

**AÑO METEOROLÓGICO
TÍPICO PARA APLICACIONES
DE ENERGÍA SOLAR**

Rodrigo Alonso-Suárez • Mario Bidegain
Gonzalo Abal • Pablo Modernell

AÑO METEOROLÓGICO
TÍPICO PARA APLICACIONES
DE ENERGÍA SOLAR



CSIC



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

bibliotecaplural

La publicación de este libro fue realizada con el apoyo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) de la Universidad de la República.

Los libros publicados en la presente colección han sido evaluados por académicos de reconocida trayectoria en las temáticas respectivas.

La Subcomisión de Apoyo a Publicaciones de la CSIC, integrada por Mónica Lladó, Luis Bértola, Carlos Demasi, Cristina Mazzella, Sergio Martínez, Carlos Carmona y Aníbal Parodi ha sido la encargada de recomendar los evaluadores para la convocatoria 2016.

© Los autores, 2016

© Universidad de la República, 2019

Ediciones Universitarias,
Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR)

18 de Julio 1824 (Facultad de Derecho, subsuelo Eduardo Acevedo)

Montevideo, CP 11200, Uruguay

Tels.: (+598) 2408 5714 - (+598) 2408 2906

Telefax: (+598) 2409 7720

Correo electrónico: <infoed@edic.edu.uy>

<www.universidad.edu.uy/bibliotecas/>

ISBN: 978-9974-0-1647-7

Tabla de contenidos

| | |
|---|-----------|
| Índice de figuras | 9 |
| Índice de tablas | 11 |
| Presentación de la Colección Biblioteca Plural | 13 |
| Resumen y Agradecimientos | 15 |
| Versiones del AMTUEs | 17 |
| Créditos | 19 |
| 1. Introducción | 21 |
| 1.1. Antecedentes | 23 |
| 1.2. Sobre este documento | 24 |
| 2. Información meteorológica | 27 |
| 2.1. Sitios de medida en Uruguay | 28 |
| 2.2. Datos meteorológicos complementarios | 30 |
| 2.2.1. Temperatura del aire ambiente y humedad relativa | 30 |
| 2.2.2. Presión atmosférica | 31 |
| 2.2.3. Heliofanía | 31 |
| 2.2.4. Datos de viento | 32 |
| 2.3. Datos de irradiancia solar registrados en tierra | 33 |
| 2.4. Irradiación solar horaria por satélite | 34 |
| 2.4.1. Modelo satelital para Uruguay: BD-JPT | 36 |
| 2.5. Selección de las localidades | 38 |
| 3. Conformación de las series de datos | 43 |
| 3.1. Integración de datos de superficie | 43 |
| 3.2. Interpolación de datos registrados en tierra | 46 |
| 3.3. Interpolación y relleno de datos de satélite | 47 |
| 3.4. Análisis de datos | 48 |
| 3.4.1. Análisis de datos de Montevideo | 48 |
| 3.4.2. Análisis de datos de Salto | 53 |
| 3.4.3. Análisis de datos de Rivera | 55 |
| 3.4.4. Análisis de datos de Rocha | 56 |
| 3.4.5. Análisis de datos de Colonia | 58 |
| 3.5. Conjuntos de datos generados | 60 |

| | |
|--|------------|
| 4. Metodología | 65 |
| 4.1. Elaboración del AMT | 66 |
| 4.1.1. Selección de meses típicos | 66 |
| 4.1.2. Filtros de persistencia | 69 |
| 4.1.3. Datos faltantes | 71 |
| 4.1.4. Continuidad en las interfaces | 72 |
| 4.2. Variables derivadas | 73 |
| 4.2.1. Irradiación directa en incidencia normal | 74 |
| 4.2.2. Irradiación global sobre plano inclinado | 74 |
| 4.3. Inclusión de viento | 76 |
| 5. Construcción de los AMT | 77 |
| 5.1. Selección de los meses que integran los AMT | 77 |
| 5.2. Filtrado de persistencia | 86 |
| 5.3. Datos faltantes sustituidos | 87 |
| 5.4. Pos-proceso de GHI | 87 |
| 5.5. Formato y presentación de las series del AMT Ues | 89 |
| 6. Evaluación del AMT Ues | 93 |
| 6.1. Evaluación de la GHI para los meses seleccionados | 94 |
| 6.2. Incertidumbre estimada en DNI | 98 |
| 6.3. Comparación de los meses seleccionados con NASA/SSE | 102 |
| 6.4. Adecuación del sesgo anual | 103 |
| 6.5. Evaluación de la GHI del AMT Ues | 104 |
| 6.6. Variables complementarias | 107 |
| 6.7. Comparación con la climatología oficial | 111 |
| 6.8. Evaluación externa | 114 |
| 6.9. Inclinación de las superficies de captación | 115 |
| 7. Comentarios finales | 119 |
| 7.1. Perspectivas para mejorar el AMT Ues | 120 |
| A. Series típicas para cada localidad | 125 |
| B. Información histórica y del AMT Ues | 137 |
| C. Gráficos de evaluación por localidad | 149 |
| D. Régimen de estaciones INUMET | 161 |
| Bibliografía | 163 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Sitios de medida de las redes de INUMET, INIA, UTE y LES/Udelar | 29 |
| 2.2. | Ejemplo de una imagen del canal visible del satélite GOES-East. | 36 |
| 2.3. | Serie horaria de irradiación solar por satélite para Salto. | 38 |
| 2.4. | Serie diaria de irradiación solar por satélite para Salto. | 38 |
| 2.5. | Zonificación climática de Uruguay (adaptado de la norma UNIT 1026:1999). | 39 |
| 2.6. | Ubicación de las localidades del AMTUES. | 42 |
| | | |
| 3.1. | Ajuste de datos de relleno en base a su CDF. | 44 |
| 3.2. | Ejemplo de integración de datos de temperatura. | 45 |
| 3.3. | Ejemplo de interpolación de datos de presión atmosférica. | 46 |
| 3.4. | Ejemplo de datos horarios por satélite para Montevideo. | 49 |
| 3.5. | Datos mensuales de temperatura ambiente y humedad relativa para Montevideo. | 50 |
| 3.6. | Corrección de la presión atmosférica para Montevideo. | 51 |
| 3.7. | Rosa de los vientos para Montevideo. | 52 |
| 3.8. | Medias mensuales de irradiación diaria para Montevideo. | 52 |
| 3.9. | Datos mensuales de temperatura ambiente y humedad relativa para Salto. | 53 |
| 3.10. | Rosa de los vientos para Salto. | 54 |
| 3.11. | Medias mensuales de irradiación diaria para Salto. | 55 |
| 3.12. | Medias mensuales de irradiación diaria para Rivera. | 56 |
| 3.13. | Rosa de los vientos para Rivera. | 56 |
| 3.14. | Medias mensuales de irradiación diaria para Rocha. | 57 |
| 3.15. | Rosa de los vientos para Rocha. | 57 |
| 3.16. | Datos mensuales de temperatura ambiente y humedad relativa para Colonia. | 59 |
| 3.17. | Medias mensuales de irradiación diaria para Colonia. | 59 |
| 3.18. | Rosa de los vientos para Colonia. | 60 |
| | | |
| 4.1. | Funciones de Probabilidad de largo plazo para 4 meses del año. | 68 |
| 4.2. | Ejemplo de percentiles utilizados: Montevideo. | 70 |
| 4.3. | Ejemplo del efecto del suavizado en las interfaces. | 73 |
| | | |
| 5.1. | Ejemplo de selección de meses típicos para Montevideo. | 79 |
| 5.2. | CDFs de cada año comparadas con las CDFs de largo plazo (Montevideo). | 80 |
| 5.3. | Ejemplo de pos-proceso de GHI. Localidad: Salto. | 90 |
| 5.4. | Ejemplo de series horarias típicas para la localidad de Montevideo. | 92 |
| | | |
| 6.1. | Comparación de la GHI mensual de los meses seleccionados y los datos base. | 96 |
| 6.2. | Comparación de los promedios diarios de irradiación a escala anual y mensual. | 97 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.3. | Ciclos diarios de irradiación solar para los meses seleccionados y los datos base. | 99 |
| 6.4. | Equipamiento para medir irradiancia difusa. | 101 |
| 6.5. | Comparación de la GHI y DNI por satélite con medidas en tierra. | 102 |
| 6.6. | Ciclos diarios de irradiación solar para el AMTUES y los datos base. | 107 |
| 6.7. | Comparación de la GHI mensual del AMTUES y los datos base. | 109 |
| 6.8. | Comparación mensual de las variables complementarias del AMTUES con los datos base. | 112 |
| 6.9. | Variación de la irradiación anual con el ángulo de inclinación. | 117 |
| | | |
| C.1. | Comparación mensual entre el AMTUES y los datos base de Montevideo. | 150 |
| C.2. | Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUES y los datos base de Montevideo. . . | 150 |
| C.3. | Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Montevideo. | 151 |
| C.4. | Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Montevideo. . . | 151 |
| C.5. | Comparación mensual entre el AMTUES y los datos base de Salto. | 152 |
| C.6. | Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUES y los datos base de Salto. | 152 |
| C.7. | Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Salto. | 153 |
| C.8. | Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Salto. | 153 |
| C.9. | Comparación mensual entre el AMTUES y los datos base de Rivera. | 154 |
| C.10. | Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUES y los datos base de Rivera. | 154 |
| C.11. | Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Rivera. | 155 |
| C.12. | Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Rivera. | 155 |
| C.13. | Comparación mensual entre el AMTUES y los datos base de Rocha. | 156 |
| C.14. | Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUES y los datos base de Rocha. | 156 |
| C.15. | Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Rocha. | 157 |
| C.16. | Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Rocha. | 157 |
| C.17. | Comparación mensual entre el AMTUES y los datos base de Colonia. | 158 |
| C.18. | Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUES y los datos base de Colonia. | 158 |
| C.19. | Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Colonia. | 159 |
| C.20. | Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Colonia. | 159 |
| | | |
| D.1. | Datos existentes en estaciones convencionales del INUMET. | 161 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| 2.1. Estadística de datos de las estaciones INUMET. | 30 |
| 2.2. Estadística de datos de las estaciones INIA. | 31 |
| 2.3. Ubicación y estadística de medidas de irradiancia solar del LES. | 34 |
| 2.4. Descripción de la base de imágenes GOES-East del LES/Udelar. | 35 |
| 2.5. Ubicación de las localidades del AMTUes. | 42 |
| 3.1. Detalle de las localidades para la integración de datos. | 45 |
| 3.2. Máximos intervalos de interpolación para cada variable. | 47 |
| 3.3. Años de datos efectivos utilizados para cada localidad. | 61 |
| 3.4. Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Montevideo. | 61 |
| 3.5. Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Salto. | 62 |
| 3.6. Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Rivera. | 62 |
| 3.7. Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Rocha. | 63 |
| 3.8. Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Colonia. | 63 |
| 4.1. Pesos utilizados en la elaboración del AMTUes. | 69 |
| 5.1. Elaboración del AMTUes: años elegidos para cada mes de datos. | 78 |
| 5.2. Selección de meses para el AMT de Montevideo. | 81 |
| 5.3. Selección de meses para el AMT de Salto. | 82 |
| 5.4. Selección de meses para el AMT de Rivera. | 83 |
| 5.5. Selección de meses para el AMT de Rocha. | 84 |
| 5.6. Selección de meses para el AMT de Colonia. | 85 |
| 5.7. Percentiles de irradiación solar y temperatura media diaria. | 86 |
| 5.8. Días sustituidos en los AMT de cada localidad. | 88 |
| 6.1. Comparación entre la GHI del AMT y de los datos base. | 95 |
| 6.2. Valores anuales y mensuales de GHI para los meses seleccionados y los datos base. | 97 |
| 6.3. Diferencia entre los ciclos diarios de los meses seleccionados y los datos base. | 98 |
| 6.4. Comparación de la GHI y DNI por satélite con medidas en tierra. | 101 |
| 6.5. Comparación de la GHI y DNI por satélite con estimativos NASA/SSE. | 103 |
| 6.6. Factores de adecuación de la GHI y GTI del AMTUes. | 105 |
| 6.7. Comparación entre los valores anuales de GHI del AMTUes y los NASA/SSE. | 106 |
| 6.8. Diferencia entre los ciclos diarios promedio del AMTUes y los datos base. | 106 |
| 6.9. Comparación entre la irradiación mensual del AMTUes y los datos base. | 108 |
| 6.10. Comparación de temperatura anual y mensual del AMTUes y los datos base. | 110 |
| 6.11. Comparación de humedad anual y mensual del AMTUes y los datos base. | 111 |

| | |
|--|-----|
| 6.12. Comparación de presión anual y mensual del AMTUES y los datos base. | 111 |
| 6.13. Comparación entre los valores anuales oficiales y los valores del AMTUES. | 114 |
| 6.14. Promedio diario de irradiación anual y ángulo óptimo para las 5 localidades. | 116 |
| | |
| B.1. Comparación de la irradiación mensual del AMTUES con los datos base. | 137 |
| B.2. Ciclos diarios para el AMTUES y los datos base de Montevideo. | 138 |
| B.3. Comparación entre el AMTUES y los datos base de Montevideo. | 139 |
| B.4. Ciclos diarios para el AMTUES y los datos base de Salto. | 140 |
| B.5. Comparación entre el AMTUES y los datos base de Salto. | 141 |
| B.6. Ciclos diarios para el AMTUES y los datos base de Rivera. | 142 |
| B.7. Comparación entre el AMTUES y los datos base de Rivera. | 143 |
| B.8. Ciclos diarios para el AMTUES y los datos base de Rocha. | 144 |
| B.9. Comparación entre el AMTUES y los datos base de Rocha. | 145 |
| B.10. Ciclos diarios para el AMTUES y los datos base de Colonia. | 146 |
| B.11. Comparación entre el AMTUES y los datos base de Colonia. | 147 |

Presentación de la Colección Biblioteca Plural

La Universidad de la República (Udelar) es una institución compleja, que ha tenido un gran crecimiento y cambios profundos en las últimas décadas. En su seno no hay asuntos aislados ni independientes: su rico entramado obliga a verla como un todo en equilibrio.

La necesidad de cambios que se reclaman y nos reclamamos permanentemente no puede negar ni puede prescindir de los muchos aspectos positivos que por su historia, su accionar y sus resultados, la Udelar tiene a nivel nacional, regional e internacional. Esos logros son de orden institucional, ético, compromiso social, académico y es, justamente, a partir de ellos y de la inteligencia y voluntad de los universitarios que se debe impulsar la transformación.

La Udelar es hoy una institución de gran tamaño (presupuesto anual de más de cuatrocientos millones de dólares, cien mil estudiantes, cerca de diez mil puestos docentes, cerca de cinco mil egresados por año) y en extremo heterogénea. No es posible adjudicar debilidades y fortalezas a sus servicios académicos por igual.

En las últimas décadas se han dado cambios muy importantes: nuevas facultades y carreras, multiplicación de los posgrados y formaciones terciarias, un desarrollo impetuoso fuera del área metropolitana, un desarrollo importante de la investigación y de los vínculos de la extensión con la enseñanza, proyectos muy variados y exitosos con diversos organismos públicos, participación activa en las formas existentes de coordinación con el resto del sistema educativo. Es natural que en una institución tan grande y compleja se generen visiones contrapuestas y sea vista por muchos como una estructura que es renuente a los cambios y que, por tanto, cambia muy poco.

Por ello es necesario:

- a. Generar condiciones para incrementar la confianza en la seriedad y las virtudes de la institución, en particular mediante el firme apoyo a la creación de conocimiento avanzado y la enseñanza de calidad y la plena autonomía de los poderes políticos.
- b. Tomar en cuenta las necesidades sociales y productivas al concebir las formaciones terciarias y superiores y buscar para ellas soluciones superadoras que reconozcan que la Udelar no es ni debe ser la única institución a cargo de ellas.
- c. Buscar nuevas formas de participación democrática, del irrestricto ejercicio de la crítica y la autocrítica y del libre funcionamiento gremial.

El anterior rector, Rodrigo Arocena, en la presentación de esta colección, incluyó las siguientes palabras que comparto enteramente y que complementan adecuadamente esta presentación de la colección Biblioteca Plural de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC), en la que se publican trabajos de muy diversa índole y finalidades:

La Universidad de la República promueve la investigación en el conjunto de las tecnologías, las ciencias, las humanidades y las artes. Contribuye, así, a la creación de cultura; esta se manifiesta en la vocación por conocer, hacer y expresarse de maneras nuevas y variadas, cultivando a la vez la originalidad, la tenacidad y el respeto por la diversidad; ello caracteriza a la investigación –a la mejor investigación– que es, pues, una de las grandes manifestaciones de la creatividad humana.

Investigación de creciente calidad en todos los campos, ligada a la expansión de la cultura, la mejora de la enseñanza y el uso socialmente útil del conocimiento: todo ello exige pluralismo. Bien escogido está el título de la colección a la que este libro hace su aporte.

Roberto Markarian

Rector de la Universidad de la República

Mayo, 2015

Resumen

Las series anuales típicas son utilizadas para simular actividades humanas bajo condiciones meteorológicas características de una región. Deben ser representativas de una estadística de largo plazo en términos de sus valores medios y de su variabilidad para que las simulaciones sean realistas. En este trabajo se presenta el desarrollo de cinco series típicas a escala horaria para uso en aplicaciones de energía solar u otras actividades que sean principalmente influenciadas por la radiación solar a nivel de superficie. Para construir una serie típica se requieren datos de largo plazo de las variables involucradas. Como en Uruguay no existen medidas de largo plazo de irradiación solar, se utilizan 15 años de estimaciones por satélite de esta variable que tienen baja incertidumbre sobre el territorio nacional. Las series típicas cuentan con valores de irradiación global en plano horizontal e inclinado y de irradiación directa en incidencia normal. Se incluye además información de temperatura, humedad, presión y viento, todas variables medidas en tierra por instituciones nacionales. Las series típicas son elaboradas para las localidades de Montevideo, Salto, Rivera, Rocha y Colonia, donde la estadística de largo plazo de medidas completas está disponible o nos ha sido posible construirla. La metodología utilizada para desarrollar este AMTUs es de uso internacional y está bien documentada en la bibliografía científica especializada.

Palabras clave: energía solar, año meteorológico típico, irradiación solar por satélite, GHI, DNI.

Agradecimientos

Este trabajo sólo ha sido posible debido a la colaboración de varias instituciones y personas. En primer lugar, agradecemos la confianza del MIEM/DNE en este equipo de trabajo. El Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) aportaron la gran mayoría de los datos medidos en tierra. Por su parte, la empresa eléctrica estatal UTE aportó medidas de viento que fueron utilizadas en algunas localidades donde se construyeron series típicas. Ha sido una experiencia notable poder acceder a este gran volumen de información y se logró sólo en base a la colaboración de estas Instituciones, a las cuáles agradecemos especialmente.

La lista de agradecimientos a personas particulares es probablemente muy larga. A riesgo de omitir injustamente a algún valioso colaborador, queremos agradecer particularmente a algunas personas. A Ricardo Siri quien ha descargado las imágenes de satélite de nuestro banco satelital de más de 15 años que ha posibilitado este trabajo. Agradecemos a Adrián Cal del GRAS/INIA quien nos ha evacuado varias consultas sobre los datos INIA y a Álvaro Otero del INIA/Salto por proporcionarnos valiosas medidas de viento para la localidad de Salto. Este equipo no cuenta con especialistas en la variable viento, por lo que debimos asesorarnos al respecto y agradecemos a Valeria Durañona y Martín Draper quienes nos brindaron información de utilidad para el tratamiento de estas series de datos. Finalmente, queremos agradecer a quienes nos han dado devoluciones sobre las versiones preliminares del AMTUs y que nos ha permitido mejorarlo o agregarle información de utilidad práctica: a María Pía Olave y Alicia Mimbacas del MIEM/DNE, a Diego Oroño y Gonzalo Hermida del IIE/FING/Udelar, y a Martín Navarro, quien utilizó esta información para su proyecto final de carrera en Ingeniería Química y con quien intercambiamos varias comunicaciones de diagnóstico sobre la serie típica de Montevideo.

Versiones del AMTUES

Versiones 2.0, 2.1 y 2.2 (mayo de 2015 a febrero de 2016):

Estas versiones se distribuyeron en forma interna a través del periodo de elaboración del AMTUES. La versión 2.0 es de mayo de 2015 y constaba sólo con la serie de Salto. Para la versión 2.1 (junio de 2015) se incorporó la localidad de Montevideo y en la versión 2.2 (febrero de 2016) la localidad de Colonia. Las versiones se utilizaron para consultorías del MIEM/DNE y para estudios de uso interno. A través de su utilización se incorporaron refinamientos en la metodología y se agregaron variables de utilidad práctica, como el coseno del ángulo cenital, la altura solar y el azimuth solar. La irradiación solar no tenía pos-proceso alguno en estas versiones, elemento que se incorporó para la versión 2.3 y mejoró la calidad de las series típicas de irradiación solar.

Versión 2.3 (abril de 2016):

La versión 2.3 es la primera versión pública del AMTUES e incluía las 5 localidades (Montevideo, Salto, Rivera, Rocha y Colonia). Esta versión fue la primera puesta “en campo” para su utilización. A partir de la experiencia recibida desde los usuarios se incorporaron mejoras que resultaron en la versión 2.4. En la versión 2.3 la metodología para la determinación de las series típicas estaba finalizada y se incorporaron pos-procesos de la irradiación solar GHI basados en modelos de cielo claro calibrados con medidas locales. Para el cálculo de la irradiación DNI y la irradiación global en plano inclinado se utilizaron modelos de fracción difusa especialmente ajustados a la región. Estos ajustes locales fueron realizados por investigadores del Laboratorio de Energía Solar de la Udelar. También fue la primer versión en tener una Memoria Técnica disponible.

Versión 2.4 (junio de 2016):

En la versión 2.4 se incorporó un pos-proceso de la irradiación solar destinado a adecuar el sesgo anual presente en las series típicas de irradiación global en plano inclinado (GTI). Este pos-proceso se realizó en las series de GHI y de GTI, y mejoró el ajuste de las series del AMTUES a los datos satelitales de base (segunda versión del Mapa Solar del Uruguay) y a la información de largo plazo generada por el modelo global NASA/SSE. Adicionalmente se incorporaron los datos a escala diaria en la información puesta a disposición, que hasta la versión anterior sólo se brindaban a escala horaria.

Créditos

Este documento está acompañado de 5 archivos en formato digital donde se encuentran las series típicas que conforman el AMTUs. Estos archivos se disponen en diferentes formatos y se pueden descargar en <http://les.edu.uy>. Esta información es de carácter público y de libre circulación. Su comercialización bajo cualquier medio está prohibida.

En caso de utilizar la información generada en este trabajo, agradecemos sea citada como: Alonso-Suárez R., Bidegain, M., Abal, G., Modernell, P., 2016. Año Meteorológico Típico para Aplicaciones de Energía Solar (AMTUs): series horarias típicas para 5 sitios del Uruguay (versión 2.4). Publicación de la Comisión Sectorial de Investigación Científica de la Udelar. ISBN: 978-9974-0-1647-7.

Todas las imágenes contenidas en este documento son de elaboración propia, salvo aquellas que específicamente se indique lo contrario citando su fuente.

De encontrar erratas u omisiones en esta documentación agradecemos que sean enviadas a la casilla r.alonso.suarez@gmail.com. Alentamos a los usuarios de esta información a hacernos llegar sus comentarios y sugerencias, y transmitirnos su experiencia con el uso de la información del AMTUs. El aporte de los usuarios es importante para mejorar este producto y ampliar su utilidad.

Trabajo realizado por el **Laboratorio de Energía Solar (LES)** de la Udelar:



Datos medidos aportados por **INUMET**, **INIA**, **UTE** y **LES/Udelar**:



Trabajo elaborado a pedido del **MIEM/DNE**:



Introducción

Un Año Meteorológico Típico (AMT) reúne la información necesaria para simular emprendimientos o actividades humanas bajo condiciones climáticas típicas para cierta región. Las principales aplicaciones se encuentran en el sector Energía y Agropecuario, pero su utilidad no está limitada por ellos. Los AMT son especialmente importantes para el desarrollo de las energías renovables debido a su fuerte relación con la variabilidad meteorológica. Las series típicas permiten simular emprendimientos de energía renovable bajo condiciones de funcionamiento representativas del clima de una región. A partir de allí se pueden extraer conclusiones para diseñar las aplicaciones y para estimar su retorno económico. Es necesario que la serie típica sea representativa en al menos dos sentidos: en valores medios, para que su utilización pueda ser considerada como simulación de largo plazo, y en la variabilidad meteorológica típica, para la que la simulación sea ante un escenario realista. En este trabajo, tales series típicas fueron obtenidas para cinco ubicaciones en Uruguay cercanas a centros urbanos: Montevideo, Salto, Rivera, Rocha y Colonia.

Los AMT desarrollados en este trabajo son a escala horaria (son 24×365 valores para cada localidad). Son representativos de las medias mensuales y anuales, y preservan la variabilidad natural a escala horaria y diaria respetando el ciclo anual de las variables consideradas. Para satisfacer estos requerimientos es necesario contar con una estadística de datos de largo plazo (más de una década de registros) para cada variable considerada. En este trabajo hemos incluido la irradiación solar horaria, la temperatura del aire ambiente, la humedad relativa, la presión atmosférica y la velocidad del viento (módulo y dirección). Las componentes de la irradiación solar incluidas son la global en plano horizontal (GHI), la global en en plano inclinado (GTI) a algunas inclinaciones representativas y la directa en incidencia normal (DNI). Para que el producto sea más amigable con los usuarios finales las variables de irradiación solar se expresan en Wh/m^2 y pueden ser también interpretadas como irradiancia promedio en la hora (en W/m^2). A escala diaria, la irradiación solar será expresada en MJ/m^2 .

Denominamos al conjunto de series típicas desarrolladas en este trabajo como AMTUs. La “U” es en referencia a *Uruguay* y el “es” es en referencia a la *energía solar*. De esta manera buscamos resaltar que este AMTUs ha sido generado específicamente para aplicaciones de energía solar u otras aplicaciones estrechamente relacionadas. Es importante tener presente los límites de aplicabilidad del AMTUs. La decisión final en cuanto a su adecuación a diferentes situaciones queda a criterio de los usuarios, así como las consecuencias de su utilización. Aquí nos limitamos a dar una serie de recomendaciones generales. El objetivo principal del

AMTUes es ser un insumo para la simulación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar. En las variables que lo componen se estableció una importancia relativa del 50 % para la irradiación solar, 33 % para la temperatura ambiente, y 8,5 % para la humedad relativa y la presión atmosférica por separado. La variable viento se incluye en las series pero no participa en la decisión de la tipicidad. Esta elección condiciona su utilidad a las aplicaciones donde la importancia relativa de estas variables sea similar. La evaluación realizada sugiere que las series típicas generadas son representativas no sólo para la irradiación solar, como explícitamente se buscó, sino también para temperatura, humedad y presión. Esto amplía el rango de utilización del AMTUes. Por ejemplo, entendemos que estos AMT pueden ser utilizados en aplicaciones vinculadas al sector Agropecuario y a la eficiencia energética. Por otro lado, existen algunas aplicaciones donde es claro que este AMTUes *no* es utilizable, como por ejemplo, la simulación de sistemas de energía eólica. Tampoco es utilizable para estudios de peor caso o para evaluar la frecuencia de eventos extremos o para simular el comportamiento de sistemas bajo fenómenos climáticos severos, entre otros.

La variable principal de este AMTUes es la irradiación solar horaria. Para su tratamiento se utilizaron técnicas y modelos al estado del arte en Uruguay. El conocimiento del recurso solar generado en los últimos años en Uruguay ha sido clave para posibilitar este producto. Una parte fundamental ha sido el desarrollo reciente de herramientas satelitales para estimar el recurso solar. En la lista de desarrollos relevantes destacan también el ajuste de modelos de fracción difusa y de modelos de cielo claro que permitieron una mejor estimación de la DNI por satélite. Todas estas herramientas han sido adaptadas especialmente al territorio uruguayo y la región en base a los datos registrados por la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS) que administra el Laboratorio de Energía Solar (LES) de la Udelar. Estas son herramientas perfectibles y seguramente serán refinadas en el futuro como parte de la tarea de investigación cotidiana del LES. No obstante, la evaluación de estas herramientas contra datos adquiridos en superficie las sitúan como las de mejor desempeño en el territorio nacional a la fecha. A modo de ejemplo, la incertidumbre horaria del estimativo satelital de GHI es del orden del 12-13 %, en comparación al 21 % que reporta 3TIER para Sudamérica [1], una consultora internacional reconocida en el sector energético.

Las variables complementarias (temperatura del aire ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad del viento) han sido medidas en las redes de medida del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y de la empresa eléctrica estatal (UTE). Como el estimativo satelital de irradiación solar horario está disponible para cualquier punto del territorio con una resolución de 2 km, la limitación para la construcción de un AMT se encuentra actualmente en la disponibilidad de series de medidas *esencialmente completas* de largo plazo para las variables complementarias. Las localidades donde se elaboraron las series típicas del AMTUes surgieron de cruzar la información a escala horaria de todas estas bases de datos. A partir de allí se logró construir conjuntos de datos base de largo plazo para cada ubicación seleccionada, para luego obtener la serie típica. El volumen de información procesada para la elaboración de este AMTUes es relativamente

grande. Engloba los datos de cuatro redes de medida a escala nacional (INUMET, INIA, UTE y LES) en conjunto con una base de datos de más de medio millón de imágenes de satélite.

Las series de datos meteorológicos son siempre imperfectas, ya sean datos de satélite o series de medida en campo realizadas por equipos automáticos o por seres humanos. Por esto, el completado de los datos faltantes es una actividad imposible de evitar en la práctica. Los resultados finales pueden ser sensibles a los procedimientos usados para el completado de las series de datos y si estos procedimientos no son adecuadamente documentados pueden llevar a un mal uso de la información. En este trabajo hemos puesto especial cuidado en el proceso de rellenado y en su adecuada documentación. Hemos utilizado técnicas estadísticas que buscan preservar de la mejor manera posible la información horaria de las series de medidas y, principalmente, su estadística de largo plazo, que es un punto crítico para el presente trabajo. Todos los procedimientos utilizados se encuentran descriptos en detalle en este documento y se informa de los porcentajes de datos completados para cada sitio.

La metodología escogida para la elaboración del AMTUs es conocida como “metodología SANDIA”. Fue desarrollada por los SANDIA National Laboratories en Estados Unidos y es utilizada para elaborar los años meteorológicos típicos de EEUU en sus sucesivas versiones TMY1, TMY2 y TMY3 [2–4]. La metodología SANDIA ha sido utilizada exitosamente en varios países [5–12] y es altamente aceptada internacionalmente.

1.1. Antecedentes

Este no es el primer Año Meteorológico Típico desarrollado para Uruguay y esperamos que no sea el último. Uno de los primeros trabajos realizados en Uruguay para seleccionar un conjunto de datos típicos para uso en energía solar se debe a Duomarco y Luongo en 1979 [13]. En este trabajo se usaron datos de irradiación solar (GHI y DNI) para un período de dos años (1977–1978) registrados en la Facultad de Arquitectura de la Udelar (Montevideo) y ocho años (1969–1977) de datos diarios de GHI registrados en estación experimental del INIA La Estanzuela (Colonia). Con esta información se seleccionaron 12 días típicos (uno para cada mes del año) tomando como criterio el de seleccionar el día de la serie de Montevideo cuya irradiación diaria fuese más cercana a la media mensual de los datos de Colonia para ese mes. La hipótesis de trabajo era que los promedios mensuales de irradiación diaria de Colonia son válidos para Montevideo. Los datos de radiación solar se complementaron con datos de otras variables meteorológicas de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), actual INUMET. También se incluyó un análisis de la irradiación solar sobre plano inclinado.

En 2005, Piccion y Milicua desarrollaron series típicas para seis localidades en Uruguay a través de un proyecto de investigación desarrollado en la Facultad de Arquitectura [14]. Se trabajó con un periodo de 12 años (1982–1994) a escala horaria para seleccionar un conjunto típico de utilidad para la evaluación del desempeño térmico de viviendas y otras edificaciones. En este análisis no se contó con datos de radiación solar, por lo que se utilizaron series diarias de heliofanía (horas de Sol con irradiancia directa sobre el umbral de 120 W/m^2) medidas por DNM usando heliógrafos de Campbell-Stokes para estimar la irradiación solar diaria.

Más recientemente, dos co-autores de este trabajo (Alonso-Suárez y Abal) realizaron en 2012 junto a M. D'Angelo, un AMT a escala diaria para la región Sudoeste del país [15]. Se utilizaron como base los datos a escala diaria de irradiación solar y otras variables meteorológicas medidas en la estación experimental del INIA de La Estanzuela para el periodo 1969–1977. A partir de estos ocho años de datos se obtuvieron 365 valores diarios típicos para cada variable. Si bien la metodología que se utilizó es similar a la del presente trabajo, varias limitaciones de esta primera versión se han superado en la versión actual. La principal desventaja de la serie típica desarrollada en 2012 es su resolución temporal diaria, no pudiendo ser utilizada para simulaciones horarias de aplicaciones de energía solar. Además, debido a la limitada disponibilidad de datos de radiación solar, sólo se elaboró para una localidad y con estadística reducida.

Este trabajo es la continuación natural del trabajo anterior. Surge del impulso reciente que han tenido las energías renovables en Uruguay y la necesidad de tener información confiable para su simulación. Creemos que las limitaciones del anterior trabajo han sido superadas en la versión actual. La disponibilidad de información satelital con baja incertidumbre permite superar la barrera de no poseer estadística suficiente de radiación solar, dificultad que era insalvable hasta hace algunos años. El modelo satelital nos permite estimar la irradiación solar horaria para cualquier punto del territorio desde enero de 2000 a la fecha, cubriendo un período ininterrumpido de más de 15 años de datos con incertidumbre bien conocida. También se amplió sensiblemente la cobertura territorial, llevando el número de localidades de uno a cinco. Finalmente, se incorporaron algunas variables medidas en tierra, además de otras componentes de la radiación solar, como la irradiación solar directa en incidencia normal (DNI) y la irradiación global sobre superficies inclinadas (GTI).

El proceso de elaboración de un AMT es incremental. A medida que se cuenta con mejores modelos y series de datos más confiables y más largas, es necesario re-elaborar los AMT para reflejar los avances en el conocimiento climatológico. Esperamos que este proceso de elaboración de series típicas en Uruguay prosiga en el tiempo, actualizando y mejorando versión a versión su información. Las series típicas presentadas aquí se pueden mejorar en varios aspectos: incorporando mayor estadística de datos, incorporando más variables de utilidad, mejorando las técnicas satelitales de estimación de la irradiación solar u otras variables, mejorando el modelado del recurso solar y sus componentes, mejorando las metodologías de generación de las series típicas, de los procedimientos de completado o de los pos-procesos, sólo por mencionar algunos aspectos. No obstante, el conjunto de series típicas que se documenta en este trabajo representa el estado del arte a la fecha, con la información climática disponible en Uruguay.

1.2. Sobre este documento

Este documento es una Memoria Técnica en la cual se realiza una extensa recopilación de todos los datos técnicos relevantes de este desarrollo. Es, además, la documentación más exhaustiva sobre el proceso de elaboración del AMTUs. En el Capítulo 2 se detalla la información meteorológica que se inspeccionó como insumo de este trabajo. Se especifican las series de datos disponibles, su duración y el porcentaje de completitud. También se explican los

motivos por los cuales se seleccionaron las localidades de Montevideo, Salto, Rivera, Rocha y Colonia. En el Capítulo 3 se detalla el proceso de elaboración de los conjuntos de datos base. Se analizan los datos por localidad, describiendo en detalle los procesos de completado utilizados. Allí se brinda en forma tabulada la información recopilada para cada localidad, su extensión temporal, el porcentaje de datos base, de datos interpolados y de relleno para cada variable. En los Capítulos 4 y 5 se presenta y se aplica (respectivamente) la metodología estadística utilizada para confeccionar los AMT. En el Capítulo 5 se especifica además el formato en el que se presenta el AMTUes. El Capítulo 6 está dedicado a la evaluación del AMTUes y su representatividad. Se analiza en particular la representatividad de las series típicas de irradiación solar y la incertidumbre en su estimación. Se comparan las series típicas contra la información de los datos base y las estadísticas oficiales de Uruguay. También se incluye un análisis de la inclinación de las superficies de captación. Los comentarios finales son expresados en el Capítulo 7.

Esta Memoria Técnica cuenta con una serie de Apéndices donde se presenta gran cantidad de información de utilidad. En el Apéndice D se muestra en forma gráfica el régimen de funcionamiento de la estaciones INUMET durante el periodo 01/2000 al 12/2014. Esto permite visualizar rápidamente la disponibilidad de datos horarios de las estaciones convencionales. En el Apéndice A se presentan las series típicas para cada localidad en forma gráfica para su visualización. Este documento está acompañado de las series típicas horarias en formato digital, que están disponibles en distintos formatos en el sitio web del LES (<http://les.edu.uy>). En el Apéndice B se incluyen Tablas con valores mensuales y los valores para el día promedio anual para cada localidad y para cada variable principal (irradiación GHI, temperatura del aire ambiente, humedad relativa y presión atmosférica). Se brindan los valores obtenidos a partir de las series de largo plazo (las series base conformadas para este trabajo) y de los AMT confeccionados. En el Apéndice C se encuentran todos los gráficos de evaluación por estación. En estos últimos dos Apéndices se puede observar la representatividad del AMTUes para cada localidad por separado.

Información meteorológica

El AMTUes fue desarrollado a partir de información horaria de irradiación solar, temperatura del aire ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad de viento. En Uruguay, los *registros horarios completos* de más de una década son escasos, y en el caso de la radiación solar, aún inexistentes. Para alcanzar una estadística de datos suficiente se debieron integrar datos de distintas fuentes. La confección de series típicas está limitada a sitios en donde tales datos estén disponibles.

La variable principal de este trabajo, la irradiación solar horaria, fue estimada por satélite con modelos localmente adaptados de baja incertidumbre. La irradiación global horaria sobre plano horizontal (GHI) se obtiene directamente a partir de imágenes del satélite utilizando un modelo estadístico cuyos parámetros fueron ajustados especialmente a las particularidades de la región utilizando los datos registrados en tierra por la Red de Medida Continua de Irradiancia Solar (RMCIS) administrada por el LES desde 2010 [16–18]. La estadística que disponemos de imágenes de satélite es mayor a 15 años, por lo que es posible reproducir el modelo hacia atrás en el tiempo y generar series de GHI horaria para ese período. No existe ninguna restricción para su aplicación en el territorio nacional por lo que pueden estimarse series horarias de GHI para cualquier ubicación en el país. La irradiación solar directa en incidencia normal (DNI) y la irradiación global sobre plano inclinado (GTI) fueron inferidas a partir de la GHI utilizando modelos estadísticos adaptados al Uruguay a partir de medidas adquiridas en tierra.

El resto de las variables meteorológicas (denominadas “complementarias” en el contexto de este trabajo) han sido registradas en tierra por instituciones nacionales. Las variables complementarias incluidas en este AMT son aquellas consideradas de utilidad para la simulación de emprendimientos de energía solar o para estudios de eficiencia energética relacionados con la radiación solar. En orden de relevancia, estas variables son:

- Temperatura del Aire Ambiente (bulbo seco) (TAM).
- Humedad Relativa (HRE).
- Presión Atmosférica (PAM).
- Velocidad y Dirección de Viento (VVI y DVI, respectivamente).

La disponibilidad de series de datos medidos condiciona fuertemente los sitios para los cuáles es posible construir un AMT. En general, ninguna fuente de datos por separado tiene una estadística completa sin huecos (datos faltantes o claramente corruptos) en la serie temporal.

Debido a esto, fue necesario realizar un relevamiento a escala nacional de las fuentes de datos existentes con énfasis en el potencial de complementar datos de diferentes fuentes para cada localidad geográfica. Las ubicaciones seleccionadas para realizar los AMT son aquellas que permiten una adecuada estadística de datos una vez que se integran en un único conjunto de datos las distintas fuentes disponibles con proximidad geográfica.

2.1. Sitios de medida en Uruguay

Se consideraron los datos registrados en las cuatro redes de medida a escala nacional que existen en el país, que corresponden a las siguientes instituciones públicas:

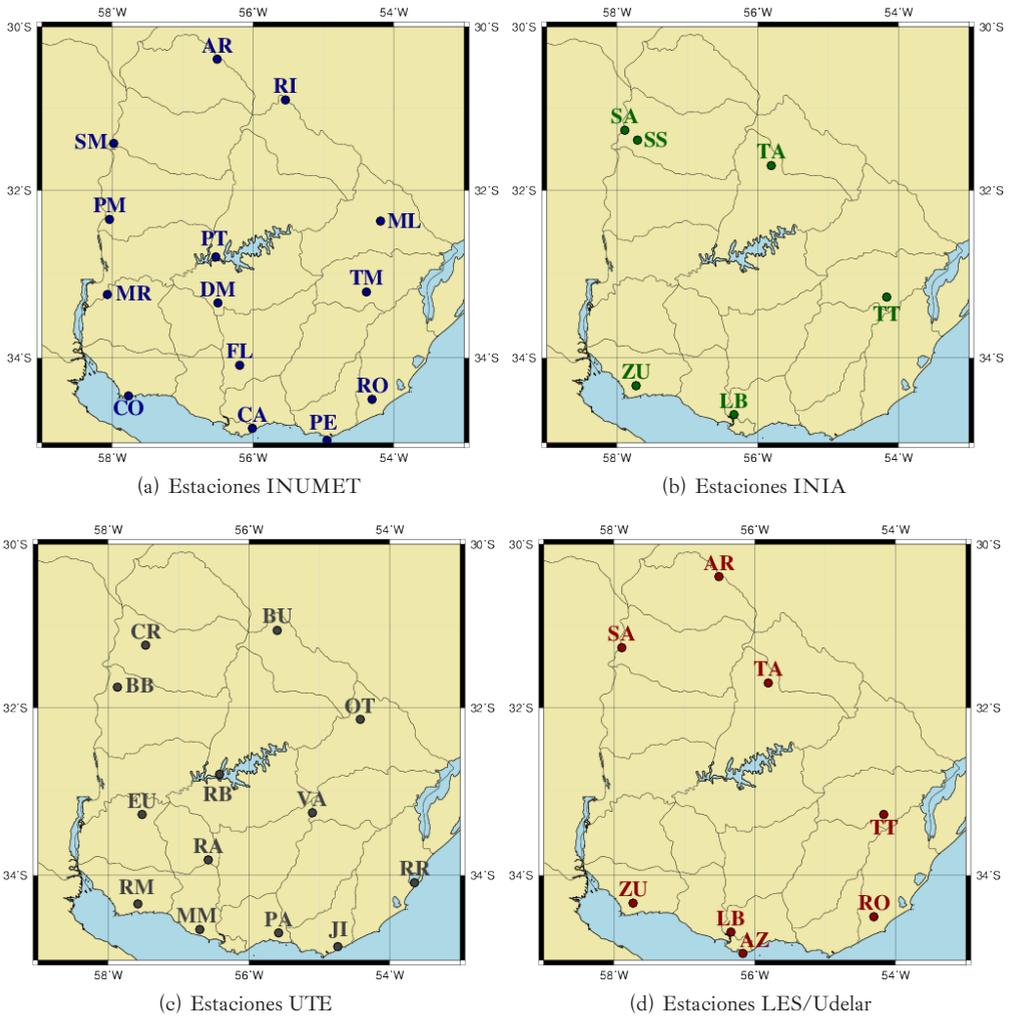
- Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET).
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).
- Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE).
- Universidad de la República, Laboratorio de Energía Solar (LES).

Las redes de medida de INUMET e INIA registran gran cantidad de medidas meteorológicas desde hace décadas. Estas medidas son utilizadas con fines de pronóstico meteorológico, caracterización climática y estudios agropecuarios. En particular, todas sus estaciones registran las variables requeridas para este estudio. En algunas localidades las estaciones están relativamente próximas, por lo que sus datos son complementarios. En las Figuras 2.1.a y 2.1.b se muestra la ubicación de las estaciones INUMET e INIA analizadas en este trabajo, respectivamente. Se añade el sitio SS (ver Figura 2.1.b), cercano a la estación SA, donde hay una estación meteorológica automática del INIA de la cual se utilizaron datos de viento. Esta medida está ubicada en la estación experimental de San Antonio de la Udelar en Salto.

La red de medidas de UTE fue concebida para registrar principalmente información de viento a varias alturas en el marco de la incorporación de energía eólica a la red eléctrica nacional. En algunos sitios registra también valores de radiación solar en plano horizontal utilizando sensores fotovoltaicos de bajo costo Li-Cor LI200. Los datos son guardados con cadencia 10-minutal. En la Figura 2.1.c se muestra la ubicación de los sitios de medida. Se muestran allí sólo los puntos en que se registra radiación solar o son relevantes para este estudio porque se utilizaron series de viento registradas en esos sitios.

La red de medidas que administra el LES/Udelar fue instalada en el marco de una iniciativa apoyada por el MIEM/DNE y por PEDECIBA para realizar un relevamiento de largo plazo del recurso solar nacional. Si bien recientemente se han incorporado sensores de temperatura ambiente, la red está orientada a medir irradiancia solar y algunas de sus componentes. En la Sección 2.3 se describen con mayor detalle las capacidades actuales de esta red de medidas. En la Figura 2.1.d se muestra la distribución espacial de la red. Como se puede apreciar por simple comparación entre los mapas de la Figura 2.1, la mayoría de los sitios del LES son los mismos que aparecen en las otras redes de medida. Por motivos de seguridad y mantenimiento, los puntos de la RMCIS se han instalado en estaciones convencionales del INIA o INUMET. Los

Figura 2.1: Ubicación de los sitios de medida de las redes de INUMET, INIA, UTE y LES/Udelar. En el caso de INUMET, INIA y UTE, sólo se muestran los sitios de medida relevantes para este trabajo.



equipos de medida han sido ubicados dentro del campo de sensores de las otras instituciones de modo que el personal de la estación realiza la limpieza diaria de las cúpulas de los piranómetros. Los datos son guardados con cadencia minutal y enviados a un servidor del LES por adquirentes automáticos a través de la red celular. Una vez en el servidor, los datos son sometidos a controles de integridad y de calidad que buscan detectar datos incorrectos o instrumentos con problemas de medida o descalibrados. Los mismos controles de calidad son realizados sobre los datos de irradiancia solar de la red de UTE a través de la colaboración que existe entre ambas instituciones.

2.2. Datos meteorológicos complementarios

En esta Sección se describe la estadística de datos meteorológicos de las variables complementarias que existe para cada localidad. Este análisis es un insumo necesario para seleccionar los sitios donde es posible construir un AMT. En la Subsección 2.2.1 se describen los datos de temperatura del aire ambiente y de humedad relativa aportados por INIA e INUMET. Los datos de presión son brevemente descriptos en el apartado 2.2.2. Para el tratamiento de datos faltantes en las series del AMT Ues se utilizaron datos de heliofanía para tener una indicación de si los datos a reemplazar correspondían a un día de cielo despejado, parcialmente cubierto o totalmente cubierto. Los datos de heliofanía se describen en la Subsección 2.2.3. Finalmente, las medidas de viento son analizadas en el apartado 2.2.4.

2.2.1. Temperatura del aire ambiente y humedad relativa

La estadística de datos de temperatura y humedad es similar, por lo que pueden ser analizadas en conjunto. Estas medidas fueron aportadas por INUMET e INIA. El detalle de estas estaciones se encuentra en las Tablas 2.1 y 2.2 respectivamente. Allí se indica el período temporal para el cual hay datos horarios disponibles y el porcentaje de huecos detectado en la serie temporal utilizando como variable guía la temperatura ambiente. Se incluye también una valoración respecto a la posibilidad de complementar o interpolar cada serie de medida.

Tabla 2.1: Estadística de datos de las estaciones INUMET.

| estación | código | estadística | datos | |
|-------------------|--------|-------------------|-----------|-----------------------------------|
| | | | faltantes | comentarios |
| Rivera | RI | 01/2000 – 12/2014 | 0,3 % | 15 años completos. |
| Carrasco | CA | 01/2000 – 12/2014 | 0,4 % | 15 años completos. |
| Artigas | AR | 01/2006 – 12/2014 | 2,4 % | 8 años completos [†] . |
| Rocha | RO | 01/2000 – 12/2014 | 13,0 % | 15 años completables (interpol.). |
| Salto | SM | 01/2000 – 12/2014 | 18,8 % | 15 años complementables. |
| Colonia | CO | 01/2000 – 12/2014 | 46,4 % | Parcialmente complementable. |
| Treinta y Tres | TM | 01/2000 – 12/2014 | 49,8 % | Parcialmente complementable. |
| Mercedes | MR | 01/2000 – 12/2014 | 26,8 % | 15 años no complementables. |
| Melo | ML | 01/2000 – 12/2014 | 28,8 % | 15 años no complementables. |
| Paysandú | PM | 01/2000 – 12/2014 | 48,8 % | 15 años no complementables. |
| Paso de los Toros | PT | 05/2010 – 12/2014 | 24,7 % | 4 años no complementables. |
| Punta del Este | PE | 05/2010 – 12/2014 | 26,4 % | 4 años no complementables. |
| Florida | FL | 05/2010 – 12/2014 | 33,2 % | 4 años no complementables. |
| Durazno | DM | 05/2010 – 12/2014 | 41,7 % | 4 años no complementables. |

[†] Los últimos 2 meses de 2014 son no complementables.

De la inspección de las Tablas 2.1 y 2.2 se pueden extraer conclusiones respecto a los sitios donde es posible confeccionar un AMT que incluya estas variables. A primera vista se observa que hay sólo tres estaciones de medida en el país con 15 años de datos horarios esencialmente completos: CA, RI y LB. Si se tomara el criterio de utilizar sólo medidas adquiridas en tierra sin ninguna interpolación o rellenado, sólo en estos sitios se podrían confeccionar un AMT. Lamentablemente, los sitios CA y LB son muy cercanos entre sí y son ambos representativos

Tabla 2.2: Estadística de datos de las estaciones INIA.

| estación | código | estadística | datos | |
|----------------|--------|-------------------|-----------|--------------------|
| | | | faltantes | comentarios |
| Las Brujas | LB | 01/2000 – 12/2014 | 0,3 % | 15 años completos. |
| Salto | SA | 11/2006 – 12/2014 | 0,4 % | 8 años completos. |
| Tacuarembó | TA | 11/2006 – 12/2014 | 0,4 % | 8 años completos. |
| La Estanzuela | ZU | 05/2006 – 12/2014 | 1,5 % | 8 años completos. |
| Treinta y Tres | TT | 04/2009 – 12/2014 | 2,9 % | 5 años completos. |

del área metropolitana de la ciudad de Montevideo. Usando datos solamente de estas estaciones no es posible representar adecuadamente el territorio nacional.

Para el resto de los sitios la situación se debe analizar individualmente. Algunos sitios INUMET son complementables con los datos de estaciones INIA cercanas. En algunos sitios el porcentaje de huecos es bajo y es posible aplicar técnicas de interpolación para el completado. En las demás estaciones de la red de INIA (las que no son LB) se cuenta con estadística de datos de menos de 10 años y por sí solos no pueden ser utilizados para confeccionar un AMT. El problema de la selección de localidades para la elaboración del AMT Ues se aborda con mayor profundidad en la Sección 2.5.

2.2.2. Presión atmosférica

Los datos de presión atmosférica utilizados para este trabajo han sido registrados en estaciones convencionales del INUMET. La medida de la presión atmosférica al nivel de la estación se realiza a través de barómetros mercuriales situados dentro del edificio de las respectivas estaciones meteorológicas. Estas lecturas se realizan cada hora o eventualmente cada tres horas. Las medidas de presión atmosférica pueden ser fácilmente interpoladas en el tiempo por ser una variable de lenta evolución y alta autocorrelación. Por medio de estimaciones donde se incorpora tanto el valor de la altura sobre el nivel medio del mar como la temperatura del aire es práctica usual calcular los valores de la presión atmosférica al nivel medio del mar. Los valores dados en este trabajo están expresados a nivel medio del mar y no a nivel de la estación.

2.2.3. Heliofanía

Las medidas de heliofanía (definida como horas de Sol sobre el umbral $DNI > 120 \text{ W/m}^2$) se obtienen a partir de la lectura manual del trazo sobre una banda de papel dejado por un heliógrafo de Campbell-Stokes. La heliofanía no es una medida precisa de la irradiación solar diaria, pero permite tener una indicación de la nubosidad media del día. Estos datos fueron utilizados para el proceso de sustitución de algunos días de datos faltantes en los AMT. Los días sustituidos son pocos, por lo que este procedimiento aproximado resulta adecuado. Los detalles de cómo se usó esta variable diaria se brindan en la Subsección 4.1.3. Se utilizaron los datos de heliofanía registrados en las estaciones LB, SA, TT, ZU y TA del INIA para el periodo 2000–2014. En todos los casos estos registros están esencialmente completos.

