASN12] R. Alonso-Suárez and S. Nesmachnow. Parallel computing applied to satellite images processing for solar resource estimates. *CLEI Electronic Journal*, 15:15, Dic 2012.
- [HK10] C. et al. Hoyer-Klick. Technical implementation and success factors for a global solar and wind atlas. In Workshop of the Multilateral Working Group on Implementing the Major Economies Forum Global Partnership's Technology Action Plans for Wind and Solar Technologies, 2010.
- [IEA11] Renewable energy technology solar energy perspectives. Technical report, International Energy Agency - IEA, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France, 2011.
- [Iqb83] M. Iqbal. An introduction to Solar Radiation. Academic Press, 1983.

- [ISO90] ISO Technical Committee ISO/TC 180, Solar Energy Sub-committee SC1: Climate, Measurement and Data. Solar energy - specification and classification of instruments for meassuring hemispherical solar and direct solar radiation. Norm ISO 9060:1990(E), International Organization for Standarization (ISO), 1990.
- [ISO92] ISO Technical Committee ISO/TC 180, Solar Energy Sub-committee SC1: Climate, Measurement and Data. Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Norm ISO 9847:1992(E), International Organization for Standarization (ISO), 1992.
- [Kas96] F. Kasten. The linke turbidity factor based on improved values of the integral raileigh optical thickness. *Solar Energy*, 56:239–244, 1996.
- [RAATPPV10] J.A. Ruiz-Arias, H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador, and D. Pozo-Vázquez. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. *Energy Conversion and Management*, 51:881–893, 2010.
- [RBGM16] Alonso-Suárez R., M. Bidegain, Abal G., and P. Modernell. Año Meteorológico Típico para aplicaciones de energía solar – AMTUes. Memoria Técnica versión 2.4, Laboratorio de Energía Solar - UDELAR, 2016.
- [SRM⁺10] T. Stoffel, D. Renné, D. Myers, S. Wilcox, M. Sengupta, R. George, and C. Turchi. Best practices handbook for the collection and use of solar resource data. Technical Report NREL/TP-550-47465, National Renewable Energy Laboratory (NREL), September 2010.
- [WM08] S. Wilcox and W. Marion. Technical report tp-581-43156: User's manual for TMY3 data sets. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), NREL, Golden, Colorado, United States, 2008.