2.2.4. Datos de viento

La medida de viento se realiza con un instrumento denominado anemómetro, que consta de dos partes: copelas para la medida de la velocidad y de una veleta para indicar la dirección. Como ambas partes son móviles, su registro confiable a lo largo del tiempo presenta algunas dificultades si el instrumento no recibe el mantenimiento adecuado. La velocidad del viento varía con la altura, lo cual agrega complejidad al tratamiento de los datos de viento. Además, la velocidad y dirección del viento son afectados por el entorno de la medida, ya sea por la rugosidad del terreno u obstáculos cercanos. Las redes de medida de INUMET, INIA y UTE registran valores de viento a distintas alturas y de distinta manera. Este conjunto de factores hace que series de medidas de viento de largo plazo sean complejas de obtener y de procesar.

Las medidas de viento de INUMET (originariamente expresadas en nudos) se toman a 10 m de altura, siguiendo la recomendación de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, de ahora en más) [19]. Es una expresión aproximada del viento en el sitio, en la cual la medida registrada es un número natural que indica la cantidad de nudos. A efectos de este trabajo se tradujo la medida a m/s.

La red de medida de UTE cuenta con gran cantidad de medidas de viento en varios puntos del territorio nacional, algunos de los cuales se muestran en la Figura 2.1.c. Mayormente las medidas se ubican en alturas superiores a 20 m, debido a que el recurso eólico es mayor lejos de la superficie. Para este trabajo interesa contar con medidas de viento cercanas a la superficie, principalmente para evaluar pérdidas convectivas en aplicaciones de energía solar. Para alturas mayores a 20 m, la relación entre velocidad de viento y altura se puede parametrizar como,

$$\frac{w_1}{w_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^\alpha, \quad (2.1)$$

donde w_1 y w_2 son los módulos de velocidad de viento a alturas z_1 y z_2 respectivamente. Esta relación permite transformar las series de viento a una altura dada, por ejemplo 20 m. Para poder aplicarla se necesita conocer el parámetro α que depende de la ubicación de la medida, la hora del día y la dirección del viento. Para los casos en que las medidas disponibles están a más de 20 m, se hallaron valores de α para cada hora del día y para cada 10° de ángulo de dirección, utilizando las dos medidas de viento de menor altura disponibles. Luego, con estos valores de α , se utiliza la Ec. (2.1) para calcular el módulo de la velocidad a 20 m utilizando como velocidad conocida la medida a menor altura disponible. No se generaron series de velocidad de viento a alturas menores de 20 m debido a que esta altura se encuentra ya cercana al umbral de aplicabilidad de este método. Para alturas menores se deben aplicar otras técnicas de mayor complejidad que requieren conocimiento de la rugosidad del terreno. No es el objetivo de este trabajo realizar un modelado detallado de la variable viento, que es complementaria para aplicaciones de energía solar.

El INIA mide viento a alturas más cercanas a la superficie terrestre y por ende más factibles de que sean afectadas por el terreno circundante. En este trabajo se utilizó una única medida de viento del INIA, realizada a 2 m de altura, que presenta poca afectación de las inmediaciones

a la medida. Estas medidas se adquirieron en el sitio SS (ver Figura 2.1.b) y se utilizaron para las series base del AMT de Salto.

2.3. Datos de irradiancia solar registrados en tierra

La irradiancia solar en superficie es la variable meteorológica cuyo registro es más escaso. Esta situación no sólo ocurre en Uruguay, sino que es común a nivel internacional, dados los costos asociados y la especialización requeridas para su adecuado registro.

Previo al año 2010, el país contaba con unas pocas series de medida de radiación solar, en su mayoría de corta duración temporal y no todas con la calidad mínima necesaria para servir como base de estudios sobre el recurso solar. Información detallada sobre las medidas de irradiancia solar disponibles hasta el año 2010 puede ser encontrada en la Memoria Técnica del primer Mapa Solar del Uruguay [20]. A partir de la elaboración del primer Mapa Solar en el año 2009, quedó clara la necesidad de comenzar a medir adecuadamente el recurso solar a escala nacional. En 2010 se da comienzo desde la Facultad de Ingeniería, con apoyo del MIEM/DNE, a un programa de medidas de radiación solar que es precursor de la actual RMCIS. Esta primer red de medida del recurso solar registraba irradiancia solar global sobre plano horizontal (GHI) con cadencia 3-minutal en tres estaciones equipadas con piranómetros de Primera Clase¹. Las estaciones estaban equipadas con adquirentes basados en placas adq-vx, montados y programados en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la FING/Udelar en el marco de un proyecto de fin de carrera. Esta red de medidas de Primera Generación operó durante aproximadamente cuatro años en tres sitios del país, SA, TT y LB (ver Figura 2.1.d), con paulatinas mejoras introducidas a lo largo de su período de operación.

El LES/Udelar, y anteriormente el GMARS², han estado a cargo de la administración y mantenimiento de esta red de medida desde mediados de 2010 y contó el apoyo del MIEM/DNE para este fin. Más detalles sobre la historia de esta Red de Medida pueden encontrarse en <http://les.edu.uy> [21]. En el documento citado se documentan las modificaciones y ampliaciones realizadas en la RMCIS a lo largo del periodo 2010–2015, hasta llegar a las estaciones actuales (de Segunda Generación). En este documento nos limitamos a brindar la información necesaria para los fines de este trabajo.

La actual RMCIS cuenta con 8 puntos distribuidos en el país, como se indica en la Figura 2.1.d. Para la medida principal de GHI, todas las estaciones están equipadas con piranómetros de Primera Clase o superior, de acuerdo a la clasificación ISO 9060:1990. Además, todas cuentan con una medida redundante en GHI basada en sensores fotovoltaicos Li-Cor LI200 o LI200R, lo cual permite un mejor control de calidad y minimiza los datos faltantes. Los adquirentes, el núcleo de las estaciones de medida, han sido adquiridos a la firma Fischer-Scientific y presentan una tasa de fallos muy baja. Se registran datos con cadencia minutal y todos tienen capacidad de comunicación remota por internet a través de la red celular. Estos adquirentes

1. Definida en la normativa ISO 9060:1990 “Solar Energy – Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation”.
2. Grupo de Modelado y Análisis del Recurso Solar, que funcionó en el Instituto de Física de la FING/Udelar hasta 2012, previo a la creación del Laboratorio de Energía Solar.

envían los datos diariamente a un servidor central en el LES, donde son almacenados y procesados. Los detalles de los sitios de medida de esta red se indican en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Ubicación y estadística de medidas de irradiancia solar del LES.

| estación | código | latitud | longitud | estadística | años al 12/2014 |
|-------------------------|--------|---------|----------|----------------------|-----------------|
| Las Brujas | LB | -34,67 | -56,34 | 03/2010 – a la fecha | 4,8 años. |
| Salto | SA | -31,27 | -57,89 | 06/2010 – a la fecha | 4,6 años. |
| Treinta y Tres | TT | -33,28 | -54,17 | 06/2010 – a la fecha | 4,6 años. |
| Rocha | RO | -34,49 | -54,31 | 06/2011 – a la fecha | 3,6 años. |
| FING Azotea | AZ | -34,92 | -56,17 | 03/2011 – 07/2014 | 3,4 años. |
| Artigas | AR | -30,40 | -56,51 | 12/2011 – a la fecha | 3,1 años. |
| Colonia (La Estanzuela) | ZU | -34,34 | -57,69 | 04/2015 – a la fecha | 1,0 años |
| Tacuarembó | TA | -31,71 | -55,83 | 12/2015 – a la fecha | 0,3 años |

Los sensores de irradiancia solar son calibrados periódicamente utilizando como referencia un estándar secundario (Kipp & Zonen CMP22) que el LES mantiene calibrado con trazabilidad a la referencia radiométrica mundial (el patrón primario para medidas de radiación solar) que se encuentra en el World Radiation Center en Davos, Suiza. Las calibraciones de los sensores de campo se realizan cada dos años, según recomendación del fabricante y de la WMO [19]. La calibración contra el estándar secundario se realiza al exterior utilizando la luz solar, en una mesa de calibración especialmente diseñada por el LES para estos propósitos y siguiendo la norma ISO 9847:1992 “Solar energy – Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer”. El LES/Udelar realiza controles de calidad periódicos de la mayoría de las series de medida de irradiancia solar registradas en Uruguay. Para estos controles de calidad se utilizan modelos de cielo claro y estimativos satelitales, además de la inspección visual. Los controles de calidad permiten detectar eventos anómalos en las series de medida e instrumentos en mal estado. La mayoría de estos controles están integrados al procesamiento automático de datos que realiza el LES y son realizados sobre las series minutales, 3-minutales o 10-minutales adquiridas en campo, previo a la construcción de las series horarias.

2.4. Irradiación solar horaria por satélite

El planeta es monitoreado en tiempo real por varios satélites especialmente dedicados a la observación de la Tierra. A partir de una imagen de satélite geoestacionario es posible estimar con baja incertidumbre la irradiación solar en superficie. Estos satélites están ubicados en órbita geoestacionaria a una distancia de aproximadamente 36000 km de la superficie terrestre y conforman una red global de medida cuyas imágenes cubren todo el globo terráqueo. Tienen la capacidad de escanear grandes extensiones territoriales generando información con una frecuencia temporal de algunas imágenes por hora. Como contrapartida, su resolución espacial es moderada: actualmente alcanzan una distancia entre píxeles de 1 km sobre el ecuador. De esta

red de satélites, el satélite GOES-East administrado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA/EEUU), genera imágenes de acceso libre que incluyen a Uruguay ³.

La función de un modelo para la estimación la irradiación solar por satélite es convertir una imagen satelital adquirida por un radiómetro en órbita en una imagen de irradiación solar a nivel de superficie. Las medidas de alta calidad registradas en tierra son importantes para mejorar el desempeño de estos modelos y también para evaluar su desempeño. Los modelos satelitales pueden separarse en dos categorías: estadísticos [22] y físicos [23]. Los modelos estadísticos dependen de un conjunto de coeficientes que se ajustan utilizando datos medidos en tierra. Los modelos físicos buscan modelar los procesos de transferencia radiante en la atmósfera y requieren un conocimiento detallado de su estado. Actualmente, la mayoría de los modelos son de naturaleza híbrida, en los cuáles la parametrización usada tiene un fundamento físico, pero constan de uno o más parámetros ajustables a datos medidos en tierra.

Las imágenes GOES-East se pueden obtener a través del sistema CLASS de la NOAA (<http://www.nsof.class.noaa.gov/>). El LES ha recopilado un banco de imágenes GOES-East en formato crudo utilizando este servicio web. El banco de imágenes local conformado cuenta actualmente con más de medio millón de imágenes. Estas imágenes cubren el período temporal desde el 01/01/2000 a la fecha. En régimen de operación normal, el satélite genera dos imágenes por hora en cinco bandas espectrales, una en la banda visible y cuatro en bandas del infrarrojo lejano. La resolución espacial sobre Uruguay de una imagen del canal visible es de aproximadamente 2 km. La ventana espacial de las imágenes del LES 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 la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de una imagen del canal visible del archivo del LES, donde se puede apreciar la ventana espacial a la fecha. En estos 15 años, tres dispositivos físicos distintos han operado en la posición GOES-East (longitud 75 W sobre el ecuador), denominados GOES-8, GOES-12 y GOES-13. En la Tabla 2.4 aparece la descripción del banco de imágenes al 31/12/2014.

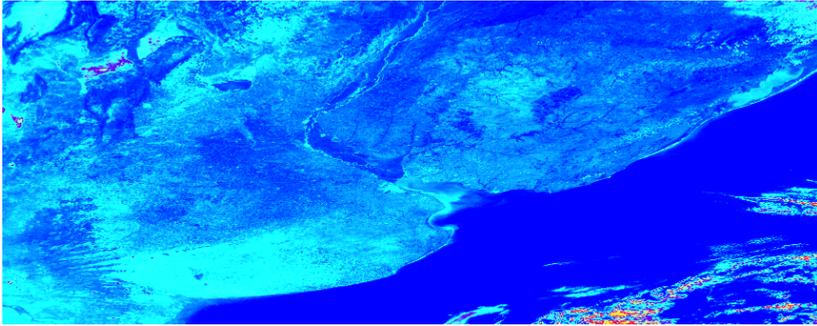
Tabla 2.4: Descripción de la base de imágenes GOES-East del LES/Udelar.

| 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 |
| total | 01/01/2000 | 31/12/2014 | 613300 |

A partir de estas imágenes se detecta la presencia de nubosidad, el principal factor que afecta la disponibilidad de radiación solar en la superficie terrestre. La nubosidad es un fenómeno altamente variable, tanto en el espacio como en el tiempo, de modo que la estimación del recurso solar basada sólo en interpolación o extrapolación de medidas en tierra presenta serias

3. Las imágenes del satélite Meteosat, administrado por la Agencia Espacial Europea (ESA/UE), también incluyen el territorio de Uruguay pero en un borde de su ventana, por lo cual los errores asociados al ángulo de visión son más importantes. Además, las imágenes de este satélite no son de acceso libre sino que se comercializan.

Figura 2.2: Ejemplo de una imagen del canal visible del satélite GOES-East.



limitaciones. Estos métodos tienen una incertidumbre asociada que es mayor conforme aumenta la distancia entre a los sitios base de la interpolación o disminuya la escala temporal a la que se realiza la estimación. Dos trabajos de R. Perez y A. Zelenka publicados en la década de los 90 [24, 25] comparan la incertidumbre asociada a las técnicas de interpolación de datos de superficie con la incertidumbre asociada a la estimación por satélite usando los modelos básicos de la época. El resultado principal de estos trabajos fue que, para estimativos horarios, a partir de una distancia de 30 km de un punto de medida, los modelos satelitales simples tienen menor incertidumbre que los métodos de interpolación/extrapolación. Para totales diarios esta distancia se incrementaba a 50 km. Desde aquel entonces, las capacidades de los satélites y de los modelos satelitales han mejorado considerablemente, por lo que estas distancias pueden ser aún menores actualmente. En definitiva, se concluye que, 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.

2.4.1. Modelo satelital para Uruguay: BD-JPT

En la actualidad existen varios modelos satelitales en uso corriente en el mundo [26–29]. El LES ha desarrollado un modelo estadístico cuyo ajuste se realizó con los datos de la RMCIS descrita en la Sección 2.3. Este modelo es una modificación del modelo de Tarpley o JPT (Justus-Paris-Tarpley) [30]. En una primer implementación de este modelo, en 2011, detectamos que en su forma básica el modelo subestimaba la irradiación solar para cielo despejado y la sobre-estimaba para cielo cubierto. Para solucionar este problema se optó por tratar por separado tres condiciones atmosféricas diferentes: (i) cielo despejado, (ii) cielo parcialmente cubierto y (iii) cielo totalmente cubierto, ajustando conjuntos de coeficientes diferentes para cada una. Las sucesivas mejoras al modelo están documentadas en [16–18]. En su formulación actual, la irradiación global horaria en plano horizontal, I_h , es parametrizada según,

$$I_h = I_{SC} F_n \cos \theta_z (a + b \cos \theta_z + c \cos^2 \theta_z) + d (F_R^2 - F_{Ro}^2), \quad (2.2)$$

donde $I_{SC} = 1367 \text{ Wh/m}^2$ es el valor horario de la constante solar, F_n es una pequeña corrección por la distancia Tierra-Sol variable a lo largo de la órbita terrestre y $\cos \theta_z$ es el coseno

del ángulo cenital evaluado en el medio del intervalo horario. Las expresiones para el cálculo de estas cantidades se pueden encontrar en [31, 32]. La información satelital ingresa al modelo a través de los valores de los factores de reflectancia, F_R y F_{Ro} , que representan el albedo terrestre y el albedo en ausencia de nubosidad (o albedo de fondo), respectivamente. El factor de reflectancia, F_R , es calculado a partir del canal visible del satélite. Las imágenes de los distintos dispositivos físicos (GOES-8, GOES-12 y GOES-13) deben ser calibradas para que sus medidas sean consistentes entre sí durante todo el periodo temporal. El proceso de calibración incluye la transformación de cuentas digitales de 10 bits a una medida de la radiancia vista por el satélite, incluyendo la corrección por el deterioro del sensor al colocarlo en órbita y la corrección por su degradación paulatina al operar en condiciones extremas en el espacio exterior. Esta calibración fue realizada por el LES siguiendo las recomendaciones de la NOAA [33]. El factor de reflectancia, F_R , es el producto final de esta calibración y da una indicación del “brillo” de la escena en el visible, normalizado entre 0 y 100 %. F_{Ro} es el valor de factor de reflectancia para el mismo punto e instante de tiempo, pero en condiciones de cielo despejado, es decir, el brillo de fondo visto por el satélite.

Para cada condición de cielo, se deben ajustar los 4 parámetros $\{a, b, c, d\}$ utilizando medidas en tierra. La decisión sobre cuál es la condición de cielo en un sitio dado se realiza en base a la presencia de nubosidad en la imagen de satélite. Una vez ajustado los parámetros, el modelo sólo requiere información geométrica y satelital para su funcionamiento, por lo que puede ser utilizado sólo en base a la imagen del canal visible. Para el ajuste de los parámetros se utilizaron datos horarios de cinco estaciones de la RMCIS (SA, TT, LB, AR y RO) para el periodo comprendido entre los años 2010 y 2014.

Este modelo es la base de la segunda versión del Mapa Solar del Uruguay, actualmente en elaboración por el LES. La incertidumbre del modelo se ha estimado utilizando las medidas independientes proporcionadas por la red de UTE. El modelo presenta excelentes resultados para la región, siendo capaz de generar datos horarios, diarios y mensuales con una incertidumbre (RMS) de 13,2 %, 6,2 % y 4,0 % de la media, respectivamente. El desvío promedio (MDB) es de 1,5 %, 1,8 % y 1,4 % de la media, respectivamente, o sea, menor al 2 % en todas las escalas temporales. Este buen desempeño se debe a que la región de interés es relativamente uniforme, suavemente ondulada sin mayores accidentes geográficos y sin ocurrencia de eventos de nieve, y a que el modelo no pretende ser universal, sino que está específicamente ajustado para esta región. Para contextualizar estos resultados, el RMS 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 [1]. El mismo indicador para el modelo desarrollado en Uruguay es de 13 %, aunque con la limitante de ser un modelo que puede ser aplicado sólo en la región y no globalmente.

A modo de ejemplo, en las Figuras 2.3 y 2.4 se muestra la estimación de irradiación solar por satélite para la localidad de Salto con la estadística de 15 años que se utiliza este trabajo. En la Figura 2.3, debido a la cantidad de datos mostrados, sólo se puede apreciar la silueta del gráfico y no el detalle del ciclo diario. En la Figura 2.4 se muestran los acumulados diarios (en

MJ/m²) calculados a partir de la serie horaria. Utilizando esta herramienta satelital es posible generar series de este estilo para cualquier punto del país y la región.

Figura 2.3: Serie horaria de irradiación solar por satélite para Salto.

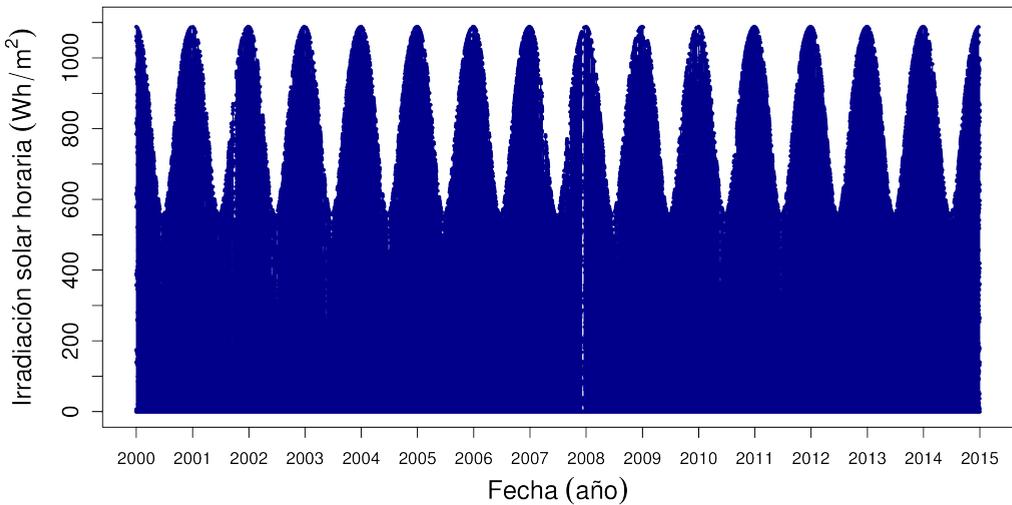
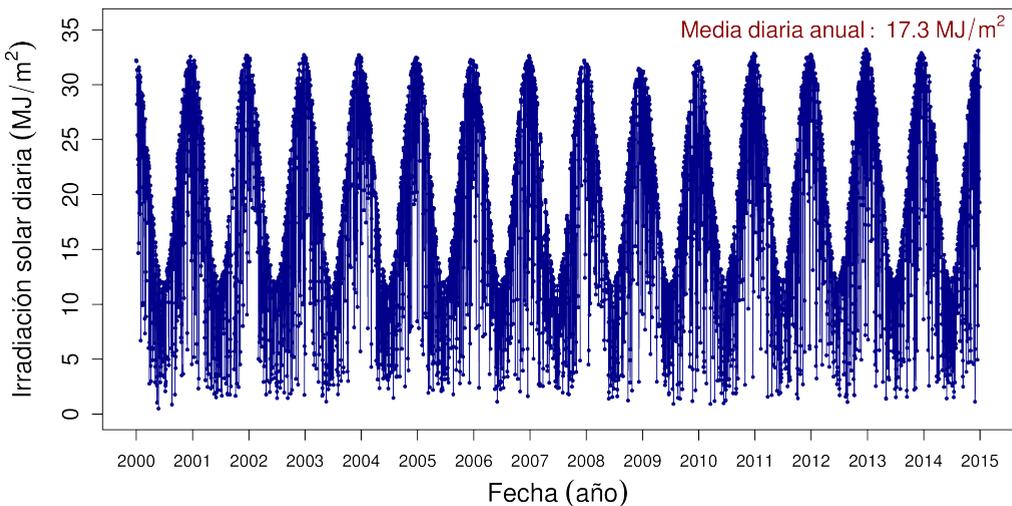


Figura 2.4: Serie diaria de irradiación solar por satélite para Salto.

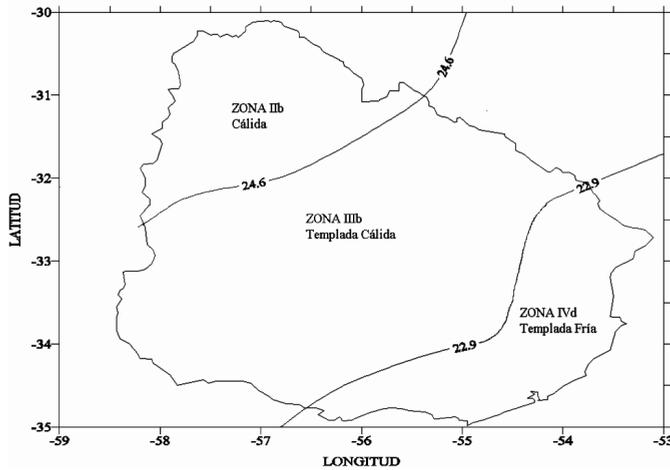


2.5. Selección de las localidades

En la norma UNIT 1026:1999 “Aislamiento térmico de edificios. Zonificación climática.” [34] se establecen para Uruguay tres zonas climáticas: (i) una zona cálida al Noroeste del país, (ii) una zona centro de clima templado-cálido y (iii) una zona costera oceánica al Sureste del país con clima templado-frío, como se muestra en la Figura 2.5. En este AMTUes buscamos

representar esta zonificación elaborando por lo menos un AMT para cada zona, de modo que las series típicas puedan ser utilizadas en el contexto de la normativa vigente en el país. El área metropolitana de la ciudad de Montevideo se trató por separado debido a que es la zona del país con mayor concentración de población.

Figura 2.5: Zonificación climática de Uruguay (adaptado de la norma UNIT 1026:1999).



Se inspeccionaron las series de datos existentes en el país para determinar en qué sitios la construcción de series típicas es posible. Se tuvo en consideración el objetivo guía de generar series representativas de las tres zonas climáticas y de la ciudad de Montevideo. A efectos de este trabajo, se toma como criterio que para elaborar un AMT que sea mínimamente representativo se debe contar con al menos de 10 años de datos. La irradiación solar no es restrictiva en este sentido debido a que se genera por satélite y no existen problemas de disponibilidad en el periodo 01/2000–12/2014. La variable viento se trata en forma especial y, dado que los registros horarios de largo plazo son escasos y que es una variables de interés secundario para la simulación de emprendimientos de energía solar, se relaja el criterio de 10 años. Por lo tanto, el proceso de selección de localidades que se describe en esta Sección busca relevar en qué localidades hay disponible medidas de largo plazo esencialmente completas de temperatura, humedad y presión, o se pueden componer un conjunto de datos completo a partir de interpolación o de integración de datos adquiridos en estaciones cercanas.

Las estaciones convencionales del INUMET requieren personal in-situ para registrar y reportar la información a la sede central. A lo largo de los últimos 15 años estas estaciones han tenido distintos regímenes de funcionamiento de acuerdo a la disponibilidad de personal para cubrir o no las 24 horas del día. Basado en el análisis de los datos disponibles, las series INUMET pueden separarse en tres categorías: (i) estaciones con datos esencialmente completos donde los pocos huecos pueden ser rellenados por interpolación, (ii) estaciones con datos parcialmente completos pero complementables con datos de estaciones INIA y (iii) estaciones con datos no completables o con estadística reducida. Estas tres categorías son las que aparecen

por separado en la Tabla 2.1 previamente discutida. Más información sobre los regímenes de operación de las estaciones convencionales del INUMET puede encontrarse en el Apéndice D. Allí se ilustra en forma gráfica los regímenes de funcionamiento de las estaciones INUMET a lo del periodo 2000–2014.

Fácilmente se puede observar que es posible generar un AMT para el área metropolitana de la ciudad de Montevideo. Cerca de Montevideo existen dos estaciones de medida, CA (Estación Carrasco, INUMET) y LB (Las Brujas, INIA), con estadística casi completa y cuyos registros se encuentran entre los mejores del país. Se integraron ambas fuentes de datos para la localidad de Montevideo y el resultado es el conjunto de datos más completo generado en este trabajo. Se utilizaron como base las medidas de temperatura, humedad, presión y viento registradas en CA (INUMET) a escala horaria, y los datos de LB (INIA) se utilizaron como relleno de los escasos huecos presentes.

Una situación similar se presenta en la localidad de Rivera, donde los registros INUMET de la estación RI están esencialmente completos y los pocos huecos presentes se pueden completar por interpolación, al no existir una estación INIA cercana. Para esta estación, las medidas de viento de INUMET se registran cada tres horas a una altura de 10 m por lo que se redujeron a escala horaria por interpolación. También se utilizaron las medidas horarias de viento de la estación BU de UTE (estación a menos de 20 km de RI) para generar, e incluir en este AMT, viento a 20 m (generado según el procedimiento explicado en la Subsección 2.2.4). Con estas precauciones, es posible elaborar series base para un AMT para Rivera.

Para el resto de las localidades del país la decisión es más compleja. La red de UTE no tiene medidas de largo plazo, por lo cual sus sitios no pueden ser utilizados en solitario como base para la confección de los AMT. De la red de UTE se utilizaron las medidas de viento para integrar a los conjuntos base de algunas localidades. En las localidades INUMET de Paso de los Toros, Florida, Punta del Este y Durazno sólo se dispone de 4 años de datos y no existe forma de complementarlos con datos de otras estaciones para alcanzar los 10 años, y por ello fueron descartadas. Para las localidades de Mercedes, Melo y Paysandú las series presentan un alto porcentaje de datos faltantes y no existen datos complementarios cercanos para completarlas. Tampoco son interpolables debido a que frecuentemente los huecos abarcan varias horas consecutivas (más de 8 horas) por ausencia de medidas nocturnas. Finalmente, en Artigas y Tacuarembó, existen 8 años de datos completos. Si bien los registros presentan alta completitud no alcanzan la meta mínima de 10 años de datos y también fueron descartados. Este análisis deja sólo 4 localidades a ser inspeccionadas: Salto, Colonia, Rocha y Treinta y Tres.

En Rocha no existe posibilidad de complementar los datos con medidas de otra estación. La decisión sobre si incluirla o no para la elaboración de un AMT radica en la posibilidad de interpolar las horas faltantes. El porcentaje de huecos en esta estación es de 13%. Los huecos son principalmente horas nocturnas y abarcan hasta 8 horas en algunos períodos de tiempo no muy extensos (ver Figura D.1.c). De las restantes candidatas Rocha es la única estación de la región Suroeste, por lo que se tomó la decisión de compromiso de interpolar los huecos nocturnos de Rocha hasta 8 horas, para poder recuperar estadística y elaborar el AMT. El

nivel de interpolación requerido no es alto y no se han detectado problemas en el AMT de esta localidad debido a ello.

En los restantes puntos del país la complementaridad INUMET-INIA puede ser aprovechada para minimizar los huecos en las series horarias. En Salto están las estaciones de SA y SM, en Treinta y Tres las estaciones TT y TM, y en Colonia las estaciones CO y ZU. En el caso de Salto, la complementaridad de los datos de ambas series de medidas es muy buena: los huecos de la serie INUMET se encuentran en el rango de fechas donde la serie INIA está disponible y el proceso de fusión resulta en un único conjunto de 15 años de datos esencialmente completo. Las localidades de Treinta y Tres y Colonia están en el límite y ambas son las únicas candidatas de la zona centro. El porcentaje de huecos de los datos INUMET y su distribución es similar para ambas localidades. En ambas existen huecos de hasta 8 horas durante algunos periodos de tiempo e incluso algunos de mayor duración. La diferencia entre ambas radica en dos puntos: (i) los datos INIA tienen mayor estadística en Colonia que en Treinta y Tres (8 años contra 5 años) y (ii) la estación de Colonia funcionó las 24 horas de día en los primeros años de este estudio, un periodo en el cual no hay complementariedad con datos INIA. Ambas afirmaciones pueden constatar observando las Tablas 2.1 y 2.2 y las Figuras D.1.e y D.1.g. En virtud de estas diferencias, se decidió elaborar el AMT para Colonia. Esta decisión prioriza que exista una mínima estadística de datos disponibles que aseguren la calidad del AMT frente a, por ejemplo, que Treinta y Tres es más representativa de la zona Centro que Colonia. Para ello se fusionan datos INUMET e INIA y se interpolan los huecos en forma similar al procedimiento utilizado para la localidad de Rocha. La única diferencia es que en este caso se debió hacer una interpolación de un alto porcentaje de los datos de presión. Se toleró este punto debido a que la presión no es una variable de alta importancia para la simulación de aplicaciones de energía solar.

En conclusión, las localidades seleccionadas para la elaboración de series típicas son las que se listan a continuación:

- Montevideo (zona templada-fría, Sur).
- Salto (zona cálida, Noroeste).
- Rivera (zona cálida, Noreste).
- Rocha (zona templada-fría, Sureste).
- Colonia (zona templada-cálida, Suroeste).

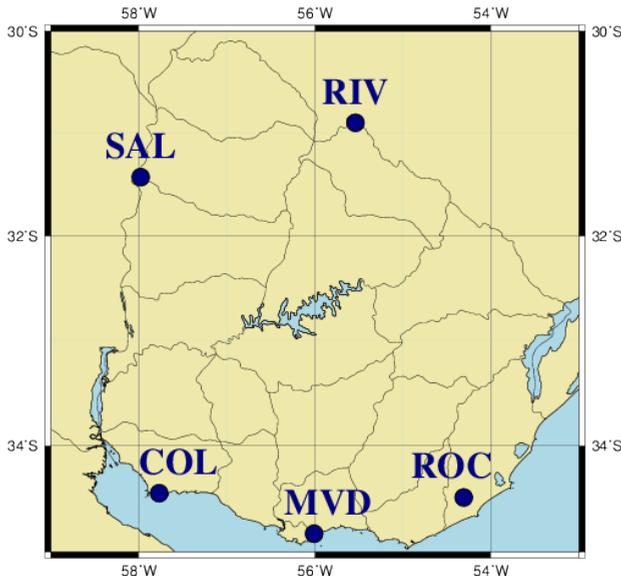
Este conjunto representa un compromiso entre las series de datos existentes y los requerimientos de base para elaborar series típicas. Se logra representar la costa oceánica en Rocha (zona Sureste), la costa Suroeste en Colonia (zona Centro) y la zona Norte en dos puntos, Este y Oeste, a través de Salto y Rivera respectivamente. Adicionalmente se dispone de un AMT específico para la localidad de Montevideo, lo cual es conveniente dada su mayor densidad de población. El AMT de cada localidad integra datos de estaciones cercanas entre sí y es representativo de una región geográfica más amplia a una estación puntual. Para establecer una

ubicación a cada localidad se tomó como referencia las estaciones INUMET, de donde se tomaron la mayor cantidad de datos medidos en tierra para este AMTUs. Además, los datos de irradiación solar por satélite fueron generados para estos sitios. En la Tabla 2.5 se brinda la latitud, longitud y altura para cada una de las localidades. Se muestra también el código con el cual se identificará cada sitio de ahora en adelante. En la Figura 2.6 se muestra la posición geográfica de cada localidad. Allí se puede apreciar que las localidades en donde se elaboró el AMTUs se encuentran distribuidas a lo largo del territorio nacional.

Tabla 2.5: Ubicación de las localidades del AMTUs. La latitud y la longitud están en grados y la altura está en metros sobre el nivel del mar.

| localidad | código | latitud | longitud | altura |
|------------|--------|---------|----------|--------|
| Montevideo | MVD | -34,83 | -56,01 | 33 m |
| Salto | SAL | -31,43 | -57,98 | 50 m |
| Rivera | RIV | -30,90 | -55,54 | 240 m |
| Rocha | ROC | -34,49 | -54,31 | 18 m |
| Colonia | COL | -34,45 | -57,77 | 20 m |

Figura 2.6: Ubicación de las localidades del AMTUs.



Conformación de las series de datos

En este Capítulo se describen los procedimientos utilizados para generar los conjuntos de datos base para la elaboración de los AMT. Se analiza si en las regiones donde hay más de un punto de medida es posible o no la integración de los datos en un único conjunto (Sección 3.1) y se describen las técnicas de interpolación utilizadas para el completado de las series. Las técnicas de interpolación utilizadas para datos de superficie y de satélite son diferentes, y se describen en las Secciones 3.2 y 3.3, respectivamente. En todos los casos, lo que se busca es generar un único conjunto de datos para cada localidad con la menor cantidad de huecos y la mayor estadística posible. Al final de este apartado, en la Sección 3.5, se brinda una descripción completa de cada conjunto de datos, indicando el porcentaje de completitud de cada variable y de la totalidad del conjunto y los porcentajes de completado por relleno e interpolación para cada variable por separado.

3.1. Integración de datos de superficie

Las medidas de estaciones cercanas pueden diferir significativamente dependiendo de las características del instrumento de medida, los procesos de medición o, simplemente, por la variabilidad espacial de la magnitud medida o su interacción con el entorno. Por este motivo, en este trabajo se utilizó un procedimiento de integración de datos más sofisticado que el simple rellenado de un conjunto con el otro. El procedimiento fue aplicado a las variables temperatura ambiente y humedad relativa cuyas medidas provenían de estaciones INUMET e INIA cercanas entre sí. Para el caso de la presión atmosférica no se aplicó, debido a que los datos de presión provienen del INUMET en su totalidad. La medida de viento es registrada a distintas alturas en cada sitio, lo cual agrega complejidad al proceso de integración. No se exploró en este trabajo la integración de datos de viento de distintas fuentes.

El primer paso consiste en analizar si es posible o no la integración, para lo cual las series de medidas de INUMET e INIA son inspeccionadas y comparadas entre sí. Si la integración es posible, se toma la serie temporal más completa como base (datos base) para ser complementada con los datos de la otra estación (datos de relleno). Sobre los datos de relleno se realiza un tratamiento que busca asegurar que su estadística de largo plazo sea similar a la de los datos base. El procedimiento se basa en comparar la Función de Probabilidad Acumulada de ambos sets de datos (comúnmente denominada CDF, del inglés Cumulative Distribution Function). Los datos de relleno son modificados para que su CDF sea lo más parecida posible a la CDF de los datos base. Este procedimiento es conocido como CDF-matching [35].

Denominamos y_1 y $F_1(y)$ a los datos base y su CDF, e y_2 y $F_2(y)$ a los datos de relleno y su CDF. En base a las series de datos y_1 e y_2 se calculan las CDFs de la forma que se indica en la Ec. (3.1).

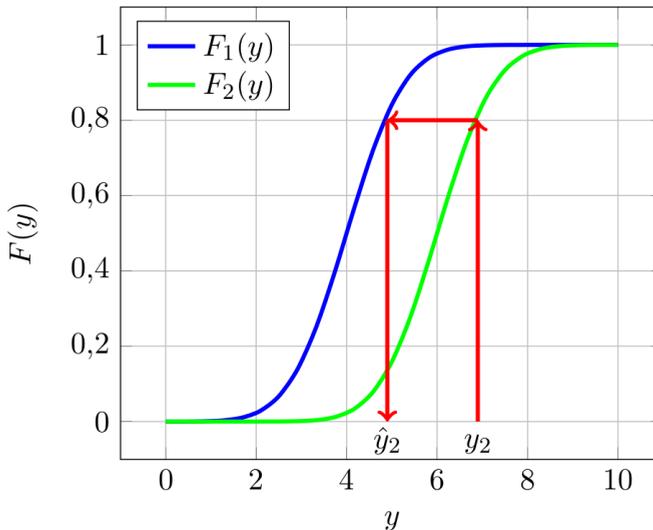
$$F_1(y) = \text{Prob}(y \leq y_1) = \frac{1}{N_1} \sum_{l=1}^{N_1} \Theta(y - y_1(l))$$

$$F_2(y) = \text{Prob}(y \leq y_2) = \frac{1}{N_2} \sum_{l=1}^{N_2} \Theta(y - y_2(l))$$
(3.1)

En la Ec. (3.1) N_1 y N_2 son los tamaños de los conjuntos de datos y_1 e y_2 respectivamente, y $\Theta(y)$ la función escalón de Heavyside que vale ‘0’ si $y < 0$ y vale ‘1’ si $y \geq 0$. Las CDFs se calculan usando la mayor estadística posible de y_1 e y_2 , pero cuidando de que se trate de años enteros de datos. Esto es importante para no introducir sesgos en la estadística por considerar conjuntos de datos parciales. Aplicando la Ec. (3.2) se puede transformar los datos y_2 en un nuevo set de datos \hat{y}_2 cuya CDF está ajustada a la CDF de los datos base ($F_1(y)$). En la Figura 3.1 se muestra en forma gráfica la operación de la Ec. (3.2).

$$\hat{y}_2 = F_1^{-1} \{F_2(y_2)\}$$
(3.2)

Figura 3.1: Procedimiento para el ajuste de los datos de relleno basado en el ajuste de su CDF a la CDF de los datos de base (CDF-matching).



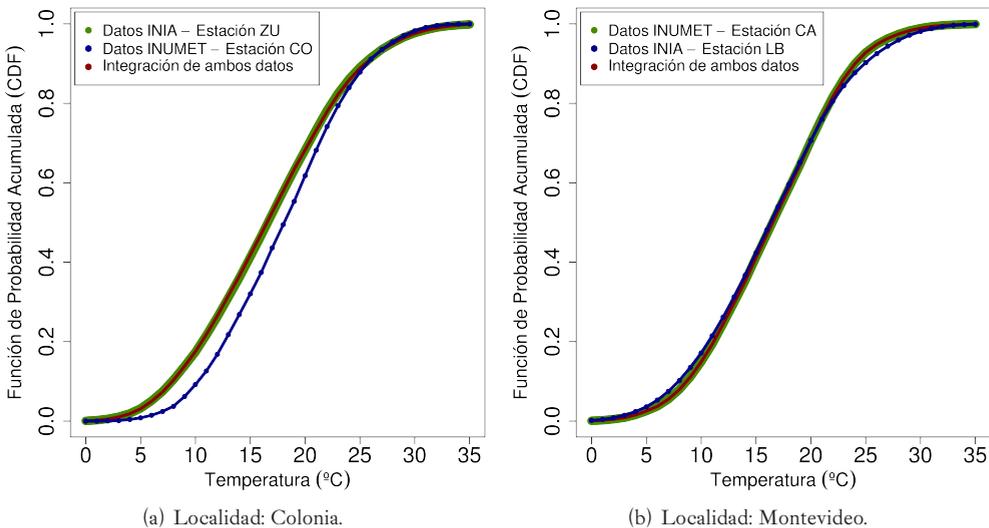
A través de este procedimiento los datos de relleno son adaptados. Su aplicación se debe verificar para cada caso en particular. A través de este procedimiento se asegura que, en el largo plazo, los datos base y los datos de relleno son estadísticamente similares y se pueden sustituir uno por otro sin afectar la estadística.

Las localidades donde se puede aplicar este procedimiento se listan en la Tabla 3.1, donde se indica qué estaciones se integran para cada localidad y la distancia entre ambas. El proceso es especialmente importante para las localidades de Salto y Colonia, donde el relleno por este mecanismo es del orden del 20 %. Para estas localidades, el AMT se pudo construir sólo debido a la existencia de las dos series de datos. Montevideo es la localidad donde las estaciones a integrar están más distantes entre sí, pero el efecto de la integración en este caso es prácticamente despreciable dado que el porcentaje de relleno es menor al 1 %. En la Figura 3.2, se muestra a modo de ejemplo, la corrección de CDF aplicada a las localidades de Montevideo y Colonia. Se puede ver que en el caso de Colonia la corrección es importante. En cambio, para Montevideo la corrección es pequeña. En los próximos apartados se presta especial atención a este proceso de integración para cada localidad por separado.

Tabla 3.1: Detalle de las localidades para la integración de datos.

| localidad | estación base | estación relleno | distancia |
|------------|-----------------|--------------------|-----------|
| Montevideo | CA (Carrasco) | LB (Las Brujas) | 35 km |
| Salto | SM (Aeropuerto) | SA (Salto Grande) | 20 km |
| Colonia | CO (Colonia) | ZU (La Estanzuela) | 15 km |

Figura 3.2: Ejemplo de integración de datos de temperatura en base a sus CDFs. La escala del eje horizontal no recorre todo el rango de las medidas de temperatura para una mejor visualización de las diferentes CDFs.

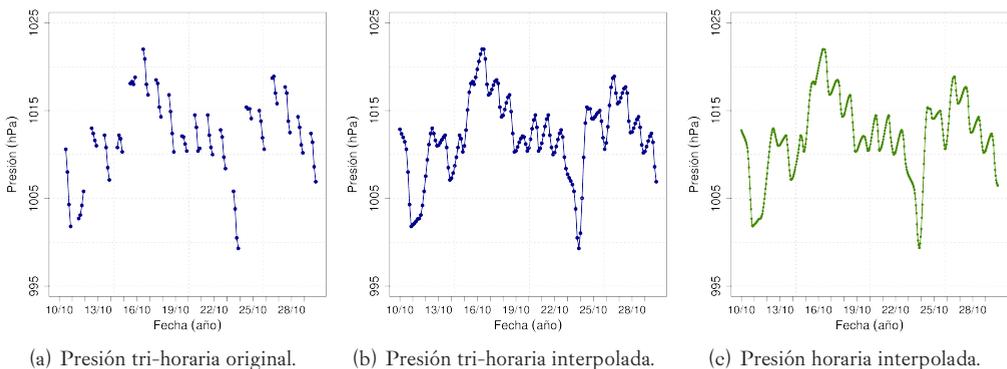


3.2. Interpolación de datos registrados en tierra

La interpolación de horas faltantes para los datos de superficie se realizó usando splines cúbicos, lo cual asegura la coherencia temporal de la serie. En caso de que se trate de una estación donde haya complementariedad entre datos INUMET-INIA, primero se realiza el relleno por complementariedad y luego, los huecos que persisten se completan por interpolación. Para las estaciones donde hay mayor disponibilidad de datos (Montevideo, Salto y Rivera) se interpolaron hasta 2 horas consecutivas de temperatura del aire ambiente y humedad relativa. Estas son las variables de mayor importancia para este AMTUEs, luego de la irradiación solar. En cambio, en las estaciones de Rocha y Colonia fue necesario un mayor grado de interpolación para lograr una serie de datos utilizable: en estas estaciones se interpolaron hasta 8 horas en temperatura y humedad. Incluso así, para estas dos estaciones algunos periodos de tiempo no se han podido recuperar porque existían huecos sistemáticos de 9 horas o más. En estas estaciones no se alcanzó el objetivo de 15 años pero sí se llegó a superar los 10 años.

Los datos de presión se disponen principalmente a escala tri-horaria, con algunos cortos periodos de datos horarios. La única excepción es la localidad de Montevideo donde se cuenta con datos de presión a escala horaria. Debido a esto, la mayoría de los datos horarios de presión atmosférica se obtuvieron a partir de las series tri-horarias disponibles. Primero se interpolan las series tri-horarias para completar huecos tri-horarios y luego, a partir de ella, se derivaron los datos horarios. Ambos procesos de interpolación se realizaron usando splines cúbicos. Si existían datos horarios para la localidad, aún parciales, se integraron a la serie horaria. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de interpolación de presión atmosférica tri-horaria y horaria donde se muestra que este proceso es coherente para la variabilidad de esta magnitud. Se realizó el mismo procedimiento para la interpolación de las medidas tri-horarias de velocidad y dirección de viento del INUMET. Para el caso de los datos horarios de viento aportados por UTE e INIA, se realizó una interpolación horaria también por splines cúbicos.

Figura 3.3: Ejemplo de interpolación de datos de presión atmosférica. Se muestra un periodo de 20 días para la estación SM (Salto, año 2009).



La cantidad máxima de horas consecutivas a interpolar depende de cada sitio de medida y de si se disponían de datos horarios o tri-horarios. La información sobre la interpolación de todas las variables se encuentra resumida en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Máximos intervalos de interpolación para cada variable y cada serie de medida registrada en tierra.

| Localidad | Montevideo | Salto | Rivera | Rocha | Colonia |
|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|
| temperatura | 2 horas | 2 horas | 2 horas | 8 horas | 8 horas |
| humedad relativa | 2 horas | 2 horas | 2 horas | 8 horas | 8 horas |
| presión atm. | 6 horas | 4 tri-horas | 4 tri-horas | 4 tri-horas | 5 tri-horas |
| viento | 3 horas (CA) 3 horas (MM) | 6 horas (CR) 6 horas (SS) | 4 tri-horas (RI) 3 horas (BU) | 4 tri-horas (RO) 3 horas (JI) | 3 horas (RM) – |

En la Sección 3.5 se presentan Tablas con los porcentajes de datos base, rellenos e interpolados. Allí se puede observar que el proceso de interpolación afecta una pequeña porción de los datos. Para las variables de temperatura ambiente, humedad relativa y viento los niveles de interpolación están en el rango del 0-10 %. La interpolación de presión atmosférica es un poco mayor y se encuentra en el rango del 0-20 % para la mayoría de las estaciones. Para esta variable, el único caso de alta interpolación se da en la localidad de Colonia, donde se debió interpolar hasta un $\simeq 40\%$. Para este caso se toleró este nivel de interpolación en virtud de que la presión es una variable secundaria y que interesa elaborar el AMT para la localidad de Colonia, que es la única representante de la zona centro del territorio. No se detectó ninguna afectación en la series típicas elaboradas debido a la interpolación o relleno.

3.3. Interpolación y relleno de datos de satélite

La cadencia normal de las imágenes del satélite GOES-East es de dos imágenes por hora. Sin embargo, existen muchas imágenes faltantes. El satélite es administrado por EEUU y cuando ocurren eventos de tiempo severo en la zona del Caribe se destina casi todo el tiempo del satélite para su monitoreo. Esto resulta en imágenes faltantes para Sudamérica, especialmente durante la temporada anual de huracanes en el Caribe. Si bien desde agosto de 2014 el problema está parcialmente solucionado, durante varios años la NOAA sólo aseguraba imágenes tri-horarias ante tales situaciones. Se debe notar que este no es un problema de Uruguay o del banco de imágenes de LES, sino una situación que afecta a todo el continente sudamericano.

La situación más común es que haya huecos de hasta dos horas en las series temporales de irradiación solar por satélite. Utilizando el criterio de interpolar hasta dos horas consecutivas, gran parte de las series temporales son recuperables. Las medidas en tierra disponibles se usan también para el completado, por lo que se utiliza un criterio jerárquico para este proceso. Previo a interpolar las horas faltantes, se completan los huecos que sea posible con los datos de irradiación solar registrados por la RMCIS del LES y, luego, con los huecos que persisten, se aplica el procedimiento de interpolación.

La técnica de interpolación utilizada para irradiación solar es distinta a la que se utilizó para las demás variables debido a que se intenta aprovechar las particularidades de la radiación solar. Por ejemplo, en ausencia de nubosidad, la radiación solar es predecible con muy baja incertidumbre. Más aún, para condiciones de nubosidad constante, es posible elaborar una predicción de irradiación solar horaria certera en base al índice de claridad k_T . El índice de claridad se define como el cociente entre la irradiación global en plano horizontal (I_h) y la irradiación en plano horizontal en el tope de la atmósfera (I_{oh}). A escala horaria, su cálculo es de la forma:

$$k_T = \frac{I_h}{I_{oh}} = \frac{I_h}{I_{SC} F_n \cos(\theta_z)}. \quad (3.3)$$

Las magnitudes en esta expresión ya fueron definidas para la Ec. (2.2). k_T es una magnitud adimensional que da una indicación indirecta de la nubosidad: si k_T es bajo indica la presencia de nubosidad, en cambio, si k_T tiene un valor alto indica cielo despejado. En condiciones de cielo despejado, dependiendo de la transmitancia de la atmósfera, k_T a escala horaria toma un valores máximos entre 0,75 y 0,80.

La interpolación de irradiación solar se realiza a través del índice de claridad debido a que éste presenta menos dependencia geométrica. Se utiliza interpolación lineal para k_T , que es buena en condiciones de cielo despejado y de nubosidad constante o lentamente variable. La irradiación faltante es calculada multiplicando el valor interpolado de k_T por el correspondiente valor de I_{oh} . Como se puede apreciar en las Tablas de la Sección 3.5 el proceso de interpolación de irradiación solar afecta a menos del 5 % de los datos. El porcentaje es el mismo en todas las localidades debido a que las imágenes faltantes afectan a todo el territorio. En la Figura 3.4 se muestran, a modo de ejemplo, dos meses de datos de irradiación solar horaria por satélite, para la localidad de Montevideo. Se muestra un mes de verano y un mes de invierno (con la misma escala), donde se puede observar la diferencia de irradiación entre dichos meses.

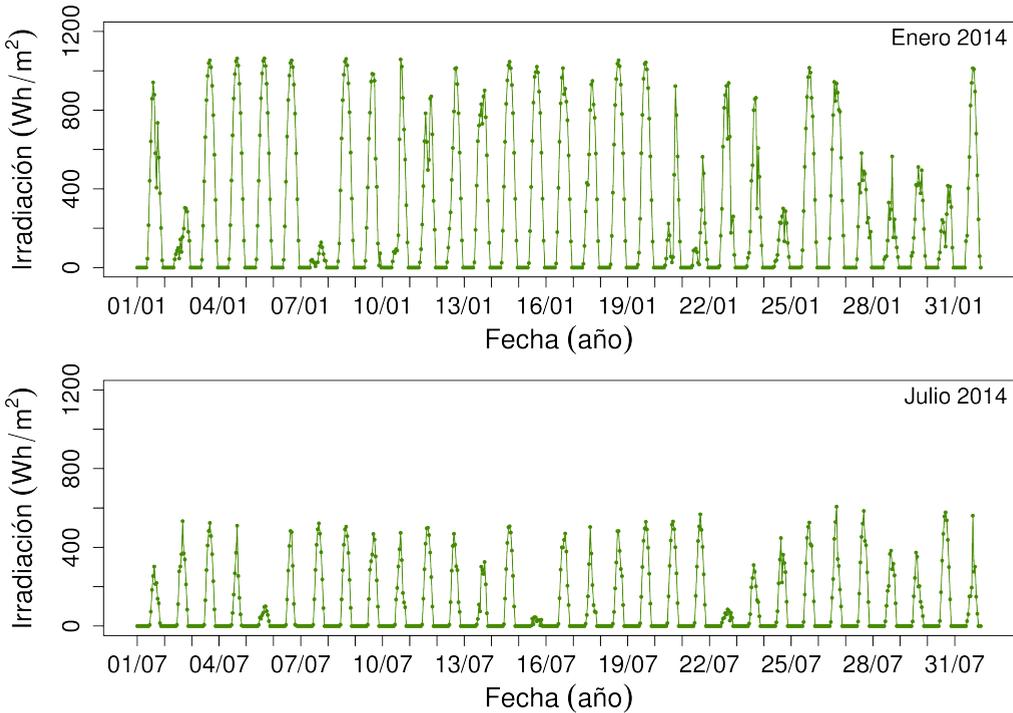
3.4. Análisis de datos

En esta Sección se presenta un análisis de los datos disponibles para cada localidad poniendo especial foco en la forma en que se generaron los conjuntos de datos base para desarrollar el AMTUs. Se presenta también un desglose detallado de los datos utilizados y los procesamientos realizados a cada variable y para localidad por separado.

3.4.1. Análisis de datos de Montevideo

Montevideo es el punto del país donde hay mayor disponibilidad de datos meteorológicos. Para esta localidad se inspeccionaron los datos medidos en la estación Carrasco (CA) del INUMET y en la estación Las Brujas (LB) del INIA. Las series de medidas disponibles en estos sitios presentan pocos huecos. Esto es bueno, especialmente teniendo en cuenta que son los puntos de medida a integrar que se encuentran a mayor distancia entre sí (ver Tabla 3.1). Las medidas de temperatura y humedad en la estación base (CA del INUMET) están prácticamente completas (presentan un 0,4 % de huecos). Estos pocos huecos se pudieron completar en su mayoría con los procedimientos de relleno e interpolación descritos en las Secciones 3.1 y 3.2

Figura 3.4: Ejemplo de irradiación solar horaria estimada por satélite para Montevideo.



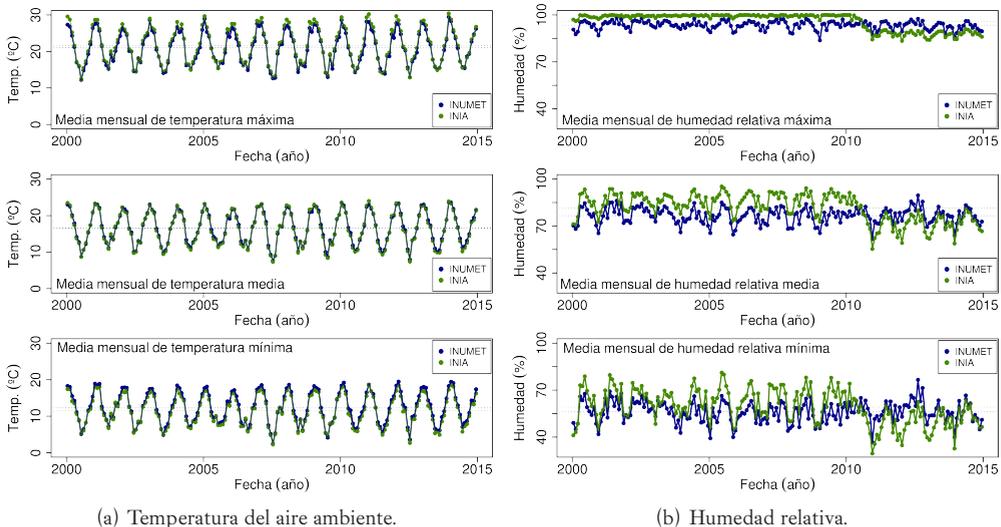
respectivamente. Las medidas de presión atmosférica y de viento utilizadas fueron registradas en la estación CA del INUMET. La medida de viento es tomada a 10 m de altura según las indicaciones de la WMO.

Al inspeccionar los datos de temperatura de las estaciones CA y LB puede concluirse que ambas medidas son consistentes entre sí. En la Figura 3.5.a se muestran las medias mensuales de temperatura máxima, mínima y media (diaria) de las dos estaciones. Considerando los 15 años de medidas en ambas estaciones, se obtiene valores mensuales y de largo plazo (promedio de 15 años) similares. Se concluye que los datos de temperatura de LB pueden ser utilizados para rellenar los escasos huecos de la serie de CA. Esta integración resulta en un dataset de temperatura 100% completo con sólo un 0,4% de relleno utilizando los datos de LB y sin necesidad de recurrir a procedimientos de interpolación en la serie temporal.

En cambio, los datos de humedad relativa de ambas localidades presentan diferencias significativas a lo largo de los 15 años, como se puede apreciar en la Figura 3.5.b. Se puede ver que la medida de Las Brujas presenta un cambio significativo de comportamiento a mediados de 2010, pasando de estar sistemáticamente por encima de la medida de CA a estar por debajo. La diferencia abrupta de comportamiento en la serie LB puede deberse a una re-ubicación o cambio del instrumento de medida, pero es claramente anómala. Debido a esto, para la humedad relativa en Montevideo se usaron sólo los datos de humedad de la estación CA de INUMET, sin utilizar los datos de LB como relleno. La interpolación aplicada a la serie CA fue de hasta

dos horas consecutivas. Con este procedimiento se puede interpolar hasta un 0,2% de los datos logrando para Montevideo una serie de humedad relativa casi completa (al 99,8%).

Figura 3.5: Observación de los datos de temperatura ambiente y humedad relativa a escala mensual. Se muestran las medias mensuales de la máxima diaria (arriba), la mínima diaria (abajo) y la media diaria (centro). Comparación de los datos de LB y CA (Montevideo).



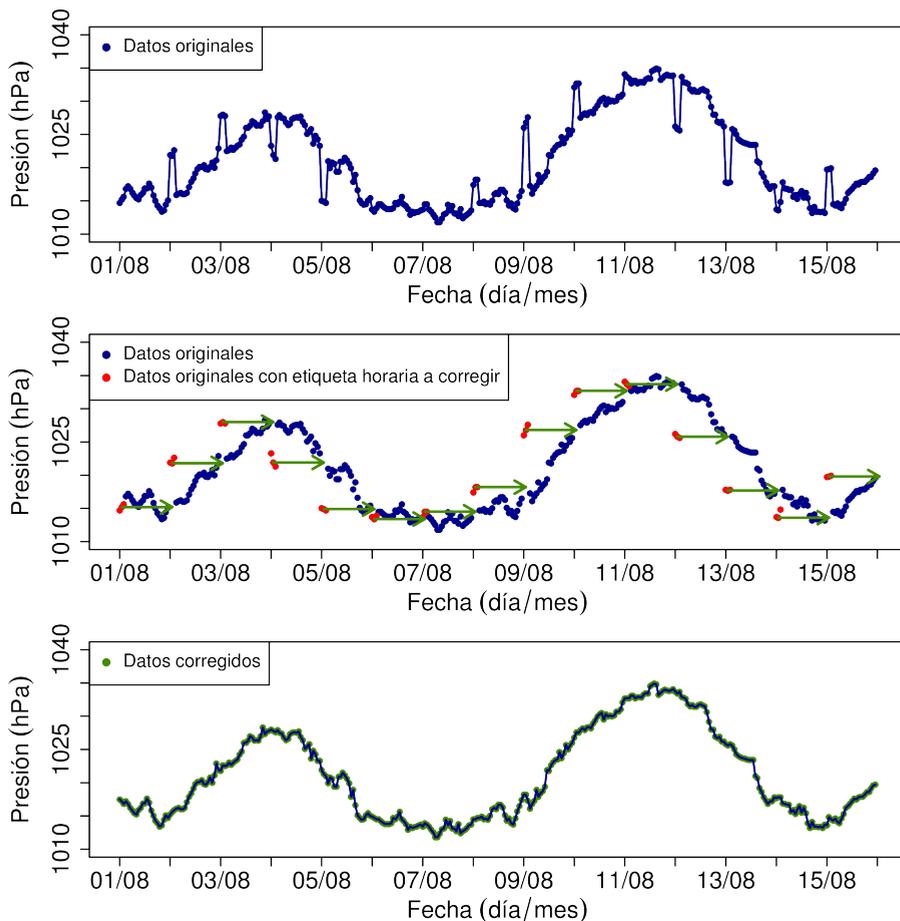
(a) Temperatura del aire ambiente.

(b) Humedad relativa.

Montevideo es el único caso en que se dispone de registros de presión atmosférica a escala horaria, aportados por el INUMET. La serie presenta muy poca cantidad de huecos (0,6%) que fueron parcialmente reconstruidos por interpolación alcanzando un dataset de presión completo al 99,7%. Este porcentaje de huecos se obtiene luego de arreglar un problema encontrado en la etiqueta horaria durante el periodo 01/01/2000 al 31/12/2009. En la parte superior de la Figura 3.6, se muestra un ejemplo de 15 días de la serie original de presión. Un fenómeno atípico ocurre sistemáticamente en las 3 horas posteriores a las 00:00hs UTC de cada día. Inicialmente se creyó que se trataba de una anomalía en las medidas, pero luego se encontró que era un problema de corrimiento sistemático de la etiqueta horaria en las primeras horas del día. En la segunda figura se ilustra lo que está ocurriendo en la serie temporal. De forma visual se muestra que existe un corrimiento de un día de las primeras tres muestras de cada día indicados por las flechas en rojo. Al detectar y corregir este fenómeno, se obtiene la serie temporal mostrada en el panel inferior de la Figura 3.6, donde puede observarse que los fenómenos atípicos han desaparecido y la serie temporal luce normal.

Los principales datos de viento utilizados para Montevideo son los de la estación CA del INUMET. Se trata de una medida de viento a 10 m de altura que no presenta particularidades. En la Figura 3.7.a se puede observar la Rosa de los Vientos para estas medidas. La dirección de viento es el ángulo “desde donde sopla” el viento, que es el opuesto al del vector velocidad. Es posible que estén levemente afectadas por el entorno de la medida en las direcciones Norte y

Figura 3.6: Corrección de la etiqueta horaria de la serie de presión para Montevideo.



Sureste, pero son datos de buena calidad para los propósitos de este trabajo. Luego de una interpolación del 4,6 % se obtiene un conjunto completo al 95,2 %. La medida se extiende durante los 15 años considerados en este trabajo lo que coloca a esta serie de viento como la de mayor estadística de las que se utilizaron para este trabajo. Se incluyen, también para MVD, datos de viento transportados a 20 m según el procedimiento descrito en la Subsección 2.2.4 a partir de las medidas a 64 m y 81 m de la estación de MM de UTE. La Rosa de los vientos de los datos transportados se muestra en la Figura 3.7.b. La distancia de la estación MM a la estación CA es similar a la de la estación CR a SA (≈ 40 km) y es tolerable para fines de este trabajo, donde el foco no está en la variable viento. Esta serie tiene una estadística de 3 años y medio y una completitud alta de 99,5 %. La interpolación aplicada fue baja (0,2 %). El AMT de Montevideo cuenta entonces con dos variables de viento a distintas alturas.

Finalmente, los 15 años de datos de irradiación solar por satélite se completaron en forma jerárquica, utilizando en primera instancia datos los datos medidos por el LES en la estación

LB y, en segunda instancia, aplicando el procedimiento de interpolación detallado en la Sección 3.3. De esto se obtiene una serie de irradiación horaria solar completa al 99,4% para Montevideo. En la Figura 3.8 se muestran, a modo de ejemplo, la medias mensuales de esta serie. La dependencia estacional es correcta y los valores son coherentes entre sí. El modelo satelital tiene una incertidumbre del 4% para las medias mensuales [36]. Se incluye en el gráfico una indicación del promedio anual histórico para la localidad en base a estos estimativos.

Figura 3.7: Rosa de los vientos para las medidas utilizadas para la localidad de Montevideo.

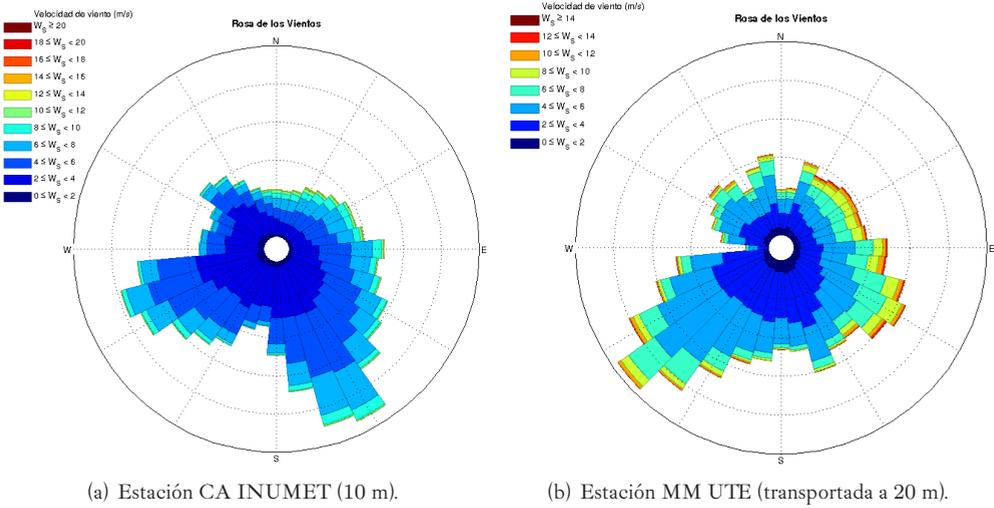
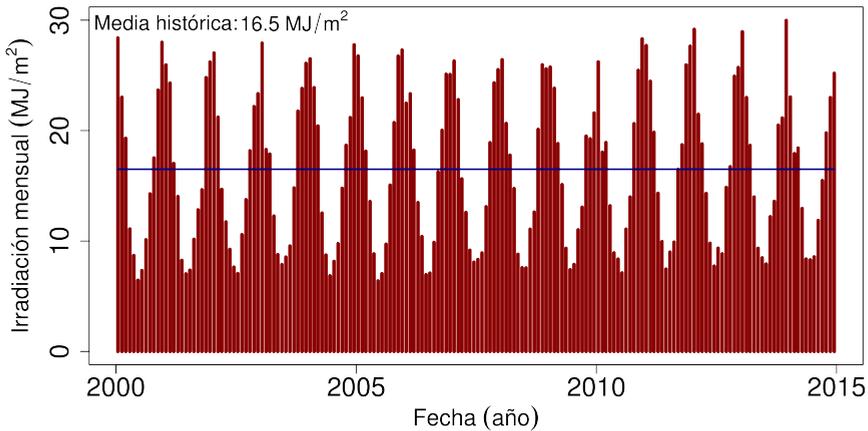


Figura 3.8: Medias mensuales de irradiación diaria para los 15 años de estimados por satélite para la localidad de Montevideo. Se indica con una línea azul el promedio histórico.

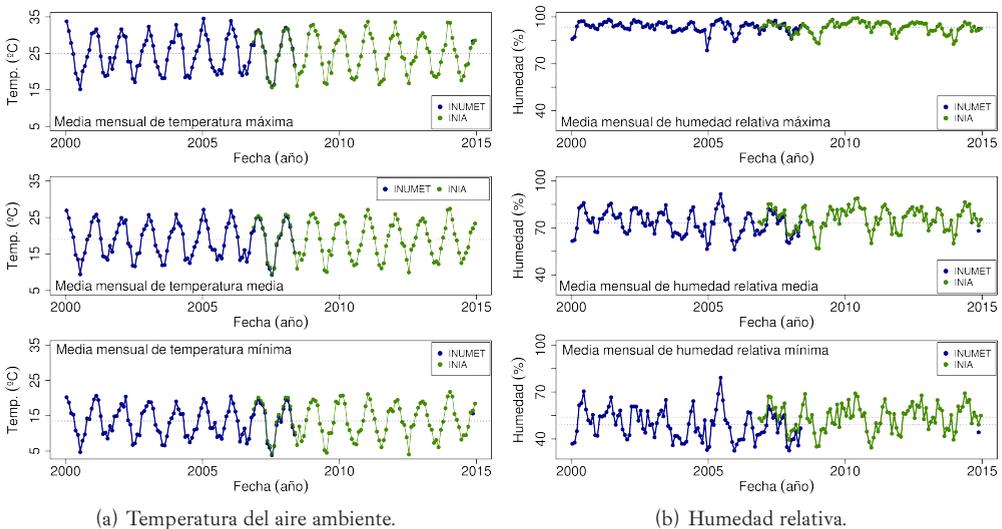


3.4.2. Análisis de datos de Salto

El conjunto de datos para Salto incluye las medidas de varias estaciones. Se utilizaron datos de la estación SM del INUMET, de las estaciones SA y SS del INIA, y de la estación CR de UTE. Los datos de temperatura ambiente y humedad relativa corresponden a las estaciones SA y SM. La medida de presión corresponde a la estación SM. En esta localidad se incluyeron dos conjuntos de datos de viento: a 2 metros medidos en la estación SS y a 20 metros convertidos a partir de los datos medidos en la estación CR.

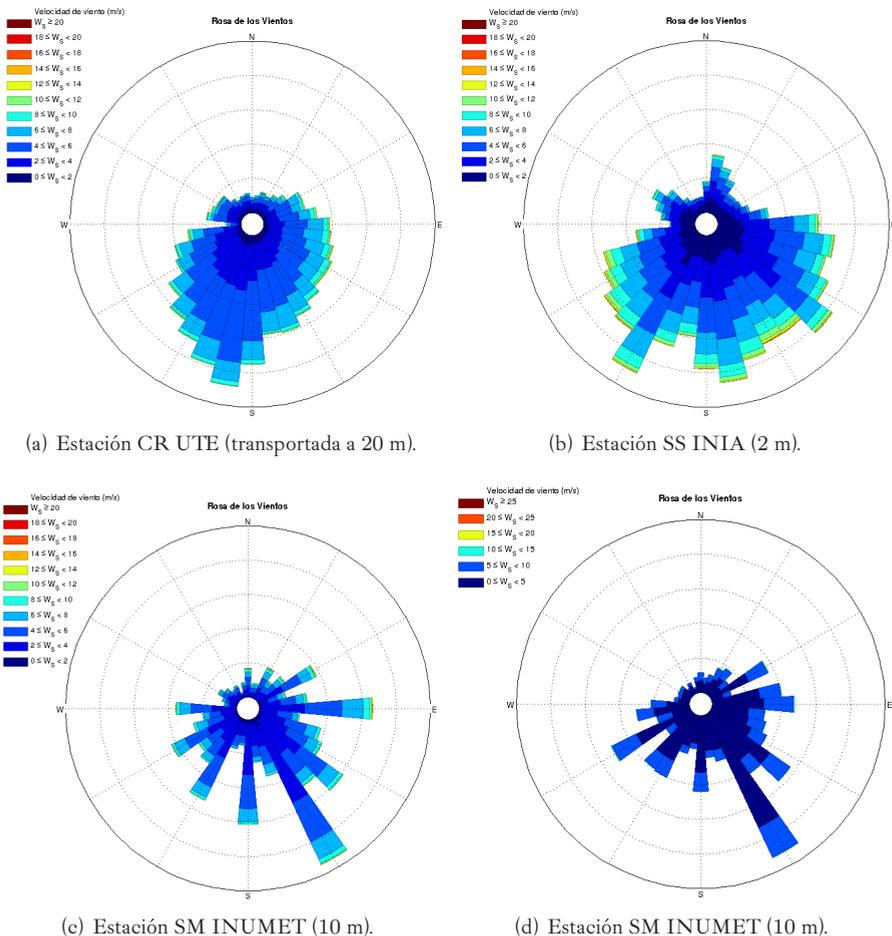
La estación SM del INUMET funcionó registrando datos las 24 horas del día durante el periodo 03/01/2000 al 31/05/2008. Esto significa que a partir del 01/06/2008 existen huecos sistemáticos en la serie SM. Con esta situación, los datos de la estación SA del INIA resultan fundamentales para complementar el conjunto. Ambas series de medida son complementarias en el tiempo, como se puede apreciar en la Figura 3.9. Allí se muestra el promedio mensual de la máxima diaria, la mínima diaria y la media diaria de temperatura y humedad, y se puede observar que el final de la serie completa del INUMET coincide aproximadamente con el inicio de los datos INIA. No se observan grandes diferencias entre ambos conjuntos de datos, por lo que se utilizaron ambos. Dada esta complementariedad temporal el procedimiento de integración explicado en la Sección 3.1 es importante en este caso. La construcción de un AMT en Salto sólo fue posible por la existencia de medidas complementarias en ambas estaciones. Para la presión atmosférica se interpolaron los valores horarios a partir de las medidas tri-horaria de SM (ver Sección 3.2).

Figura 3.9: Observación de los datos de temperatura ambiente y humedad relativa a escala mensual. Se muestran las medias mensuales de la máxima, mínima y media diaria. Comparación de los datos de SA y SM (Salto).



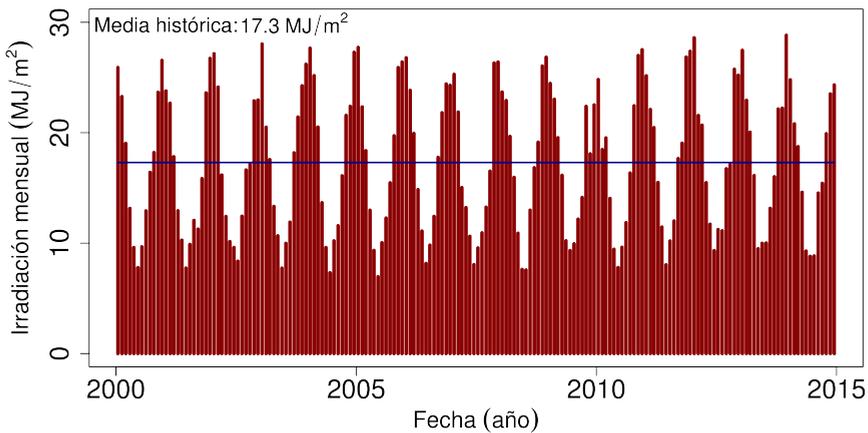
Las fuentes de datos de viento disponibles para la localidad de Salto son tres: la estación SM del INUMET (viento a 10 m), la estación CR de UTE (viento a alturas mayores a 60 m), y la estación SS del INIA (viento a 2 m). En el caso de los datos de CR se utilizaron los datos medidos a 60 m y 80 m para calcular valores de viento a 20 m. Se inspeccionaron los datos horarios de estas estaciones para elegir los datasets a usar. En la Figura 3.10 se muestra la Rosa de los Vientos para cada sitio de medida. Se pueden observar algunos artificios en la serie de SM, por los cuales esta serie fue descartada. La serie de CR es una medida que no presenta mayores anomalías bajo inspección visual. La serie de SS muestra cierto efecto del entorno de la medida, que es aceptable para este trabajo y es esperable para una medida a solo 2 m de altura, dado que es más afectada por la rugosidad y configuración del entorno. Se decidió incluir en el AMTUES los 3 años de medidas de la estación CR (a 20 m de altura) y los 10 años de medidas de la estación SS (a 2 m de altura), por lo que en esta estación también se dispone de dos series de viento a distintas alturas en el AMTUES.

Figura 3.10: Rosa de los vientos para las medidas inspeccionadas para la localidad de Salto.



Los datos de irradiación solar generados por satélite fueron completados en forma jerárquica, utilizando primero los datos medidos por el LES en la estación SA (INIA) para el periodo 06/2010 al 12/2014 y luego procediendo a interpolar. En ese periodo, la operación de relleno con datos de tierra completa la serie y no se requirió interpolación. La interpolación aplica al resto del periodo hasta el 01/2000 inclusive. Los porcentajes de interpolación y relleno para esta serie fueron de 1,6 % y 3,7 % respectivamente. En la Figura 3.11 se muestran los promedios mensuales y el promedio histórico para esta localidad.

Figura 3.11: Medias mensuales de irradiación diaria para los 15 años de datos de la localidad de Salto. Se indica con una línea azul el promedio histórico.



3.4.3. Análisis de datos de Rivera

Rivera es un punto del país donde existen datos de buena calidad y completitud. Para esta localidad los datos utilizados provienen de la estación RI del INUMET y de la estación BU de UTE. Los registros horarios de temperatura y humedad relativa en RI están prácticamente completos para el período 01/2000 al 12/2014. Este AMT utiliza información de viento a 10 m registrados en RI y se generaron a 20 m para la estación BU a partir de las medidas disponible. En la Tabla 3.6 se pueden apreciar los bajos niveles de interpolación requeridos.

No se utilizaron medidas en tierra de irradiación solar para complementar el conjunto de valores estimados por satélite. Sólo se aplicó interpolación de hasta dos horas consecutivas para completar el conjunto. En la Figura 3.12 se muestran los promedios mensuales e históricos de irradiación solar diaria estimada por satélite para Rivera.

Para esta ubicación existen registros horarios de presión atmosférica y viento de INUMET desde abril de 2010. Para completar la estadística se utilizaron registros tri-horarios (también de INUMET) de estas variables, complementando los datos horarios disponibles con la interpolación horaria de los datos tri-horarios. En la estación BU se registran a escala 10-minutal datos de viento desde el 04/2010. Se utilizaron los 4 años y medio de estas medidas para generar los datos de viento a 20 m a partir de las medidas a 28 m y 66 m. En la Figura 3.13 se muestra la Rosa de los Vientos para los dos conjuntos de datos de viento. No se aprecian

Figura 3.12: Medias mensuales de irradiación diaria para los 15 años de datos de la localidad de Rivera. Se indica con una línea azul el promedio histórico.

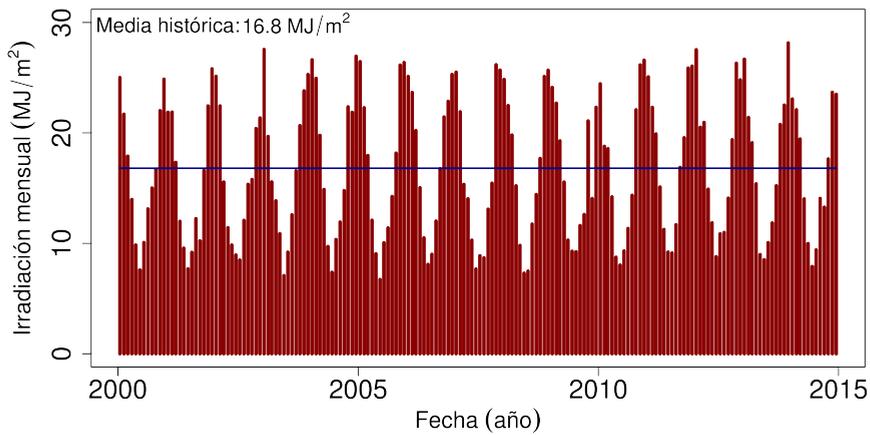
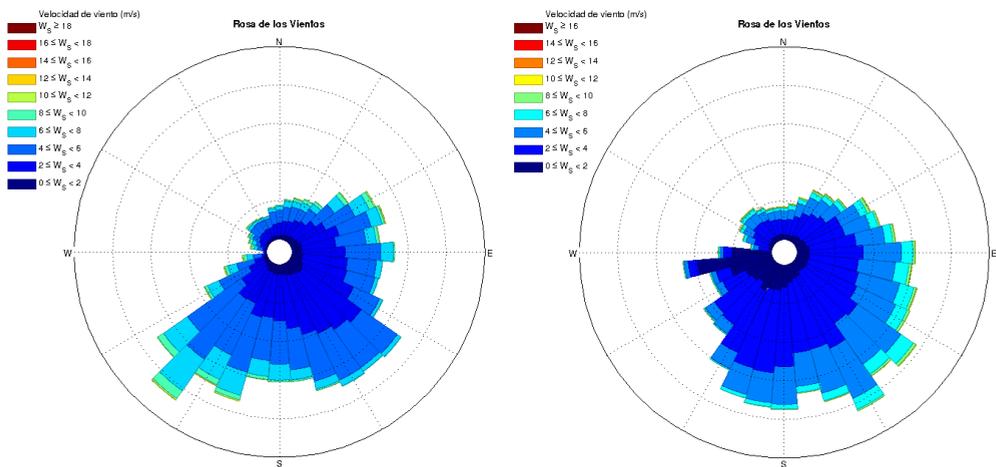


Figura 3.13: Rosa de los vientos para la localidad de Rivera.



(a) Estación BU UTE (transp. a 20 m). Medida horaria.

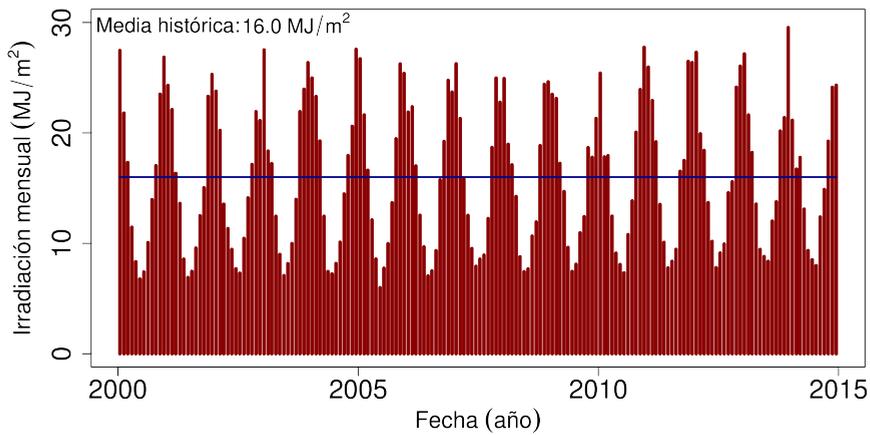
(b) Estación RI INUMET (10 m). Medida horaria.

artificios o anomalías que lleven a excluir alguna de estas series del AMT para Rivera, y por ello se incluyen dos variables de viento a distintas alturas para esta localidad.

3.4.4. Análisis de datos de Rocha

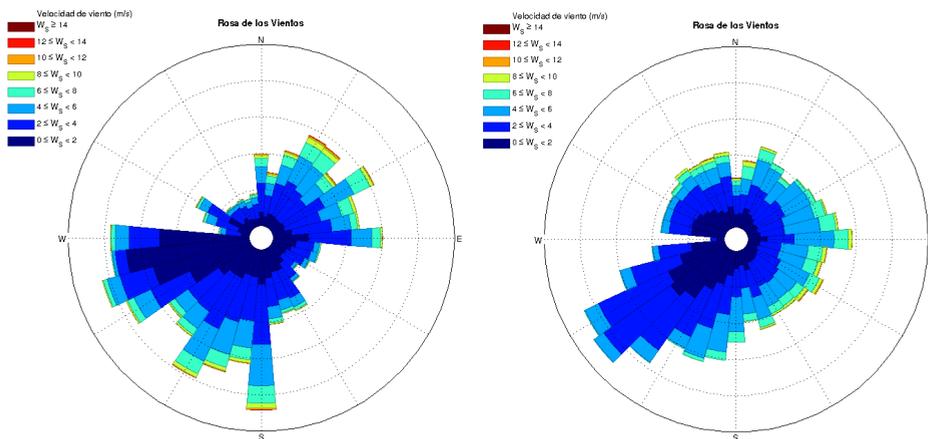
Rocha es una localidad representativa de la costa oceánica (Sureste del territorio). Para esta localidad no se dispone de datos INIA. Se utilizaron los datos INUMET para las variables temperatura, humedad, presión y viento a 10 m. Los datos de irradiación horaria por satélite fueron primero completados con datos de la estación RO del LES y luego los huecos restantes fueron interpolados. En la Figura 3.14 se muestran los valores mensuales y el promedio histórico para estos datos de irradiación.

Figura 3.14: Medias mensuales de irradiación diaria para los 15 años de datos de la localidad de Rocha. Se indica con una línea azul el promedio histórico.



La medida INUMET de viento para Rocha está disponible a escala horaria desde el 01/2010 y a escala tri-horaria para el periodo anterior, por lo que dos tercios de la estadística está originariamente a escala tri-horaria. Se incluyeron además los datos de viento a 12 m de la estación JI (José Ignacio) de UTE. A pesar de que la distancia entre estaciones es la más grande considerada en este trabajo (≈ 50 km), la medida de JI es representativa de la costa oceánica que se intenta describir. La estación de medida de RR (Rocha) de UTE se encuentra a mayor distancia (≈ 70 km) y no se utilizó. En la Figura 3.15 se muestra la Rosa de los Vientos para ambas series de medida utilizadas (RO y JI). De esta manera, en esta localidad también se disponen de dos series de viento a distintas alturas.

Figura 3.15: Rosa de los vientos para la localidad de Rocha.



(a) Estación RO INUMET (12 m). Medida horaria.

(b) Estación JI UTE (10 m). Medida horaria.

En la Figura D.1.d se muestra el registro de INUMET para la estación RO. Durante los periodos del 01/2000 al 11/2001 y 07/2007 al 04/2009, la estación operó con huecos sistemáticos de 8 horas nocturnas. Por un periodo pequeño, del 05/2009 al 06/2010, los huecos sistemáticos son de 9 horas. Como se decidió interpolar hasta 8 horas, este periodo de aproximadamente 1,2 años no fue recuperado, lo cual deja a esta localidad con un total de 13,8 años de datos, no alcanzándose la meta de los 15 años. Durante el resto del tiempo la estación RO registró datos en régimen continuo con algunos períodos de datos faltantes de hasta 2 horas que no representan mayor problema en este trabajo. El porcentaje de interpolación en Rocha para el periodo de 13,8 años es tolerable, del orden del 10%. En la Tabla 3.7 se muestra el detalle para cada variable.

3.4.5. Análisis de datos de Colonia

De las localidades consideradas para este trabajo, Colonia es la que cuenta con menos datos disponibles para la realización del AMT, resultando ser la ubicación con mayor porcentaje de interpolación y con menor estadística disponible. Se integraron datos de la estación CO del INUMET, ZU del INIA y RM de UTE para armar el conjunto de datos base de esta localidad. En total se llegó a recopilar 11,5 años de datos, principalmente por la reducida disponibilidad de datos horarios de temperatura ambiente y humedad relativa, considerados importantes para este AMT y donde no se permite una interpolación excesiva. La medida del INUMET en la ubicación actual inicia el 01/2001. En el periodo del 01/2001 al 10/2003 hay huecos de 5 y 8 horas que fueron interpolados. Los datos para este periodo no pueden ser complementados con otra medida por lo que la única estrategia posible es la interpolación. A partir del 10/2003 existen huecos de 9 horas o superior, con periodos prolongados de huecos de 12 y 17 horas que no fueron interpolados.

La estadística para esta localidad se complementa con datos de la estación ZU del INIA desde el 05/2006 al 12/2014. Para ilustrar esta situación se muestran en la Figura 3.16 los promedios diarios de temperatura y humedad relativa para el periodo 01/2001 al 12/2014, utilizando interpolación de hasta 8 horas consecutivas en cada conjunto de datos (INUMET e INIA). Dado que no hay concurrencia temporal entre estos dos conjuntos de datos, la integración de ambas series resulta un proceso delicado. De forma similar a la localidad de Salto, el AMT de Colonia sólo se pudo realizar porque existían en la zona dos series de medidas complementarias y, en este caso, relajando los criterios para la estadística de datos. Para la unión de datos de temperatura y humedad relativa se utilizó como base la serie de datos del INIA, por ser la serie más larga y completa. Se utilizó la serie INUMET como serie secundaria para el relleno. Para esta localidad, es importante la corrección (por CDF-matching) de los datos de relleno, como se mostró en la Figura 3.2.a. La interpolación requerida fue razonable, de 4,0% y 8,2% para temperatura y humedad, respectivamente.

La irradiación solar fue generada por satélite para el periodo del 01/2001 al 12/2014. En la Figura 3.17 se muestran los promedios mensuales e históricos para este periodo de tiempo. Dada las restricciones en las otras variables el periodo máximo utilizable es el 01/2001 al 10/2003 y del 05/2006 al 12/2014. No se utilizaron medidas para el completado y la in-

terpolación necesaria se realizó de la misma forma que en las otras estaciones. El conjunto de irradiación solar horaria está completo al 98,9% en el periodo utilizable.

Figura 3.16: Series diarias de temperatura y humedad relativa de INUMET e INIA para la localidad de Colonia. Se muestran los periodos temporales de medida sin huecos importantes para apreciar su complementariedad.

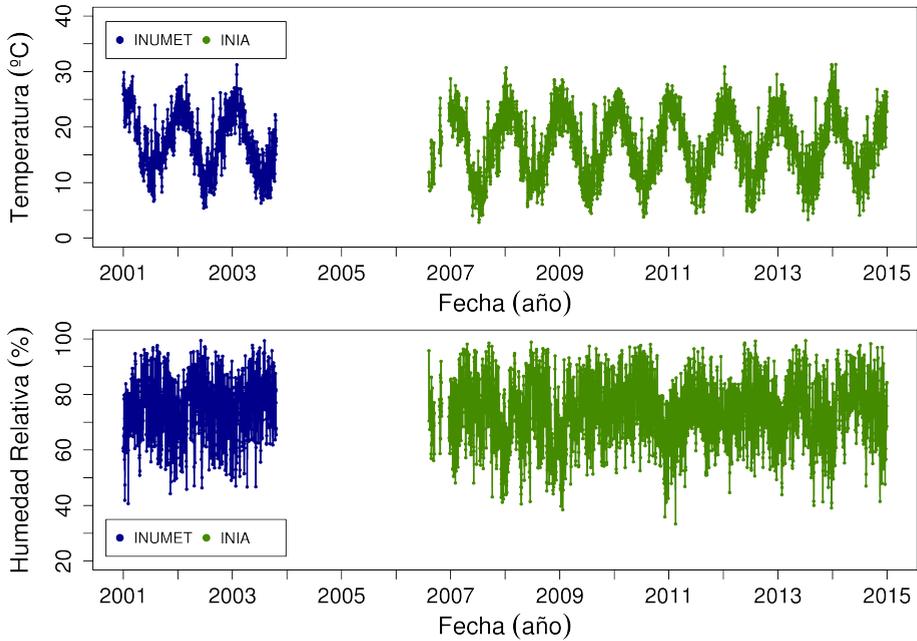
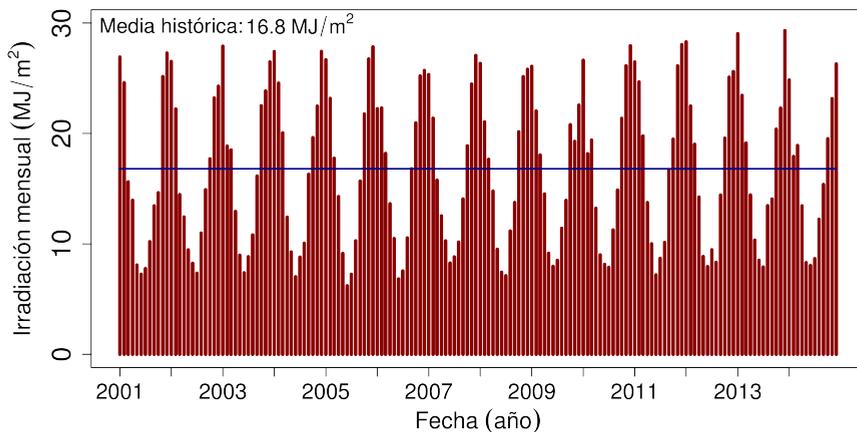


Figura 3.17: Medias mensuales de irradiación diaria para los 14 años de datos de la localidad de Colonia. Se indica con una línea azul el promedio histórico.

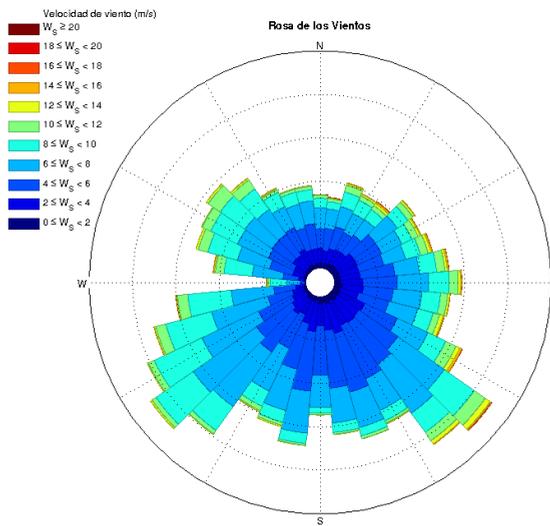


Las medidas de presión utilizadas se encuentran registradas por el INUMET a escala tri-horaria para todo el periodo. Durante el período desde el 01/2006 al 06/2008 se cuenta

además con valores horarios de presión. La integración de estos dos conjuntos deja una gran cantidad de huecos (41,2%) que debieron ser interpolados para viabilizar el AMT de Colonia. Este nivel de interpolación fue aceptado en virtud de que la presión es una variable con variaciones lentas y que además es de relevancia secundaria para aplicaciones de energía solar.

Se utilizaron para Colonia los datos de viento de la estación RM de UTE para el periodo desde el 05/2011 al 12/2014. Los datos a 20 m fueron calculados a partir de las medidas a 40 m y 60 m disponibles en esta estación. La Rosa de los Vientos para esta serie se muestra en la Figura 3.18. Los conjuntos de datos resultantes se encuentran esencialmente completos habiendo un 0,3% de huecos, en su mayoría no interpolables. No se utilizaron los datos de viento tri-horarios del INUMET debido a la presencia de huecos de 5 tri-horas durante intervalos largos de tiempo. La situación de huecos en este caso es similar a la de presión atmosférica, con la diferencia de que la variable viento es de variación rápida y no se le puede aplicar el alto grado de interpolación requerido. Colonia es la única localidad donde sólo se incluye una variable de viento y, además, los datos base no son de larga duración.

Figura 3.18: Rosa de los vientos para la localidad de Colonia (estación RM transp. a 20 m).



3.5. Conjuntos de datos generados

En esta Sección se resumen varios indicadores que describen los conjuntos de datos base generados para cada localidad. Se indican los porcentajes de completitud, de datos rellenados y de datos interpolados para las series horarias de cada variable considerada. Estos porcentajes son referidos al periodo de tiempo desde el primer al último dato considerado, teniendo en cuenta los periodos no utilizables en el caso de las localidades de Rocha y Colonia. En las localidades de Montevideo, Salto y Rivera las series temporales generadas no presentan huecos importantes por lo que los datos efectivamente utilizados se corresponden con todo el periodo de 15 años. En las localidades de Rocha y Colonia existen huecos sistemáticos que no fue posible completar.

Estos huecos están presentes en parte de la serie temporal, por lo que la cantidad de años efectivamente utilizada es menor al periodo indicado. Esta información se presenta resumida en la Tabla 3.3. En las Tablas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran los indicadores para las cinco localidades consideradas.

Tabla 3.3: Años de datos efectivos utilizados para la elaboración del AMT de cada localidad. El periodo indicado refiere a las variables irradiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y presión.

| Localidad | Montevideo | Salto | Rivera | Rocha | Colonia |
|-------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| años de datos efectivos | 15,0 años | 15,0 años | 15,0 años | 13,8 años | 11,5 años |

Tabla 3.4: Resumen de los datos utilizados para el AMT Ues de Montevideo.

| Montevideo: estadística 01/2000–12/2014 (15,0 años) | | | | | | |
|---|-----------|---------|---------|-------------------------|-----------|---------------|
| variable | principal | | relleno | | interpol. | comp. |
| | fuelle | comp. % | fuelle | comp. % | comp. % | total % |
| irradiación solar | BD-JPT | 94,2 % | LES | 1,6 % | 3,7 % | 99,4 % |
| temperatura ambiente | INUMET | 99,6 % | INIA | 0,4 % | 0,0 % | 100,0 % |
| humedad relativa | INUMET | 99,6 % | N/A | 0,0 % | 0,2 % | 99,8 % |
| presión atmosférica | INUMET | 99,1 % | N/A | 0,0 % | 0,6 % | 99,7 % |
| | | | | completitud MVD: | | 99,7 % |
| módulo viento (10 m) | INUMET | 90,5 % | N/A | 0,0 % | 4,2 % | 94,7 % |
| dirección viento (10 m) | INUMET | 90,5 % | N/A | 0,0 % | 4,2 % | 94,7 % |
| módulo viento (20 m) [†] | UTE | 99,3 % | N/A | 0,0 % | 0,2 % | 99,5 % |
| dirección viento (20 m) [†] | UTE | 99,3 % | N/A | 0,0 % | 0,2 % | 99,5 % |

[†] Sobre 3 años y medio de datos. Periodo: 04/2011–12/2014

Tabla 3.5: Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Salto.

| Salto: estadística 01/2000–12/2014 (15,0 años) | | | | | | |
|--|-----------|---------|---------|---------|-----------|---------------|
| variable | principal | | relleno | | interpol. | comp. |
| | fuelle | comp. % | fuelle | comp. % | comp. % | total % |
| irradiancia solar | BD-JPT | 94,1 % | LES | 1,6 % | 3,7 % | 99,4 % |
| temperatura ambiente | INUMET | 81,2 % | INIA | 18,6 % | < 0,1 % | 99,9 % |
| humedad relativa | INUMET | 80,1 % | INIA | 18,7 % | < 0,1 % | 98,8 % |
| presión atmosférica | INUMET | 80,1 % | N/A | 0,0 % | 18,4 % | 98,5 % |
| completitud SAL: | | | | | | 99,2 % |
| módulo viento (2 m) † | INIA | 81,8 % | N/A | 0,0 % | 4,8 % | 86,6 % |
| dirección viento (2 m) † | INIA | 81,8 % | N/A | 0,0 % | 4,8 % | 86,6 % |
| módulo viento (20 m) †† | UTE | 95,6 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 95,6 % |
| dirección viento (20 m) †† | UTE | 95,6 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 95,6 % |

† Sobre 10 años de datos. Periodo: 01/2005–12/2014

†† Sobre 3 años de datos. Periodo: 01/2012–12/2014

Tabla 3.6: Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Rivera.

| Rivera: estadística 01/2000–12/2014 (15,0 años) | | | | | | |
|---|-----------|---------|---------|---------|-----------|---------------|
| variable | principal | | relleno | | interpol. | comp. |
| | fuelle | comp. % | fuelle | comp. % | comp. % | total % |
| irradiancia solar | BD-JPT | 94,2 % | N/A | 0,0 % | 4,8 % | 99,0 % |
| temperatura ambiente | INUMET | 99,7 % | N/A | 0,0 % | 0,1 % | 99,8 % |
| humedad relativa | INUMET | 99,5 % | N/A | 0,0 % | 0,2 % | 99,7 % |
| presión atmosférica | INUMET | 95,8 % | N/A | 0,0 % | 3,1 % | 98,9 % |
| completitud RIV: | | | | | | 99,4 % |
| módulo viento (10 m) | INUMET | 95,9 % | N/A | 0,0 % | 3,0 % | 98,9 % |
| dirección viento (10 m) | INUMET | 95,9 % | N/A | 0,0 % | 3,0 % | 98,9 % |
| módulo viento (20 m) † | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 99,7 % |
| dirección viento (20 m) † | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 99,7 % |

† Sobre 4 años y medio de datos. Periodo: 04/2010–12/2014

Tabla 3.7: Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Rocha.

| Rocha: estadística 01/2000–03/2009 y 06/2010–12/2014 (13,8 años) | | | | | | |
|--|-----------|---------|----------|---------|-----------|---------------|
| variable | principal | | relleno | | interpol. | comp. total % |
| | f fuente | comp. % | f fuente | comp. % | comp. % | |
| irradiancia solar | BD-JPT | 94,0 % | LES | 1,3 % | 4,1 % | 99,4 % |
| temperatura ambiente | INUMET | 89,3 % | N/A | 0,0 % | 10,2 % | 99,5 % |
| humedad relativa | INUMET | 89,1 % | N/A | 0,0 % | 10,4 % | 99,5 % |
| presión atmosférica | INUMET | 87,5 % | N/A | 0,0 % | 11,3 % | 98,8 % |
| completitud ROC: | | | | | | 99,3 % |
| módulo viento (10 m) | INUMET | 87,5 % | N/A | 0,0 % | 11,6 % | 99,1 % |
| dirección viento (10 m) | INUMET | 87,5 % | N/A | 0,0 % | 11,5 % | 99,0 % |
| módulo viento (12 m) [†] | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | 0,1 % | 99,8 % |
| dirección viento (12 m) [†] | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | 0,1 % | 99,8 % |

[†] Sobre 3 años y medio de datos. Periodo: 07/2011–12/2014

Tabla 3.8: Resumen de los datos utilizados para el AMTUes de Colonia.

| Colonia: estadística 01/2001–10/2003 y 05/2006–12/2014 (11,5 años) | | | | | | |
|--|-----------|---------|----------|---------|-----------|---------------|
| variable | principal | | relleno | | interpol. | comp. total % |
| | f fuente | comp. % | f fuente | comp. % | comp. % | |
| irradiancia solar | BD-JPT | 94,2 % | N/A | 0,0 % | 4,7 % | 98,9 % |
| temperatura ambiente | INIA | 70,9 % | INUMET | 22,2 % | 4,0 % | 97,1 % |
| humedad relativa | INIA | 70,9 % | INUMET | 18,0 % | 8,2 % | 97,1 % |
| presión atmosférica | INUMET | 53,3 % | N/A | 0,0 % | 41,2 % | 94,5 % |
| completitud COL: | | | | | | 96,9 % |
| módulo viento (20 m) [†] | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 99,7 % |
| dirección viento (20 m) [†] | UTE | 99,7 % | N/A | 0,0 % | < 0,1 % | 99,7 % |

[†] Sobre 3 años y medio de datos. Periodo: 05/2011–12/2014.

Metodología

La serie anual considerada “típica” para una región debe preservar el comportamiento en media de cada variable involucrada, además de su variabilidad característica. En una primera aproximación, si una serie anual logra preservar ambos aspectos de la serie histórica, entonces es candidata a ser de útil para la simulación de dispositivos bajo condiciones climáticas típicas. Una forma de construir esta serie típica es concatenando sub-series temporales de datos reales, seleccionados por su carácter típico. Este enfoque asegura que el AMT tendrá la variabilidad real de cada variable. Además, se preserva la concurrencia temporal entre las variables debido a que cada sub-serie utilizada corresponde al mismo periodo de tiempo para todas las variables. Este fue el enfoque utilizado en este trabajo para la elaboración del AMTUs. Los datos que aparecen en las series anuales resultantes no son datos generados sintéticamente o resultado de un post-procesamiento de las series de datos originales, sino que son medidas reales seleccionadas por su carácter típico para cada localidad. Al usar esta metodología, es necesario elegir el tamaño de las sub-series a concatenar y el criterio con el cuál se evalúa su tipicidad.

Este método ha sido utilizado para elaborar el año meteorológico típico de EEUU (TMY), que en su última actualización se realizó para 1020 localidades por parte del National Renewable Energy Laboratory (NREL) [4]. Las ideas base fueron propuestas originalmente en 1978 por los SANDIA National Laboratories y usadas para construir el TMY1 y TMY2 de EEUU [2, 3]. Las sucesivas versiones de los TMY elaborados para EEUU difieren en la cantidad y calidad de las series de datos base y en actualizaciones de implementación derivadas de la inclusión de mayor cantidad de datos. Variaciones de esta metodología base han sido utilizadas para confeccionar series típicas para otras partes del mundo [5–12].

En este AMT utilizamos como variables principales (las que determinan las sub-series típicas del AMT) la irradiación horaria sobre plano horizontal, la temperatura del aire ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica. La información de viento, considerada secundaria para este trabajo, se incluye a posteriori y no participa de la decisión. También se incluyen a posteriori otras variables derivadas de la variable solar, como la irradiación directa en incidencia normal (DNI) y la irradiación global sobre plano inclinado para algunas inclinaciones orientadas al Norte (GTI).

En la Sección 4.1 se explica la metodología de elaboración de las series típicas. El AMT inicial para cada localidad se compone de las variables principales mencionadas en el párrafo anterior. Luego, se agregan las variables derivadas de radiación solar (DNI y GTI), calculadas según se explica en la Sección 4.2. El paso final, la inclusión de las variables de viento, se describe en la Sección 4.3.

4.1. Elaboración del AMT

La metodología SANDIA toma como sub-serie temporal la escala mensual, por lo que el problema consiste en escoger 12 meses típicos (uno para cada mes del año) y concatenarlos en forma consistente en una única serie anual horaria. Un mes típico es elegido del conjunto de meses-año disponibles para ese mes. Por ejemplo, el enero típico para Montevideo será uno de los 15 eneros incluidos en los datos base de esa localidad.

La forma en que se seleccionan los meses típicos se explica en la Subsecciones 4.1.1 y 4.1.2. El tratamiento de los (pocos) datos faltantes en los meses seleccionados se explica en la Subsección 4.1.3. En las interfaces entre dos meses consecutivos se realiza un proceso de suavizado necesario para garantizar la continuidad física de las variables entre el último día del mes y el primer día del mes siguiente. Este suavizado se realiza para temperatura, presión y humedad relativa. No es necesario para la radiación solar debido a que las interfaces tienen lugar a medianoche y tampoco para viento debido a que es una variable que puede variar rápidamente a escala horaria. El proceso de suavizado se explica en la Subsección 4.1.4.

4.1.1. Selección de meses típicos

La concatenación final del AMT tiene resolución horaria. No obstante, a efectos de decidir qué mes de datos será el típico para cada mes del año, se trabaja con los valores diarios de las variables involucradas. A partir de la serie temporal horaria de las variables principales, calculamos a escala diaria las siguientes variables:

- H_{GHI} : irradiación global diaria sobre plano horizontal (en MJ/m²).
- T_{PRO} : promedio diario de temperatura del aire ambiente (en °C).
- T_{MAX} : máxima diaria de temperatura del aire ambiente (en °C).
- T_{MIN} : mínima diaria de temperatura del aire ambiente (en °C).
- H_{PRO} : promedio diario de humedad relativa (en %).
- P_{PRO} : promedio diario de presión atmosférica (en hPa).

Para formular la metodología de selección de meses típicos denotaremos con X al conjunto de estas 6 variables,

$$X = \{H_{GHI}, T_{PRO}, T_{MAX}, T_{MIN}, H_{PRO}, P_{PRO}\},$$

de modo que X_i es la serie temporal diaria completa de la i -ésima variable ($i \in \{1, \dots, 6\}$). Los meses del año serán indicados con el índice j que puede variar entre 1 y 12. Los años serán indicados con el índice k ($k \in \{2000, \dots, 2014\}$). De esta manera, el conjunto X_i^j son todos los datos diarios de la variable i para el mes j y X_i^{jk} indica el conjunto de valores de la variable i para el mes j del año k .

Para cada variable i y mes j , se comparan estadísticamente cada una de sus instancias mes-año (jk) con la estadística de largo plazo del mes j para determinar cual de ellas es más representativa. La comparación se realiza utilizando las Funciones de Probabilidad (CDF) de los distintos conjuntos de datos. Para cada variable i y cada mes j se calcula la CDF de largo plazo (o padrón), integrando todos los datos diarios del mes j para todos los años. La CDF padrón de la variable i y mes j se denomina $F_i^j(u)$. Para cada valor u del dominio, queda definida por,

$$F_i^j(u) = \text{Prob} \left(u \leq X_i^j \right) = \frac{1}{N_i^j} \sum_{l=1}^{N_i^j} \Theta \left(u - X_i^j(l) \right), \quad (4.1)$$

donde N_i^j es la cantidad de elementos del conjunto X_i^j y $\Theta(u)$ es la función escalón de Heavy-side que vale '1' si $u \geq 0$ y '0' si $u < 0$. Computacionalmente, es conveniente que el vector u sea una discretización fina del espacio en el cual está definida cada variable X_i . En la Figura 4.1 se muestran las CDFs de largo plazo de irradiación global diaria, temperatura media, humedad relativa media y presión atmosférica media para la localidad de Montevideo para cuatro meses del año (enero, abril, julio y octubre), de modo que se puede apreciar la variación estacional de las CDFs para cada variable.

De forma análoga se puede computar la CDF para cada variable, mes y año,

$$F_i^{jk}(u) = \text{Prob} \left(u \leq X_i^{jk} \right) = \frac{1}{N_i^{jk}} \sum_{l=1}^{N_i^{jk}} \Theta \left(u - X_i^{jk}(l) \right), \quad (4.2)$$

donde N_i^{jk} es la cantidad de elementos del conjunto X_i^{jk} .

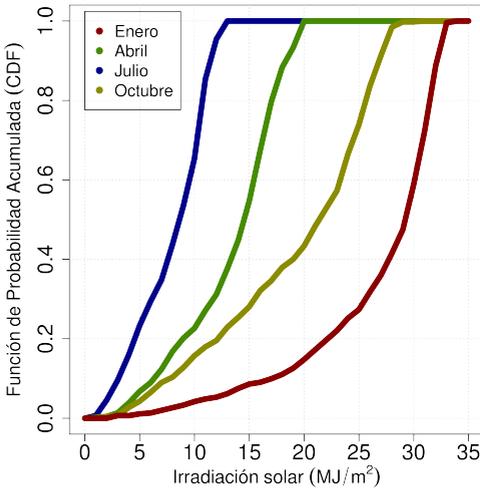
Una vez que calculadas las CDFs padrón de cada mes y de cada mes-año, estas se deben comparar entre sí, para lo cual es necesario definir una distancia entre ellas. En la medida en que una CDF de un mes-año dado sea más parecida a la CDF de largo plazo para ese mes, los datos del mes-año serán más típicos. En otras palabras, la medida de distancia entre CDFs será en este contexto una medida de tipicidad. La medida de distancia propuesta por la metodología SANDIA es el promedio de la diferencia absoluta entre dos CDFs, conocida como distancia de Finkelstein-Schafer (FS) [37]. Entonces, para cada mes-año de datos de cada variable se puede calcular el estadístico FS en comparación con su CDF padrón,

$$\text{FS}_i^{jk} = \frac{1}{N_i^{jk}} \sum_{u \in X_i^{jk}} \|F_i^j(u) - F_i^{jk}(u)\|. \quad (4.3)$$

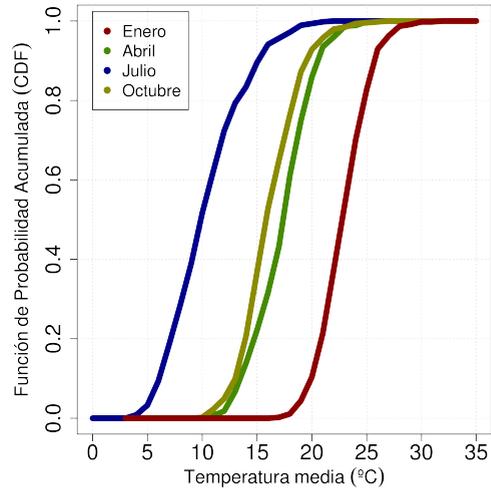
El valor FS_i^{jk} da una indicación de qué tan típica es una instancia mes-año para cada variable (a menor FS_i^{jk} , mayor tipicidad de la instancia jk para la variable i). Para obtener un único estadístico para cada instancia (mes-año), los estadísticos FS de cada variable son ponderados mediante pesos w_i , elegidos de acuerdo a la finalidad prevista para el AMT. Como resultado, se obtiene un único indicador de tipicidad para cada mes-año jk ,

$$FS^{jk} = \sum_{i=1}^6 w_i FS_i^{jk}. \quad (4.4)$$

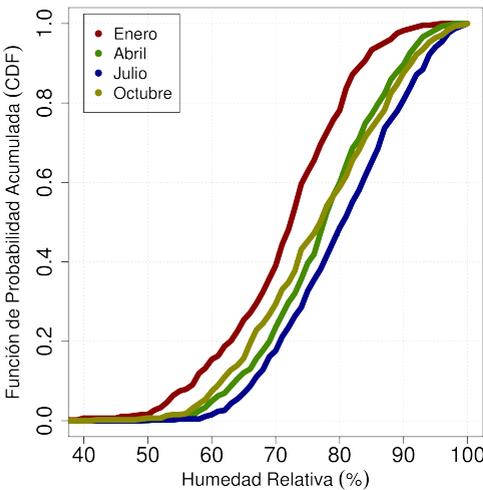
Figura 4.1: Funciones de Probabilidad de largo plazo (CDFs padrón) para 4 meses del año. Localidad: Montevideo.



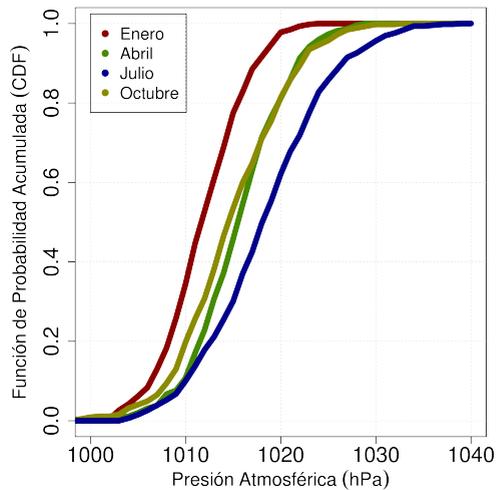
(a) CDFs padrón de irradiación diaria.



(b) CDFs padrón de temperatura promedio.



(c) CDFs padrón de humedad relativa.



(d) CDFs padrón de presión atmosférica.

La elección de estos pesos condiciona el resultado del AMT y limita su espectro de aplicaciones. Por ejemplo, al no tener en cuenta a la variable viento en esta decisión, el AMT resultante no resulta adecuado para simulaciones de sistemas de energía eólica. En este trabajo hemos definido los pesos w_i , mostrados en la Tabla 4.1, en relación a la importancia de las

variables para la simulación de dispositivos de aprovechamiento de la energía solar. Estos pesos fueron escogidos en forma similar a los del TMY3 [4]: (i) la irradiación solar tiene el 50 % del peso total, (ii) la temperatura media tiene el doble de peso que las temperaturas máxima y mínima, y (iii) se le asigna a las demás variables (en este caso, humedad y presión) el mismo peso que las variables de temperatura mínima y máxima (que es el peso w_i mínimo).

Tabla 4.1: Pesos utilizados en la elaboración del AMTUs.

| variable | peso | valor |
|------------------------------------|-------|-------|
| Irradiación solar (H_{GHI}) | w_1 | 6/12 |
| Temperatura promedio (T_{PRO}) | w_2 | 2/12 |
| Temperatura máximo (T_{MAX}) | w_3 | 1/12 |
| Temperatura mínima (T_{MIN}) | w_4 | 1/12 |
| Humedad relativa (H_{PRO}) | w_5 | 1/12 |
| Presión atmosférica (P_{PRO}) | w_6 | 1/12 |

Para cada mes j , se pre-seleccionan las cinco instancias mes-año con menor valor de FS, siempre que presenten menos de 10 % de datos faltantes. Si el conjunto de datos inicial es razonablemente bueno, en general ningún mes-año es descartado por datos faltantes. Estos candidatos son ordenados por tipicidad decreciente (de menor a mayor valor de FS). A estos candidatos se les aplica una serie de filtros de persistencia, tal como se explica en la siguiente Subsección. La instancia mes-año más típica para cada mes del año será aquella de menor valor de FS que supera estos filtros. Si a pesar de estas exigencias en el mes seleccionado hubieran datos faltantes (que necesariamente serán menos del 10 % de los datos horarios), éstos se completan siguiendo el procedimiento que se indica en la Subsección 4.1.3.

4.1.2. Filtros de persistencia

Los filtros de persistencia buscan descartar instancias que presenten rachas atípicas. Por ejemplo, si una instancia mes-año –candidata a típica por FS– tiene gran cantidad de días consecutivos de muy baja irradiación solar, es probable que se trató de una situación anómala en la cual unos pocos días de alta irradiación compensan una serie atípicamente larga de días cubiertos. De la misma manera, para una instancia con varios días seguidos muy fríos o muy cálidos aplica la misma conclusión. Si bien el procedimiento de selección de las instancias candidatas hace poco probable que este tipo de fenómenos estén presentes, esto no está asegurado metodológicamente. Por ello, se agregan estos filtros a posteriori. Desde el punto de vista estadístico se busca cuidar que la autocorrelación de la instancia mes-año que finalmente se seleccione sea típica.

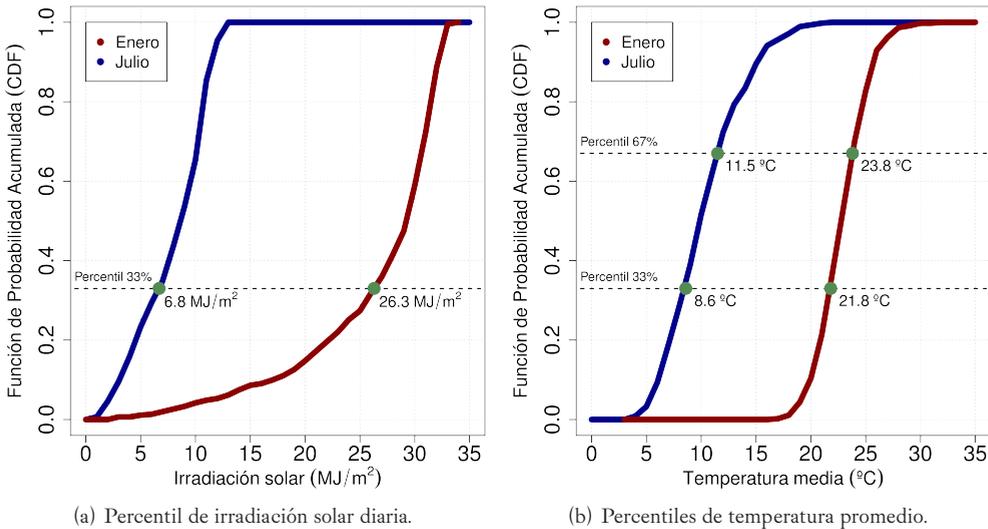
Dado que se seleccionan 5 candidatos hemos escogido una serie de 4 filtros, inspirados en la metodología TMY3. Esto no implica que efectivamente 4 candidatos de los 5 sean descartados, pues una misma instancia mes-año puede ser filtrada por más de un filtro. En general, tampoco son los mejores candidatos los que son filtrados. En el Capítulo 5 se detalla el proceso de selec-

ción específico para cada localidad, indicando las instancias filtradas y el proceso completo para obtener cada mes que integra el AMTUs. Los criterios utilizados están basados en detectar días consecutivos de “baja” irradiación (muy nublados), muy “fríos” o muy “cálidos”, y son los siguientes:

- Un día es de baja irradiación si la irradiación solar diaria está por debajo del percentil de 33% (1/3) de la CDF padrón del mes j correspondiente.
- Un día es considerado frío si la temperatura promedio diaria está por debajo del percentil 33% (1/3) de la CDF padrón del mes j correspondiente.
- Un día es considerado cálido si la temperatura promedio diaria está por encima del percentil 67% (2/3) de la CDF padrón del mes j correspondiente.

En la Figura 4.2 se muestra la CDF padrón de irradiación solar y de temperatura promedio para dos meses del año de Montevideo. Se identifican en el gráfico los valores de los percentiles utilizados en esos casos. Un listado completo de los valores de los percentiles 1/3 y 2/3 utilizados para cada mes y localidad se muestra en la Tabla 5.7 del Capítulo 5.

Figura 4.2: Funciones de Probabilidad de largo plazo (CDFs padrón) para enero y julio. Se muestran los percentiles utilizados para los filtros de persistencia. Localidad: Montevideo.



Denominamos *corrida* a dos o más días consecutivos que cumplan alguno de estos criterios. Dado un mes del año j , el conjunto de instancias candidatas son un subconjunto del conjunto total de las instancias mes-año jk , y las denominaremos por el super-índice jk_j^* (donde k_j^* toma cinco valores). Para cada instancia candidata se calcula la cantidad de corridas en el mes y el largo de la máxima corrida para cada criterio. El conjunto $N_1^{jk_j^*}$ es la cantidad de corridas en irradiación solar de cada instancia en jk_j^* y, de la misma manera, $L_1^{jk_j^*}$ es el tamaño de la máxima

corrida para esa variable. Análogamente, llamaremos $N_2^{jk_j^*}$ y $L_2^{jk_j^*}$ a la cantidad de corridas y el tamaño de la máxima corrida de días fríos, y $N_3^{jk_j^*}$ y $L_3^{jk_j^*}$ a la cantidad de corridas y el tamaño de la máxima corrida de días cálidos. En base a estos indicadores, se implementan los siguientes cuatro filtros:

- \mathcal{F}_1 : descarta la instancia en jk_j^* donde $N^{jk_j^*} = N_1^{jk_j^*} + N_2^{jk_j^*} + N_3^{jk_j^*}$ sea máximo.
- \mathcal{F}_2 : descarta la instancia en jk_j^* donde $N^{jk_j^*} = N_1^{jk_j^*} + N_2^{jk_j^*} + N_3^{jk_j^*} = 0$.
- \mathcal{F}_3 : descarta la instancia en jk_j^* donde $L_1^{jk_j^*}$ sea máximo.
- \mathcal{F}_4 : descarta la instancia en jk_j^* donde $L^{jk_j^*} = L_2^{jk_j^*} + L_3^{jk_j^*}$ sea máximo.

Estos filtros coinciden con los utilizados en el TMY3 de EEUU [4]. \mathcal{F}_1 elimina el candidato con mayor número de corridas. \mathcal{F}_2 descarta el candidato que no presente corridas. En general, este filtro no elimina ningún candidato dado que sería extremadamente anómalo que una serie mes-año no tenga, por ejemplo, dos días nublados consecutivos. \mathcal{F}_3 elimina el candidato que tenga la corrida más larga en irradiación solar (días nublados consecutivos) y \mathcal{F}_4 elimina al que tenga la corrida más larga de valores extremos de temperatura.

La mejor instancia de cada mes j es aquella que tenga menor valor de FS y logre pasar estos filtros, y es la elegida para integrar el AMTUs. Con este procedimiento se seleccionan 12 meses en forma independiente para cada localidad.

4.1.3. Datos faltantes

Si bien no es conveniente rellenar datos en las series finales, en los meses seleccionados puede haber algún dato faltante que deba ser completado usando criterios adecuados. Los criterios adoptados buscan: (i) no afectar estadísticamente la serie temporal y (ii) mantener la concurrencia temporal entre las variables. En la Tabla 5.8 del Capítulo 5 se indican los pocos días completados para cada localidad.

El primer criterio adoptado es no sustituir horas aisladas sino días enteros (si en un día existe al menos una hora faltante, ese día se sustituye por completo). Esta sustitución se realizará colocando allí otro día que no tenga datos faltantes. Alcanza con que falte una hora de alguna de las variables que participan de la decisión (irradiación, temperatura, humedad o presión) para eliminar el día y sustituirlo por otro. Se sustituye la serie horaria de todas las variables del día a sustituir por los datos horarios del día sustituto. Al sustituir el día, se generan discontinuidades no físicas en las variables, a la hora 0 y la hora 23. Estas son suavizadas siguiendo los criterios descritos en la Subsección 4.1.4.

Como este AMT está orientado a aplicaciones de energía solar, la elección del día sustituto está basada exclusivamente en la irradiación solar global diaria. El día sustituto se elige del conjunto de días del mismo mes j al que pertenece el día que se tiene que sustituir, pero de un año diferente. Esto asegura que en el AMTUs no haya días repetidos. Los criterios utilizados para seleccionar el día sustituto se indican a continuación en orden de prioridad:

- (i) Por irradiación diaria: si el dato faltante por el cual se sustituye el día no estaba en la serie de irradiación, entonces la irradiación diaria (H_{GHI}) de ese día es conocida y se elige el día de ese mes que tenga una irradiación diaria más próxima al que sustituye.
- (ii) Por heliofanía: si el dato faltante es en la serie de irradiación, entonces su valor diario no es conocido, pero se puede estimar a través de la heliofanía (que denominaremos N_S). Si bien el estimado diario por heliofanía tiene alta incertidumbre [20], el resultado da una buena indicación de si ese día fue nublado, claro o parcialmente nublado. Se estima la irradiación diaria \hat{H}_{GHI} utilizando la correlación de Ångström-Prescott [38, 39],

$$\hat{H}_{GHI} = H_0 \left(a + b \left(\frac{N_S}{N_0} \right) \right),$$

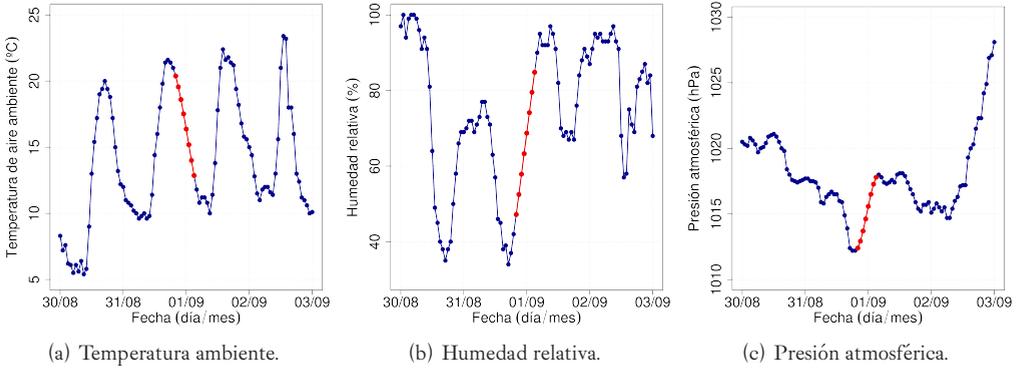
donde H_0 es la irradiación diaria en el tope de la Atmósfera, N_0 es la cantidad de horas entre la salida y la puesta del Sol, y a y b son parámetros que dependen de la localidad. Las expresiones de cálculo para H_0 y N_0 se pueden encontrar en [32]. Los valores de a y b se toman, para cada sitio, de la Memoria Técnica de la primera versión del Mapa Solar del Uruguay [20]. Una vez conocido el valor de \hat{H}_{GHI} , se elige como relleno el día de ese mes cuya irradiación sea más similar a la irradiación diaria estimada del día a sustituir.

Como los registros de heliofanía están esencialmente completos, estos criterios han sido suficientes para sustituir los días con datos faltantes en todos los meses seleccionados. Un tercer criterio, en caso de que fallaran los criterios anteriores, podría ser el de seleccionar el día cuya irradiación diaria sea más próxima a la de la media mensual. No ha sido necesario apelar a este criterio en este trabajo.

4.1.4. Continuidad en las interfaces

La concatenación horaria de los datos mensuales genera discontinuidades en la serie temporal en la última hora del mes y la primera del mes siguiente. De la misma manera, al sustituir un día incompleto por otro se genera una discontinuidad entre las hora 0 y 23 de ese día y los días adyacentes. Para suavizar estas discontinuidades se sustituyen las 4 horas anteriores y posteriores a la interfaz (8 horas en total) por una interpolación de splines cúbicos. Este procedimiento se aplica a los datos de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. No es necesario aplicar este procedimiento a la irradiación solar debido a que las interfaces suceden a medianoche. Tampoco se aplica a los datos de viento debido a su alta variabilidad temporal. En la Figura 4.3 se muestra un ejemplo típico de esta operación suavizado para cada una de las tres variables mencionadas, donde se observa que la interpolación acompaña el régimen diario de cada variable de manera adecuada.

Figura 4.3: Ejemplo del efecto del suavizado en las interfaces para temperatura, humedad relativa y presión. El ejemplo muestra la unión entre el mes de agosto y setiembre para Montevideo. En azul se muestra la serie temporal y en rojo la interpolación.



4.2. Variables derivadas

En este AMTUs se incluyen valores de irradiación directa en incidencia normal (DNI) y de irradiación global sobre plano inclinado (GTI). Estas variables se estiman a escala horaria a partir de la serie típica de irradiación global sobre plano horizontal (GHI) y, de igual forma que para esta variable, se expresan a escala horaria en Wh/m^2 y a escala diaria en MJ/m^2 .

Previo a obtener estimativos de DNI y GTI a partir de GHI, es necesario separar las componentes directa y difusa de la GHI. Una forma de hacer esto en forma aproximada es utilizando un *modelo de fracción difusa*. La fracción difusa horaria [32], f_D , se define como,

$$f_D = \frac{I_{dh}}{I_h}, \quad (4.5)$$

donde I_{dh} e I_h son las componentes difusa y global de la irradiación solar horaria sobre plano horizontal, respectivamente. Los modelos de fracción difusa relacionan esta cantidad, generalmente, con el índice de claridad k_T horario (definido en la Ec. (3.3)) y/o otras variables. Los más sencillos utilizan k_T como único predictor y los más complejos introducen predictores adicionales. Recientemente el LES ha evaluado 10 modelos de fracción difusa y los ha ajustado para la región utilizando medidas de irradiación global y difusa registradas en Uruguay y Argentina [40]. De esta evaluación surgen tres modelos con mejor desempeño en la región [41–43]. Para este trabajo hemos utilizado modelo de Ruiz-Arias [41] con sus coeficientes ajustados localmente, debido a que presenta el mejor balance entre baja incertidumbre y simplicidad [40]. Este modelo utiliza como predictores el índice de claridad k_T y la masa de aire m . La masa de aire es el camino óptico relativo de un rayo de luz a lo largo de la atmósfera terrestre. En este trabajo hemos utilizado para m la expresión de Kasten y Young [44], que tiene en cuenta la curvatura terrestre y los efectos de refracción en la atmósfera. La formulación del modelo de

Ruiz-Arias en términos de estas variables se muestra en la Ec. (4.6). Se utilizaron los valores de los parámetros a_j ($j = 0, \dots, 6$) ajustados por el LES para la región [40].

$$f_D = a_0 - a_1 \exp \left\{ - \exp \left(a_2 + a_3 k_T + a_4 k_T^2 + a_5 m + a_6 m^2 \right) \right\}. \quad (4.6)$$

Utilizando este modelo es posible estimar la irradiación difusa y directa sobre plano horizontal, I_{dh} e I_{bh} , de la forma:

$$I_{dh} = f_D \times I_h \quad I_{bh} = (1 - f_D) \times I_h$$

Esta separación permite estimar la DNI y la GTI de la forma que se explica respectivamente en las próximas dos Subsecciones. Se debe tener en cuenta que la fracción difusa no está determinada por sólo dos variables, por lo que la utilización de este tipo de modelos introduce una incertidumbre que en este caso es de aproximadamente un $\simeq 20\%$ de f_D [40]. Esta incertidumbre se propaga débilmente a la GTI y pero más directamente a la DNI.

4.2.1. Irradiación directa en incidencia normal

La DNI (denominada I_b a escala horaria) es la componente de la irradiación solar relevante para las aplicaciones de concentración solar. Para poder aprovechar esta componente se debe disponer de un dispositivo de seguimiento que tenga la capacidad de seguir el recorrido del Sol a lo largo del día (y del año). La DNI se puede obtener a partir de I_h e I_{dh} utilizando la relación geométrica de la Ec. (4.7), donde I_{dh} se estima a partir de la fracción difusa f_D .

$$I_b = \frac{I_h - I_{dh}}{\cos \theta_z} \quad (4.7)$$

Esta expresión es propensa a error para horas en las cuales el Sol esta bajo y el ángulo cenital es próximo a 90° . Además, la utilización de un modelo de fracción difusa introduce incertidumbre en la estimación que se agrega a la incertidumbre de base en los estimativos horarios de GHI. Sin embargo, esta incertidumbre será mayor en condiciones de cielo nublado que en condiciones de cielo despejado que es cuando la DNI tiene mayor interés. En la Sección 6.2 se realiza una estimación de la incertidumbre con la que se estima la DNI a través de este método.

4.2.2. Irradiación global sobre plano inclinado

Es práctica usual inclinar superficies de captación (como paneles fotovoltaicos o colectores solares para agua caliente sanitaria) para aumentar la cantidad de energía anual incidente sobre el sistema o modificar su estacionalidad. Existe un ángulo de inclinación denominado “óptimo”, para el cual la energía anual incidente es maximizada. Para inclinaciones elevadas con respecto al plano horizontal la estacionalidad anual de la irradiación sobre la superficie captación inclinada puede ser la inversa a la del recurso solar en plano horizontal, resultando en mayor irradiación incidiendo durante los meses de invierno que durante los meses de verano. La irradiación incidente sobre superficies inclinadas presenta interés también para consideraciones de eficiencia energética en edificios y para diseños de arquitectura solar pasiva. La GTI (denominada I_t a escala horaria) se calcula en este trabajo para superficies orientadas al Norte con cinco

inclinaciones β diferentes respecto al plano horizontal: 20°, 35°, 45°, 60° y 90°. Las primeras tres inclinaciones son representativas de las inclinaciones de las superficies de captación para aplicaciones comunes (en Uruguay), como paneles fotovoltaicos o sistemas para calentamiento de agua (sin concentración). La inclinación de 90° aplica, por ejemplo, a ventanas y paredes en construcciones. La inclinación de 60° es una situación intermedia entre estas situaciones y es adecuada para aplicaciones con mayor captación en invierno.

Para estimar la GTI a partir de la GHI y sus componentes directa y difusa, se utilizan modelos de *transporte a plano inclinado* [32]. El modelo HDKR es el que considera mayor cantidad de factores que afectan a este transporte y es el modelo utilizado en este trabajo. En este modelo se tienen en cuenta los efectos de la anisotropicidad en la distribución de la radiación difusa en la bóveda celeste y, en particular, el aumento de radiación difusa proveniente de la zona circumsolar. El modelo considera tres componentes de la irradiación solar sobre un plano inclinado,

$$I_t = (I_{bh} + A_i I_{dh}) r_B + I_{dh} (1 - A_i) \left[1 + f \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_h \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right), \quad (4.8)$$

donde cada término (de izquierda a derecha) corresponde a una componente:

- la irradiación proveniente de la dirección del Sol (directa + difusa circumsolar),
- la irradiación difusa proveniente del resto de la bóveda celeste,
- la irradiación reflejada hacia el plano inclinado por el terreno y el entorno.

En la Ec. (4.8) se utilizan las siguientes magnitudes,

$$r_B = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}, \quad A_i = \frac{I_{bh}}{I_{oh}}, \quad f = \sqrt{\frac{I_{bh}}{I_h}}, \quad (4.9)$$

donde r_B es la razón directa horaria y θ es el ángulo que forma la dirección Tierra-Sol con la normal al plano inclinado [32]. Tanto θ como θ_z varían a lo largo del día (y del año) y dependen de la posición geográfica. A escala horaria r_B se calcula evaluando el $\cos(\theta)$ y el $\cos(\theta_z)$ en el medio del intervalo horario. Este cociente representa la proyección de la irradiación directa horizontal sobre el plano inclinado. En la Ec. (4.8) A_i es el índice de anisotropicidad de la radiación difusa en la bóveda celeste y f es un factor modulante propuesto por Reindl et al para esta expresión [45]. El cálculo de I_{oh} ya se comentó en la Ec. (3.3).

En el último término de la Ec. (4.8) se incluye una componente reflejada por el terreno circundante con reflectividad difusa ρ . En la práctica, este término debe ser evaluado con cuidado para cada caso particular ya que puede representar diferentes entornos o incluso posibles superficies verticales que reflejen radiación sobre el plano inclinado. Para este trabajo hemos tomado un valor genérico, $\rho = 0,20$, que es la reflectividad aproximada del pasto seco o pedregullo, y es representativa de varios tipos de terrenos comunes.

4.3. Inclusión de viento

Como ya se mencionó, para este trabajo no se dispone de series de viento confiables de 15 años para todas las localidades por lo que la metodología utilizada no puede depender de su existencia. Debido a ello, no se incluyó al viento en la selección de los meses de los AMT y se lo trató por separado. El procedimiento para decidir qué meses de viento se seleccionan es el mismo que para las otras variables, sólo que se realiza sobre la estadística existente, que es más reducida en algunos sitios. Si se disponen de datos de viento para el mes-año seleccionado, se utilizan los datos de viento de ese mes-año y la concurrencia temporal está asegurada. Si, por el contrario, no están disponibles, el mes-año de viento escogido es el próximo de la lista de candidatos válidos. En este caso, el mes-año de irradiación, temperatura, humedad y presión no coincidirá con el de viento y no habrá concurrencia temporal. En la mayoría de las localidades se incluyeron dos series de datos de viento a distintas alturas. La única excepción es la localidad de Colonia donde se incluye una única serie de datos de viento. Una descripción de las alturas utilizadas en cada localidad y la estadística de cada serie de viento se presentó en el Capítulo 3.

Construcción de los AMT

En este Capítulo se describe la construcción de cada AMT aplicando la metodología descrita en el Capítulo 4 a los conjuntos de datos base generados para cada localidad. Se exponen los elementos más relevantes de su elaboración con énfasis en el proceso de selección y descarte de los meses candidatos a conformar las series típicas. Se detalla también el proceso de completado final de los pocos huecos que persisten en algunos meses seleccionados para los AMT. Las series de irradiación solar por satélite fueron pos-procesadas para corregir una pequeña sub-estimación sistemática a mediodía solar bajo condiciones de cielo claro, la cual es una característica conocida del modelo satelital utilizado. Este proceso se explica en la Sección 5.4. Finalmente, en la Sección 5.5 se presentan los formatos en que se publica el AMT Ues.

5.1. Selección de los meses que integran los AMT

La selección de meses a ser concatenados se realiza en forma independiente para cada estación. En la Tabla 5.1 se presentan los meses seleccionados para cada localidad. En este contexto, las localidades deben entenderse como representativas de una amplia región circundante con características climáticas similares. Cada mes-año seleccionado es el de menor valor de índice FS (más típico) que pasó los filtros de persistencia. De la Tabla 5.2 a la 5.6 se resume el proceso de selección para cada localidad. Los cinco años candidatos para cada mes se ordenan en forma descendente del más típico al menos típico, según su valor de FS. Se resalta en azul la instancia seleccionada y se tachan aquellas que resultan descartadas por el filtrado de persistencia, indicando qué filtro eliminó cada instancia. Los años seleccionados coinciden con los mostrados en la Tabla 5.1. Por ejemplo, para Montevideo el mes de enero de 2002 es el enero más típico de todos los meses de enero del periodo del 2000 al 2014. Al observar la Tabla 5.2, se puede ver que además ese año era inicialmente el mejor de los 5 candidatos y no fue eliminado por ningún filtro de persistencia. Existe una adecuada dispersión de los años seleccionados para cada mes de los AMT.

El proceso de selección se ilustra gráficamente en la Figura 5.1 para tres meses del AMT Montevideo: enero (arriba), mayo (centro) y setiembre (abajo). Se muestran las CDFs para irradiación GHI diaria (izquierda) y para temperatura media diaria (derecha). Se indica en rojo la CDF de largo plazo y en verde la CDF del mes seleccionado. Para estos meses el mejor candidato no fue filtrado por ningún filtro de persistencia (ver Tabla 5.2) por lo que el mes seleccionado coincide con el de menor índice FS. En azul se grafican las CDFs de los dos meses peor clasificados (mayor valor de FS). Como para la elección final de un mes se ponderan varias variables, que un mes haya resultado escogido no implica que sea el mejor mes para cada variable por se-

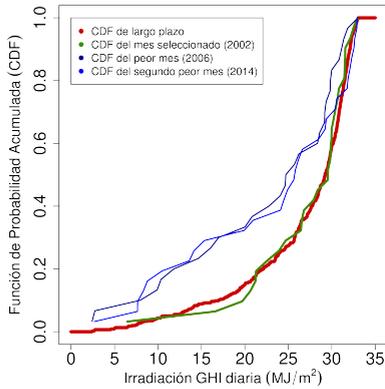
Tabla 5.1: Elaboración del AMTUes: años elegidos para cada mes de datos.

| Mes | MVD | SAL | RIV | ROC | COL |
|-----------|------|------|------|------|------|
| enero | 2002 | 2006 | 2007 | 2011 | 2001 |
| febrero | 2006 | 2007 | 2007 | 2013 | 2008 |
| marzo | 2003 | 2008 | 2010 | 2006 | 2009 |
| abril | 2013 | 2014 | 2011 | 2013 | 2013 |
| mayo | 2008 | 2002 | 2000 | 2014 | 2011 |
| junio | 2012 | 2014 | 2010 | 2010 | 2007 |
| julio | 2013 | 2001 | 2013 | 2013 | 2009 |
| agosto | 2008 | 2002 | 2004 | 2004 | 2010 |
| setiembre | 2012 | 2010 | 2010 | 2012 | 2013 |
| octubre | 2008 | 2011 | 2013 | 2006 | 2013 |
| noviembre | 2014 | 2003 | 2003 | 2003 | 2011 |
| diciembre | 2004 | 2006 | 2008 | 2003 | 2012 |

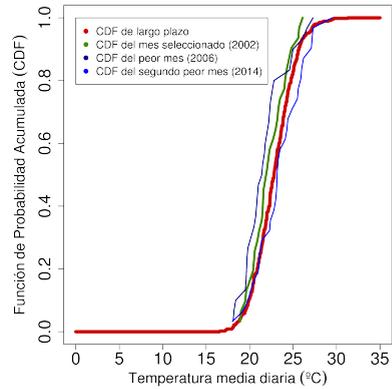
parado. De la misma manera, un mes que es rechazado no necesariamente se comporta mal para todas las variables, aunque en algunos casos alcanza con que se comporte mal para una variable para que resulte descartado por el algoritmo TMY. En el ejemplo, en enero y setiembre los peores meses (curvas azules) están alejados de la CDF padrón para irradiación, pero no tanto en temperatura. En mayo, están más próximos en irradiación, pero más alejados en temperatura. En cambio, las curvas verdes (meses seleccionados) se comportan bien para ambas variables (en todos los meses) permaneciendo cercanas a la CDF padrón. Esto ilustra el carácter de compromiso que debe tener el mes seleccionado para la serie típica. El mes escogido es aquel que, en promedio ponderado según los pesos, se comporta de mejor manera para todas las variables involucradas en la decisión y no necesariamente es el mejor para cada variable por separado. Si se intentase generar un AMT donde cada mes seleccionado fuera óptimo para cada variable por separado, sería necesario utilizar distintos mes-año para cada una. En este enfoque, se perdería la correlación temporal entre las diferentes variables, volviendo el AMT poco útil.

En la Figura 5.2 se muestra la CDF de largo plazo y las CDFs para cada mes-año para los mismos meses, variables y localidad que en la Figura 5.1. Como se toma como ejemplo la localidad de Montevideo, además de la CDF padrón, hay 15 CDFs correspondientes a cada mes-año presente en los 15 años de estadística considerados. Se aprecia claramente que la dispersión en torno a la CDF de largo plazo es mayor para la irradiación solar que para la temperatura, lo cual refleja la mayor variabilidad de esta variable. En algunos gráficos todos los meses-años aparecen cercanos entre sí, por ejemplo, para irradiación solar en mayo y para temperatura en enero. Para estos meses las variables por separado tienen valores de $FS_i^{j,k}$ con poca diferencia entre sí. Si para un mes dado se configura una situación de este estilo al mismo tiempo para irradiación y temperatura, la decisión del mes típico será más pareja entre los candidatos.

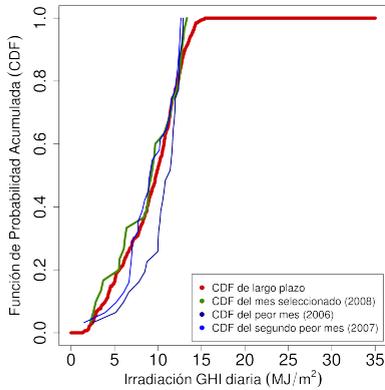
Figura 5.1: Ejemplo de selección de meses típicos para la localidad de Montevideo. Se grafica la CDF del mes seleccionado y la de los dos meses más atípicos (mayor valor de FS) en comparación a la CDF de largo plazo para ese mes.



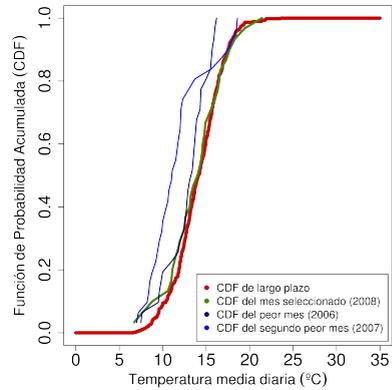
(a) Enero: irradiación diaria.



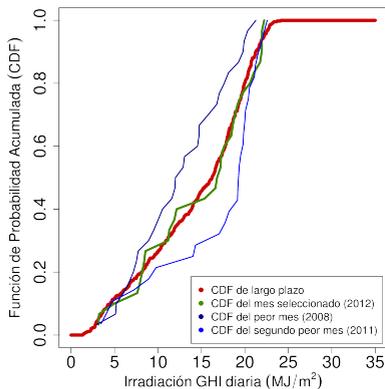
(b) Enero: temperatura media.



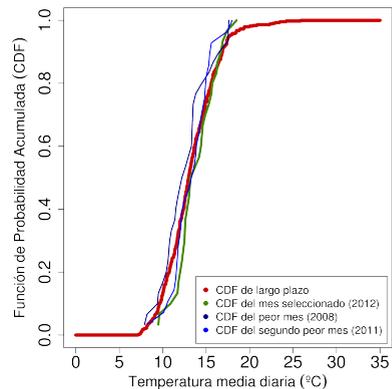
(c) Mayo: irradiación diaria.



(d) Mayo: temperatura media.

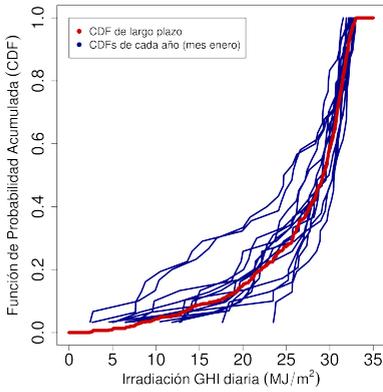


(e) Setiembre: irradiación diaria.

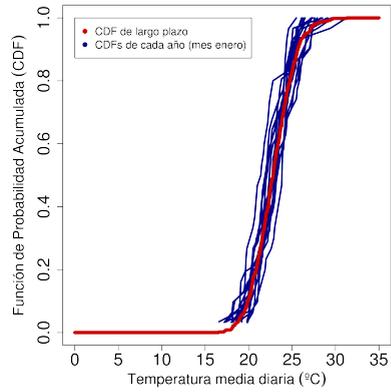


(f) Setiembre: temperatura media.

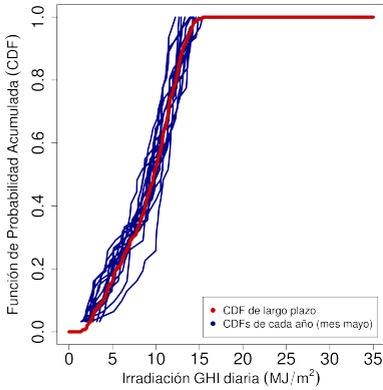
Figura 5.2: CDFs de cada año comparadas con las CDFs de largo plazo (Montevideo).



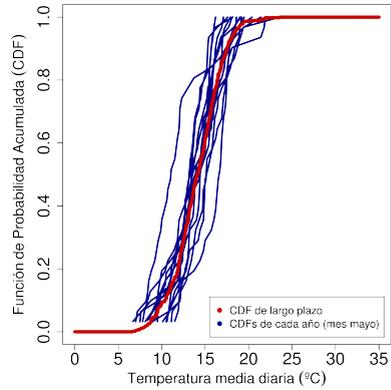
(a) Enero: irradiación diaria.



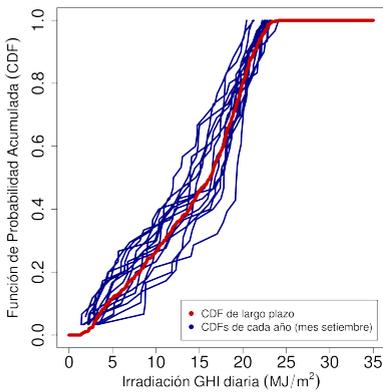
(b) Enero: temperatura media.



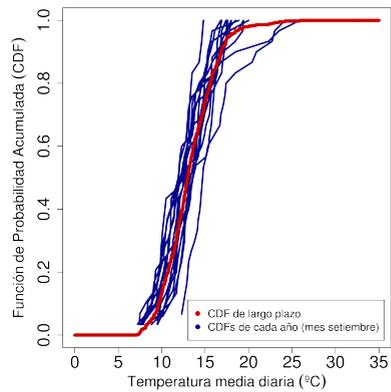
(c) Mayo: irradiación diaria.



(d) Mayo: temperatura media.



(e) Setiembre: irradiación diaria.



(f) Setiembre: temperatura media.

Tabla 5.2: Selección de meses para el AMT de Montevideo.

| MONTEVIDEO | | | | | | | | | | | |
|------------|-----------------|---------------|---|----------|-----------------|---------------|--------------------------------|----------|-----------------|---------------|---|
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2002 | 0.0527 | ok | 1 | 2008 | 0.0417 | ok | 1 | 2012 | 0.0451 | ok |
| E 2 | 2012 | 0.0566 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | M 2 | 2003 | 0.0433 | ok | S 2 | 2004 | 0.0478 | ok |
| N 3 | 2013 | 0.0577 | ok | A 3 | 2013 | 0.0536 | ok | E 3 | 2000 | 0.0544 | ok |
| E 4 | 2003 | 0.0592 | \mathcal{F}_1 | Y 4 | 2009 | 0.0551 | \mathcal{F}_1 | T 4 | 2013 | 0.0597 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ |
| 5 | 2011 | 0.0593 | ok | 5 | 2005 | 0.0586 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2010 | 0.0639 | \mathcal{F}_1 |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2006 | 0.0579 | ok | 1 | 2012 | 0.0403 | ok | 1 | 2008 | 0.0507 | ok |
| F 2 | 2005 | 0.0633 | ok | J 2 | 2003 | 0.0483 | \mathcal{F}_3 | O 2 | 2013 | 0.0510 | ok |
| E 3 | 2009 | 0.0642 | ok | U 3 | 2014 | 0.0628 | ok | C 3 | 2006 | 0.0547 | ok |
| B 4 | 2008 | 0.0645 | ok | N 4 | 2006 | 0.0639 | \mathcal{F}_1 | T 4 | 2011 | 0.0583 | ok |
| 5 | 2013 | 0.0648 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2002 | 0.0669 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2007 | 0.0589 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2003 | 0.0481 | ok | 1 | 2013 | 0.0340 | ok | 1 | 2014 | 0.0489 | ok |
| M 2 | 2010 | 0.0526 | ok | J 2 | 2004 | 0.0666 | \mathcal{F}_4 | N 2 | 2003 | 0.0501 | \mathcal{F}_3 |
| A 3 | 2012 | 0.0535 | \mathcal{F}_4 | U 3 | 2003 | 0.0668 | ok | O 3 | 2001 | 0.0530 | \mathcal{F}_4 |
| R 4 | 2008 | 0.0572 | \mathcal{F}_3 | L 4 | 2010 | 0.0693 | ok | V 4 | 2006 | 0.0659 | ok |
| 5 | 2006 | 0.0586 | \mathcal{F}_1 | 5 | 2002 | 0.0699 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ | 5 | 2011 | 0.0679 | \mathcal{F}_1 |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2001 | 0.0459 | \mathcal{F}_4 | 1 | 2002 | 0.0511 | \mathcal{F}_1 | 1 | 2004 | 0.0593 | ok |
| A 2 | 2013 | 0.0498 | ok | A 2 | 2008 | 0.0563 | ok | D 2 | 2008 | 0.0743 | ok |
| B 3 | 2012 | 0.0588 | \mathcal{F}_3 | G 3 | 2004 | 0.0607 | \mathcal{F}_3 | I 3 | 2001 | 0.0792 | ok |
| R 4 | 2005 | 0.0594 | \mathcal{F}_1 | O 4 | 2000 | 0.0612 | \mathcal{F}_4 | C 4 | 2003 | 0.0802 | \mathcal{F}_4 |
| 5 | 2011 | 0.0597 | ok | 5 | 2006 | 0.0662 | ok | 5 | 2006 | 0.0810 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ |

Tabla 5.3: Selección de meses para el AMT de Salto.

| SALTO | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|-----------------|-----------|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| 1 | 2006 | 0.0524 | ok | 1 | 2001 | 0.0631 | \mathcal{F}_1 | 1 | 2000 | 0.0374 | \mathcal{F}_4 | | | |
| E | 2 | 2004 | 0.0543 | ok | M | 2 | 2013 | 0.0646 | \mathcal{F}_2 | S | 2 | 2004 | 0.0474 | \mathcal{F}_2 |
| N | 3 | 2007 | 0.0677 | ok | A | 3 | 2003 | 0.0683 | \mathcal{F}_4 | E | 3 | 2002 | 0.0475 | \mathcal{F}_1 |
| E | 4 | 2002 | 0.0724 | ok | Y | 4 | 2002 | 0.0704 | ok | T | 4 | 2010 | 0.0556 | ok |
| | 5 | 2014 | 0.0741 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2000 | 0.0721 | ok | 5 | 2012 | 0.0608 | ok | | |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| 1 | 2007 | 0.0416 | ok | 1 | 2010 | 0.0636 | \mathcal{F}_1 | 1 | 2011 | 0.0478 | ok | | | |
| F | 2 | 2009 | 0.0545 | ok | J | 2 | 2001 | 0.0655 | \mathcal{F}_3 | O | 2 | 2008 | 0.0552 | ok |
| E | 3 | 2012 | 0.0546 | \mathcal{F}_1 | U | 3 | 2014 | 0.0669 | ok | C | 3 | 2014 | 0.0662 | \mathcal{F}_3 |
| B | 4 | 2011 | 0.0553 | \mathcal{F}_4 | N | 4 | 2012 | 0.0671 | ok | T | 4 | 2003 | 0.0682 | ok |
| | 5 | 2000 | 0.0615 | \mathcal{F}_3 | 5 | 2000 | 0.0737 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2000 | 0.0733 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_4$ | | |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| 1 | 2008 | 0.0586 | ok | 1 | 2001 | 0.0463 | ok | 1 | 2014 | 0.0464 | \mathcal{F}_1 | | | |
| M | 2 | 2000 | 0.0631 | ok | J | 2 | 2003 | 0.0495 | \mathcal{F}_4 | N | 2 | 2003 | 0.0514 | ok |
| A | 3 | 2010 | 0.0687 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | U | 3 | 2010 | 0.0554 | \mathcal{F}_3 | O | 3 | 2006 | 0.0552 | ok |
| R | 4 | 2006 | 0.0702 | ok | L | 4 | 2005 | 0.0635 | ok | V | 4 | 2001 | 0.0617 | ok |
| | 5 | 2009 | 0.0722 | \mathcal{F}_1 | 5 | 2014 | 0.0763 | \mathcal{F}_1 | 5 | 2012 | 0.0659 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | | |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| 1 | 2014 | 0.0502 | ok | 1 | 2002 | 0.0360 | ok | 1 | 2000 | 0.0570 | \mathcal{F}_3 | | | |
| A | 2 | 2012 | 0.0662 | ok | A | 2 | 2006 | 0.0459 | ok | D | 2 | 2006 | 0.0606 | ok |
| B | 3 | 2011 | 0.0735 | \mathcal{F}_1 | G | 3 | 2000 | 0.0527 | ok | I | 3 | 2001 | 0.0607 | ok |
| R | 4 | 2001 | 0.0746 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | O | 4 | 2009 | 0.0546 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ | C | 4 | 2012 | 0.0716 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_4$ |
| | 5 | 2006 | 0.0797 | ok | 5 | 2004 | 0.0617 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2011 | 0.0740 | ok | | |

Tabla 5.4: Selección de meses para el AMT de Rivera.

| RIVERA | | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|---------------|--------------------------------|----------|-------------|---------------|--------------------------------|----------|-------------|---------------|--------------------------------|
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2007 | 0.0478 | ok | 1 | 2014 | 0.0448 | \mathcal{F}_3 | 1 | 2000 | 0.0450 | \mathcal{F}_4 |
| E 2 | 2008 | 0.0499 | \mathcal{F}_3 | M 2 | 2003 | 0.0585 | \mathcal{F}_4 | S 2 | 2010 | 0.0529 | ok |
| N 3 | 2002 | 0.0568 | ok | A 3 | 2000 | 0.0593 | ok | E 3 | 2013 | 0.0566 | \mathcal{F}_3 |
| E 4 | 2004 | 0.0572 | \mathcal{F}_4 | Y 4 | 2008 | 0.0654 | ok | T 4 | 2004 | 0.0589 | ok |
| 5 | 2010 | 0.0668 | \mathcal{F}_1 | 5 | 2009 | 0.0719 | \mathcal{F}_1 | 5 | 2002 | 0.0676 | \mathcal{F}_1 |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2007 | 0.0421 | ok | 1 | 2010 | 0.0437 | ok | 1 | 2013 | 0.0618 | ok |
| F 2 | 2011 | 0.0486 | \mathcal{F}_4 | J 2 | 2006 | 0.0511 | \mathcal{F}_1 | O 2 | 2008 | 0.0641 | \mathcal{F}_4 |
| E 3 | 2009 | 0.0490 | ok | U 3 | 2012 | 0.0603 | ok | C 3 | 2014 | 0.0668 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ |
| B 4 | 2008 | 0.0501 | \mathcal{F}_1 | N 4 | 2007 | 0.0604 | \mathcal{F}_3 | T 4 | 2003 | 0.0680 | ok |
| 5 | 2014 | 0.0564 | \mathcal{F}_3 | 5 | 2014 | 0.0655 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2006 | 0.0793 | ok |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2010 | 0.0576 | ok | 1 | 2003 | 0.0392 | \mathcal{F}_4 | 1 | 2003 | 0.0483 | ok |
| M 2 | 2008 | 0.0632 | ok | J 2 | 2010 | 0.0434 | \mathcal{F}_3 | N 2 | 2014 | 0.0544 | ok |
| A 3 | 2009 | 0.0652 | ok | U 3 | 2013 | 0.0525 | ok | O 3 | 2001 | 0.0555 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_4$ |
| R 4 | 2011 | 0.0716 | \mathcal{F}_3 | L 4 | 2005 | 0.0577 | \mathcal{F}_1 | V 4 | 2006 | 0.0640 | \mathcal{F}_3 |
| 5 | 2005 | 0.0744 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2004 | 0.0619 | ok | 5 | 2010 | 0.0796 | ok |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2011 | 0.0529 | ok | 1 | 2004 | 0.0485 | ok | 1 | 2001 | 0.0570 | \mathcal{F}_3 |
| A 2 | 2014 | 0.0571 | \mathcal{F}_3 | A 2 | 2009 | 0.0544 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ | D 2 | 2008 | 0.0582 | ok |
| B 3 | 2010 | 0.0578 | \mathcal{F}_1 | G 3 | 2002 | 0.0578 | \mathcal{F}_4 | I 3 | 2000 | 0.0593 | \mathcal{F}_1 |
| R 4 | 2012 | 0.0585 | ok | O 4 | 2008 | 0.0590 | ok | C 4 | 2006 | 0.0597 | ok |
| 5 | 2000 | 0.0585 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2000 | 0.0624 | ok | 5 | 2012 | 0.0604 | \mathcal{F}_4 |

Tabla 5.5: Selección de meses para el AMT de Rocha.

| ROCHA | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|------|---------|--------------------------------|-----|----|---------|--------|-----------------|----|---------|------|--------|--------------------------------|
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| E | 1 | 2007 | 0.0525 | \mathcal{F}_1 | M | 1 | 2003 | 0.0333 | \mathcal{F}_4 | S | 1 | 2012 | 0.0434 | ok |
| N | 2 | 2011 | 0.0620 | ok | A | 2 | 2014 | 0.0462 | ok | E | 2 | 2004 | 0.0461 | \mathcal{F}_1 |
| E | 3 | 2004 | 0.0648 | ok | A | 3 | 2008 | 0.0472 | \mathcal{F}_3 | E | 3 | 2000 | 0.0505 | ok |
| | 4 | 2008 | 0.0655 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | Y | 4 | 2013 | 0.0563 | \mathcal{F}_1 | T | 4 | 2013 | 0.0517 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ |
| | 5 | 2013 | 0.0729 | ok | | 5 | 2001 | 0.0667 | ok | | 5 | 2010 | 0.0551 | ok |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| F | 1 | 2013 | 0.0570 | ok | | 1 | 2006 | 0.0544 | \mathcal{F}_1 | O | 1 | 2006 | 0.0503 | ok |
| E | 2 | 2005 | 0.0681 | \mathcal{F}_4 | J | 2 | 2010 | 0.0565 | ok | O | 2 | 2013 | 0.0588 | ok |
| B | 3 | 2007 | 0.0699 | \mathcal{F}_1 | U | 3 | 2002 | 0.0580 | \mathcal{F}_3 | C | 3 | 2007 | 0.0592 | \mathcal{F}_1 |
| | 4 | 2006 | 0.0700 | \mathcal{F}_3 | N | 4 | 2008 | 0.0586 | ok | T | 4 | 2008 | 0.0624 | \mathcal{F}_4 |
| | 5 | 2000 | 0.0706 | ok | | 5 | 2003 | 0.0635 | \mathcal{F}_4 | | 5 | 2014 | 0.0739 | \mathcal{F}_3 |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| M | 1 | 2008 | 0.0547 | \mathcal{F}_4 | J | 1 | 2013 | 0.0445 | ok | N | 1 | 2003 | 0.0464 | ok |
| A | 2 | 2006 | 0.0574 | ok | J | 2 | 2004 | 0.0504 | \mathcal{F}_3 | N | 2 | 2001 | 0.0524 | \mathcal{F}_3 |
| R | 3 | 2012 | 0.0584 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ | U | 3 | 2003 | 0.0554 | ok | O | 3 | 2012 | 0.0547 | \mathcal{F}_4 |
| | 4 | 2009 | 0.0661 | ok | L | 4 | 2005 | 0.0557 | \mathcal{F}_4 | V | 4 | 2014 | 0.0571 | \mathcal{F}_1 |
| | 5 | 2007 | 0.0702 | ok | | 5 | 2014 | 0.0578 | \mathcal{F}_1 | | 5 | 2002 | 0.0580 | ok |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | | | |
| A | 1 | 2013 | 0.0483 | ok | A | 1 | 2002 | 0.0435 | \mathcal{F}_3 | D | 1 | 2011 | 0.0704 | \mathcal{F}_4 |
| B | 2 | 2011 | 0.0492 | ok | A | 2 | 2004 | 0.0576 | ok | I | 2 | 2003 | 0.0762 | ok |
| R | 3 | 2014 | 0.0547 | \mathcal{F}_3 | G | 3 | 2000 | 0.0585 | \mathcal{F}_4 | I | 3 | 2001 | 0.0884 | ok |
| | 4 | 2007 | 0.0580 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_4$ | O | 4 | 2003 | 0.0648 | \mathcal{F}_1 | C | 4 | 2012 | 0.0887 | \mathcal{F}_1 |
| | 5 | 2012 | 0.0585 | ok | | 5 | 2006 | 0.0668 | ok | | 5 | 2006 | 0.1100 | \mathcal{F}_3 |

Tabla 5.6: Selección de meses para el AMT de Colonia.

| COLONIA | | | | | | | | | | | |
|------------|-------------|---------------|---|------------|-------------|---------------|--------------------------------|------------|-------------|---------------|--------------------------------|
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2001 | 0.0548 | ok | 1 | 2008 | 0.0553 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | 1 | 2010 | 0.0434 | \mathcal{F}_1 |
| E 2 | 2013 | 0.0558 | ok | M 2 | 2011 | 0.0649 | ok | S 2 | 2013 | 0.0705 | ok |
| N 3 | 2002 | 0.0575 | ok | A 3 | 2003 | 0.0664 | ok | E 3 | 2009 | 0.0832 | ok |
| E 4 | 2010 | 0.0582 | ok | Y 4 | 2009 | 0.0686 | \mathcal{F}_1 | T 4 | 2002 | 0.0832 | ok |
| 5 | 2014 | 0.0660 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2002 | 0.0687 | ok | 5 | 2007 | 0.0834 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2012 | 0.0545 | \mathcal{F}_1 | 1 | 2012 | 0.0413 | \mathcal{F}_1 | 1 | 2013 | 0.0528 | ok |
| F 2 | 2013 | 0.0672 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | J 2 | 2011 | 0.0654 | \mathcal{F}_4 | O 2 | 2008 | 0.0610 | ok |
| E 3 | 2008 | 0.0731 | ok | U 3 | 2007 | 0.0658 | ok | C 3 | 2011 | 0.0624 | \mathcal{F}_4 |
| B 4 | 2009 | 0.0863 | ok | N 4 | 2001 | 0.0664 | \mathcal{F}_3 | T 4 | 2002 | 0.0878 | ok |
| 5 | 2002 | 0.0942 | ok | 5 | 2010 | 0.0753 | ok | 5 | 2014 | 0.0922 | $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_3$ |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2003 | 0.0461 | \mathcal{F}_4 | 1 | 2009 | 0.0472 | ok | 1 | 2012 | 0.0562 | \mathcal{F}_3 |
| M 2 | 2010 | 0.0597 | \mathcal{F}_1 | J 2 | 2010 | 0.0479 | ok | N 2 | 2011 | 0.0593 | ok |
| A 3 | 2012 | 0.0632 | \mathcal{F}_3 | U 3 | 2001 | 0.0554 | \mathcal{F}_1 | O 3 | 2002 | 0.0622 | \mathcal{F}_1 |
| R 4 | 2009 | 0.0733 | ok | L 4 | 2003 | 0.0564 | ok | V 4 | 2014 | 0.0626 | ok |
| 5 | 2011 | 0.0923 | ok | 5 | 2013 | 0.0567 | $\mathcal{F}_3, \mathcal{F}_4$ | 5 | 2013 | 0.0671 | \mathcal{F}_4 |
| mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros | mes | año | FS | filtros |
| 1 | 2001 | 0.0409 | \mathcal{F}_3 | 1 | 2010 | 0.0519 | ok | 1 | 2001 | 0.0620 | \mathcal{F}_3 |
| A 2 | 2013 | 0.0481 | ok | A 2 | 2008 | 0.0606 | \mathcal{F}_1 | D 2 | 2012 | 0.0790 | ok |
| B 3 | 2011 | 0.0513 | \mathcal{F}_1 | G 3 | 2011 | 0.0672 | \mathcal{F}_4 | I 3 | 2008 | 0.0929 | ok |
| R 4 | 2012 | 0.0577 | ok | O 4 | 2002 | 0.0698 | ok | C 4 | 2011 | 0.0982 | \mathcal{F}_4 |
| 5 | 2007 | 0.0709 | \mathcal{F}_4 | 5 | 2009 | 0.0753 | \mathcal{F}_3 | 5 | 2002 | 0.1060 | \mathcal{F}_1 |

Es importante resaltar que la selección del mes típico para cada localidad *es el resultado de un algoritmo matemático*, que incluye una caracterización matemática de la tipicidad de cada mes-año y un filtrado por persistencia típica. No hay ningún elemento de discrecionalidad en la selección de un mes dado, por lo que cualquiera que trabaje sobre los mismos conjuntos de datos siguiendo los mismos métodos de completado y el mismo algoritmo de selección, debería arribar al mismo conjunto de meses típicos para cada localidad.

5.2. Filtrado de persistencia

Como se describió en la Subsección 4.1.2, el filtrado de los candidatos está basado en el percentil 33 % (p_1) de irradiación solar diaria y en los percentiles 33 % (p_1) y 67 % (p_2) de temperatura media diaria. En la Tabla 5.7 se presentan los percentiles calculados en base a los datos de largo plazo de cada localidad. Estos son los valores utilizados para los filtros del \mathcal{F}_1 al \mathcal{F}_4 , descritos en la Subsección 4.1.2. Los valores indicados como ejemplo en la Figura 4.1 coinciden con los de esta Tabla, por lo que dicha Figura puede ser usada como una descripción gráfica de los percentiles que se indican aquí.

Tabla 5.7: Percentiles de irradiación solar diaria (H_{GHI} , en MJ/m^2) y de temperatura media diaria (T_{PRO} , en $^{\circ}\text{C}$) utilizados para los filtros de persistencia.

| Percentiles para los filtros de persistencia | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MVD | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| $p_1 H_{\text{GHI}}$ | 26,3 | 20,5 | 17,0 | 12,3 | 8,0 | 6,3 | 6,8 | 8,8 | 11,9 | 16,5 | 22,5 | 25,0 |
| $p_1 T_{\text{PRO}}$ | 21,8 | 21,4 | 19,7 | 16,2 | 12,8 | 9,9 | 8,5 | 9,8 | 11,9 | 14,9 | 17,5 | 20,0 |
| $p_2 T_{\text{PRO}}$ | 23,8 | 23,1 | 21,6 | 18,4 | 15,4 | 12,2 | 11,6 | 12,8 | 14,3 | 17,1 | 19,7 | 22,3 |
| SAL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| $p_1 H_{\text{GHI}}$ | 25,9 | 21,1 | 18,7 | 13,5 | 8,8 | 6,2 | 8,6 | 11,2 | 14,8 | 17,4 | 23,7 | 24,8 |
| $p_1 T_{\text{PRO}}$ | 24,8 | 23,1 | 21,2 | 17,5 | 13,4 | 11,0 | 9,3 | 11,2 | 14,3 | 17,8 | 20,3 | 22,8 |
| $p_2 T_{\text{PRO}}$ | 27,1 | 25,7 | 23,4 | 20,2 | 16,6 | 14,6 | 14,1 | 15,5 | 17,4 | 20,5 | 23,2 | 25,3 |
| RIV | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| $p_1 H_{\text{GHI}}$ | 24,2 | 20,4 | 17,6 | 12,9 | 8,1 | 5,7 | 8,0 | 9,8 | 11,2 | 15,7 | 22,3 | 24,5 |
| $p_1 T_{\text{PRO}}$ | 23,5 | 22,8 | 20,9 | 17,4 | 13,3 | 11,1 | 9,4 | 11,0 | 13,9 | 17,3 | 19,6 | 22,0 |
| $p_2 T_{\text{PRO}}$ | 25,7 | 24,8 | 23,1 | 20,2 | 16,5 | 14,4 | 14,0 | 15,9 | 16,7 | 19,6 | 22,4 | 24,3 |
| ROC | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| $p_1 H_{\text{GHI}}$ | 23,9 | 18,8 | 15,8 | 11,4 | 8,0 | 6,2 | 7,0 | 8,6 | 11,9 | 15,4 | 22,5 | 24,5 |
| $p_1 T_{\text{PRO}}$ | 21,0 | 20,6 | 18,9 | 15,7 | 12,4 | 9,8 | 8,4 | 9,7 | 11,6 | 14,6 | 16,6 | 19,3 |
| $p_2 T_{\text{PRO}}$ | 23,4 | 22,7 | 21,4 | 18,6 | 15,4 | 12,8 | 12,0 | 13,4 | 14,5 | 17,1 | 19,3 | 21,9 |
| COL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| $p_1 H_{\text{GHI}}$ | 26,6 | 20,6 | 16,7 | 13,1 | 7,9 | 7,1 | 7,1 | 10,0 | 12,5 | 18,0 | 23,6 | 25,8 |
| $p_1 T_{\text{PRO}}$ | 22,5 | 21,6 | 19,2 | 15,6 | 11,8 | 8,6 | 7,3 | 8,9 | 11,5 | 14,8 | 18,2 | 20,8 |
| $p_2 T_{\text{PRO}}$ | 24,6 | 23,8 | 21,7 | 18,3 | 15,0 | 11,1 | 10,1 | 12,3 | 14,5 | 17,7 | 20,9 | 23,7 |

5.3. Datos faltantes sustituidos

Los meses típicos seleccionados para cada localidad no están completos al 100 %. Las series base para Montevideo, Salto, Rivera y Rocha tienen una completitud total $\geq 99\%$ y Colonia $\geq 95\%$, por lo que en los meses seleccionados pueden haber algunos datos faltantes. Como se explicó en la Subsección 4.1.3, cuando falta un dato en el mes seleccionado se sustituye todo el día que lo contiene por otro día que esté completo, de modo de preservar la correlación temporal entre las variables. Ningún día se reemplaza por otro del mismo mes-año. En la Tabla 5.8 se muestran los días sustituidos y sus días sustitutos. Como se indicó antes, los criterios de selección de días sustitutos están basados en la irradiación solar diaria del día a sustituir. El valor de irradiación se muestra también en la Tabla 5.8, junto con la indicación de cuál de los dos criterios se utilizó en la sustitución: (i) irradiación diaria o (ii) estimación por heliofanía. El criterio (i) se utiliza cuando el hueco es en una variables distinta de irradiación solar y el criterio (ii) cuando el hueco es en irradiación solar. En Montevideo y Colonia es donde se debieron reemplazar menos días, sólo 3 de los 365. En Salto fueron 9 días, y en Rivera y Rocha fueron 10 días en total. En todos los casos estas sustituciones son una pequeña fracción del año ($< 3\%$).

5.4. Pos-proceso de GHI

El modelo satelital subestima levemente la irradiación solar en condiciones de cielo despejado y en el entorno del mediodía solar. Esta sub-estimación sistemática es del orden del 3 % y afecta poco a la GHI (ver Figura 5.3). Al calcular la DNI horaria como se describe en la Subsección 4.2.1, este efecto se amplifica. Por otro lado, en condiciones de cielo despejado la irradiación solar puede estimarse con baja incertidumbre utilizando un *modelo de cielo claro* (MCC). Los estimativos de un MCC pueden usarse para sustituir las horas claras estimadas por satélite cercanas al mediodía solar y mejorar la estimación de GHI y, en especial, la de DNI. Esta es una corrección fina que no modifica sustancialmente la información del AMT. Se aplica al subconjunto de horas de GHI de la serie típica en torno al mediodía solar en condiciones de cielo despejado previo al cálculo de las variables derivadas de irradiación solar (GTI y DNI).

El primer paso del pos-proceso consiste en detectar automáticamente las horas de cielo despejado en torno del mediodía solar en la serie horaria de GHI, un problema bastante estudiado [46–48]. Para este trabajo usamos la propuesta de Remund et al [46] donde se establecen cinco criterios para considerar a una hora como de cielo despejado:

- i) que el índice de claridad horario modificado (Perez et al [49]) sea mayor a cierto umbral,
- ii) que el índice de claridad diario sea mayor a cierto umbral,
- iii) que el día tenga un porcentaje mínimo de horas diurnas claras, según los criterios (i) y (ii),
- iv) que la irradiación DNI sea mayor a cierto umbral,
- v) se excluyen horas con el Sol bajo.

Tabla 5.8: Días sustituidos en los AMT de cada localidad.

| localidad | criterio | H_{GHI} (MJ/m ²) | día sustituido | día sustituto |
|-----------|----------|--------------------------------|----------------|---------------|
| MVD | (ii) | 11,1 | 13/12/2004 | 24/12/2010 |
| MVD | (ii) | 24,4 | 07/05/2008 | 28/05/2001 |
| MVD | (ii) | 27,8 | 30/10/2008 | 12/10/2009 |
| SAL | (i) | 30,8 | 29/01/2006 | 12/01/2002 |
| SAL | (i) | 26,2 | 30/01/2006 | 25/01/2012 |
| SAL | (ii) | 27,8 | 31/01/2006 | 11/01/2003 |
| SAL | (ii) | 26,2 | 20/02/2007 | 17/02/2008 |
| SAL | (ii) | 12,7 | 24/07/2001 | 15/07/2007 |
| SAL | (ii) | 6,4 | 25/07/2001 | 29/07/2014 |
| SAL | (ii) | 25,9 | 23/11/2003 | 06/11/2000 |
| SAL | (ii) | 30,1 | 06/12/2006 | 11/12/2002 |
| SAL | (ii) | 27,4 | 12/12/2006 | 20/12/2000 |
| RIV | (ii) | 29,3 | 02/01/2007 | 01/01/2005 |
| RIV | (ii) | 26,7 | 20/02/2007 | 15/02/2012 |
| RIV | (i) | 16,9 | 13/04/2011 | 27/04/2004 |
| RIV | (i) | 16,0 | 29/04/2011 | 05/04/2010 |
| RIV | (ii) | 15,4 | 08/05/2000 | 09/05/2010 |
| RIV | (ii) | 15,0 | 11/05/2000 | 05/05/2003 |
| RIV | (i) | 11,7 | 01/08/2004 | 14/08/2010 |
| RIV | (ii) | 13,4 | 26/08/2004 | 10/08/2000 |
| RIV | (ii) | 27,3 | 23/11/2003 | 10/11/2002 |
| RIV | (ii) | 24,4 | 02/12/2008 | 24/12/2002 |
| ROC | (i) | 24,1 | 02/03/2006 | 13/03/2014 |
| ROC | (i) | 12,8 | 03/03/2006 | 17/03/2007 |
| ROC | (i) | 24,0 | 09/03/2006 | 06/03/2001 |
| ROC | (i) | 10,8 | 01/06/2010 | 30/06/2011 |
| ROC | (i) | 6,7 | 01/08/2004 | 01/08/2002 |
| ROC | (ii) | 12,5 | 26/08/2004 | 19/08/2006 |
| ROC | (ii) | 12,9 | 31/10/2006 | 28/10/2000 |
| ROC | (ii) | 18,3 | 23/11/2003 | 22/11/2010 |
| ROC | (ii) | 11,9 | 15/12/2003 | 13/12/2011 |
| ROC | (ii) | 24,0 | 16/12/2003 | 10/12/2012 |
| COL | (ii) | 27,5 | 30/01/2001 | 31/01/2009 |
| COL | (i) | 19,2 | 22/03/2009 | 22/03/2012 |
| COL | (i) | 20,0 | 23/03/2009 | 22/03/2002 |

Los dos criterios más importantes son el (i) y (ii). Para este trabajo hemos utilizado los umbrales 0,73 y 0,50 respectivamente⁴. Los criterios (iii) y (iv) no son muy excluyentes. Para el criterio (iii) se utilizó un porcentaje del 50%. Para el criterio (iv) se utilizó el umbral de DNI ≥ 200 Wh/m², que es el mismo al propuesto en [46]. Para excluir la horas de Sol bajo y seleccionar horas en el entorno del mediodía solar se utilizaron las horas que cumplen $\cos(\theta_z) > 0,4$ (que

4. En el trabajo original de Remund et al [46] se utilizan los valores de 0,70 y 0,40, pero hemos decidido ser más conservadores con el criterio de selección de horas claras.

es aproximadamente una altura solar mayor a 24°). Esto equivale a $\simeq \pm 2$ horas en invierno y $\simeq \pm 5$ horas en verano.

Al aplicar este proceso a la serie de GHI se detectan las horas claras que serán sustituidas por la salida de un modelo de cielo claro. La incertidumbre de los modelos de cielo claro es típicamente de $\simeq 4\%$ [50]. De los varios modelos de Cielo Claro existentes [51–54], en este trabajo hemos adoptado el modelo ESRA [54], que presenta un compromiso adecuado entre sencillez y precisión. Este modelo, usado en Europa como parte del modelo satelital Heliosat, tiene como único parámetro ajustable la Turbidez Linke, T_L , a masa de aire $m = 2$. Este parámetro representa el número de atmósferas limpias y secas que tendrían el mismo efecto óptico que la atmósfera real [54]. El mismo da una indicación del contenido de agua y aerosoles en suspensión en la atmósfera, lo cual afecta la absorción y dispersión de la radiación solar. Es un parámetro que se puede determinar a partir de medidas de DNI o incluso puede estimarse a partir de medidas de GHI para cielo claro, en torno al mediodía solar. Trabajos en curso dentro del LES han estimado el régimen anual de este coeficiente de Turbidez para varios sitios del Uruguay [55], en los cuáles están incluidas las localidades de este trabajo. Se utilizó el régimen anual obtenido a partir de esta investigación y se ajustó en forma fina la media de Turbidez de Linke para que la serie de GHI modificada mantenga el mismo valor de GHI anual que previo a la modificación. Esto asegura que la modificación de horas claras no cambia sensiblemente la información del AMT y sólo realiza la pequeña corrección buscada.

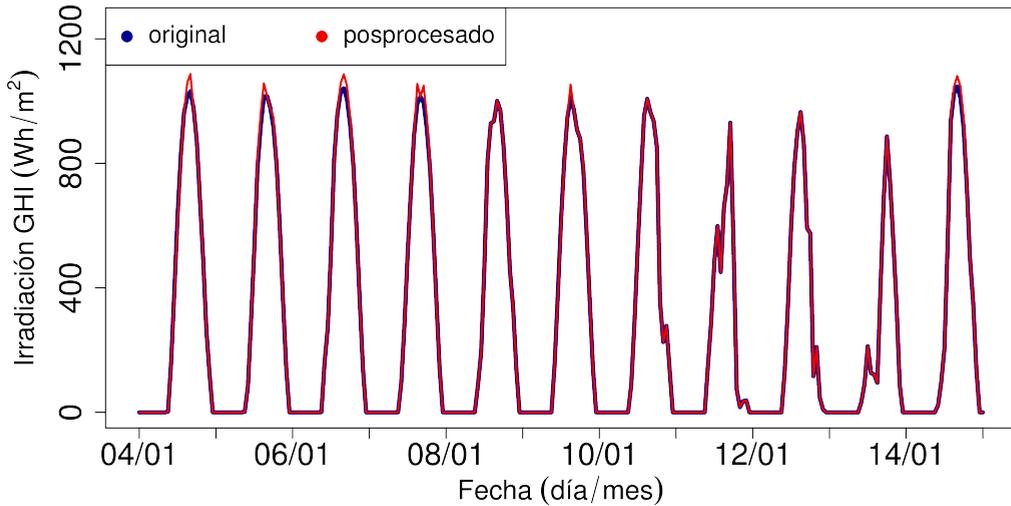
Finalmente, para la primer y última hora del día se aplicó una limitación de irradiación utilizando el modelo ESRA con un valor de Turbidez de Linke bajo (atmósfera muy transparente). Se utiliza una atmósfera muy clara, para que el modelo ESRA dé una cota superior para GHI, que no sea muy restrictiva. La irradiación solar presenta la mayor incertidumbre relativa para estas horas de Sol bajo, tanto en la medida de tierra como en el estimativo por satélite, aunque en términos absolutos contribuyen poco al total diario. Es común que resulten en valores del índice de claridad k_T artificialmente altos, ya que éste es un cociente donde el denominador tiende a cero al ponerse el Sol. Aplicando esta limitación en GHI se corrigen estos desvíos y se mejora la calidad de la serie. En la Figura 5.3 se muestra el pos-proceso para algunos días de enero del AMT de Salto donde se puede apreciar que las correcciones aplicadas son efectivamente pequeñas.

5.5. Formato y presentación de las series del AMTUes

Esta memoria técnica está acompañada de archivos para cada localidad con el contenido del AMTUes, disponibles en <http://les.edu.uy>. La información se brinda en los formatos libres CSV (texto plano, Comma Separated Values), ODS (LibreOffice Calc) y en el formato propietario XLS (Microsoft Excel). Se buscó ser lo más inclusivo posible con los potenciales usuarios, aunque el formato CSV ya es compatible con todas las herramientas de cálculo numérico bajo todos los sistemas operativos.

Los datos se presentan en columnas: las primeras 5 columnas contienen la información temporal de cada dato. La hora utilizada es UTC (GMT-0 Greenwich) para evitar problemas

Figura 5.3: Ejemplo de pos-proceso de GHI. Localidad: Salto.



relacionados a la hora local y/o la hora legal (cambios de horarios de verano). Las siguientes columnas son los datos propiamente dichos y las columnas finales son variables propias de la geometría solar que han sido agregadas para ayudar al usuario. En orden, las variables columnas son:

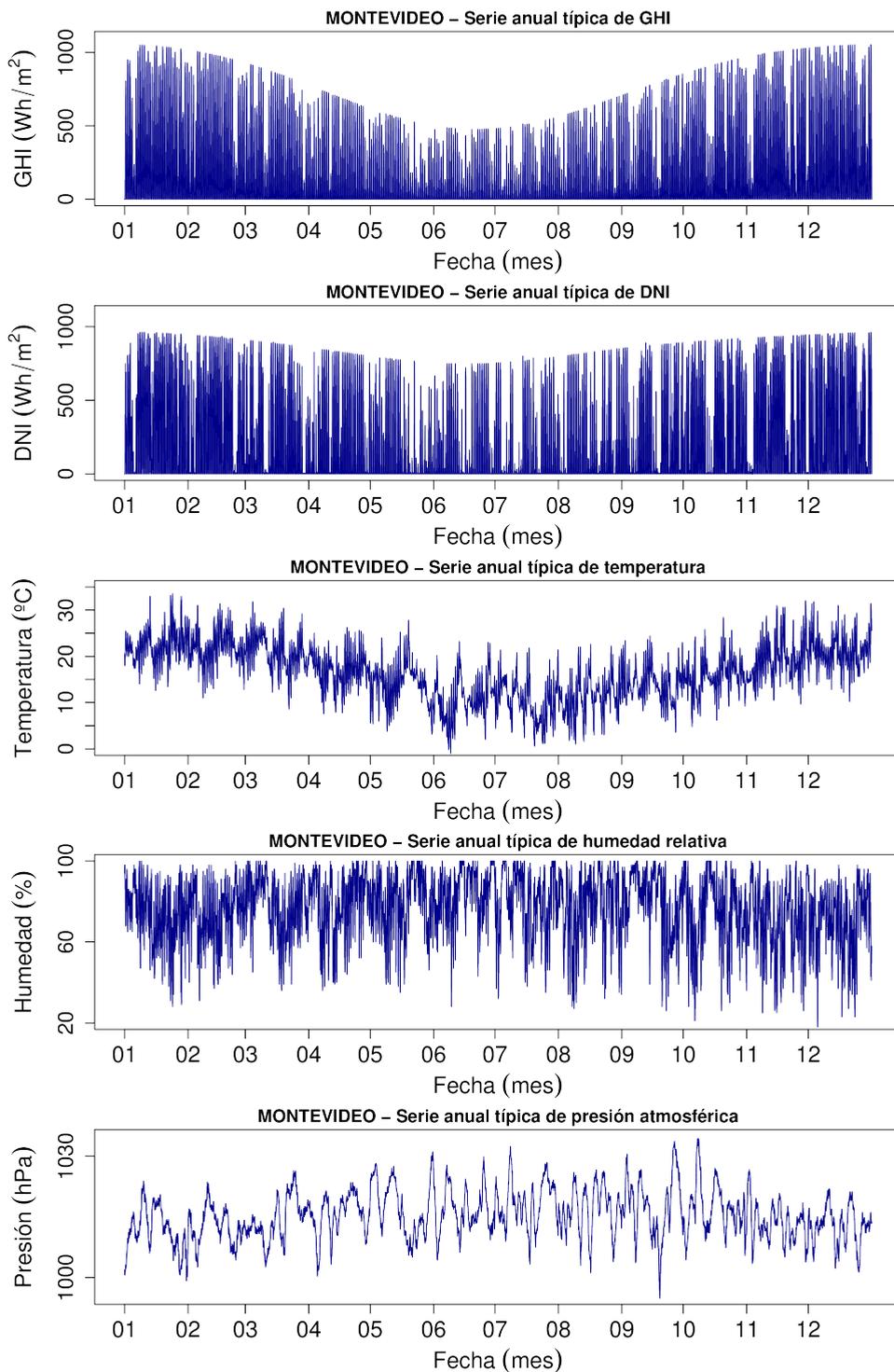
01. **Día del año** (día Juliano): varía entre 1 y 365 (número entero).
02. **Mes del año**: varía entre 1 y 12 (número entero).
03. **Día del mes**: varía entre 1 y la cantidad de días del mes (número entero).
04. **Hora del día**: varía entre 0 y 23 (número entero). La hora está en UTC.
05. **Índice temporal**: tiempo desde el inicio de año expresado en días (número decimal).
06. **GHI**: irradiación global en plano horizontal en Wh/m^2 (número entero).
07. **DNI**: irradiación directa en incidencia normal en Wh/m^2 (número entero).
08. **GTI20**: irradiación global en plano inclinado a 20° en Wh/m^2 (número entero).
09. **GTI35**: irradiación global en plano inclinado a 35° en Wh/m^2 (número entero).
10. **GTI45**: irradiación global en plano inclinado a 45° en Wh/m^2 (número entero).
11. **GTI60**: irradiación global en plano inclinado a 60° en Wh/m^2 (número entero).
12. **GTI90**: irradiación global en plano inclinado a 90° en Wh/m^2 (número entero).
13. **TAM**: temperatura del aire ambiente en grados Celsius (número decimal).

14. **HRE**: humedad relativa en porcentual (número entero).
15. **PAM**: presión atmosférica al nivel medio del mar en hPa (número decimal).
- 16 y 18.: módulo de velocidad de viento a distintas alturas en m/s (número decimal).
- 17 y 19.: dirección de la que viene el viento a distintas alturas en grados (número entero).
20. **CZ**: coseno del ángulo cenital (número decimal).
21. **AS**: ángulo de altura solar en grados (número decimal).
22. **GS**: ángulo de azimuth solar en grados (número decimal).

Los valores relacionados a la irradiación solar y su geometría han sido puestos a cero durante la noche. La noche y el día son fácilmente distinguibles utilizando la columna CZ: si $CZ = 0$ es una hora nocturna y si $CZ > 0$ es una hora diurna. Las columnas de viento 16 y 17, y 18 y 19, se corresponden entre sí. La única excepción a este formato es la localidad de Colonia donde hay una sola medida de viento. En ese caso, las columnas 18 y 19 son inexistentes y las columnas de la 20 a la 22 se corren dos posiciones. La información de la última columna es redundante con la de CZ ($AS = 90^\circ - (180^\circ/\pi) \times \arccos(CZ)$), pero se incluye por comodidad, por ejemplo, para la realización de diagramas solares (AS vs GS) en forma directa.

A modo de ejemplo se brindan en la siguiente carilla los gráficos de las series anuales típicas para algunas variables del AMT de Montevideo. En el Apéndice A aparecen los gráficos de las series típicas de las variables más relevantes para cada localidad.

Figura 5.4: Ejemplo de series horarias típicas para la localidad de Montevideo.



Evaluación del AMTUes

Las series horarias típicas se elaboran buscando preservar la media de largo plazo, la variabilidad real y las correlaciones entre las variables incluidas. Como las series están compuestas por sub-series reales con concurrencia temporal, los últimos dos puntos están garantizados. Pueden no representar, por ejemplo, correlaciones climáticas de fenómenos de más larga escala como correlaciones inter-mensuales o inter-estaciones. En esta Sección presentamos la evaluación realizada sobre los AMT para las series de irradiación solar (GHI y DNI), temperatura ambiente, humedad relativa y presión, que son las variables principales del AMTUes.

Por la forma en que se construyen las series típicas no es posible realizar una evaluación a escala horaria o diaria. Los chequeos realizados son a escala mensual o anual, donde la media de las series del AMTUes pueden ser comparadas contra las de los datos base. En varias de las comparaciones utilizaremos dos indicadores de desempeño comunes; el desvío promedio MBD (Mean Bias Deviation) y el desvío cuadrático medio RMSD (Root Mean Square Deviation) definidos como,

$$\begin{aligned} \text{MBD} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (y_i - y_i^{\text{ref}}), \\ \text{RMSD} &= \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (y_i - y_i^{\text{ref}})^2}, \end{aligned} \tag{6.1}$$

donde y representa el valor a evaluar e y^{ref} el valor de referencia. El orden en que se realiza la resta es importante para el MBD, donde un valor positivo/negativo del indicador implica que el valor a evaluar está en promedio por encima/debajo de la referencia.

El cálculo del MBD y RMSD según la Ec. (6.1) da indicadores absolutos con la misma unidad de la variable y . Los indicadores relativos son útiles para comparar entre sí el desempeño de distintas variables o escalas temporales. Estos indicadores se expresan como un porcentaje de la media de la variable de referencia, y^{ref} , valor que debe especificarse en cada caso.

La irradiación solar es la variable más importante en el AMTUes y por eso su evaluación se realiza con especial atención. En las Secciones 6.1, 6.2 y 6.3 se evalúan las series típicas de irradiación solar que surgen de la concatenación de los meses seleccionados. En la Sección 6.1 se compara la GHI de los meses seleccionados contra la GHI de los datos base. En la Sección 6.2 se realiza una estimación de la incertidumbre del dato de DNI generado por satélite. Esta comparación se realiza contra medidas indirectas de DNI adquiridas en tierra. Los valores del

AMTUs buscan ser representativos del comportamiento meteorológico de largo plazo. En la Sección 6.3 se comparan las medias anuales de GHI y DNI de los meses seleccionados contra los estimativos del modelo global NASA/SSE. Este modelo provee valores de largo plazo integrando 22 años de imágenes de satélite y se utilizó como fuente independiente para comparar los valores anuales del AMTUs. De la comparación realizada en las tres Secciones surge que los valores de irradiación global están sobre-estimados sistemáticamente en los meses seleccionados. Para eliminar este sesgo se aplicó un pos-proceso para adecuar los valores anuales del AMTUs a los valores anuales históricos que surgen de los datos base. En la Sección 6.4 se explica este proceso de adecuación de las medias anuales, que se realizó a las series típicas del AMTUs de irradiación global en plano horizontal y en plano inclinado.

La representatividad del AMTUs para las variables complementarias se presenta en las Secciones 6.6 y 6.7. En la Sección 6.6 se comparan los datos de temperatura, humedad y presión del AMTUs contra los datos base. En la Sección 6.7 se incluye una comparación con los valores anuales oficiales de Uruguay informados por INUMET (valores climatológicos oficiales, elaborados de acuerdo a las prácticas de la WMO [19]).

En el Apéndice B se presentan las medias mensuales y los ciclos diarios promedio que surgen de las series típicas y de los datos base. En particular, en dicho Apéndice se presentan los valores que surgen del AMTUs para la serie de GHI luego del proceso de adecuación del sesgo anual que se explica en la Sección 6.4. De la misma manera, en el Apéndice C se presentan gráficos adicionales a los incluidos en este Capítulo sobre la evaluación de las series típicas finales.

6.1. Evaluación de la GHI para los meses seleccionados

En esta Sección se presenta la comparación de los valores mensuales, anuales y los ciclos diarios promedio de los meses seleccionados contra los datos base para cada localidad. Esta evaluación detecta un sesgo sistemático en las series de irradiación y sugiere aplicar un pos-proceso de adecuación de medias de largo plazo que se detalla en la Sección 6.4. Por lo tanto, la evaluación brindada en esta Sección no es la definitiva.

En la Tabla 6.1 se muestran las medias mensuales de irradiación diaria GHI para los meses seleccionados y las que resultan del modelo satelital a largo plazo. Para los sitios donde hay 15 años de datos los valores de largo plazo coinciden con los de la segunda versión del Mapa Solar del Uruguay [18]. Estos valores mensuales se presentan gráficamente en la Figura 6.1. Los meses seleccionados representan bien los valores mensuales de GHI de largo plazo. Por ejemplo, a escala diaria, las diferencias están dentro del rango $\pm 0,5 \text{ MJ/m}^2$ para el 57% de los meses (34 de 60 meses). Este rango representa un $\pm 3\%$ de una media anual de $\simeq 16,7 \text{ MJ/m}^2$. Los sitios donde se observan menos meses con valores fuera de este rango son Montevideo (5 de 12 meses), Salto (4 de 12 meses) y Rivera (3 de 12 meses). Sólo el 12% de los meses (7 de 60 meses) se encuentran por fuera del rango $\pm 1,0 \text{ MJ/m}^2$ (que es un $\pm 6\%$ de la media anual). Rocha es la única localidad donde las diferencias de todos los meses están dentro de este rango. El desvío máximo es de $+1,8 \text{ MJ/m}^2$ (que es 7,4% de la media de ese mes) y se

da para el mes de noviembre de la localidad de Colonia. La mayoría de los meses presentan diferencias positivas (como se aprecia gráficamente en la Figura 6.1). En la Tabla 6.2 se indican los valores anualizados para los meses seleccionados y para los datos base, y los indicadores de la comparación mensual. Si bien las diferencias anuales son pequeñas (de $\approx 2,0\%$), también son positivas en todos los casos. Las diferencias positivas de los valores anuales se pueden visualizar gráficamente en la Figura 6.2.a. Un sesgo similar (del orden del $\approx 3,0\%$ y positivo) se encontró al comparar los valores de GHI de los meses seleccionados con los estimativos de largo plazo del modelo NASS/SSE (ver Sección 6.3).

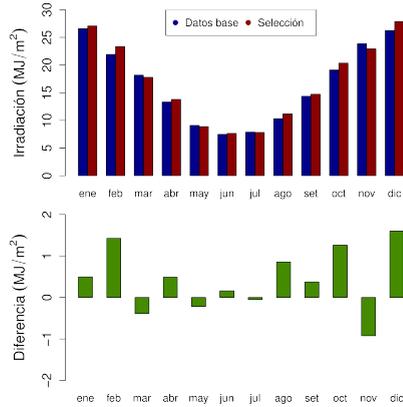
Tabla 6.1: Comparación entre los valores mensuales de irradiación GHI diaria de los meses seleccionados y de los datos de satélite para cada localidad. Los valores están en MJ/m².

| MVD | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| base | 26,6 | 21,9 | 18,2 | 13,3 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 14,4 | 19,1 | 23,8 | 26,3 |
| selec. | 27,1 | 23,4 | 17,8 | 13,8 | 8,9 | 7,7 | 7,8 | 11,2 | 14,7 | 20,4 | 22,9 | 27,9 |
| dif. | +0,5 | +1,5 | -0,4 | +0,5 | -0,2 | +0,2 | -0,1 | +0,9 | +0,3 | +1,3 | -0,9 | +1,6 |
| SAL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 26,1 | 22,4 | 18,9 | 14,3 | 10,2 | 8,3 | 9,6 | 12,3 | 16,0 | 19,6 | 24,2 | 26,0 |
| selec. | 26,9 | 22,0 | 19,8 | 14,4 | 10,1 | 8,8 | 9,9 | 12,6 | 16,3 | 18,9 | 24,3 | 24,7 |
| dif. | +0,8 | -0,4 | +0,9 | +0,1 | -0,1 | +0,5 | +0,3 | +0,3 | +0,3 | -0,7 | +0,1 | -1,3 |
| RIV | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 25,3 | 21,9 | 18,5 | 14,1 | 10,1 | 8,0 | 9,4 | 11,8 | 14,6 | 19,0 | 23,3 | 25,3 |
| selec. | 25,5 | 22,0 | 18,6 | 15,0 | 10,3 | 8,1 | 10,2 | 12,2 | 14,4 | 20,6 | 23,8 | 25,5 |
| dif. | +0,2 | +0,1 | +0,1 | +0,9 | +0,2 | +0,1 | +0,8 | +0,4 | -0,2 | +1,6 | +0,5 | +0,2 |
| ROC | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 25,2 | 20,8 | 17,3 | 12,9 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 13,9 | 18,4 | 23,4 | 25,4 |
| selec. | 25,8 | 21,5 | 17,1 | 13,5 | 9,4 | 8,2 | 8,4 | 10,3 | 14,6 | 19,1 | 23,8 | 25,8 |
| dif. | +0,6 | +0,7 | -0,2 | +0,6 | +0,3 | +0,7 | +0,5 | 0,0 | +0,7 | +0,7 | +0,4 | +0,4 |
| COL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 26,5 | 21,9 | 18,0 | 13,6 | 9,3 | 7,6 | 8,2 | 10,8 | 15,1 | 19,8 | 24,2 | 26,5 |
| selec. | 27,0 | 21,4 | 18,1 | 14,5 | 10,1 | 8,5 | 8,8 | 11,4 | 14,1 | 20,2 | 26,0 | 25,4 |
| dif. | +0,5 | -0,5 | +0,1 | +0,9 | +0,8 | +0,9 | +0,6 | +0,6 | -1,0 | +0,4 | +1,8 | -1,1 |

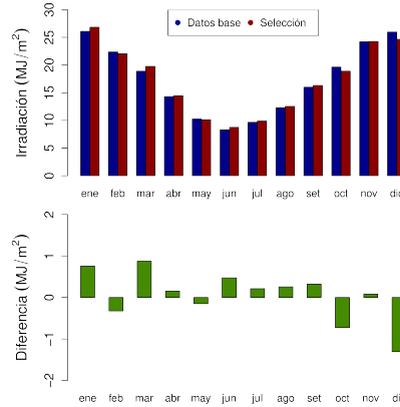
Los indicadores mensuales de la Tabla 6.2 (MBD y RMSD) son calculados para los valores de los 12 meses seleccionados de cada localidad tomando como referencia los valores de las series de datos base. El MBD mensual es similar a la diferencia anual⁵. El cálculo del RMSD da una medida de la dispersión de los valores mensuales respecto a la referencia mes a mes. Los RMSD hallados son menores a 1 MJ/m² en todos los casos. En promedio, los valores mensuales presentan un desvío de +0,3 MJ/m² y una dispersión de +0,7 MJ/m², que respecto a una media de 16,7 MJ/m², son un +1,8% y un 4,2%. El gráfico de dispersión para estos valores mensuales se muestra en la Figura 6.2.b. Los valores se encuentran en torno a la recta $x = y$, lo que muestra que los meses seleccionados no tienen una variabilidad importante con respecto a los datos de largo plazo.

5. El cálculo sería matemáticamente el mismo si todos los meses tuvieran la misma cantidad de días. La diferencia entre ambas cuentas siempre es pequeña y, en este caso, da el mismo resultado.

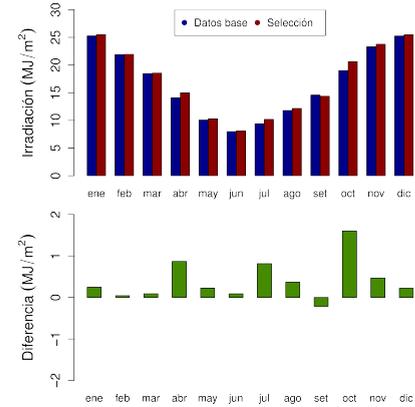
Figura 6.1: Comparación a escala mensual de los valores de irradiación GHI de los meses seleccionados y los datos de largo plazo. La comparación usando los datos del AMTUES se muestra en la Sección 6.5.



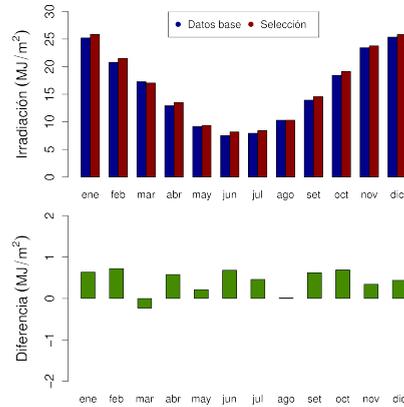
(a) Montevideo.



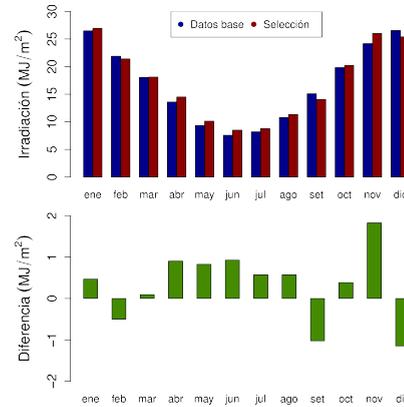
(b) Salto.



(c) Rivera.



(d) Rocha.

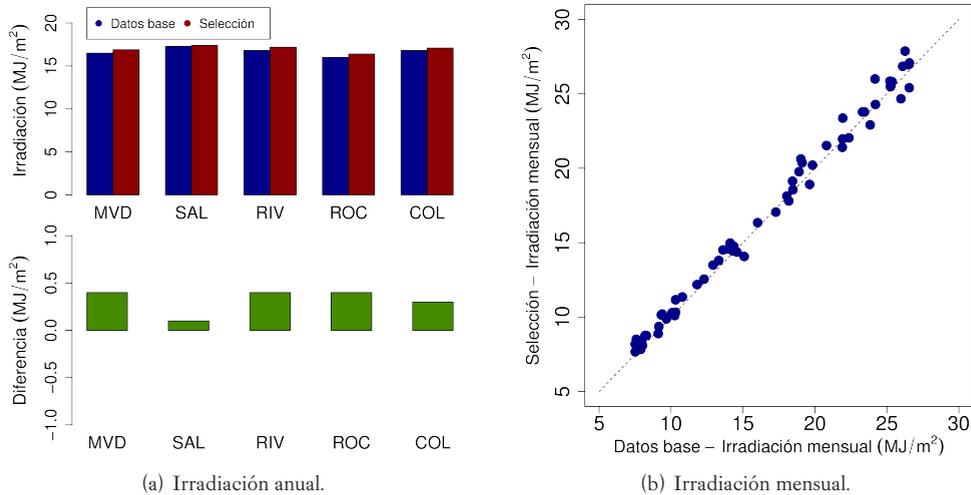


(e) Colonia.

Tabla 6.2: Comparación de los valores anuales y mensuales de irradiación GHI para los meses seleccionados y los datos base. Los valores están redondeados a una cifra. Los porcentajes fueron calculados a partir de los valores no redondeados. Los valores aquí presentados no son los definitivos del AMTUs.

| localidad | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | datos base (MJ/m ²) | selección (MJ/m ²) | dif. anual (MJ/m ²) | dif. anual (%) | MBD (MJ/m ²) | RMSD (MJ/m ²) |
| Montevideo | 16,5 | 16,9 | +0,4 | +2,5 | +0,4 | 0,8 |
| Salto | 17,3 | 17,4 | +0,1 | +0,3 | +0,1 | 0,6 |
| Rivera | 16,8 | 17,2 | +0,4 | +2,4 | +0,4 | 0,6 |
| Rocha | 16,0 | 16,4 | +0,4 | +2,6 | +0,4 | 0,5 |
| Colonia | 16,8 | 17,1 | +0,3 | +2,0 | +0,3 | 0,9 |
| media | 16,7 | 17,0 | +0,3 | +2,0 | +0,3 | 0,7 |

Figura 6.2: Comparación de los promedios diarios de irradiación a escala anual y mensual.



La última comparación se realiza en términos de los ciclos diarios. Estos ciclos son el resultado de promediar hora a hora los datos de la serie típica y los datos de la serie base por separado. En la Figura 6.3 se muestran estos ciclos para cada localidad. Se compara el ciclo diario de los meses seleccionados (en rojo) contra el de los datos base (en azul). En el caso de Salto, los ciclos diarios son prácticamente iguales. En las otras estaciones se pueden apreciar ciclos muy parecidos entre sí, con una pequeña sobre-estimación de los meses seleccionados en torno al mediodía solar.

En la Tabla 6.3 se resume la comparación de ciclos diarios para cada estación. Los valores porcentuales se expresan relativos al valor de los datos base para cada estación. En la parte izquierda de la Tabla se comparan las medias diurnas de cada ciclo diario. Las diferencias van de +3,0% en Rocha a +0,6% en Salto. La comparación estación por estación muestra resulta-

dos similares a los de la Tabla 6.2. La sobre-estimación media de los ciclos diarios es de 2,2% (promedio en todas las localidades) y es similar a la encontrada en las comparaciones anteriores. De la Figura 6.3 se observa que esta sobre-estimación respecto a los datos base se da en el mediodía solar. Es posible que se deba al pos-proceso de GHI, donde los datos de cielo despejado en torno al mediodía solar son sustituidos por la salida de un modelo de Cielo Claro. Esta corrección no se realizó sobre los datos base y sí sobre las series típicas. Del lado derecho de la Tabla 6.3 se muestra la hora donde la sobre-estimación es mayor. Se presenta el valor de la diferencia, el valor del AMTUs y de los datos base para esa hora. El desvío máximo es de +4,5% para la estación de Rivera y el mínimo es de +2,7% para la estación de Salto. En promedio, el desvío máximo es de +3,9%. La comparación de ciclos diarios reporta conclusiones similares a las comparaciones anteriores. La irradiación solar GHI es sobre-estimada en un $\simeq 2\%$ por los meses seleccionados y Salto es la estación donde se aprecian menores diferencias.

Tabla 6.3: Diferencia entre los ciclos diarios promedio de los meses seleccionados y los datos base (columna datos ref.). Se compara la diferencia de las medias diurnas y la diferencia máxima de los ciclos. Los porcentajes se calcularon a partir de valores no redondeados.

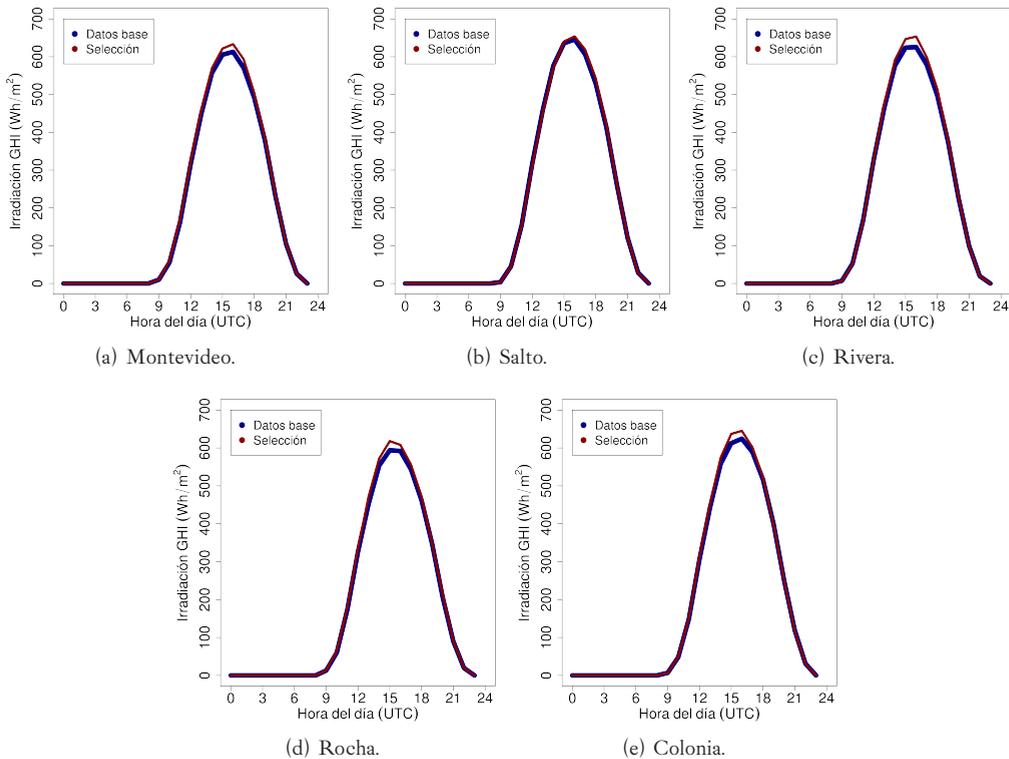
| sitio | diferencia de la media diurna | | | | diferencia máxima | | | |
|-------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------|
| | datos ref. (Wh/m ²) | selección (Wh/m ²) | dif. (Wh/m ²) | dif. (%) | datos ref. (Wh/m ²) | selección (Wh/m ²) | dif. (Wh/m ²) | dif. (%) |
| MVD | 327 | 336 | +9 | +2,9 | 570 | 593 | +23 | +4,0 |
| SAL | 343 | 344 | +1 | +0,6 | 529 | 543 | +14 | +2,7 |
| RIV | 332 | 340 | +8 | +2,6 | 625 | 653 | +28 | +4,5 |
| ROC | 317 | 326 | +9 | +3,0 | 594 | 618 | +24 | +4,1 |
| COL | 332 | 339 | +7 | +2,1 | 613 | 637 | +24 | +4,0 |
| media | 330 | 337 | +7 | +2,2 | – | – | +23 | +3,9 |

Las comparaciones apuntan que los valores de irradiación solar de los meses seleccionados son representativos de la climatología de dicha variable para Uruguay. En términos anuales, los valores están un $\simeq 2\%$ por encima de los datos base. Los valores exactos para cada estación se muestran en las Tablas 6.2 y 6.3. En el caso de los valores mensuales, el desvío promedio es el mismo que la diferencia anual y presentan una dispersión del 4%. La conclusión es que la metodología utilizada selecciona meses que son representativos y ante la opción de seleccionar un candidato cuya irradiación está por encima o por debajo de la media tiende a seleccionar según la primera opción. Como la variabilidad espacial del recurso solar en Uruguay no es muy grande (del orden del 7% [36]) los sesgos anuales diferentes en cada estación pueden llevar a conclusiones equivocadas a la hora de utilizar el AMTUs. Estos sesgos fueron corregidos en las series típicas AMT según se explica en la Sección 6.4.

6.2. Incertidumbre estimada en DNI

Calcular la DNI a partir de la GHI usando un modelo de fracción difusa tiene una incertidumbre asociada. Estimar esta incertidumbre no es tarea sencilla debido a que la medida de DNI en Uruguay es escasa. Para medir DNI en forma continua se requiere un mecanismo de

Figura 6.3: Ciclos diarios promedio de irradiación solar para los meses seleccionados y los datos base. En la Sección 6.5 y en el Apéndice B se presentan gráficos iguales pero con los valores definitivos del AMTUES.



seguimiento preciso de la posición del Sol y la medida es muy sensible a una correcta alineación del sensor (pirheliómetro). Las campañas de medición realizadas en el pasado han presentado problemas operativos asociados al mantenimiento de los sistemas de seguimiento⁶. La DNI también puede medirse de forma indirecta, si se miden las componentes global (GHI) y difusa (DHI) de la radiación solar en plano horizontal. La relación entre estas magnitudes es:

$$DNI = \frac{GHI - DHI}{\cos \theta_z}. \quad (6.2)$$

Esta relación es de naturaleza geométrica. Es una práctica usual en las estaciones de medida que miden las tres componentes por separado, utilizar esta ecuación para control de calidad, haciendo un chequeo de consistencia. Es importante observar que el coseno del ángulo cenital se anula al amanecer y atardecer, por lo cual el uso de la Ec. (6.2) puede amplificar errores de medida e implicar un error importante en la DNI para las horas con baja altura solar. En el AMTUES se utilizó esta ecuación para calcular la DNI a partir de la GHI de los meses

6. El LES ha iniciado un programa de medida continua de DNI en Salto en 2015, basado en un sistema de seguimiento SOLYS2 de Kipp & Zonen. Hasta el momento se cuentan con pocos meses de datos.

seleccionados. Los valores de GHI fueron previamente pos-procesados por limitación de k_T para las horas bajas, por lo que en las series típicas de DNI no se observan valores anómalos o con errores notorios en el amanecer o atardecer por utilizar la Ec. (6.2).

En Uruguay existen algunos años de medidas de irradiancia difusa realizadas por el LES en los sitios AR (Artigas), TT (Treinta y Tres) y AZ (Montevideo), y por el INUMET en la estación SM (Salto). Dos de estas ubicaciones, SM y AZ, coinciden con las localidades geográficas consideradas en este trabajo y, además, son los que tienen mayor estadística de datos de DHI. Comparar en estas localidades nos permitirá estimar, en una primera aproximación, la incertidumbre asociada a la DNI estimada para el AMTUs. Para este propósito se siguió el procedimiento de pos-proceso de la GHI de satélite explicado en la Sección 5.4 y de cálculo de la DNI explicado en la Subsección 4.2.1. Se incluye también la comparación en GHI debido a que su pos-proceso se hizo específicamente para el AMTUs. Además, permite comparar indicadores y gráficos con el análisis realizado para la DNI.

La medida de difusa en Salto fue realizada por el INUMET utilizando un piranómetro Kipp & Zonen y una banda de sombra⁷. La banda de sombra se ajusta periódicamente para asegurarse que la irradiancia directa no llega al piranómetro. La banda bloquea, además, parte de la bóveda celeste de la cual debería llegar irradiancia difusa. Por esto, las medidas de irradiancia difusa por banda de sombra se corrigen aplicando un factor que varía con el día Juliano, conforme varía el ángulo sólido que bloquea la banda de sombra. La expresión para calcular estos factores se encuentra en el manual del fabricante (ver Kipp & Zonen Shadow Ring Instructions Manual). La medida utilizada se extiende durante el periodo 06/1998 al 12/2003, pero la comparación se puede realizar a partir del 01/2000 debido a la disponibilidad de imágenes de satélite en la base de imágenes del LES.

La medida asociada a Montevideo fue realizada por el LES en la azotea de la Facultad de Ingeniería de la Udelar (estación AZ). Allí se midió la irradiancia difusa desde 03/2011 al 08/2013 utilizando un equipo SPN1 (de la empresa británica Delta-T, <http://www.deltat.co.uk/>), que es capaz de medir irradiancia difusa sin partes móviles. El equipo cuenta con una array de sensores y una máscara diseñada de forma tal que en todo momento del día al menos un sensor se encuentra expuesto al Sol y otro se encuentra bloqueado. La electrónica interna del equipo genera una salida de DHI, usando los máximos y mínimos registrados por sus sensores. Recientemente, un análisis exhaustivo de esta tecnología [56] ha determinado que su ángulo de apertura efectivo es mayor que el de un pirheliómetro estándar (5°), por lo que, si se compara con una medida de DNI el instrumento la sobre-estima en forma sistemática. El resultado del análisis en [56] es que, a efectos de hacer la DNI derivada comparable con una medida de pirheliómetro, la medida de DHI de estos instrumentos SPN1 se debe corregir aplicando un factor 1,05. Esta corrección fue realizada sobre las medidas de DHI de este instrumento. En la Figura 6.4 se muestran los dos tipos de medidas de irradiancia difusa utilizadas para este trabajo.

7. La medida sistemática con banda de sombra requiere alinear semanalmente su posición. Esta medida fue mantenida con dedicación durante varios años por el Sr. Sergio Arizcorreta de INUMET, a quien se agradece la información brindada.

Figura 6.4: Equipamiento para medir irradiancia difusa. El equipo que se muestra a la derecha es el mismo que registró las medidas en la estación de AZ. La figura de la izquierda es sólo ilustrativa.



(a) Banda de sombra. Fuente: Kipp & Zonen.



(b) Equipo Delta-T SPN1 (prop. del LES).

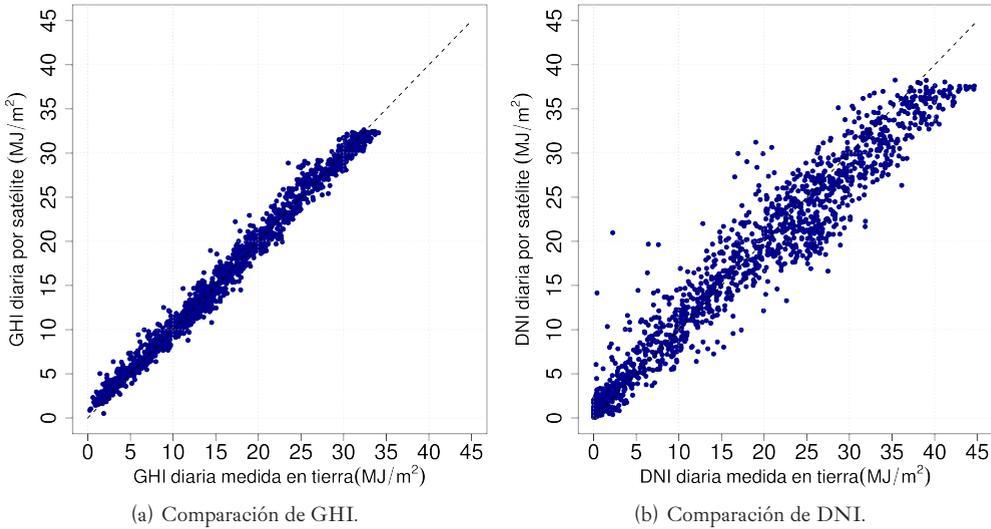
La comparación se realizó a escala diaria. Se calcularon los datos de GHI y DNI por satélite siguiendo exactamente los mismos procedimientos que en este AMTUs y se hallaron los totales diarios que se muestran en los gráficos de dispersión de la Figura 6.5. En la Tabla 6.4 se presentan los indicadores cuantitativos de la comparación. La comparación no se puede realizar a escala horaria porque la etiqueta temporal de los datos no coincide con la etiqueta temporal de los datos de satélite (hay 30 minutos de desfase entre una y otra, y la irradiancia solar es muy sensible a este tipo de corrimientos temporales).

Tabla 6.4: Comparación cuantitativa entre la GHI y DNI por satélite contra las medidas disponibles en SM (Salto) y AZ (Montevideo). Las medias no son representativas de la localidad porque la estadística es parcial y no comprende varios años completos.

| localidad | días | GHI | | | DNI | | |
|------------|------|-------------------------------|-------------|--------------|-------------------------------|-------------|--------------|
| | | media (MJ/m ²) | rMBD (%) | rRMSD (%) | media (MJ/m ²) | rMBD (%) | rRMSD (%) |
| Montevideo | 523 | 13,9 | +0,6 | 7,5 | 15,5 | -2,6 | 18,2 |
| Salto | 1004 | 17,0 | +0,6 | 6,4 | 18,1 | -2,7 | 18,5 |

Los gráficos de la Figura 6.5 muestran, como era de esperar, que la estimación por satélite de GHI presenta menor incertidumbre que la de DNI. El rango de la DNI es también mayor, ya que varía entre $\simeq 0\text{--}45$ MJ/m², en comparación con el rango de $\simeq 0\text{--}35$ MJ/m² para la GHI. El desvío rRMSD a escala diaria es del orden de 7% de la media para la GHI y de 18% para la DNI, lo que da cuenta de la mayor incertidumbre asociada a la estimación de DNI. El desvío promedio, rMBD, es despreciable para la GHI y es de $\simeq -3\%$ para DNI. Esto muestra

Figura 6.5: Gráficos de comparación de la GHI y DNI satelital del AMTUes contra medidas de GHI y DNI en superficie. En el eje x se coloca la medida y en el eje y el estimativo satelital. Se coloca la línea $x = y$ para ilustrar la situación de ajuste perfecto. La escala de ambos gráficos es la misma para una mejor comparación.



que la DNI en el AMTUes está ligeramente subestimada en aproximadamente un 3%, lo cual se confirma al analizar la Figura 6.5.b. Allí se aprecia que para valores de irradiación DNI altos los valores de DNI por satélite tienden a estar por debajo de la recta de ajuste perfecto $x = y$.

6.3. Comparación de los meses seleccionados con NASA/SSE

Una validación independiente para los valores de irradiación solar de los meses seleccionados se realizó contra la salida del modelo NASA/SSE⁸ [57]. Este modelo se computa en forma global y los estimativos de largo plazo están disponibles en una grilla espacial de $1^\circ \times 1^\circ$. Los estimativos son elaborados en base a 22 años de información satelital (periodo entre 1983 y 2005). Para la irradiación solar, los estimativos NASA/SSE son generados en base a una variación del modelo de Pinker y Laszlo [29, 57]. Este modelo utiliza un modelo de transferencia radiante que tiene en cuenta los fenómenos de absorción y dispersión a través de la atmósfera terrestre. Además de las imágenes de satélite, requiere información del vapor de agua, del contenido de Ozono y del contenido de aerosoles en la atmósfera. Estos valores son estimados por satélite (para el vapor de agua y Ozono) o por modelos de transporte (para aerosoles). En [57] se reporta un MBD de $\simeq -0,2 \text{ MJ/m}^2$ y un RMSD de $\simeq 1,7 \text{ MJ/m}^2$ para los valores mensuales de GHI de este modelo, y de $\simeq +1,4 \text{ MJ/m}^2$ y $\simeq 3,9 \text{ MJ/m}^2$ para los de DNI. Esta comparación se realizó contra los datos de la Baseline Solar Radiation Network (BSRN, <http://bsrn.awi.de/>), una red de medida a escala global de la irradiancia solar que se compone de sitios de medida

8. SSE es la sigla de Surface meteorology and Solar Energy; <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

de alta calidad⁹. Estos valores fueron hallados en comparación con datos medidos en diferentes partes del mundo entre las latitudes 60°N y 60°S, con distintos climas y variadas condiciones atmosféricas. El modelo NASA/SSE es reconocido y aceptado internacionalmente.

A pesar de que la estadística temporal del AMTÚes (2000–2014) no coincide con la de los estimativos NASA/SSE (1983–2005), la comparación es válida en términos de largo plazo contra una fuente independiente a los datos base. Esta comparación es en particular importante para la DNI debido a que los datos NASA/SSE son la única fuente de largo plazo para esta validación. En la Tabla 6.5 se presenta la comparación de los valores anuales de GHI y DNI entre los meses seleccionados y el modelo NASA/SSE. Se observan diferencias pequeñas entre los valores anuales de ambas fuentes, que van desde +1,5% a +3,9% para la GHI y desde -2,2% a +1,6% para la DNI. En términos absolutos, las diferencias máximas encontradas son de 0,6 MJ/m² para la GHI y \simeq 0,3 MJ/m² para la DNI. Para la GHI todos los desvíos son positivos. En cambio, para la DNI existen desvíos positivos y negativos dependiendo de la localidad, que están todos dentro del rango $\pm 2,2\%$. No se observan desvíos grandes que puedan estar por fuera del rango de incertidumbre de ambos estimativos.

Tabla 6.5: Comparación entre los valores anuales de la GHI y DNI de los meses seleccionados contra los valores anuales del modelo NASA/SSE. Los valores en MJ/m² se encuentra redondeados a una cifra. Los valores porcentuales fueron calculados desde los valores sin redondear. Los valores aquí presentados no son los definitivos del AMTÚes.

| sitio | GHI | | | | DNI | | | |
|-------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------|
| | selección (MJ/m ²) | NASA (MJ/m ²) | dif. (MJ/m ²) | dif. (%) | selección (MJ/m ²) | NASA (MJ/m ²) | dif. (MJ/m ²) | dif. (%) |
| MVD | 16,9 | 16,3 | +0,6 | +3,9 | 18,4 | 18,1 | +0,3 | +1,6 |
| SAL | 17,4 | 17,1 | +0,3 | +1,7 | 18,7 | 18,6 | +0,1 | +0,9 |
| RIV | 17,1 | 16,9 | +0,2 | +1,5 | 17,6 | 17,9 | -0,3 | -2,2 |
| ROC | 16,4 | 15,9 | +0,5 | +3,5 | 17,2 | 17,1 | +0,1 | +0,5 |
| COL | 17,1 | 16,6 | +0,5 | +2,8 | 18,6 | 18,7 | -0,1 | -0,3 |

6.4. Adecuación del sesgo anual

Las comparaciones de GHI realizadas indican que los meses seleccionados sobrestiman esta variable sistemáticamente. Esta conclusión es confirmada por las dos comparaciones realizadas de GHI, contra los datos base y contra los estimativos del modelo NASA/SSE. Esta sobrestimación es pequeña (del orden del 2%) pero puede llevar a un mal uso de la información en el contexto de Uruguay, donde la variabilidad espacial del recurso no es muy acentuada. Debido a esto se realizó una adecuación del sesgo anual de los meses seleccionados previo a incluirlos en el AMTÚes. Este pos-proceso es importante debido a que la sobrestimación tiene un valor diferente en cada localidad. Lo que se busca es que la serie típica tenga exactamente el mismo valor anual que el promedio histórico de los datos base. El proceso se aplicó a la irradiación

9. Para formar parte de la BSRN se debe tener equipamiento para la medida continua de alta calidad de las tres componentes principales de la irradiancia solar (GHI, DHI y DNI) y aplicar una serie de controles de calidad.

global en plano horizontal y en plano inclinado. No se realizó para la irradiación DNI. La única comparación realizada para la DNI es contra los estimativos del modelo NASA/SSE y no se encontró en los meses seleccionados un sesgo sistemático a la sobrestimación o subestimación, si no desvíos alternados positivos y negativos.

La adecuación se realiza aplicando a la serie típica un factor de corrección que hace coincidir el valor anual de la serie típica con el valor anual de los datos de largo plazo. Estos factores se calcularon para la irradiación global en plano horizontal (GHI) y en plano inclinado (GTI) para las cinco inclinaciones que se incluyen en el AMTUes. El cálculo de los factores y la adecuación de las series se realizó en forma independiente para cada variable y cada localidad. Tanto el estimativo satelital de GHI como el proceso de pasaje a plano inclinado tienen una incertidumbre asociada, y la modificación introducida en las series debido al proceso de adecuación está dentro de los rangos de incertidumbre de la metodología.

En la Tabla 6.6 se muestran los valores anuales de los datos base y de los meses seleccionados para las variables consideradas para la adecuación. Se presenta también las diferencias absolutas (en MJ/m²) y porcentuales entre ambos valores. La diferencias varían por localidad y por variable. Por localidad, se observan diferencias promedio de +0,8% (en Salto) a +3,6% (en Colonia). En Salto es dónde las diferencias son menores para todas las variables. Por variable, las diferencias promedio van de +2,0% para la GHI hasta +3,3% para la GTI a 90°. Se observa que las diferencias promedio aumentan conforme aumenta la inclinación de las superficies de captación, por lo que estos sesgos pueden ser introducidos por la metodología de pasaje a plano inclinado.

A partir de los valores anuales es posible calcular los factores de ajuste para cada variable y cada localidad. Estos factores se muestran también en la Tabla 6.6. La corrección en GHI para los meses seleccionados es de -2,0% en promedio, con un máximo de -2,6% en Rocha. En promedio, todas las adecuaciones (incluyendo GHI y las cinco inclinaciones de GTI) son de -2,7% con un máximo de -5,1% para la GTI a 90° en Colonia. Esto factores fueron aplicados a las series horarias de los meses seleccionados y resultan en series más representativas de los valores de largo plazo de estas variables (que son las que componen el AMTUes).

6.5. Evaluación de la GHI del AMTUes

Luego del proceso de adecuación se obtienen las series de irradiación global que conforman el AMTUes. En esta Sección realizamos un análisis similar al de las Secciones 6.1 y 6.3, pero para las series definitivas del AMTUes. La comparación se realiza para la GHI del AMTUes en comparación a la de los datos base y a la del modelo NASA/SSE. Las medias mensuales y los ciclos diarios promedio del AMTUes se comparan contra los datos base, pero no los valores anuales debido a que las medias fueron ajustadas para que coincidan. Los valores anuales del AMTUes son comparados contra las estimaciones del modelo NASA/SSE.

La comparación anual contra los estimativos del modelo NASA/SSE se muestra en la Tabla 6.7. Comparando la información de esta Tabla con la de Tabla 6.5 (datos previo a la adecuación) se observa un mejor ajuste entre los datos y el modelo NASA/SSE. En la nueva com-

Tabla 6.6: Factores que se utilizaron para adecuar el sesgo anual de las series típicas a la media anual de los datos de largo plazo.

| MVD | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
|---------------------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| selección | 16,9 | 18,4 | 18,5 | 18,0 | 16,5 | 11,3 | – |
| datos base | 16,5 | 18,0 | 18,0 | 17,5 | 16,1 | 11,1 | – |
| dif. (MJ/m ²) | +0,4 | +0,4 | +0,5 | +0,5 | +0,4 | +0,2 | +0,4 |
| dif. (%) | +2,5% | +2,6% | +2,5% | +2,5% | +2,4% | +1,8% | +2,4% |
| factores | 0,975 | 0,974 | 0,975 | 0,975 | 0,976 | 0,982 | 0,976 |
| SAL | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
| selección | 17,4 | 18,8 | 18,8 | 18,2 | 16,6 | 11,2 | – |
| datos base | 17,3 | 18,7 | 18,6 | 18,0 | 16,4 | 11,0 | – |
| dif. (MJ/m ²) | +0,1 | +0,1 | +0,2 | +0,2 | +0,2 | +0,2 | +0,1 |
| dif. (%) | +0,3% | +0,7% | +0,8% | +0,9% | +1,1% | +1,2% | +0,8% |
| factores | 0,997 | 0,993 | 0,992 | 0,991 | 0,989 | 0,988 | 0,992 |
| RIV | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
| selección | 17,1 | 18,5 | 18,4 | 17,8 | 16,2 | 10,9 | – |
| datos base | 16,7 | 17,9 | 17,8 | 17,2 | 15,6 | 10,5 | – |
| dif. (MJ/m ²) | +0,4 | +0,4 | +0,6 | +0,6 | +0,6 | +0,4 | +0,5 |
| dif. (%) | +2,4% | +2,2% | +3,2% | +3,4% | +3,6% | +3,7% | +3,1% |
| factores | 0,976 | 0,972 | 0,969 | 0,967 | 0,966 | 0,965 | 0,969 |
| ROC | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
| selección | 16,4 | 17,9 | 18,0 | 17,5 | 16,1 | 11,3 | – |
| datos base | 16,0 | 17,3 | 17,4 | 16,9 | 15,5 | 10,8 | – |
| dif. (MJ/m ²) | +0,4 | +0,6 | +0,6 | +0,6 | +0,6 | +0,5 | +0,6 |
| dif. (%) | +2,6% | +3,1% | +3,4% | +3,6% | +3,8% | +4,1% | +3,5% |
| factores | 0,974 | 0,969 | 0,966 | 0,964 | 0,962 | 0,959 | 0,965 |
| COL | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
| selección | 17,1 | 18,8 | 19,0 | 18,5 | 17,1 | 11,9 | – |
| datos base | 16,8 | 18,3 | 18,3 | 17,8 | 16,3 | 11,2 | – |
| dif. (MJ/m ²) | +0,3 | +0,5 | +0,7 | +0,7 | +0,8 | +0,7 | +0,6 |
| dif. (%) | +1,9% | +2,8% | +3,3% | +3,7% | +4,3% | +5,7% | +3,6% |
| factores | 0,981 | 0,972 | 0,967 | 0,963 | 0,957 | 0,943 | 0,964 |
| PROMEDIO | GHI | GTI20 | GTI35 | GTI45 | GTI60 | GTI90 | media |
| dif. (MJ/m ²) | +0,3 | +0,4 | +0,5 | +0,5 | +0,5 | +0,4 | +0,4 |
| dif. (%) | +2,0% | +2,4% | +2,6% | +2,8% | +3,0% | +3,3% | +2,7% |
| factores | 0,980 | 0,976 | 0,974 | 0,972 | 0,970 | 0,967 | 0,973 |

paración las diferencias son menores y no son todas positivas como en la comparación anterior. Las diferencias entre los valores anuales del AMTUs y del modelo NASA/SSE están dentro del rango $\pm 0,2$ MJ/m². Las diferencias porcentuales pasan de estar en el rango entre +1,5% y +3,9% al rango entre -0,9% y +1,4%. Esta comparación brinda una primera evidencia de que el pos-proceso de adecuación mejora el AMTUs.

Tabla 6.7: Comparación entre los valores anuales de GHI del AMTUes contra los del modelo NASA/SSE. Los valores en MJ/m² se encuentra redondeados a una cifra. Los valores porcentuales fueron calculados desde los valores sin redondear.

| sitio | AMTUes | NASA | dif. | dif. |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|------|
| | (MJ/m ²) | (MJ/m ²) | (MJ/m ²) | (%) |
| MVD | 16,5 | 16,3 | +0,2 | +1,3 |
| SAL | 17,3 | 17,1 | +0,2 | +1,4 |
| RIV | 16,7 | 16,9 | -0,2 | -0,9 |
| ROC | 16,0 | 15,9 | +0,1 | +0,9 |
| COL | 16,7 | 16,6 | +0,1 | +0,7 |

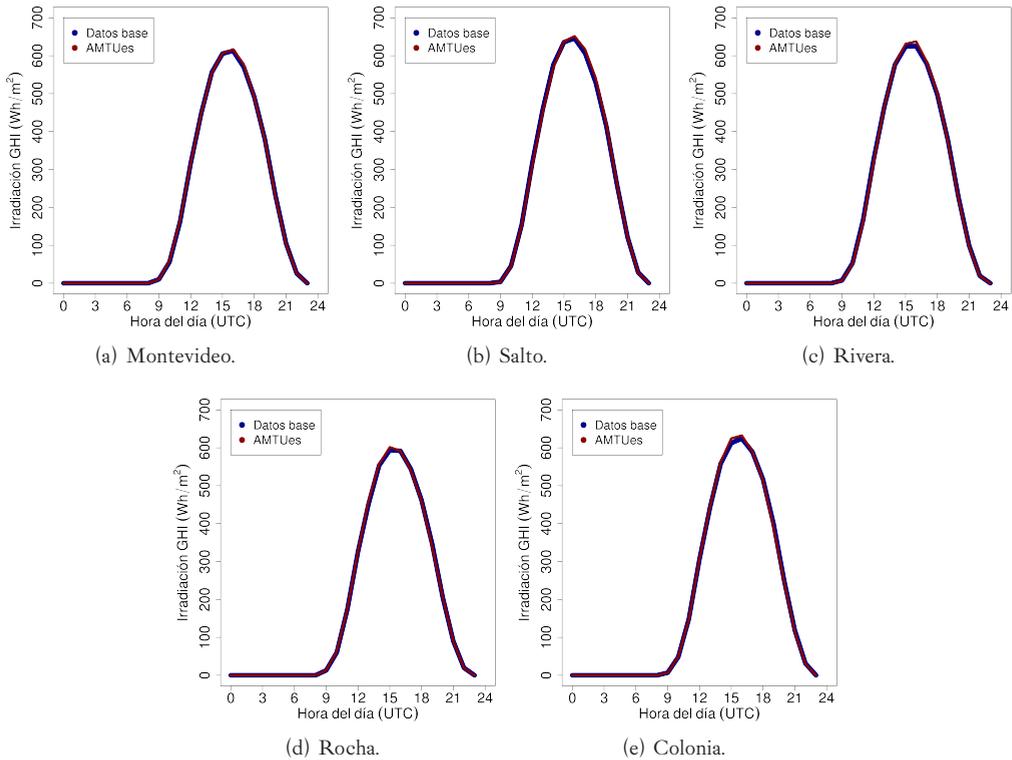
La comparación contra los datos base también da cuenta de un mejor desempeño del AMTUes luego de este pos-proceso. En la Tabla 6.8 y la Figura 6.6 se muestra la comparación de ciclos diarios entre el AMTUes y los datos base. Comparando los indicadores obtenidos con los de la Tabla 6.3 se puede apreciar una importante disminución de la diferencia media y máxima entre los ciclos diarios. En promedio, la diferencia media se reduce de +2,2% a +0,2% y la diferencia máxima se reduce de +3,9% a +1,8%. En la Figura 6.6 se puede observar como la subestimación sistemática presente en torno al mediodía solar ha desaparecido y que el ajuste del los ciclos diarios es mejor respecto a la Figura 6.3.

Tabla 6.8: Diferencia entre los ciclos diarios promedio del AMTUes y los datos base (columna datos ref.). Se compara la diferencia de las medias diurnas y la diferencia máxima de los ciclos diarios. Los porcentajes fueron calculados a partir de los valores no redondeados.

| sitio | diferencia de la media diurna | | | | diferencia máxima | | | |
|-------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------|
| | datos ref. (Wh/m ²) | AMTUes (Wh/m ²) | dif. (Wh/m ²) | dif. (%) | datos ref. (Wh/m ²) | AMTUes (Wh/m ²) | dif. (Wh/m ²) | dif. (%) |
| MVD | 327 | 327 | < 1 | +0,3 | 570 | 578 | +8 | +1,4 |
| SAL | 343 | 343 | < 1 | +0,2 | 529 | 541 | +12 | +2,3 |
| RIV | 332 | 332 | < 1 | +0,1 | 626 | 638 | +12 | +1,9 |
| ROC | 317 | 317 | < 1 | +0,3 | 594 | 602 | +8 | +1,3 |
| COL | 332 | 333 | +1 | +0,1 | 613 | 625 | +12 | +2,0 |
| media | 330 | 330 | < 1 | +0,2 | - | - | +10 | +1,8 |

La comparación mensual se muestra en la Tabla 6.9 y la Figura 6.7. En esta comparación también se encuentran mejoras respecto a las presentadas en la Tabla 6.1 y la Figura 6.1 de la Sección 6.1. La cantidad de meses con diferencias positivas baja de 78% (46 de 59 meses) a 52% (28 de 54 meses). Se excluyen de la cuenta los meses donde el ajuste es perfecto (diferencia cero), que es un sólo mes en la comparación anterior y son seis meses en la presente. Ambas apreciaciones muestran una dispersión más saludable de los valores mensuales de irradiación del AMTUes respecto a los de largo plazo. La cantidad de meses dentro con diferencias en el rango $\pm 0,5$ MJ/m² aumenta de 57% (34 de 60 meses) a 65% (39 de 60 meses). De forma similar, la cantidad de meses con diferencias fuera del rango $\pm 1,0$ MJ/m² disminuye de 12% (7 de 60 meses) a 10% (6 de 60 meses). Prácticamente todos los meses están dentro del

Figura 6.6: Ciclos diarios promedio de irradiación solar para el AMTUs y los datos base.



rango $\pm 1,5 \text{ MJ/m}^2$, con la única excepción del mes de diciembre para Colonia que presenta la máxima diferencia de $-1,6 \text{ MJ/m}^2$. Los rangos $\pm 0,5 \text{ MJ/m}^2$, $\pm 1,0 \text{ MJ/m}^2$, $\pm 1,5 \text{ MJ/m}^2$ representan respectivamente un $\pm 3\%$, $\pm 6\%$ y $\pm 8\%$ de la media territorial de $\pm 16,7 \text{ MJ/m}^2$. El pos-proceso de adecuación de medias anuales mejora el ajuste mensual en todas las localidades y es particularmente útil para la localidad de Rocha, donde 11 de 12 meses quedan en el rango $\pm 3\%$, además de mantener todos sus meses en el rango $\pm 6\%$ (como ya se había observado en la comparación anterior). Si se observa la Figura 6.7 en comparación a la Figura 6.1 se pueden apreciar estas observaciones cuantitativas en forma gráfica. Se puede notar una mayor alternancia de diferencias positivas y negativas, y un mejor ajuste en general.

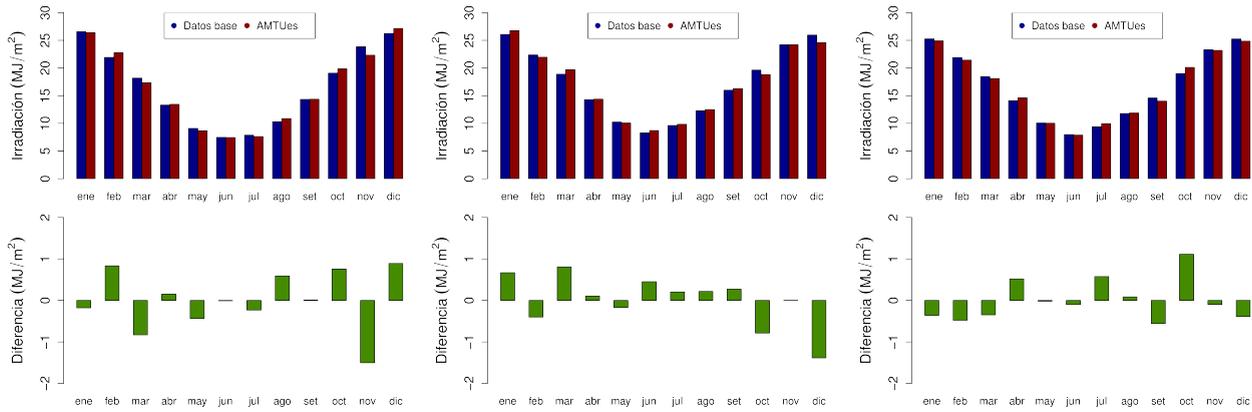
6.6. Variables complementarias

En esta Sección se analiza la representatividad de las variables complementarias del AMTUs: temperatura, humedad y presión. La comparación se realiza contra los datos base de cada localidad. En la Sección 6.7 se presenta la comparación contra los datos históricos (oficiales) brindados por el INUMET para las localidades de este trabajo.

Tabla 6.9: Comparación entre los valores mensuales de irradiación GHI diaria del AMTUes y de los datos de satélite para cada localidad. Los valores están en MJ/m².

| MVD | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| datos base | 26,6 | 21,9 | 18,2 | 13,3 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 14,4 | 19,1 | 23,8 | 26,3 |
| AMTUes | 26,4 | 22,8 | 17,3 | 13,5 | 8,7 | 7,5 | 7,6 | 10,9 | 14,4 | 19,9 | 22,3 | 27,2 |
| diferencia | -0,2 | +0,9 | -0,9 | +0,2 | -0,4 | 0,0 | -0,3 | +0,6 | 0,0 | +0,8 | -1,5 | +0,9 |
| SAL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| datos base | 26,1 | 22,4 | 18,9 | 14,3 | 10,2 | 8,3 | 9,6 | 12,3 | 16,0 | 19,6 | 24,2 | 26,0 |
| AMTUes | 26,8 | 22,0 | 19,7 | 14,4 | 10,1 | 8,7 | 9,8 | 12,5 | 16,3 | 18,8 | 24,2 | 24,6 |
| diferencia | +0,7 | -0,4 | +0,8 | +0,1 | -0,1 | +0,4 | +0,2 | +0,2 | +0,3 | -0,8 | 0,0 | -1,4 |
| RIV | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| datos base | 25,3 | 21,9 | 18,5 | 14,1 | 10,1 | 8,0 | 9,4 | 11,8 | 14,6 | 19,0 | 23,3 | 25,3 |
| AMTUes | 24,9 | 21,4 | 18,1 | 14,6 | 10,0 | 7,9 | 10,0 | 11,9 | 14,0 | 20,1 | 23,2 | 24,9 |
| diferencia | -0,4 | -0,5 | -0,4 | +0,5 | -0,1 | -0,1 | +0,6 | +0,1 | -0,6 | +1,1 | -0,1 | -0,4 |
| ROC | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| datos base | 25,2 | 20,8 | 17,3 | 12,9 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 13,9 | 18,4 | 23,4 | 25,4 |
| AMTUes | 25,2 | 21,0 | 16,6 | 13,1 | 9,1 | 8,0 | 8,2 | 10,1 | 14,2 | 18,6 | 23,2 | 25,1 |
| diferencia | 0,0 | +0,2 | -0,7 | +0,2 | 0,0 | +0,5 | +0,3 | -0,2 | +0,3 | +0,2 | -0,2 | -0,3 |
| COL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| datos base | 26,5 | 21,9 | 18,0 | 13,6 | 9,3 | 7,6 | 8,2 | 10,8 | 15,1 | 19,8 | 24,2 | 26,5 |
| AMTUes | 26,4 | 21,0 | 17,8 | 14,2 | 9,9 | 8,3 | 8,6 | 11,1 | 13,8 | 19,8 | 25,5 | 24,9 |
| diferencia | -0,1 | -0,9 | -0,2 | +0,6 | +0,6 | +0,7 | +0,4 | +0,3 | -1,3 | 0,0 | +1,3 | -1,6 |

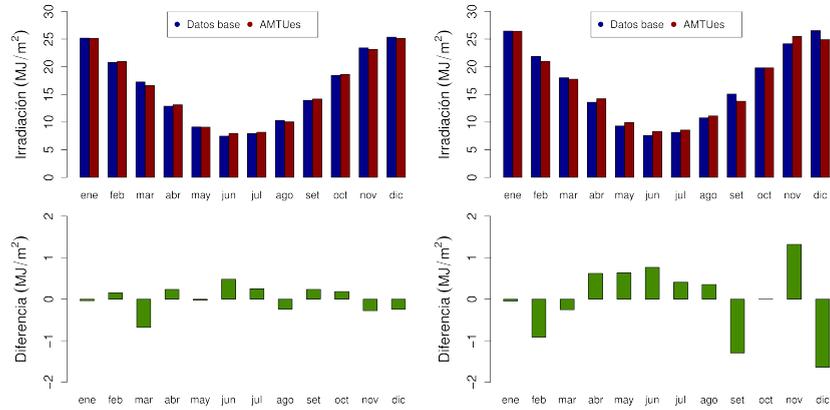
Figura 6.7: Comparación a escala mensual de los valores de irradiación GHI del AMTUs y los datos base.



(a) Montevideo.

(b) Salto.

(c) Rivera.



(d) Rocha.

(e) Colonia.

En las Tablas 6.10, 6.11 y 6.12 se muestran los indicadores de desempeño a escala anual y mensual para la temperatura ambiente (incluye el promedio mensual de la temperatura media, máxima y mínima), la humedad relativa y la presión atmosférica, respectivamente. El desvío promedio (sobre todas las localidades) es menor al 1 % para todas las variables consideradas. Las diferencias anuales promedio de las variables de temperatura promedio (media, máxima y mínima) son de +0,6 %, +0,9 % y 0,0 % respectivamente. Desglosados por estación, no se observan diferencias anuales mayores al 3 % para estas variables. En humedad relativa las diferencias anuales están por debajo del 1 % para todas las estaciones y en presión atmosférica son despreciables¹⁰.

Tabla 6.10: Comparación de los valores anuales y mensuales de temperatura de aire ambiente del AMTUES contra los datos base.

| localidad | TEMPERATURA MEDIA | | | | | |
|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------|
| | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
| | datos base | AMTUES | dif. anual | dif. anual | MBD | RMSD |
| (°C) | (°C) | (°C) | (%) | (°C) | (°C) | |
| Montevideo | 16,6 | 16,5 | -0,1 | -0,6 | -0,1 | 0,4 |
| Salto | 18,8 | 19,3 | +0,5 | +2,7 | +0,5 | 0,9 |
| Rivera | 18,4 | 18,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 |
| Rocha | 16,3 | 16,2 | -0,1 | -0,6 | -0,1 | 0,6 |
| Colonia | 16,5 | 16,6 | +0,1 | +0,6 | +0,1 | 0,7 |
| media | 17,3 | 17,4 | +0,1 | +0,6 | +0,1 | 0,6 |

| localidad | TEMPERATURA MÁXIMA PROMEDIO | | | | | |
|--------------|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|------------|
| | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
| | datos base | AMTUES | dif. anual | dif. anual | MBD | RMSD |
| (°C) | (°C) | (°C) | (%) | (°C) | (°C) | |
| Montevideo | 20,9 | 21,1 | +0,2 | +1,0 | +0,1 | 0,6 |
| Salto | 24,9 | 25,3 | +0,4 | +1,6 | +0,4 | 0,9 |
| Rivera | 23,8 | 24,0 | +0,2 | +0,8 | +0,2 | 0,5 |
| Rocha | 21,5 | 21,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 |
| Colonia | 21,6 | 21,8 | +0,2 | +0,9 | +0,2 | 0,8 |
| media | 22,5 | 22,7 | +0,2 | +0,9 | +0,2 | 0,7 |

| localidad | TEMPERATURA MÍNIMA PROMEDIO | | | | | |
|--------------|-----------------------------|-------------|------------|------------|---------------|------------|
| | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
| | datos base | AMTUES | dif. anual | dif. anual | MBD | RMSD |
| (°C) | (°C) | (°C) | (%) | (°C) | (°C) | |
| Montevideo | 12,5 | 12,4 | -0,1 | -0,8 | -0,2 | 0,5 |
| Salto | 13,2 | 13,6 | +0,4 | +3,0 | +0,4 | 1,1 |
| Rivera | 13,6 | 13,4 | -0,2 | -1,5 | -0,2 | 0,5 |
| Rocha | 11,6 | 11,4 | -0,2 | -1,7 | -0,2 | 0,7 |
| Colonia | 12,2 | 12,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,8 |
| media | 12,6 | 12,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,7 |

La comparación a escala mensual también brinda evidencia de un buen desempeño del AMTUES para estas variables. En la Figura 6.8 se muestran gráficos de los valores mensuales del AMTUES contra los valores mensuales de los datos base para todas las localidades (los valores cuantitativos son los de las Tablas de la 6.10 a la 6.12.). Los gráficos por estación se

10. Las diferencias absolutas están por debajo de 1 hPa.

Tábla 6.11: Comparación de los valores anuales y mensuales de humedad relativa del AMTUs contra los datos base.

| localidad | HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO | | | | | |
|--------------|---------------------------|-------------|---------------|----------------|---------------|------------|
| | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
| | datos base (%) | AMTUs (%) | dif. abs. (%) | dif. porc. (%) | MBD (%) | RMSD (%) |
| Montevideo | 76,6 | 76,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,0 |
| Salto | 73,2 | 73,7 | +0,5 | +0,7 | +0,5 | 2,5 |
| Rivera | 74,3 | 73,8 | -0,5 | -0,7 | -0,5 | 2,6 |
| Rocha | 78,8 | 78,3 | -0,5 | -0,6 | -0,5 | 1,8 |
| Colonia | 73,6 | 73,1 | -0,5 | -0,7 | -0,5 | 2,3 |
| media | 75,3 | 75,1 | -0,2 | -0,3 | -0,2 | 2,2 |

Tábla 6.12: Comparación de los valores anuales y mensuales de presión atmosférica del AMTUs contra los datos base.

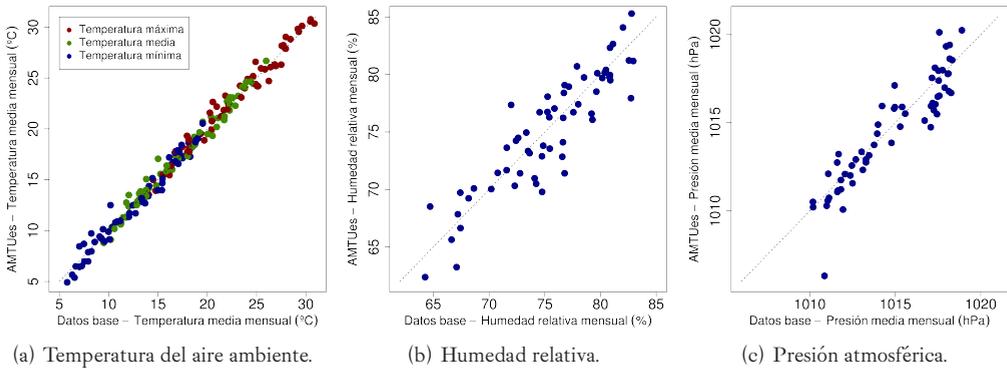
| localidad | PRESIÓN ATMOSFÉRICA PROMEDIO | | | | | |
|--------------|------------------------------|---------------|------------------|----------------|---------------|------------|
| | Comp. anual | | | | Comp. mensual | |
| | datos base (hPa) | AMTUs (hPa) | dif. anual (hPa) | dif. anual (%) | MBD (hPa) | RMSD (hPa) |
| Montevideo | 1015,3 | 1015,4 | +0,1 | 0,0 | +0,1 | 0,9 |
| Salto | 1014,3 | 1013,7 | -0,6 | -0,1 | -0,6 | 1,2 |
| Rivera | 1014,9 | 1015,2 | +0,3 | 0,0 | +0,2 | 1,1 |
| Rocha | 1015,2 | 1014,8 | -0,4 | 0,0 | -0,3 | 0,8 |
| Colonia | 1014,6 | 1014,3 | -0,3 | 0,0 | -0,3 | 1,7 |
| media | 1014,9 | 1014,7 | -0,2 | 0,0 | -0,2 | 1,1 |

incluyen en el Apéndice C. En la Figura 6.8.a se aprecia que para temperatura promedio (media, máxima y mínima) todos los puntos se encuentran cercanos a la recta $x = y$, lo que muestra una buena representatividad del AMTUs para la temperatura ambiente. La dispersión promedio (el RMSD promedio en todas las localidades) es de 0,6 °C para la temperatura media y de 0,7 °C para las temperaturas máximas y mínimas. Estas diferencias son aproximadamente un 4 % de la temperatura media de 17,3 °C. Los mayores valores de RMSD se dan para la localidad de Salto (al igual que el MBD) y son de 0,9 °C para temperatura media y máxima y de 1,1 °C para temperatura mínima. Para la humedad relativa (Figura 6.8.b) la dispersión del gráfico es algo mayor y para la presión atmosférica (Figura 6.8.c) los puntos están razonablemente alineados, con la excepción de un punto para el mes de diciembre en Colonia. El RMSD promedio para la humedad relativa es de 2,2 % y para la presión atmosférica es de 1,1 hPa.

6.7. Comparación con la climatología oficial

El Instituto Uruguayo de Meteorología es el organismo encargado de elaborar y reportar a la WMO la climatología oficial del país. Estos valores son referidos como *normals* y su forma de elaboración sigue un procedimiento explícito dado por la WMO [19]. Los datos oficiales están basados en las medidas de las estaciones del INUMET durante el periodo comprendido entre los años 1961 y 1990. Algunas estaciones han cambiado su localización posteriormente

Figura 6.8: Comparación a escala mensual de las variables complementarias del AMTUES con las medias mensuales de los datos base para las cinco localidades. El eje x se grafican las medias mensuales de los datos base y en el eje y las medias mensuales del AMTUES.



a 1990. Para este trabajo se utilizaron medidas del periodo 2000–2014 por lo que algunas diferencias entre el AMTUES y los valores oficiales pueden atribuirse a estas re-localizaciones.

La Tabla 6.13 presenta la comparación entre las medias anuales de los AMT de cada localidad con los valores históricos elaborados por INUMET. Se comparan los valores de temperatura promedio (media, máxima y mínima), humedad relativa, presión atmosférica y viento. La única excepción es el viento para la localidad de Rivera, donde no se dispone de estadística oficial. A continuación se comenta sobre la comparación para cada estación.

Localidad: Montevideo

- No se observan diferencias significativas en temperatura (media, máxima y mínima).
- No se observan diferencias significativas en humedad relativa ni en presión atmosférica.
- La estadística oficial de viento no difiere de los valores estimados para el AMT.

Localidad: Salto

- Se observan diferencias significativas en temperatura media, máxima promedio y mínima promedio. La estación meteorológica en Salto fue re-ubicada en el año 1997.
- No se observan diferencias significativas en humedad relativa ni en presión atmosférica.
- La estadística oficial de viento no difiere de los valores estimados para el AMT.

Localidad: Rivera

- No se observan diferencias significativas en temperatura (media, máxima y mínima).
- No se observan diferencias significativas en humedad relativa ni en presión atmosférica.
- No se dispone de estadística oficial de viento por lo no se puede realizar la comparación.

Localidad: Rocha

- No se observan diferencias significativas en temperatura (media, máxima y mínima).
- Se observan diferencias en humedad relativa (diferencia de 3 % de humedad relativa) pero no en presión atmosférica.
- Las diferencias entre las velocidades medias anuales de viento y las estimadas para el AMT no presentan diferencias significativas.

Localidad: Colonia

- Se observan diferencias en temperatura media, máxima promedio y mínima promedio. La estación meteorológica de Colonia fue re-ubicada en 2001.
- No se observan diferencias significativas en humedad relativa ni en presión atmosférica.
- La estadística oficial de viento no difiere de los valores estimados para el AMT.

El desvío promedio encontrado para la temperatura media considerando todas las localidades es de +1,0%. Para Montevideo no se encontraron desvíos en temperatura media. Para el resto de las localidades se encontraron diferencias porcentuales de +6,6% (Salto), +1,7% (Riviera), +1,3% (Rocha) y -4,6% (Colonia). El desvío promedio (en todas las localidades) para temperatura máxima y mínima es de +2,1% y +2,5%, respectivamente, y sus desvíos máximos observados son de +5,0% (Salto) y -9,6% (Colonia). En Salto y Colonia es donde se encontraron las mayores diferencias de temperatura con los valores históricos. Estas estaciones tuvieron re-localizaciones posteriores al año 1990 y las diferencias podrían deberse a este hecho. En la Sección 6.6 se encontraron desvíos menores para estas localidades entre el AMTUs y los datos base (que son posteriores al año 2000), lo que sustenta más esta hipótesis. En Salto se encontró una diferencia de +0,5 °C con los datos base y +1,2 °C con los datos oficiales. En Colonia las diferencias encontradas son de +0,1 °C y -0,8 °C, respectivamente.

No se aprecian diferencias significativas en humedad relativa para ninguna localidad. La diferencia máxima se encontró en la localidad Rocha, donde la diferencia es de -2,7% en términos absolutos o un -3,3% de la media de 81,0% de humedad relativa para esa estación. En promedio las diferencias relativas son de -0,6%. En presión, todas las diferencias porcentuales son menores al 0,1%. En particular, no se aprecia que el efecto de la interpolación de presión en los datos base de Colonia haya afectado significativamente el valor medio de su serie típica. Las diferencias más significativas están en la variable viento que es la menos representativa en este AMTUs.

La conclusión general de esta comparación es que el AMTUs tiene una representatividad aceptable para las variables complementarias de temperatura, humedad y presión, al menos en términos de valores medios típicos. La representatividad encontrada para humedad y presión es muy buena. La representatividad para temperatura es similar a la de la irradiación solar y los desvíos en términos porcentuales son comparables a los de la Tabla 6.2. La variable viento es la menos representativa en todas las localidades, aunque estas diferencias son tolerables en el contexto de un AMT para aplicaciones de energía solar.

Tabla 6.13: Comparación entre los valores anuales oficiales y los valores del AMTUes.

| MONTEVIDEO | temp. media (°C) | temp. máxima (°C) | temp. mínima (°C) | humedad relativa (%) | presión atmosférica (hPa) | velocidad de viento (m/s) |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| AMTUes | 16,5 | 21,1 | 12,4 | 76,6 | 1015,4 | 4,8 |
| Clima 1961–1990 | 16,5 | 21,1 | 12,1 | 75,0 | 1015,2 | 5,7 |
| Diferencia | 0,0 | 0,0 | +0,3 | +1,6 | +0,2 | -0,9 |
| SALTO | temp. media (°C) | temp. máxima (°C) | temp. mínima (°C) | humedad relativa (%) | presión atmosférica (hPa) | velocidad de viento (m/s) |
| AMTUes | 19,3 | 25,3 | 13,6 | 73,7 | 1013,7 | 4,0 |
| Clima 1961–1990 | 18,1 | 24,1 | 12,5 | 72,0 | 1014,2 | 3,5 |
| Diferencia | +1,2 | +1,2 | +1,1 | +1,7 | -0,5 | +0,5 |
| RIVERA | temp. media (°C) | temp. máxima (°C) | temp. mínima (°C) | humedad relativa (%) | presión atmosférica (hPa) | velocidad de viento (m/s) |
| AMTUes | 18,4 | 24,0 | 13,4 | 73,8 | 1015,2 | 3,0 |
| Clima 1961–1990 | 18,1 | 23,4 | 12,7 | 75,0 | 1015,0 | - |
| Diferencia | +0,3 | +0,6 | +0,7 | -1,2 | +0,2 | - |
| ROCHA | temp. media (°C) | temp. máxima (°C) | temp. mínima (°C) | humedad relativa (%) | presión atmosférica (hPa) | velocidad de viento (m/s) |
| AMTUes | 16,2 | 21,5 | 11,4 | 78,3 | 1014,8 | 2,4 |
| Clima 1961–1990 | 16,0 | 21,5 | 10,8 | 81,0 | 1015,4 | 3,5 |
| Diferencia | +0,2 | 0,0 | +0,6 | -2,7 | -0,6 | -1,1 |
| COLONIA | temp. media (°C) | temp. máxima (°C) | temp. mínima (°C) | humedad relativa (%) | presión atmosférica (hPa) | velocidad de viento (m/s) |
| AMTUes | 16,6 | 21,8 | 12,2 | 73,1 | 1014,3 | 6,3 |
| Clima 1961–1990 | 17,4 | 21,2 | 13,5 | 75,0 | 1015,3 | 5,3 |
| Diferencia | -0,8 | +0,6 | -1,3 | -1,9 | -1,0 | +1,0 |

6.8. Evaluación externa

El AMT de Salto ha sido evaluado por la consultora internacional Sólida Energías Renovables (España) en el marco de una consultoría internacional del MIEM/DNE. El objetivo de la consultoría era evaluar la viabilidad de aplicaciones de energía solar de concentración (CSP) en Uruguay. En el análisis se utilizó una versión preliminar del AMT de Salto y, previo a su utilización, la empresa Sólida realizó varios chequeos de consistencia sobre la información proporcionada. En su reporte técnico “SOTS150204DGME0001-00: Proyecto Piloto Torre Central en el Uruguay – Informe Análisis TMY”, disponible en <http://les.edu.uy>, se documentan las comprobaciones realizadas. El foco de los chequeos estuvo en las variables relevantes para la simulación de aplicaciones CSP: DNI, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y viento.

La variable de mayor interés para Sólida era la DNI, sobre la cual se realizaron tres chequeos: (i) búsqueda de datos atípicos, (ii) chequeo de desfasaje temporal y (iii) comparación de horas

claras contra modelos de cielo claro. En el análisis no se encontraron datos atípicos, fuera de rango o con desfase temporal. En la comparación contra el modelo de cielo claro de Laue [58] no se encontraron datos fuera de rango y para los días de cielo despejado se encontró un buen ajuste. En el informe se calculan valores mensuales de nubosidad característica a partir de los datos de DNI del AMT y de la DNI teórica de cielo claro. Los valores encontrados estaban en los rangos usuales y no se encontró ningún mes donde la irradiación DNI mensual estuviese fuera de los límites esperables.

En lo que respecta a las demás variables, temperatura, humedad, presión y viento, el análisis de la empresa Sólida no detectó ningún dato atípico o fuera de rango. La conclusión de la consultora es que no se detectó ninguna anomalía en la serie típica de Salto.

6.9. Inclinación de las superficies de captación

En este AMT se incluye la irradiación solar global sobre superficies orientadas al Norte, con cinco inclinaciones respecto al plano horizontal. En relación a esta cuestión siempre se presenta la interrogante de cuál es la mejor inclinación de una superficie de captación. La respuesta depende de la aplicación específica. Si se desea tener mayor captación durante el invierno, las superficies captadoras deberán tener mayor inclinación que si se desea mayor captación en verano o en el total anual, y viceversa. El mejor ángulo dependerá siempre de la aplicación en particular.

Es posible definir un *ángulo óptimo* como aquel que maximiza la cantidad de energía anual sobre la superficie de captación. En ausencia de nubosidad, condiciones de nubosidad constante o fuera de la atmósfera, este ángulo coincide con la latitud ($\beta = |\phi|$) [32]. Por otro lado, el régimen de nubosidad medio local puede afectar este ángulo óptimo. En una localidad donde hay mayor nubosidad en invierno, conviene inclinar menos la superficie y captar más en verano que en invierno. Y viceversa, si en un sitio hay mayor nubosidad en verano conviene inclinar más la superficie y aprovechar mejor el invierno para captar más energía en términos anuales. Utilizando la información de largo plazo de irradiación solar se determinó este ángulo óptimo según este criterio para cada localidad (ver Tabla 6.14). Estos ángulos fueron estimados a partir de los datos base siguiendo el procedimiento de cálculo para la GTI que fue explicado en la Subsección 4.2.2. Los ángulos son mayores en el Sur y menores en el Norte, como es esperable, debido a que el régimen de nubosidad promedio no tiene alta variabilidad espacial en Uruguay. A modo de recordatorio se incluye en la Tabla 6.14 la latitud de cada localidad (redondeadas de la Tabla 2.5). Se indica la irradiación anual promedio sobre plano horizontal y la correspondiente a las cinco inclinaciones que se incluyen en los AMT. También se incluye en la Tabla la irradiación anual para el ángulo óptimo. Se puede notar que la irradiación “óptima” es cercana a la irradiación a 20° y 35° , con diferencias menores al 1% en todos los casos. En otras palabras, desviaciones moderadas de inclinación con respecto al ángulo óptimo no afectan significativamente la irradiación anual incidente.

En la Figura 6.9 se muestra, para cada localidad, la variación de la irradiación global anual incidente en función de la inclinación. La irradiación tiene un máximo global para el ángulo

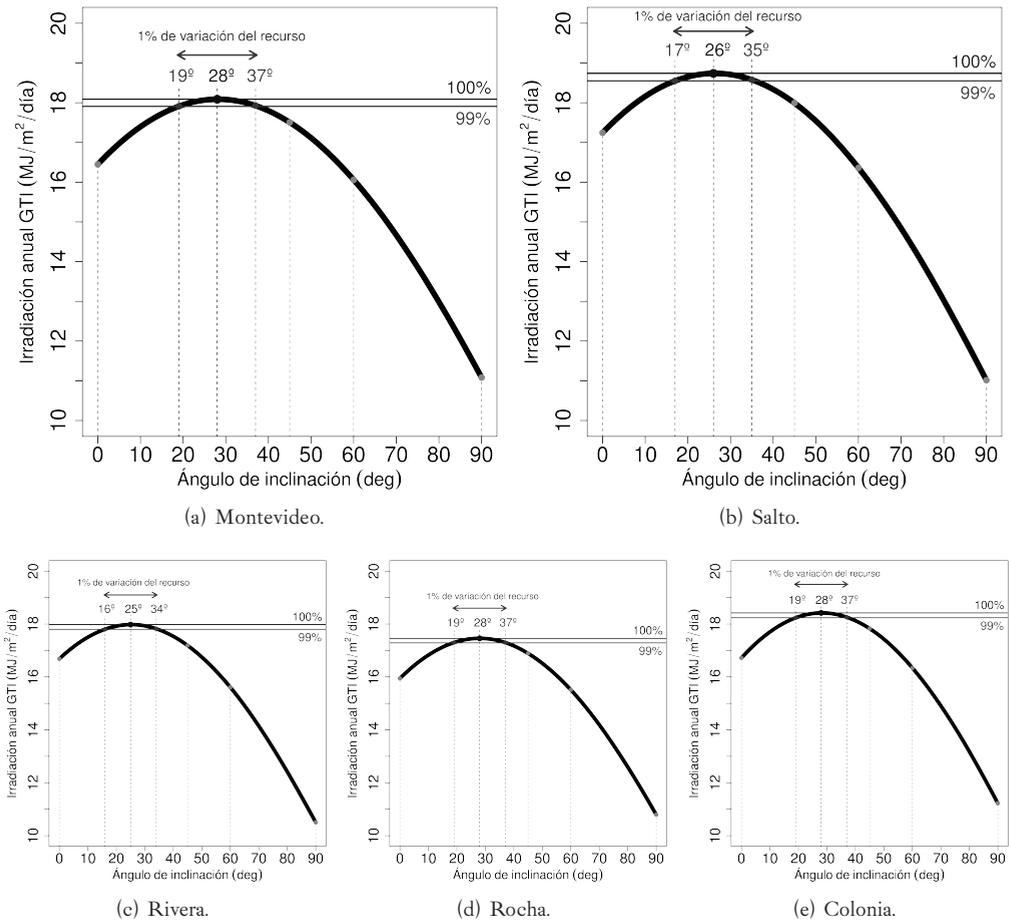
Tabla 6.14: Promedio diario de irradiación anual (en MJ/m²) para las 5 localidades. En la última y penúltima fila se muestra la latitud y el ángulo óptimo para cada localidad, respectivamente.

| ángulo | MVD | SAL | RIV | ROC | COL |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| plano horizontal | 16,5 | 17,3 | 16,8 | 16,0 | 16,8 |
| inclinación 20° | 17,9 | 18,7 | 17,9 | 17,3 | 18,3 |
| inclinación óptima | 18,1 | 18,7 | 18,0 | 17,5 | 18,4 |
| inclinación 35° | 18,0 | 18,6 | 17,8 | 17,4 | 18,3 |
| inclinación 45° | 17,5 | 18,0 | 17,2 | 16,9 | 17,8 |
| inclinación 60° | 16,1 | 16,4 | 15,6 | 15,5 | 16,3 |
| inclinación 90° | 11,1 | 11,0 | 10,5 | 10,8 | 11,2 |
| ángulo óptimo (deg) | 28 | 26 | 25 | 28 | 28 |
| latitud (deg) | -34,8 | -31,4 | -30,9 | -34,5 | -34,5 |

óptimo de inclinación, disminuyendo para otras inclinaciones. Se identifican los ángulos para los cuáles la irradiación anual ha disminuido en un 1 % del valor para el ángulo óptimo. Como la curva presenta una concavidad baja, en un rango de $\simeq \pm 10^\circ$ de la inclinación óptima la irradiación anual varía sólo en un 1 %. La conclusión es que hay un rango de casi 20° donde la irradiación anual varía muy poco y desde el punto de vista de maximizar esta irradiación, no es crítico ajustar finamente la inclinación de las superficies de captación.

En conclusión, en el AMTUES se incluye la GTI horaria sobre superficies a 20° y 35°, y el uso de una u otra depende de la latitud y de la aplicación particular. A 35° la captación será más homogénea a lo largo del año que a 20° donde se captará un poco más en verano. Luego, se incluyen 45° y 60° como posiciones intermedias para aplicaciones que requieran tener mayor captación en invierno como, por ejemplo, las aplicaciones térmicas para agua caliente sanitaria, cuya demanda aumenta en invierno. Finalmente, se incluye la inclinación a 90°, que es útil por ejemplo para aplicaciones integradas a fachadas orientadas al Norte como paredes, muros, ventanas, etc. o para evaluar la eficiencia térmica de edificios y construcciones.

Figura 6.9: Variación de la irradiación anual con el ángulo de inclinación de las superficies de captación con orientación Norte. Se agrandan las imágenes de Montevideo y Salto como comparación Norte-Sur.



Comentarios finales

Un AMT es de utilidad para caracterizar el comportamiento típico de largo plazo de un conjunto de variables meteorológicas. Al estar compuesto de series de datos reales, representa adecuadamente la variabilidad característica de las variables en conjunto y preserva las correlaciones entre ellas. Por definición, un AMT no contiene eventos extremos y no debería usarse para evaluar extremos climáticos de ningún tipo. Los AMT intentan capturar la climatología típica de una región, por lo cual son intrínsecamente locales a determinadas regiones climáticas. La decisión sobre el uso de la información generada en este trabajo, así como las consecuencias de su utilización, son estrictamente responsabilidad del usuario final. Cada usuario es responsable de verificar si estos AMT resultan adecuados para el uso específico que les dará.

Los cinco AMT desarrollados en el marco de este trabajo son para aplicaciones de energía solar o para actividades estrechamente relacionadas con la radiación solar en la superficie terrestre. Ejemplos de estas actividades se encuentran en el sector energético, en la generación de energía eléctrica o térmica a partir del Sol, en el sector Agropecuario o en la simulación de la eficiencia energética de edificios y construcciones. La variable meteorológica principal del AMT es la irradiación solar y se buscó específicamente que el producto generado fuera representativo del comportamiento de largo plazo de esta variable. Las evaluaciones realizadas a posteriori indican que estos AMT son también representativos para temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica. Viento (velocidad y dirección) es claramente una variable sub-representada en las series base y por ello este AMT es específicamente no debería utilizarse para aplicaciones relacionadas con el uso de la energía eólica.

El conocimiento del recurso solar en una región determinada es un proceso incremental. Las series de radiación solar horaria (GHI, DNI e irradiación global sobre planos inclinados) han sido estimadas utilizando las mejores herramientas y las capacidades actuales del Laboratorio de Energía Solar de la Udelar (LES). Se ha utilizado un modelo satelital propio junto a una base de 15 años de imágenes del satélite GOES-East, un modelo de cielo claro y un modelo de fracción difusa; todos ellos especialmente adaptados al territorio de Uruguay utilizando medidas de radiación solar de alta calidad adquiridas por la red de medida continua del LES en varios puntos del territorio nacional. Todos los modelos utilizados han sido probados contra datos terrestres propios y se encuentran debidamente documentados en este documento y en sus referencias.

Para las variables complementarias, temperatura de aire ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad y dirección de viento, se utilizaron como base las medidas en tierra del INUMET, del INIA y de la red de UTE. Para ello se analizaron todos los datos meteo-

rológicos horarios de estas redes de medida a escala nacional, reuniendo un conjunto de datos sin precedente en Uruguay. A esta información se sumaron los datos de la red de medida del LES, que también es a escala nacional, y más de 4 TB de información satelital. Esto nos ha permitido conformar los conjuntos de series horarias del largo plazo necesario (al menos de una década) para cada variable (salvo las vinculadas al viento) y con representación de cada región climática del país.

Esta versión del AMTUES representa una mejora sustancial de un trabajo anterior desarrollado a escala diaria para Colonia, por dos co-autores de este trabajo [15]. Aquel trabajo representó un esfuerzo inicial, orientado a probar la aplicación de la metodología estadística TMY3 sobre datos reales en Uruguay. Esta es una versión completa, con datos a nivel horario, que se busca sea de utilidad práctica para la simulación detallada de aplicaciones de energía solar y eficiencia energética. Las evaluaciones realizadas indican que la información contenida en los AMT es representativa en términos de medias mensuales y anuales de irradiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa y presión atmosférica para las regiones consideradas. La evaluación de este AMTUES resulta satisfactoria, especialmente considerando las carencias existentes a nivel de las series de datos base en Uruguay. De hecho, la evaluación sugiere que su rango de aplicación puede ser mayor al que se pensó inicialmente, debido al buen desempeño encontrado para las variables complementarias.

Todo producto es mejorable y esta versión del AMTUES no será una excepción. El aporte de los usuarios resultará fundamental para incorporar mejoras a este producto. A lo largo del proceso de elaboración hemos incorporado mejoras en base a los insumos que nos hicieron llegar los usuarios de las versiones preliminares del AMTUES. Alentamos por lo tanto a los usuarios de este producto a acercarnos sus comentarios y compartir con nosotros su experiencia en el uso de la información brindada. Las comunicaciones se pueden realizar a la casilla de correo r.alonso.suarez@gmail.com.

La situación ideal es que en el futuro el país cuente con registros de alta calidad para todas las variables meteorológicas de al menos 30 años de duración y a escala minutal, a partir de los cuales pueda elaborarse series típicas a escala minutal. La primer forma de mejorar las series típicas que se desarrollen para Uruguay es mejorar la calidad y cantidad de la información meteorológica registrada en tierra. No obstante, a partir de este trabajo ya se han identificado varios aspectos de carácter metodológico que se podrán ir mejorando en futuras versiones, a medida que mejore la calidad de la información de base y el conocimiento disponible sobre el recurso solar. Estas oportunidades de mejora se presentan a continuación.

7.1. Perspectivas para mejorar el AMTUES

Una nueva versión del AMTUES seguramente incluirá más estadística en los datos de base, lo cual sería una mejora evidente. Un aspecto fundamental es la completitud de los datos medidos en tierra ya que el principal problema para la construcción de las series fue la existencia de largos períodos con datos faltantes en las series de medida que debieron ser completados de la mejor forma posible. Un AMT es tan bueno como los datos de base que lo integran. En ese

sentido, cualquier esfuerzo que se realice en pos de mejorar la calidad y completitud de las series medidas en tierra representa un avance sobre la situación actual. El apoyo a las redes de medida nacionales resulta un punto fundamental para mejorar este y otros productos, y generar una mejor caracterización climática en Uruguay.

El conocimiento del recurso solar en Uruguay se encuentra actualmente en un proceso de continua mejora. El LES/Udelar mantiene varias líneas de investigación activas en modelado de radiación solar por satélite, modelos de cielo claro y modelos de fracción difusa. Todas estas líneas se apoyan en una red de medida continua que utiliza medidas redundantes de GHI, instrumentos de Primera Clase calibrados cada dos años en el laboratorio y cuenta con algunas otras medidas que eran escasas en Uruguay, como la DHI (en cuatro puntos) y la DNI (en un punto). Los modelos desarrollados y ajustados en el LES permitieron el desarrollo de este AMTUs con varias componentes de radiación solar. La capacidad del LES para estimar irradiación solar por satélite es actualmente muy buena, incluso para estándares internacionales, pero se puede mejorar. Principalmente, el producto de DNI es mejorable respecto a las capacidades actuales, incorporando modelos físicos de irradiación solar por satélite. Un mejor conocimiento de la turbidez atmosférica típica y de su variabilidad espacial y temporal, redundará en mejores modelos de cielo claro que permitirán mejorar la capacidad de caracterizar las horas de cielo despejado. De forma similar, un mejor conocimiento de la distribución de la irradiación difusa en la bóveda celeste, permitirá mejores estimaciones de DNI y de GTI.

La metodología utilizada para la elaboración de las series típicas generadas en este trabajo es estándar. Como ya se comentó, fue creada en los Laboratorios SANDIA de EEUU y utilizada en aquel país (y en varios otros) para la elaboración de series AMT, por lo que se la puede considerar como una metodología básica con buena aceptación internacional. Existen sin embargo otras propuestas para la elaboración de series típicas que no han sido exploradas. Los pesos de las variables utilizadas para este AMTUs fueron elegidos con su aplicación en mente, pero sin ningún criterio de optimización. En la medida de tipicidad de los meses-año, podrían incorporarse otros aspectos estadísticos en forma directa, como la diferencia de medias mensuales, la cantidad de días con cielo mayormente despejado, la variabilidad diaria, etc. En cuanto a los filtros de persistencia, se siguieron las recomendaciones de la metodología SANDIA, pero no se evaluó la pertinencia de estos filtros ni la incorporación de otros filtros nuevos. La escala mensual para elegir los datos que formarán parte del AMT parece adecuada, pero es arbitraria y podría pensarse en usar semanas típicas o quincenas de días típicos, por ejemplo.

Para finalizar, una forma clara de mejorar este producto es incorporando más variables, lo cual se puede realizar dependiendo de la disponibilidad de datos. También es posible incorporar variables derivadas (calculadas a partir de las variables existentes), por ejemplo, los grados-día, la iluminancia, la temperatura efectiva del cielo o la temperatura del punto de rocío. Aquí hemos calculado sólo las variables derivadas de la irradiación solar que tienen utilidad práctica para simular aplicaciones de energía solar, en el entendido que los usuarios pueden calcular otras variables derivadas en base a las variables que se incluyen en el AMTUs. Aún más, como los años que hay que utilizar para cada mes se encuentran en la Tabla 5.1, un usuario con

disponibilidad de datos de otra variable puede armar su propia serie típica utilizando su base de información para dichos años.

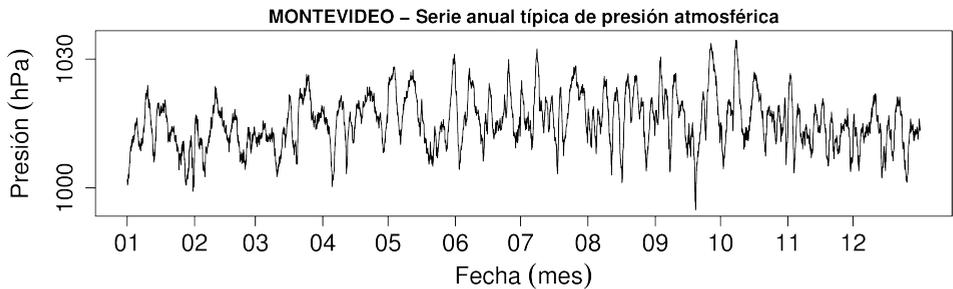
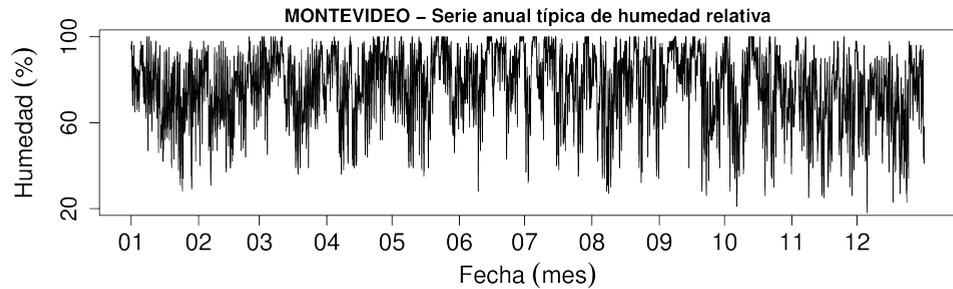
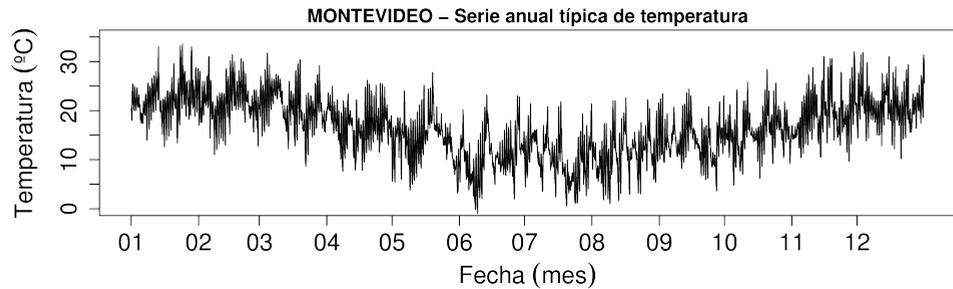
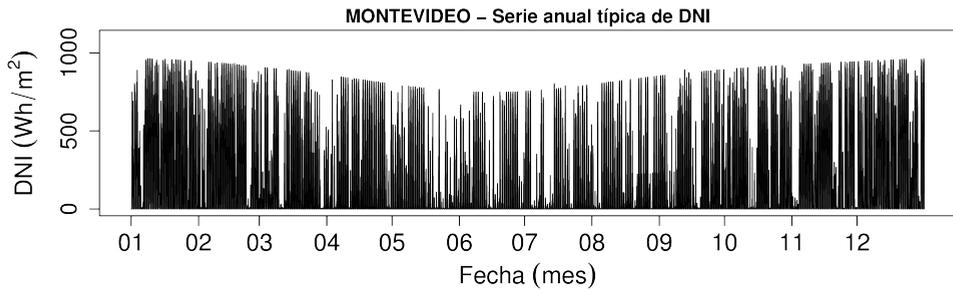
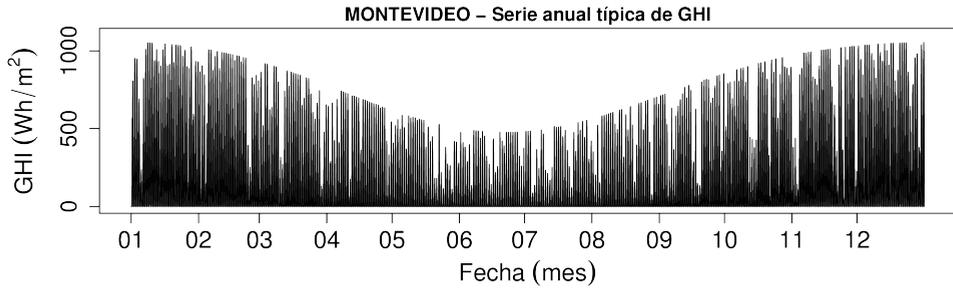
Queda pendiente en Uruguay la elaboración de series típicas orientadas a otros fines específicos, en los cuales se incluirán otras variables y con otra ponderación. Por ejemplo, para un AMT para uso en energía eólica se ponderará la variable viento por sobre las demás y un AMT para fines agropecuarios específicos, puede requerir la inclusión de un índice de evapotranspiración o precipitación. Esperamos que este trabajo sirva de orientación y de estímulo para que futuros emprendimientos de este tipo se lleven a cabo.

APÉNDICES

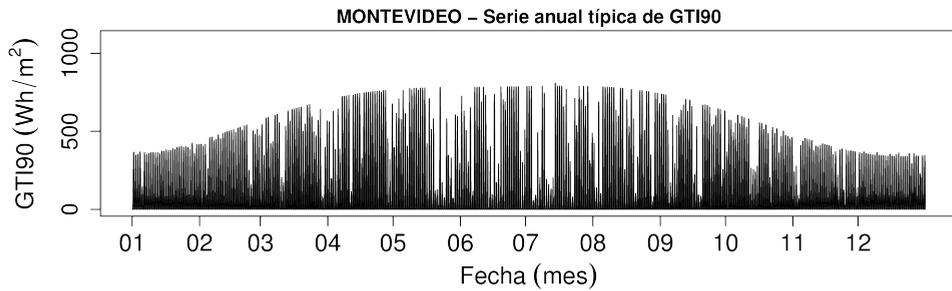
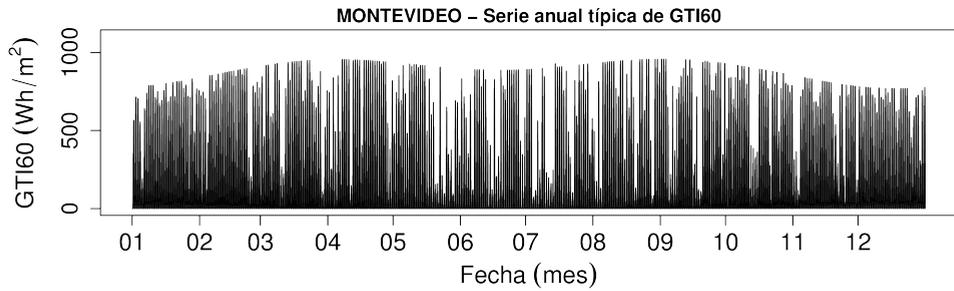
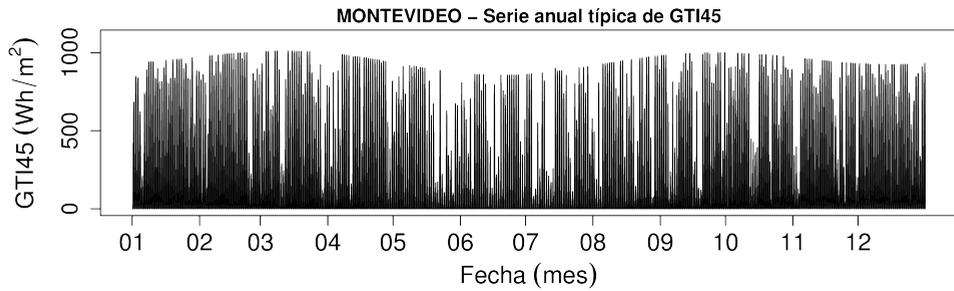
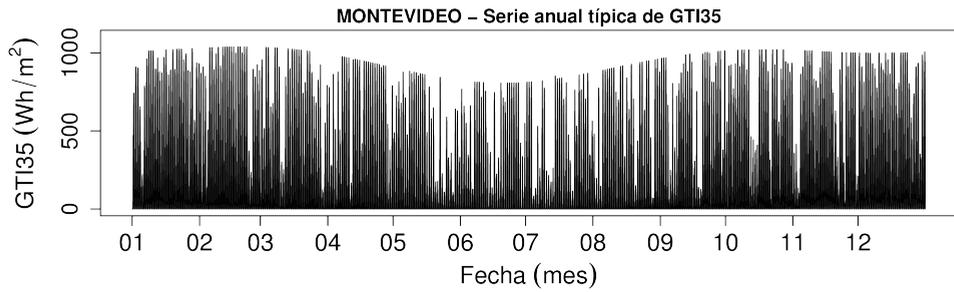
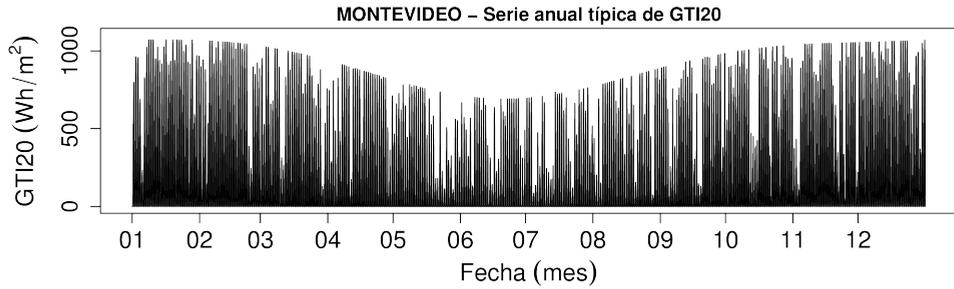
Series típicas para cada localidad

Los AMT se encuentran en las siguientes hojas.

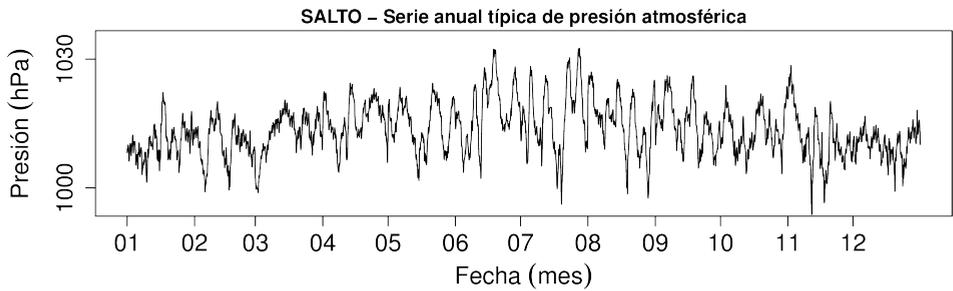
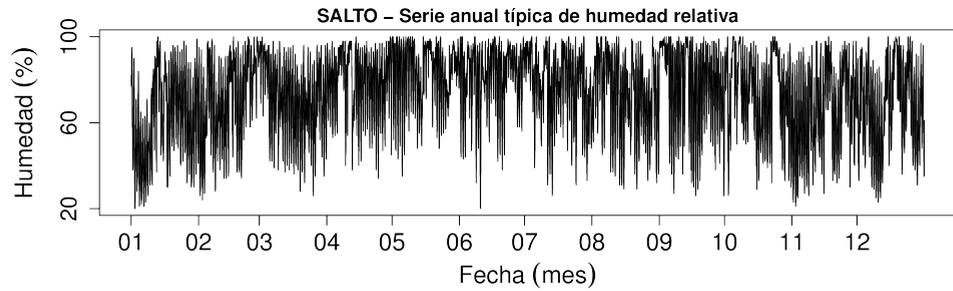
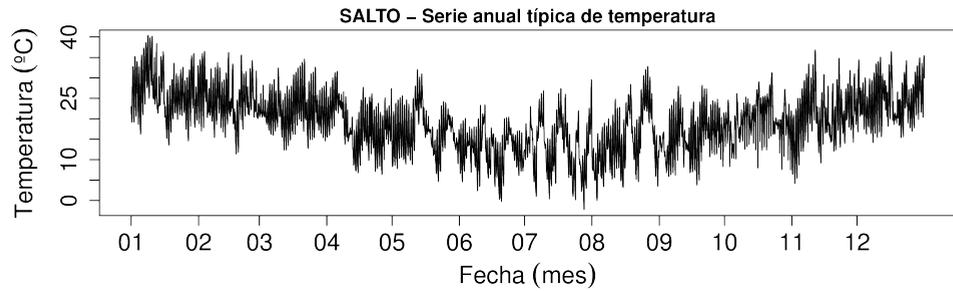
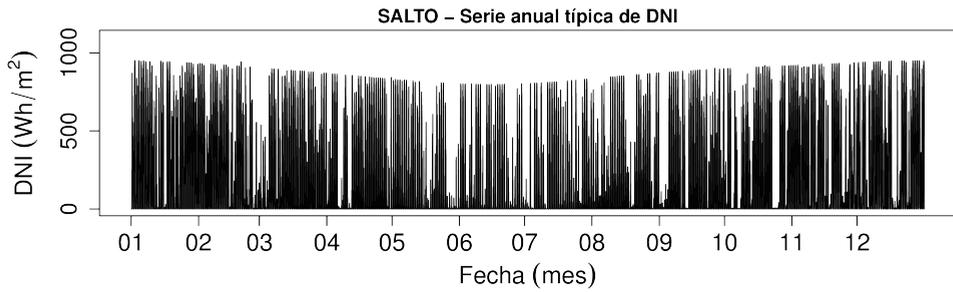
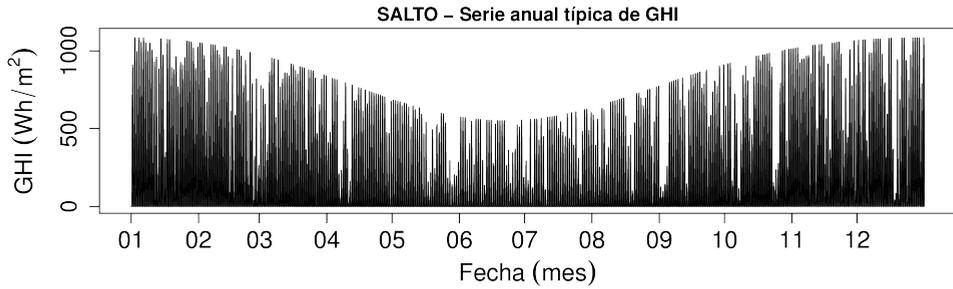
MONTEVIDEO



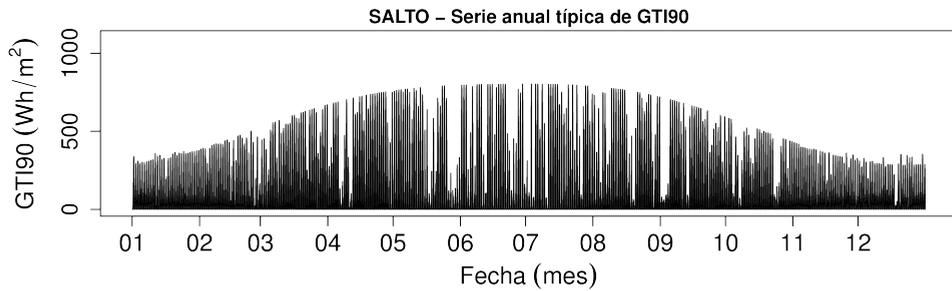
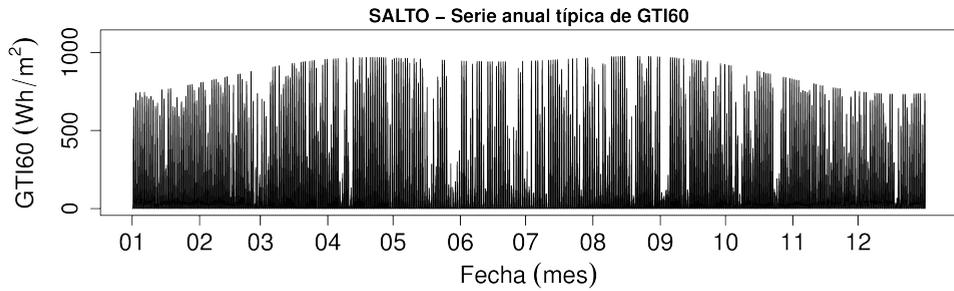
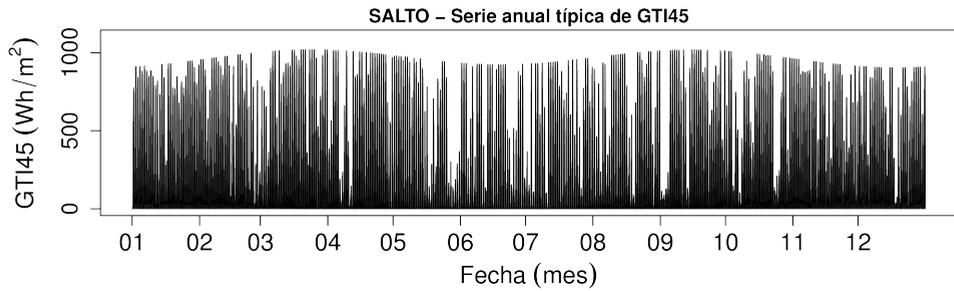
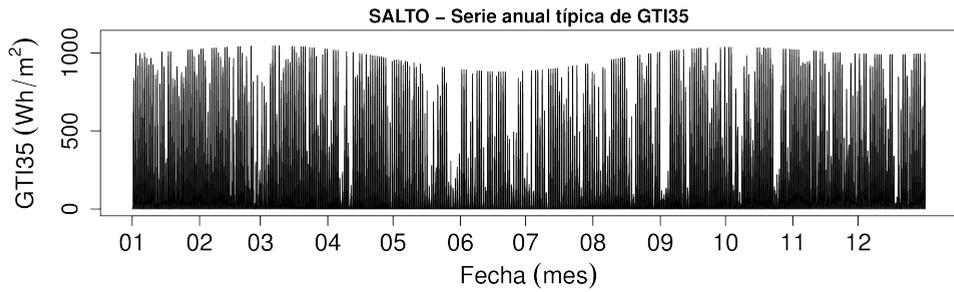
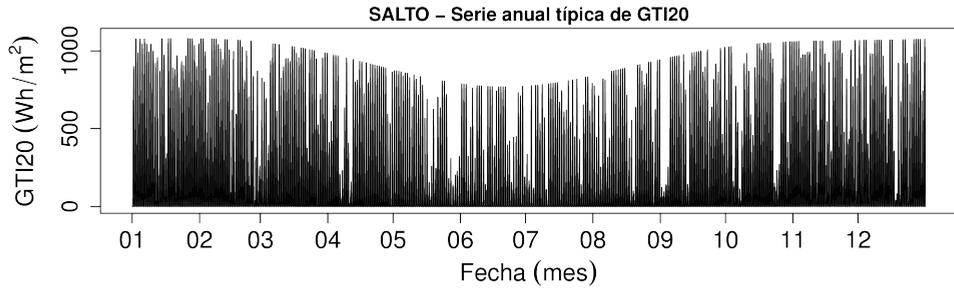
MONTEVIDEO



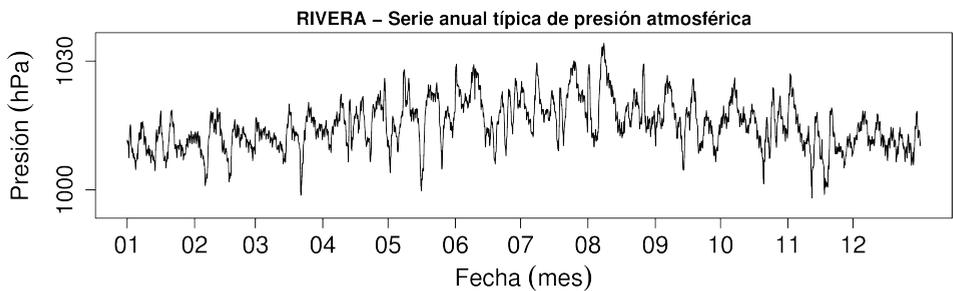
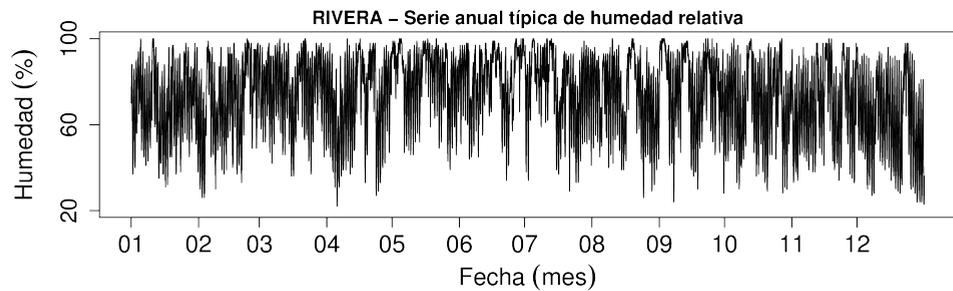
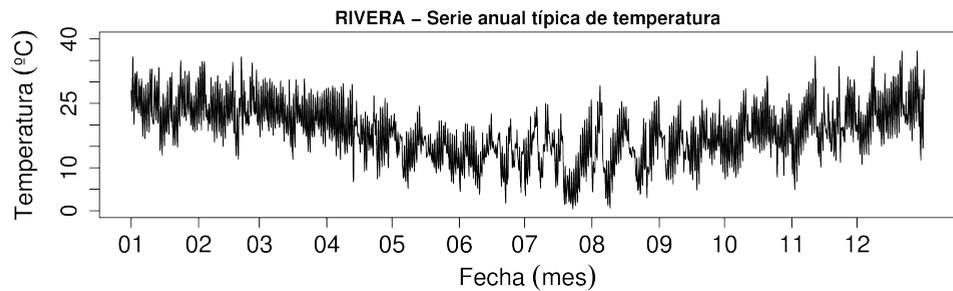
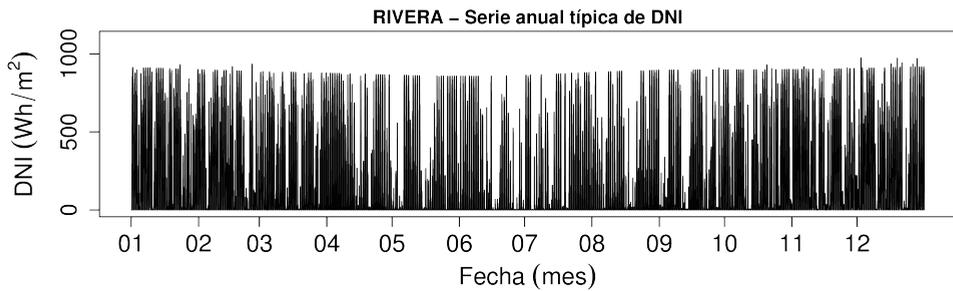
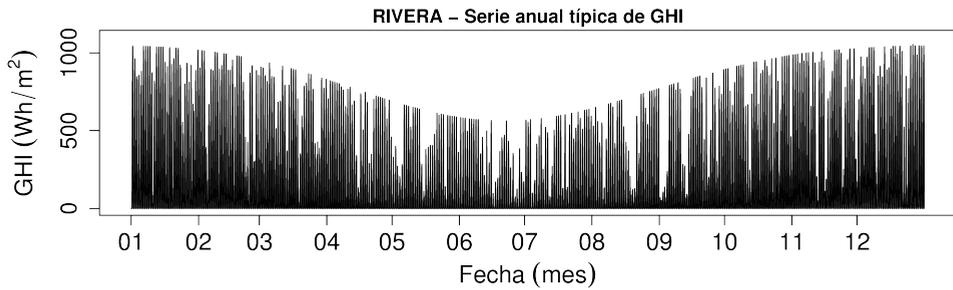
SALTO



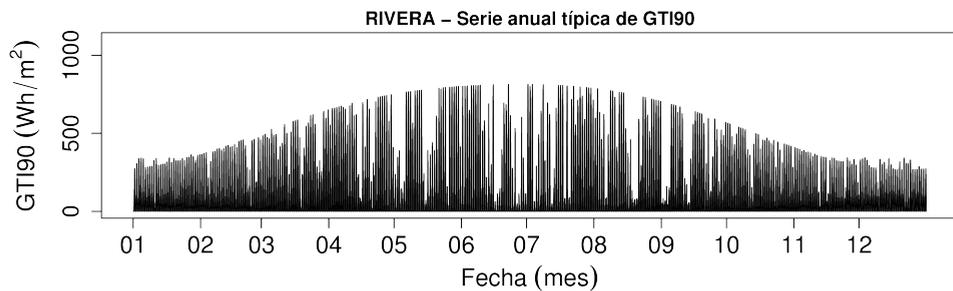
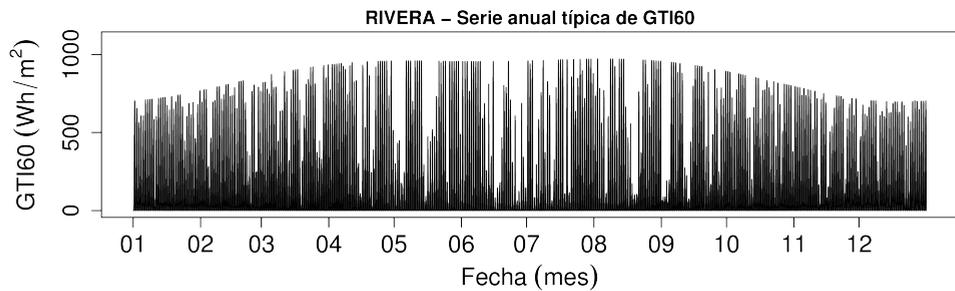
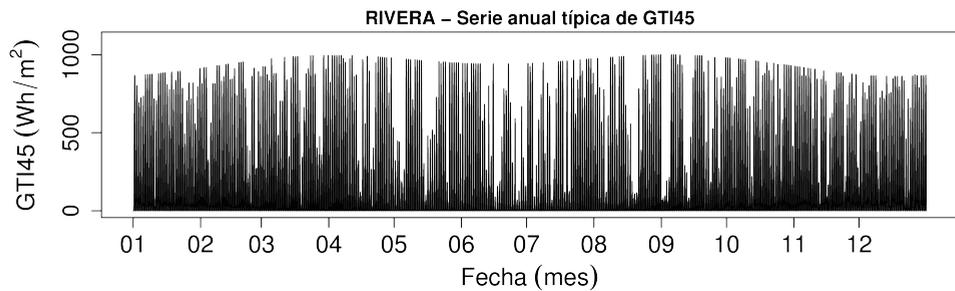
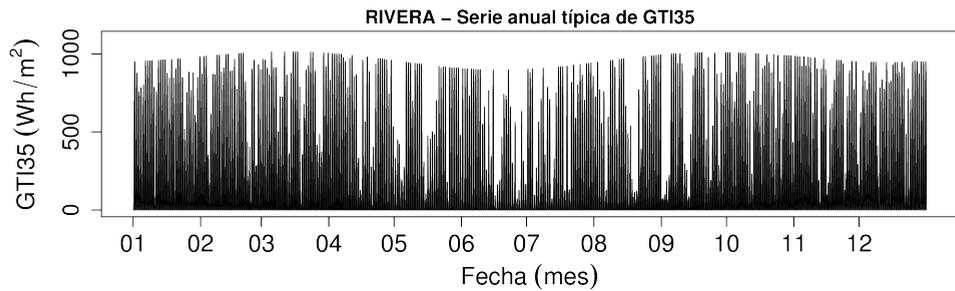
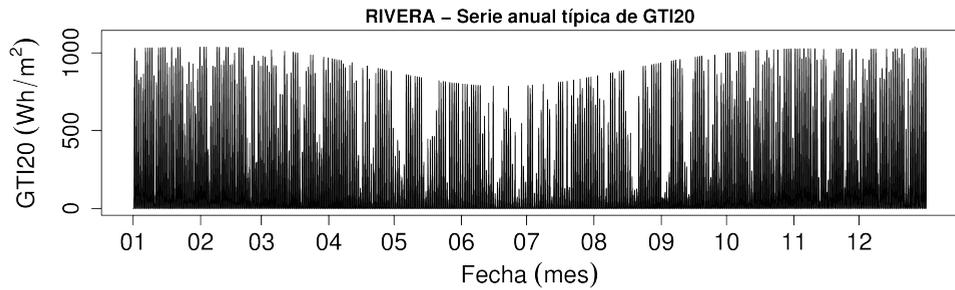
SALTO



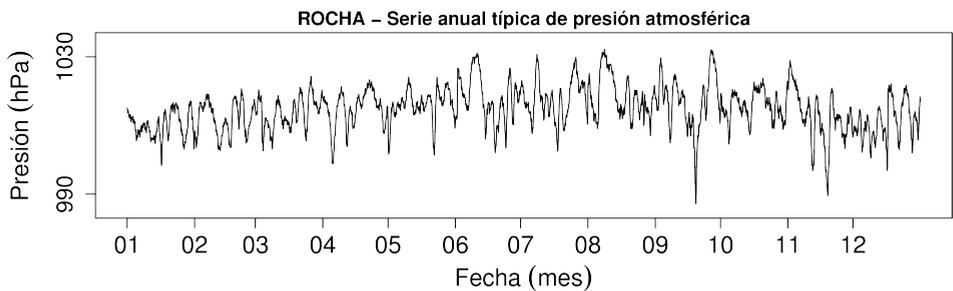
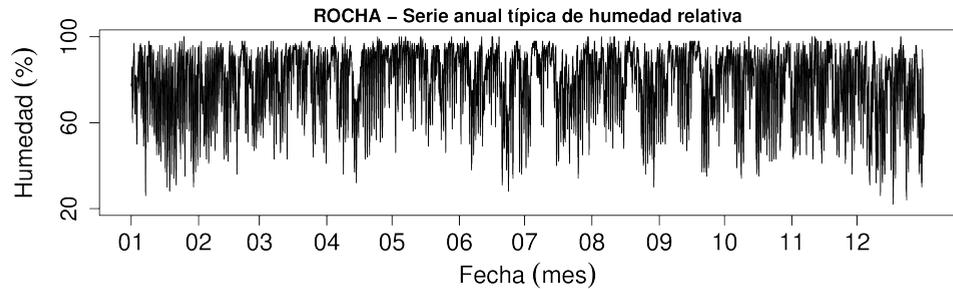
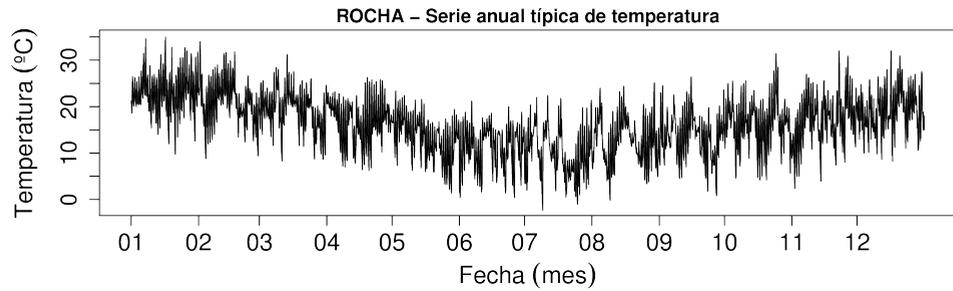
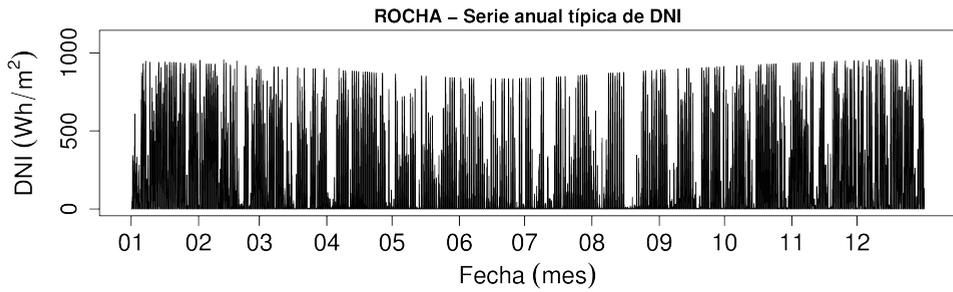
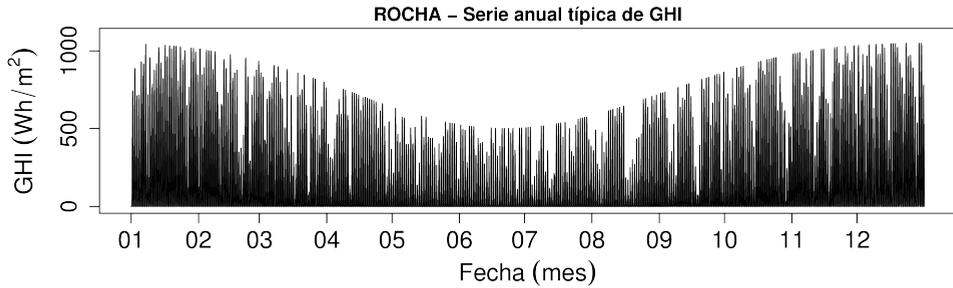
RIVERA



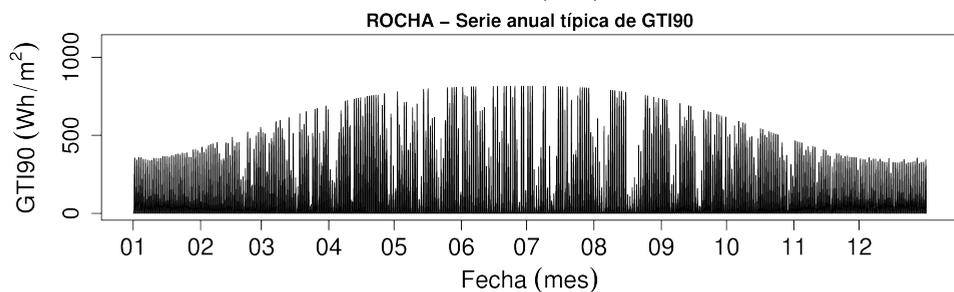
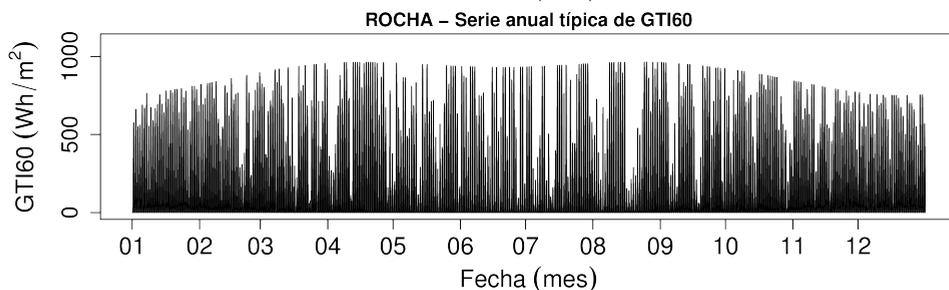
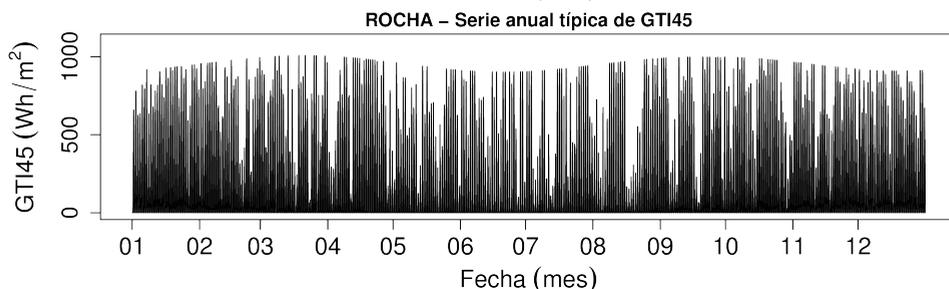
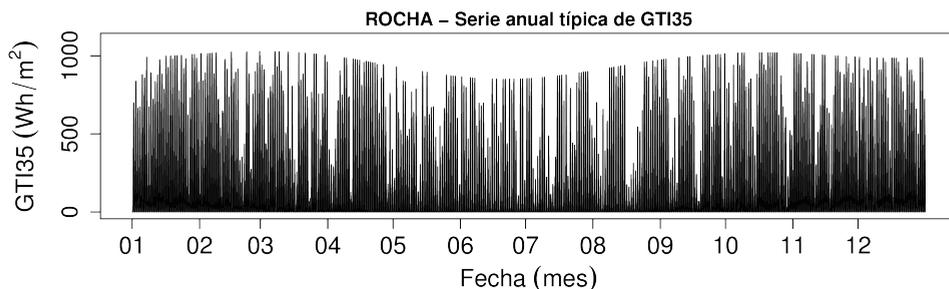
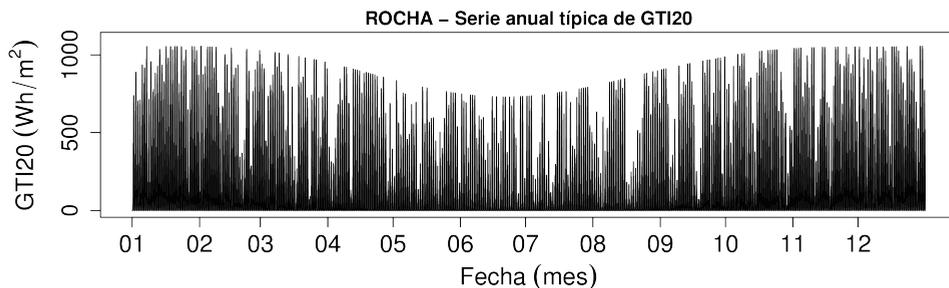
RIVERA



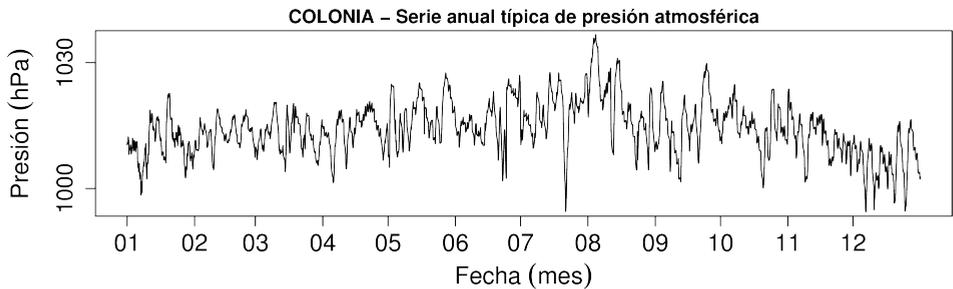
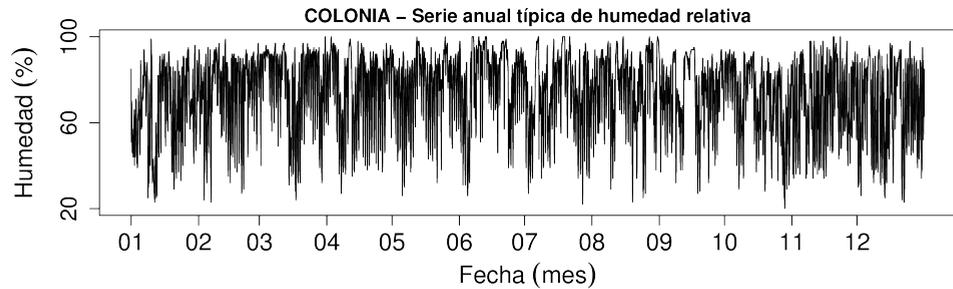
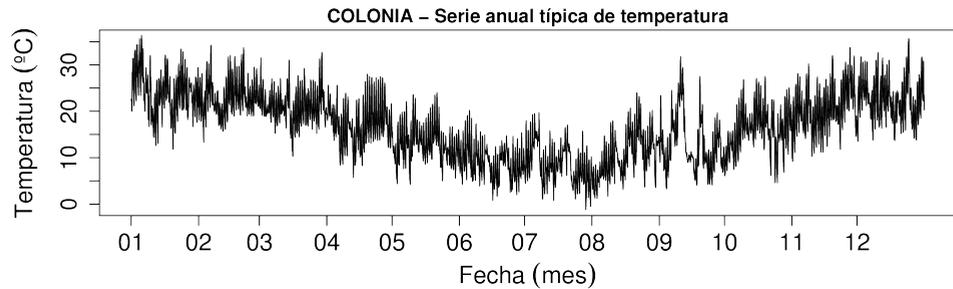
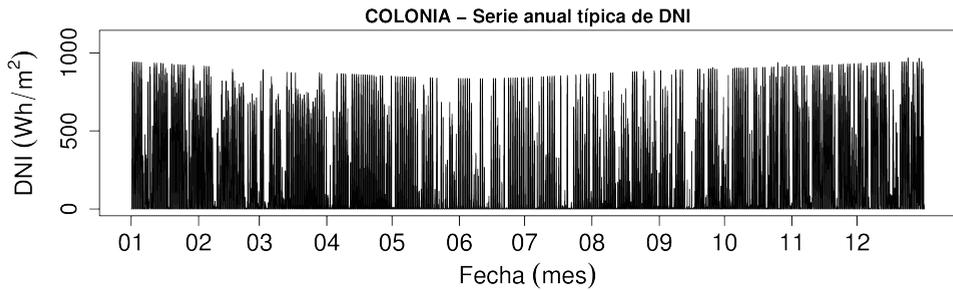
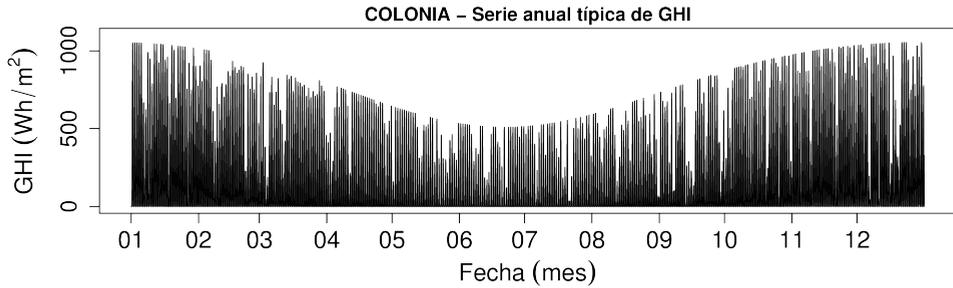
ROCHA



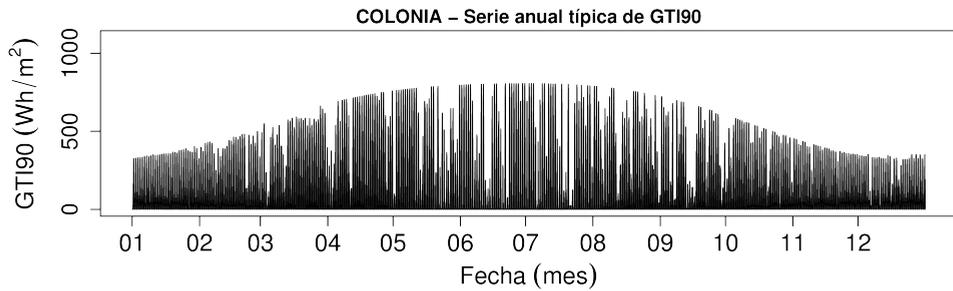
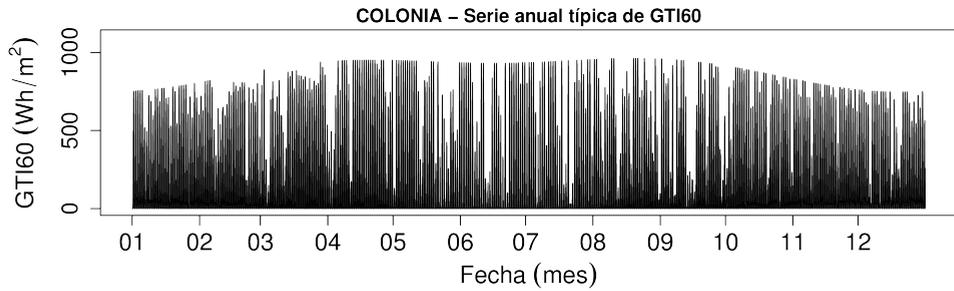
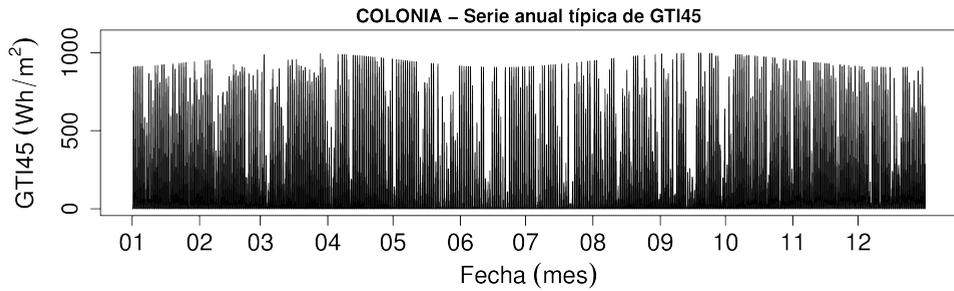
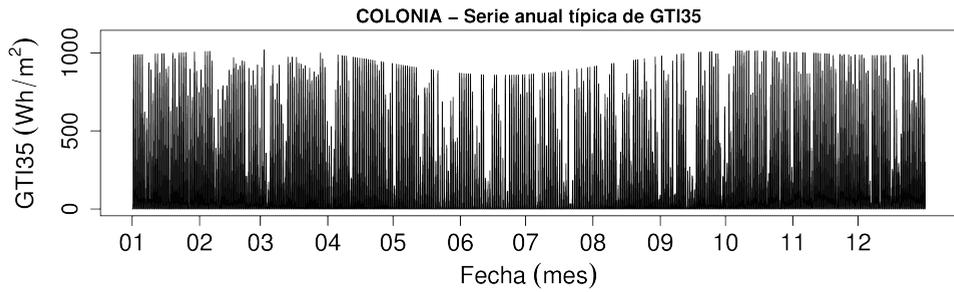
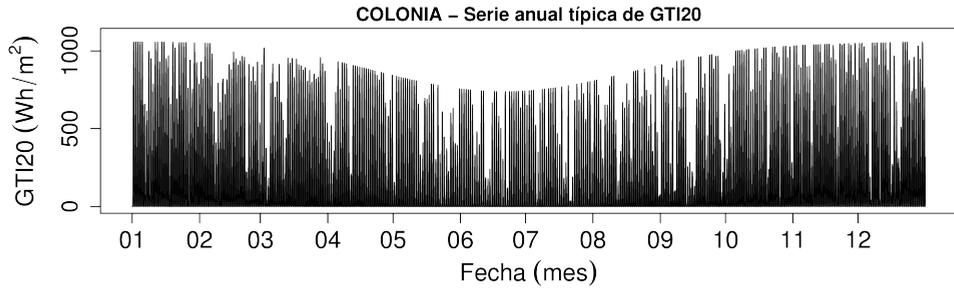
ROCHA



COLONIA



COLONIA



Información histórica y del AMTUES

TODAS LAS ESTACIONES MEDIAS MENSUALES DE IRRADIACIÓN GHI

Tabla B.1: Comparación entre los valores mensuales de irradiación GHI diaria del AMTUES y de los datos de satélite para cada localidad. Los valores están en MJ/m².

| Valores medios mensuales de irradiación GHI | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| MVD | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 26,6 | 21,9 | 18,2 | 13,3 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 14,4 | 19,1 | 23,8 | 26,3 |
| AMT | 26,4 | 22,8 | 17,3 | 13,5 | 8,7 | 7,5 | 7,6 | 10,9 | 14,4 | 19,9 | 22,3 | 27,2 |
| dif. | -0,2 | +0,9 | -0,9 | +0,2 | -0,4 | 0,0 | -0,3 | +0,6 | 0,0 | +0,8 | -1,5 | +0,9 |
| SAL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 26,1 | 22,4 | 18,9 | 14,3 | 10,2 | 8,3 | 9,6 | 12,3 | 16,0 | 19,6 | 24,2 | 26,0 |
| AMT | 26,8 | 22,0 | 19,7 | 14,4 | 10,1 | 8,7 | 9,8 | 12,5 | 16,3 | 18,8 | 24,2 | 24,6 |
| dif. | +0,7 | -0,4 | +0,8 | +0,1 | -0,1 | +0,4 | +0,2 | +0,2 | +0,3 | -0,8 | 0,0 | -1,4 |
| RIV | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 25,3 | 21,9 | 18,5 | 14,1 | 10,1 | 8,0 | 9,4 | 11,8 | 14,6 | 19,0 | 23,3 | 25,3 |
| AMT | 24,9 | 21,4 | 18,1 | 14,6 | 10,0 | 7,9 | 10,0 | 11,9 | 14,0 | 20,1 | 23,2 | 24,9 |
| dif. | -0,4 | -0,5 | -0,4 | +0,5 | -0,1 | -0,1 | +0,6 | +0,1 | -0,6 | +1,1 | -0,1 | -0,4 |
| ROC | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 25,2 | 20,8 | 17,3 | 12,9 | 9,1 | 7,5 | 7,9 | 10,3 | 13,9 | 18,4 | 23,4 | 25,4 |
| AMT | 25,2 | 21,0 | 16,6 | 13,1 | 9,1 | 8,0 | 8,2 | 10,1 | 14,2 | 18,6 | 23,2 | 25,1 |
| dif. | 0,0 | +0,2 | -0,7 | +0,2 | 0,0 | +0,5 | +0,3 | -0,2 | +0,3 | +0,2 | -0,2 | -0,3 |
| COL | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| base | 26,5 | 21,9 | 18,0 | 13,6 | 9,3 | 7,6 | 8,2 | 10,8 | 15,1 | 19,8 | 24,2 | 26,5 |
| AMT | 26,4 | 21,0 | 17,8 | 14,2 | 9,9 | 8,3 | 8,6 | 11,1 | 13,8 | 19,8 | 25,5 | 24,9 |
| dif. | -0,1 | -0,9 | -0,2 | +0,6 | +0,6 | +0,7 | +0,4 | +0,3 | -1,3 | 0,0 | +1,3 | -1,6 |

MONTEVIDEO

Tabla B.2: Ciclos diarios promedio para el AMTUs y los datos base de Montevideo. Al final de la Tabla se presenta la diferencia de las medias y la mayor diferencia hora a hora.

| CICLOS DIARIOS PROMEDIO | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|------|------------------|------|------|-------------|------|------|---------------|--------|------|
| hora UTC | GHI (Wh/m ²) | | | temperatura (°C) | | | humedad (%) | | | presión (hPa) | | |
| | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 15,9 | 15,9 | 0,0 | 80,1 | 80,0 | -0,1 | 1015,4 | 1015,5 | +0,1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 15,5 | 15,4 | -0,1 | 81,1 | 81,4 | +0,3 | 1015,5 | 1015,6 | +0,1 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 15,1 | 14,9 | -0,2 | 82,1 | 82,8 | +0,7 | 1015,5 | 1015,6 | +0,1 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 14,7 | 14,6 | -0,1 | 83,2 | 83,6 | +0,4 | 1015,5 | 1015,6 | +0,1 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 14,4 | 14,2 | -0,2 | 84,3 | 84,6 | +0,3 | 1015,3 | 1015,4 | +0,1 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 14,1 | 13,8 | -0,3 | 85,3 | 85,8 | +0,5 | 1015,1 | 1015,2 | +0,1 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 13,8 | 13,5 | -0,3 | 86,1 | 86,5 | +0,4 | 1015,0 | 1015,0 | 0,0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 13,6 | 13,4 | -0,2 | 86,6 | 86,8 | +0,2 | 1015,0 | 1015,0 | 0,0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 13,5 | 13,2 | -0,3 | 87,2 | 87,4 | +0,2 | 1015,2 | 1015,2 | 0,0 |
| 9 | 10 | 10 | 0 | 13,8 | 13,6 | -0,2 | 86,5 | 86,9 | +0,4 | 1015,5 | 1015,6 | +0,1 |
| 10 | 56 | 59 | +3 | 14,7 | 14,6 | -0,1 | 83,5 | 83,5 | 0,0 | 1015,9 | 1016,0 | +0,1 |
| 11 | 163 | 167 | +4 | 16,1 | 16,0 | -0,1 | 78,9 | 78,8 | -0,1 | 1016,0 | 1016,1 | +0,1 |
| 12 | 316 | 316 | 0 | 17,6 | 17,6 | 0,0 | 73,3 | 72,7 | -0,6 | 1016,2 | 1016,4 | +0,2 |
| 13 | 449 | 447 | -2 | 18,7 | 18,8 | +0,1 | 68,8 | 68,3 | -0,5 | 1016,2 | 1016,4 | +0,2 |
| 14 | 557 | 555 | -2 | 19,4 | 19,6 | +0,2 | 65,8 | 64,9 | -0,9 | 1016,0 | 1016,1 | +0,1 |
| 15 | 605 | 606 | +1 | 19,8 | 19,9 | +0,1 | 64,2 | 63,9 | -0,3 | 1015,6 | 1015,8 | +0,2 |
| 16 | 613 | 617 | +4 | 20,0 | 20,1 | +0,1 | 63,6 | 63,0 | -0,6 | 1015,1 | 1015,3 | +0,2 |
| 17 | 570 | 578 | +8 | 19,9 | 19,9 | 0,0 | 64,0 | 63,6 | -0,4 | 1014,8 | 1014,9 | +0,1 |
| 18 | 491 | 491 | 0 | 19,7 | 19,6 | -0,1 | 65,1 | 65,0 | -0,1 | 1014,5 | 1014,6 | +0,1 |
| 19 | 380 | 378 | -1 | 19,1 | 19,1 | 0,0 | 67,5 | 67,5 | 0,0 | 1014,4 | 1014,5 | +0,1 |
| 20 | 231 | 229 | -2 | 18,3 | 18,2 | -0,1 | 70,9 | 71,0 | +0,1 | 1014,4 | 1014,6 | +0,2 |
| 21 | 105 | 104 | -1 | 17,4 | 17,4 | 0,0 | 74,8 | 74,8 | 0,0 | 1014,6 | 1014,7 | +0,1 |
| 22 | 26 | 26 | 0 | 16,8 | 16,7 | -0,1 | 77,5 | 76,9 | -0,6 | 1014,8 | 1015,0 | +0,2 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 16,4 | 16,3 | -0,1 | 79,0 | 78,9 | -0,1 | 1015,1 | 1015,2 | +0,1 |
| media | 327 | 327 | 0 | 16,6 | 16,5 | -0,1 | 76,6 | 76,6 | 0,0 | 1015,3 | 1015,4 | +0,1 |
| max. | 570 | 578 | +8 | 13,8 | 13,5 | -0,3 | 65,8 | 64,9 | -0,9 | 1015,6 | 1015,8 | +0,2 |

MONTEVIDEO

Tabla B.3: Comparación entre el AMTUes y los datos base de Montevideo. La temperatura está en °C, la humedad en % y la presión en hPa.

| PROMEDIOS MENSUALES DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| temp. med. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 22,8 | 22,3 | 20,5 | 17,3 | 14,1 | 11,3 | 10,3 | 11,7 | 13,2 | 16,2 | 18,7 | 21,1 |
| AMTUes | 22,3 | 21,8 | 20,9 | 17,2 | 14,2 | 10,7 | 10,3 | 11,3 | 13,9 | 15,7 | 19,2 | 21,1 |
| Diferencia | -0,5 | -0,5 | +0,4 | -0,1 | +0,1 | -0,6 | +0,0 | -0,4 | +0,7 | -0,5 | +0,5 | +0,0 |
| temp. máx. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 27,5 | 26,4 | 24,6 | 21,7 | 18,1 | 15,5 | 14,5 | 16,2 | 17,5 | 20,4 | 23,3 | 25,8 |
| AMTUes | 26,3 | 26,1 | 25,2 | 21,8 | 18,7 | 15,5 | 15,0 | 16,3 | 18,2 | 19,9 | 24,2 | 25,9 |
| Diferencia | -1,2 | -0,3 | +0,6 | +0,1 | +0,6 | +0,0 | +0,5 | +0,1 | +0,7 | -0,5 | +0,9 | +0,1 |
| temp. mín. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 18,3 | 18,3 | 16,6 | 13,2 | 10,4 | 7,5 | 6,7 | 7,9 | 9,4 | 12,1 | 14,1 | 16,4 |
| AMTUes | 18,0 | 17,3 | 16,7 | 13,1 | 10,4 | 7,0 | 6,5 | 7,0 | 10,1 | 11,7 | 14,4 | 16,5 |
| Diferencia | -0,3 | -1,0 | +0,1 | -0,1 | +0,0 | -0,5 | -0,2 | -0,9 | +0,7 | -0,4 | +0,3 | +0,1 |
| humedad | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 71,6 | 74,9 | 76,7 | 77,2 | 80,9 | 82,0 | 80,2 | 79,3 | 77,9 | 76,6 | 72,3 | 70,2 |
| AMTUes | 73,6 | 73,8 | 78,4 | 78,9 | 79,5 | 84,1 | 79,7 | 76,1 | 80,7 | 74,1 | 70,3 | 70,0 |
| Diferencia | +2,0 | -1,1 | +1,7 | +1,7 | -1,4 | +2,1 | -0,5 | -3,2 | +2,8 | -2,5 | -2,0 | -0,2 |
| presión | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 1011,8 | 1012,5 | 1013,9 | 1015,6 | 1017,5 | 1017,6 | 1018,3 | 1018,1 | 1018,1 | 1015,0 | 1013,0 | 1011,6 |
| AMTUes | 1011,8 | 1012,6 | 1014,4 | 1015,5 | 1017,4 | 1016,5 | 1018,6 | 1016,8 | 1017,8 | 1017,1 | 1013,4 | 1012,7 |
| Diferencia | -0,1 | +0,1 | +0,4 | -0,1 | -0,1 | -1,0 | +0,2 | -1,4 | -0,3 | +2,2 | +0,3 | +1,1 |

SALTO

Tabla B.4: Ciclos diarios promedio para el AMTUes y los datos base de Salto. Al final de la Tabla se presenta la diferencia de las medias y la mayor diferencia hora a hora.

| CICLOS DIARIOS PROMEDIO | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|------|------------------|------|------|-------------|------|------|---------------|--------|------|
| hora UTC | GHI (Wh/m ²) | | | temperatura (°C) | | | humedad (%) | | | presión (hPa) | | |
| | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 17,8 | 18,6 | +0,8 | 77,2 | 77,6 | +0,4 | 1013,7 | 1013,2 | -0,5 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 17,1 | 17,8 | +0,7 | 80,1 | 80,5 | +0,4 | 1013,9 | 1013,4 | -0,5 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 16,6 | 17,2 | +0,6 | 82,1 | 82,9 | +0,8 | 1014,1 | 1013,6 | -0,5 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 16,1 | 16,7 | +0,6 | 84,0 | 84,8 | +0,8 | 1014,3 | 1013,7 | -0,4 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 15,6 | 16,3 | +0,7 | 85,5 | 86,2 | +0,7 | 1014,3 | 1013,7 | -0,6 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 15,2 | 15,9 | +0,7 | 87,0 | 87,1 | +0,1 | 1014,3 | 1013,6 | -0,7 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 14,8 | 15,4 | +0,6 | 88,1 | 88,3 | +0,2 | 1014,3 | 1013,6 | -0,7 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 14,4 | 15,1 | +0,7 | 89,1 | 89,3 | +0,2 | 1014,4 | 1013,7 | -0,7 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 14,1 | 14,4 | +0,3 | 90,1 | 90,6 | +0,5 | 1014,5 | 1013,8 | -0,7 |
| 9 | 4 | 3 | +1 | 14,1 | 14,5 | +0,4 | 89,7 | 90,2 | +0,5 | 1014,7 | 1014,0 | -0,7 |
| 10 | 46 | 44 | -2 | 15,1 | 15,5 | +0,4 | 86,3 | 86,8 | +0,5 | 1015,1 | 1014,5 | -0,6 |
| 11 | 154 | 151 | -3 | 16,9 | 17,2 | +0,3 | 80,4 | 81,0 | +0,6 | 1015,5 | 1014,9 | -0,6 |
| 12 | 317 | 309 | -8 | 19,0 | 19,2 | +0,2 | 73,1 | 73,9 | +0,8 | 1015,6 | 1015,0 | -0,6 |
| 13 | 459 | 451 | -8 | 20,6 | 20,9 | +0,3 | 66,6 | 67,4 | +0,8 | 1015,6 | 1015,0 | -0,6 |
| 14 | 577 | 568 | -9 | 21,9 | 22,1 | +0,2 | 61,6 | 62,5 | +0,9 | 1015,5 | 1014,9 | -0,6 |
| 15 | 636 | 638 | +2 | 22,9 | 23,1 | +0,2 | 57,8 | 58,7 | +0,9 | 1015,2 | 1014,6 | -0,6 |
| 16 | 646 | 652 | +6 | 23,6 | 23,8 | +0,2 | 55,3 | 55,8 | +0,5 | 1014,6 | 1014,0 | -0,6 |
| 17 | 606 | 617 | +11 | 24,0 | 24,3 | +0,3 | 53,8 | 54,1 | +0,3 | 1013,9 | 1013,3 | -0,6 |
| 18 | 529 | 541 | +12 | 24,1 | 24,5 | +0,4 | 53,1 | 53,4 | +0,3 | 1013,5 | 1012,9 | -0,6 |
| 19 | 414 | 420 | +6 | 23,8 | 24,2 | +0,4 | 54,0 | 54,3 | +0,3 | 1013,1 | 1012,6 | -0,5 |
| 20 | 260 | 261 | +1 | 23,0 | 23,4 | +0,4 | 57,3 | 57,5 | +0,2 | 1012,9 | 1012,4 | -0,5 |
| 21 | 121 | 122 | +1 | 21,5 | 22,0 | +0,5 | 63,2 | 63,2 | +0,0 | 1013,0 | 1012,4 | -0,6 |
| 22 | 29 | 28 | -1 | 19,9 | 20,6 | +0,7 | 68,8 | 69,1 | +0,3 | 1013,2 | 1012,7 | -0,5 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 18,8 | 19,5 | +0,7 | 73,4 | 73,4 | +0,0 | 1013,5 | 1013,0 | -0,5 |
| media | 343 | 343 | 0 | 18,8 | 19,3 | +0,5 | 73,2 | 73,7 | +0,5 | 1014,3 | 1013,7 | -0,6 |
| max. | 529 | 541 | +12 | 17,8 | 18,6 | +0,8 | 61,6 | 62,5 | +0,9 | 1014,3 | 1013,6 | -0,7 |

SALTO

Tabla B.5: Comparación entre el AMTUes y los datos base de Salto. La temperatura está en °C, la humedad en % y la presión en hPa.

| PROMEDIOS MENSUALES DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| temp. med. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 26,0 | 24,4 | 22,3 | 18,7 | 15,0 | 12,9 | 12,1 | 13,8 | 15,8 | 19,2 | 21,7 | 23,9 |
| AMTUes | 26,7 | 24,6 | 22,4 | 18,4 | 17,1 | 12,5 | 13,5 | 15,1 | 15,8 | 19,7 | 20,9 | 24,6 |
| Diferencia | +0,7 | +0,2 | +0,1 | -0,3 | +2,1 | -0,4 | +1,4 | +1,3 | +0,0 | +0,5 | -0,8 | +0,7 |
| temp. máx. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 32,7 | 30,5 | 28,4 | 24,9 | 20,6 | 18,2 | 17,9 | 20,3 | 22,0 | 25,1 | 28,0 | 30,4 |
| AMTUes | 33,6 | 30,8 | 28,8 | 24,4 | 22,6 | 17,8 | 19,3 | 21,6 | 21,9 | 24,2 | 27,9 | 30,5 |
| Diferencia | +0,9 | +0,3 | +0,4 | -0,5 | +2,0 | -0,4 | +1,4 | +1,3 | -0,1 | -0,9 | -0,1 | +0,1 |
| temp. mín. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 19,5 | 18,8 | 16,8 | 13,3 | 10,2 | 8,3 | 7,0 | 8,2 | 10,0 | 13,5 | 15,4 | 17,4 |
| AMTUes | 20,5 | 18,7 | 16,8 | 13,2 | 12,5 | 8,0 | 8,4 | 9,7 | 9,9 | 12,8 | 14,0 | 18,4 |
| Diferencia | +1,0 | -0,1 | +0,0 | -0,1 | +2,3 | -0,3 | +1,4 | +1,5 | -0,1 | -0,7 | -1,4 | +1,0 |
| humedad | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 64,3 | 70,8 | 74,2 | 76,8 | 81,1 | 82,9 | 78,0 | 73,6 | 72,0 | 72,4 | 67,4 | 64,7 |
| AMTUes | 62,4 | 71,4 | 70,5 | 79,1 | 82,6 | 81,2 | 77,4 | 73,1 | 77,4 | 74,2 | 66,6 | 68,5 |
| Diferencia | -1,9 | +0,8 | -3,7 | +2,3 | +1,5 | -1,7 | -0,6 | -0,5 | +5,4 | +1,8 | -0,8 | +3,8 |
| presión | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 1010,2 | 1011,0 | 1012,7 | 1015,0 | 1017,1 | 1017,5 | 1018,3 | 1017,4 | 1016,7 | 1013,5 | 1011,6 | 1010,2 |
| AMTUes | 1010,5 | 1010,3 | 1012,9 | 1015,9 | 1014,7 | 1017,9 | 1016,7 | 1015,5 | 1015,1 | 1013,2 | 1011,1 | 1010,2 |
| Diferencia | +0,3 | -0,7 | +0,2 | +0,9 | -2,4 | +0,4 | -1,6 | -1,9 | -1,6 | -0,3 | -0,5 | +0,0 |

RIVERA

Tabla B.6: Ciclos diarios promedio para el AMTUes y los datos base de Rivera. Al final de la Tabla se presenta la diferencia de las medias y la mayor diferencia hora a hora.

| CICLOS DIARIOS PROMEDIO | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|------|------------------|------|------|-------------|------|------|---------------|--------|------|
| hora UTC | GHI (Wh/m ²) | | | temperatura (°C) | | | humedad (%) | | | presión (hPa) | | |
| | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 17,7 | 17,7 | 0,0 | 77,0 | 76,1 | -0,9 | 1014,7 | 1014,9 | +0,2 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 17,0 | 17,0 | 0,0 | 79,4 | 79,2 | -0,2 | 1015,0 | 1015,2 | +0,2 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 16,5 | 16,4 | -0,1 | 81,3 | 81,3 | 0,0 | 1015,3 | 1015,5 | +0,2 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 16,0 | 15,8 | -0,2 | 83,2 | 83,3 | +0,1 | 1015,3 | 1015,5 | +0,2 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 15,5 | 15,4 | -0,1 | 84,7 | 84,8 | +0,1 | 1015,3 | 1015,5 | +0,2 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 15,1 | 15,0 | -0,1 | 86,1 | 86,2 | +0,1 | 1015,2 | 1015,5 | +0,3 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 14,8 | 14,6 | -0,2 | 87,4 | 87,5 | +0,1 | 1015,1 | 1015,5 | +0,4 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 14,5 | 14,2 | -0,3 | 88,5 | 88,8 | +0,3 | 1015,2 | 1015,5 | +0,3 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 14,2 | 14,0 | -0,2 | 89,3 | 89,7 | +0,4 | 1015,2 | 1015,5 | +0,3 |
| 9 | 7 | 6 | -1 | 14,4 | 14,2 | -0,2 | 88,6 | 88,9 | +0,3 | 1015,4 | 1015,7 | +0,3 |
| 10 | 53 | 50 | -3 | 15,4 | 15,2 | -0,2 | 85,3 | 85,6 | +0,3 | 1015,7 | 1015,9 | +0,2 |
| 11 | 167 | 161 | -6 | 16,8 | 16,7 | -0,1 | 80,6 | 80,8 | +0,2 | 1016,0 | 1016,2 | +0,2 |
| 12 | 328 | 320 | -8 | 18,5 | 18,6 | +0,1 | 74,4 | 74,0 | -0,4 | 1016,1 | 1016,2 | +0,1 |
| 13 | 466 | 466 | 0 | 19,9 | 20,1 | +0,2 | 68,9 | 68,1 | -0,8 | 1015,9 | 1016,1 | +0,2 |
| 14 | 576 | 577 | +1 | 21,0 | 21,2 | +0,2 | 64,6 | 63,5 | -1,1 | 1015,7 | 1015,9 | +0,2 |
| 15 | 624 | 631 | +7 | 22,0 | 22,2 | +0,2 | 60,7 | 59,8 | -0,9 | 1015,4 | 1015,6 | +0,2 |
| 16 | 626 | 638 | +12 | 22,7 | 22,8 | +0,1 | 58,1 | 57,0 | -1,1 | 1014,8 | 1015,0 | +0,2 |
| 17 | 579 | 584 | +5 | 23,0 | 23,2 | +0,2 | 56,8 | 55,9 | -0,9 | 1014,2 | 1014,4 | +0,2 |
| 18 | 497 | 502 | +5 | 23,0 | 23,1 | +0,1 | 56,6 | 55,3 | -1,3 | 1013,9 | 1014,1 | +0,2 |
| 19 | 377 | 374 | -3 | 22,6 | 22,8 | +0,2 | 58,0 | 56,7 | -1,3 | 1013,7 | 1013,9 | +0,2 |
| 20 | 226 | 224 | -2 | 21,8 | 21,9 | +0,1 | 61,2 | 60,0 | -1,2 | 1013,6 | 1013,8 | +0,2 |
| 21 | 99 | 96 | -3 | 20,5 | 20,7 | +0,2 | 66,4 | 65,2 | -1,2 | 1013,7 | 1013,9 | +0,2 |
| 22 | 20 | 19 | -1 | 19,3 | 19,5 | +0,2 | 70,8 | 69,7 | -1,1 | 1014,0 | 1014,2 | +0,2 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 18,5 | 18,6 | +0,1 | 74,0 | 72,8 | -1,2 | 1014,4 | 1014,6 | +0,2 |
| media | 332 | 332 | 0 | 18,4 | 18,4 | 0,0 | 74,2 | 73,8 | -0,4 | 1014,9 | 1015,2 | +0,3 |
| max. | 626 | 638 | +12 | 14,5 | 14,2 | -0,3 | 56,6 | 55,3 | -1,3 | 1015,1 | 1015,5 | +0,4 |

RIVERA

Tabla B.7: Comparación entre el AMTUes y los datos base de Rivera. La temperatura está en °C, la humedad en % y la presión en hPa.

| PROMEDIOS MENSUALES DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| temp. med. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 24,7 | 23,8 | 22,1 | 18,6 | 14,8 | 12,9 | 12,0 | 13,8 | 15,3 | 18,5 | 21,0 | 23,1 |
| AMTUes | 24,4 | 24,1 | 22,6 | 18,8 | 14,4 | 12,9 | 12,4 | 14,0 | 15,6 | 18,2 | 20,2 | 23,2 |
| Diferencia | -0,3 | +0,3 | +0,5 | +0,2 | -0,4 | +0,0 | +0,4 | +0,2 | +0,3 | -0,3 | -0,8 | +0,1 |
| temp. máx. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 30,9 | 29,6 | 27,7 | 24,1 | 19,7 | 17,4 | 17,1 | 19,3 | 20,5 | 23,8 | 26,8 | 29,2 |
| AMTUes | 30,3 | 30,1 | 28,2 | 24,9 | 18,9 | 17,3 | 17,8 | 19,5 | 20,8 | 24,0 | 26,3 | 29,8 |
| Diferencia | -0,6 | +0,5 | +0,5 | +0,8 | -0,8 | -0,1 | +0,7 | +0,2 | +0,3 | +0,2 | -0,5 | +0,6 |
| temp. mín. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 19,0 | 18,9 | 17,2 | 14,0 | 10,9 | 9,3 | 7,9 | 9,2 | 10,7 | 13,7 | 15,4 | 17,5 |
| AMTUes | 19,0 | 18,9 | 17,7 | 13,4 | 10,9 | 9,2 | 7,9 | 9,3 | 10,8 | 12,7 | 14,7 | 17,1 |
| Diferencia | +0,0 | +0,0 | +0,5 | -0,6 | +0,0 | -0,1 | +0,0 | +0,1 | +0,1 | -1,0 | -0,7 | -0,4 |
| humedad | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 67,4 | 71,6 | 74,5 | 76,8 | 80,8 | 82,6 | 77,6 | 74,7 | 75,2 | 74,1 | 68,6 | 67,1 |
| AMTUes | 69,7 | 71,7 | 76,7 | 71,4 | 82,3 | 81,2 | 76,7 | 72,9 | 78,1 | 71,0 | 70,1 | 63,3 |
| Diferencia | +2,3 | +0,1 | +2,2 | -5,4 | +1,5 | -1,4 | -0,9 | -1,8 | +2,9 | -3,1 | +1,5 | -3,8 |
| presión | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 1011,1 | 1011,8 | 1013,3 | 1015,4 | 1017,5 | 1018,0 | 1018,9 | 1018,2 | 1017,1 | 1014,2 | 1012,5 | 1011,1 |
| AMTUes | 1010,7 | 1011,2 | 1012,9 | 1015,9 | 1016,5 | 1019,3 | 1020,2 | 1019,4 | 1015,9 | 1015,9 | 1011,6 | 1012,1 |
| Diferencia | -0,4 | -0,6 | -0,4 | +0,5 | -1,0 | +1,3 | +1,3 | +1,2 | -1,2 | +1,7 | -0,9 | +1,0 |

ROCHA

Tabla B.8: Ciclos diarios promedio para el AMTues y los datos base de Rocha. Al final de la Tabla se presenta la diferencia de las medias y la mayor diferencia hora a hora.

| CICLOS DIARIOS PROMEDIO | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|------|------------------|------|------|-------------|------|------|---------------|--------|------|
| hora UTC | GHI (Wh/m ²) | | | temperatura (°C) | | | humedad (%) | | | presión (hPa) | | |
| | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 14,7 | 14,6 | -0,1 | 86,0 | 85,8 | -0,2 | 1015,3 | 1014,9 | -0,4 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 14,3 | 14,2 | -0,1 | 87,1 | 86,9 | -0,2 | 1015,4 | 1015,1 | -0,3 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 14,0 | 13,8 | -0,2 | 88,0 | 87,8 | -0,2 | 1015,4 | 1015,2 | -0,2 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 13,7 | 13,5 | -0,2 | 88,7 | 88,5 | -0,2 | 1015,4 | 1015,1 | -0,3 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 13,5 | 13,3 | -0,2 | 89,3 | 89,3 | 0,0 | 1015,3 | 1015,0 | -0,3 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 13,3 | 13,1 | -0,2 | 89,7 | 89,8 | +0,1 | 1015,1 | 1014,8 | -0,3 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 13,0 | 12,9 | -0,1 | 90,2 | 90,2 | 0,0 | 1015,0 | 1014,7 | -0,3 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 12,8 | 12,7 | -0,1 | 90,5 | 90,5 | 0,0 | 1015,0 | 1014,6 | -0,4 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 12,7 | 12,5 | -0,2 | 90,5 | 90,3 | -0,2 | 1015,1 | 1014,6 | -0,5 |
| 9 | 13 | 13 | 0 | 13,2 | 13,1 | -0,1 | 89,4 | 88,6 | -0,8 | 1015,2 | 1014,8 | -0,4 |
| 10 | 60 | 62 | +2 | 14,5 | 14,4 | -0,1 | 85,8 | 85,5 | -0,3 | 1015,5 | 1015,1 | -0,4 |
| 11 | 174 | 174 | 0 | 16,2 | 16,1 | -0,1 | 80,1 | 80,1 | 0,0 | 1015,8 | 1015,4 | -0,4 |
| 12 | 326 | 325 | -1 | 18,0 | 18,0 | 0,0 | 73,4 | 73,2 | -0,2 | 1015,9 | 1015,6 | -0,3 |
| 13 | 452 | 460 | +8 | 19,2 | 19,2 | 0,1 | 68,2 | 67,6 | -0,6 | 1015,9 | 1015,5 | -0,4 |
| 14 | 553 | 557 | +4 | 19,9 | 20,1 | +0,2 | 64,7 | 63,4 | -1,3 | 1015,8 | 1015,4 | -0,4 |
| 15 | 594 | 602 | +8 | 20,5 | 20,7 | +0,2 | 62,5 | 61,0 | -1,5 | 1015,6 | 1015,2 | -0,4 |
| 16 | 592 | 592 | 0 | 20,7 | 20,8 | +0,1 | 61,6 | 60,4 | -1,2 | 1015,1 | 1014,7 | -0,4 |
| 17 | 544 | 541 | -3 | 20,7 | 20,7 | 0,0 | 61,7 | 61,0 | -0,7 | 1014,6 | 1014,3 | -0,3 |
| 18 | 462 | 460 | -2 | 20,3 | 20,3 | 0,0 | 63,2 | 62,4 | -0,8 | 1014,4 | 1014,1 | -0,3 |
| 19 | 347 | 340 | -7 | 19,6 | 19,5 | -0,1 | 66,2 | 65,5 | -0,7 | 1014,4 | 1014,0 | -0,4 |
| 20 | 206 | 208 | +2 | 18,5 | 18,4 | -0,1 | 70,9 | 70,6 | -0,3 | 1014,4 | 1014,0 | -0,4 |
| 21 | 90 | 90 | 0 | 17,1 | 17,0 | -0,1 | 76,8 | 76,4 | -0,4 | 1014,5 | 1014,1 | -0,4 |
| 22 | 20 | 20 | 0 | 16,0 | 15,9 | -0,1 | 81,4 | 81,1 | -0,3 | 1014,8 | 1014,4 | -0,4 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 15,3 | 15,1 | -0,2 | 84,4 | 84,2 | -0,2 | 1015,1 | 1014,7 | -0,4 |
| media | 317 | 317 | 0 | 16,3 | 16,2 | -0,1 | 78,8 | 78,3 | -0,5 | 1015,2 | 1014,8 | -0,4 |
| max. | 594 | 602 | +8 | 14,0 | 13,8 | -0,2 | 62,5 | 61,0 | -1,5 | 1015,1 | 1014,6 | -0,5 |

ROCHA

Tabla B.9: Comparación entre el AMTUes y los datos base de Rocha. La temperatura está en °C, la humedad en % y la presión en hPa.

| PROMEDIOS MENSUALES DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| temp. med. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 22,3 | 21,8 | 20,0 | 17,0 | 13,8 | 11,5 | 10,6 | 11,8 | 13,1 | 15,9 | 18,0 | 20,5 |
| AMTUes | 23,1 | 21,2 | 19,5 | 17,1 | 13,4 | 11,3 | 10,2 | 12,7 | 13,7 | 16,4 | 17,3 | 19,3 |
| Diferencia | +0,8 | -0,6 | -0,5 | +0,1 | -0,4 | -0,2 | -0,4 | +0,9 | +0,6 | +0,5 | -0,7 | -1,2 |
| temp. máx. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 28,0 | 26,9 | 25,1 | 22,2 | 18,6 | 16,4 | 15,5 | 16,8 | 18,1 | 21,0 | 23,5 | 26,2 |
| AMTUes | 29,0 | 26,2 | 24,2 | 22,4 | 18,5 | 16,4 | 15,5 | 17,8 | 18,9 | 22,2 | 23,1 | 24,7 |
| Diferencia | +1,0 | -0,7 | -1,1 | +0,2 | -0,1 | +0,0 | +0,0 | +1,0 | +0,8 | +1,2 | -0,4 | -1,5 |
| temp. mín. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 17,0 | 17,1 | 15,4 | 12,5 | 9,6 | 7,0 | 6,3 | 7,5 | 8,6 | 11,2 | 12,7 | 15,0 |
| AMTUes | 17,9 | 16,6 | 15,1 | 12,5 | 8,9 | 6,4 | 5,7 | 8,7 | 8,9 | 11,0 | 11,7 | 14,0 |
| Diferencia | +0,9 | -0,5 | -0,3 | +0,0 | -0,7 | -0,6 | -0,6 | +1,2 | +0,3 | -0,2 | -1,0 | -1,0 |
| humedad | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 73,5 | 76,7 | 79,7 | 80,4 | 82,8 | 82,7 | 80,8 | 80,8 | 80,5 | 79,6 | 75,2 | 72,8 |
| AMTUes | 73,3 | 76,2 | 80,1 | 80,2 | 85,3 | 77,9 | 79,9 | 79,8 | 80,4 | 78,5 | 76,7 | 71,4 |
| Diferencia | -0,2 | -0,5 | +0,4 | -0,2 | +2,5 | -4,8 | -0,9 | -1,0 | -0,1 | -1,1 | +1,5 | -1,4 |
| presión | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 1011,9 | 1012,4 | 1013,8 | 1015,3 | 1017,2 | 1017,3 | 1018,1 | 1018,2 | 1017,9 | 1014,9 | 1013,1 | 1011,6 |
| AMTUes | 1010,1 | 1012,0 | 1013,7 | 1014,8 | 1016,1 | 1018,1 | 1017,8 | 1018,6 | 1017,0 | 1015,8 | 1012,3 | 1011,2 |
| Diferencia | -1,8 | -0,4 | -0,1 | -0,5 | -1,1 | +0,8 | -0,3 | +0,4 | -0,9 | +0,9 | -0,8 | -0,4 |

COLONIA

Tabla B.10: Ciclos diarios promedio para el AMTUes y los datos base de Colonia. Al final de la Tabla se presenta la diferencia de las medias y la mayor diferencia hora a hora.

| CICLOS DIARIOS PROMEDIO | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|------|------------------|------|------|-------------|------|------|---------------|--------|------|
| hora UTC | GHI (Wh/m ²) | | | temperatura (°C) | | | humedad (%) | | | presión (hPa) | | |
| | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. | ref. | AMT | dif. |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 15,4 | 15,4 | 0,0 | 78,5 | 78,2 | -0,3 | 1014,0 | 1013,6 | -0,4 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 15,0 | 15,0 | 0,0 | 79,6 | 79,4 | -0,2 | 1014,1 | 1013,7 | -0,4 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 14,6 | 14,6 | 0,0 | 80,6 | 80,6 | 0,0 | 1014,3 | 1013,9 | -0,4 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 14,2 | 14,3 | +0,1 | 81,5 | 81,6 | +0,1 | 1014,4 | 1014,0 | -0,4 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 13,9 | 13,9 | 0,0 | 82,6 | 82,5 | -0,1 | 1014,5 | 1014,2 | -0,3 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 13,6 | 13,6 | 0,0 | 83,5 | 83,3 | -0,2 | 1014,6 | 1014,3 | -0,3 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 13,4 | 13,3 | -0,1 | 84,4 | 84,3 | -0,1 | 1014,7 | 1014,4 | -0,3 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 13,1 | 13,1 | 0,0 | 85,2 | 85,2 | 0,0 | 1014,8 | 1014,6 | -0,2 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 13,0 | 13,0 | 0,0 | 85,8 | 85,9 | +0,1 | 1014,9 | 1014,7 | -0,2 |
| 9 | 7 | 6 | -1 | 13,3 | 13,2 | -0,1 | 85,4 | 85,5 | +0,1 | 1015,0 | 1014,8 | -0,2 |
| 10 | 48 | 49 | +1 | 14,2 | 14,2 | 0,0 | 82,7 | 82,8 | +0,1 | 1015,2 | 1015,0 | -0,2 |
| 11 | 149 | 149 | 0 | 15,9 | 16,1 | +0,2 | 76,7 | 76,5 | -0,1 | 1015,3 | 1015,1 | -0,2 |
| 12 | 306 | 307 | +1 | 17,3 | 17,5 | +0,2 | 71,8 | 71,4 | -0,4 | 1015,4 | 1015,2 | -0,2 |
| 13 | 443 | 446 | +3 | 18,6 | 18,9 | +0,3 | 66,0 | 65,3 | -0,7 | 1015,5 | 1015,2 | -0,3 |
| 14 | 558 | 563 | +5 | 19,5 | 19,8 | +0,3 | 61,9 | 60,9 | -1,0 | 1015,5 | 1015,3 | -0,2 |
| 15 | 613 | 625 | +12 | 20,1 | 20,4 | +0,3 | 59,5 | 57,7 | -1,8 | 1015,3 | 1015,1 | -0,2 |
| 16 | 624 | 633 | +9 | 20,5 | 20,8 | +0,3 | 58,3 | 56,3 | -2,0 | 1014,8 | 1014,5 | -0,3 |
| 17 | 589 | 590 | +1 | 20,6 | 20,9 | +0,3 | 58,3 | 56,7 | -1,6 | 1014,3 | 1014,0 | -0,3 |
| 18 | 516 | 513 | -3 | 20,5 | 20,8 | +0,3 | 58,6 | 57,1 | -1,5 | 1014,0 | 1013,7 | -0,3 |
| 19 | 399 | 387 | -12 | 20,0 | 20,3 | +0,3 | 60,6 | 59,6 | -1,0 | 1013,8 | 1013,5 | -0,3 |
| 20 | 249 | 244 | -5 | 19,0 | 19,2 | +0,2 | 65,0 | 64,4 | -0,6 | 1013,7 | 1013,4 | -0,3 |
| 21 | 118 | 115 | -3 | 17,7 | 18,0 | +0,3 | 70,3 | 69,6 | -0,7 | 1013,7 | 1013,4 | -0,3 |
| 22 | 31 | 30 | -1 | 16,6 | 16,7 | +0,1 | 74,8 | 74,3 | -0,5 | 1013,8 | 1013,4 | -0,4 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 15,9 | 15,9 | 0,0 | 77,3 | 76,6 | -0,7 | 1013,9 | 1013,5 | -0,4 |
| media | 332 | 333 | +1 | 16,5 | 16,6 | +0,1 | 73,7 | 73,1 | -0,6 | 1014,6 | 1014,3 | -0,3 |
| max. | 613 | 625 | +12 | 20,5 | 20,8 | +0,3 | 58,3 | 56,3 | -2,0 | 1014,0 | 1013,6 | -0,4 |

COLONIA

Tabla B.11: Comparación entre el AMTUes y los datos base de Colonia. La temperatura está en °C, la humedad en % y la presión en hPa.

| PROMEDIOS MENSUALES DE VARIABLES COMPLEMENTARIAS | | | | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| temp. med. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 23,6 | 22,6 | 20,4 | 16,8 | 13,6 | 10,2 | 9,5 | 11,2 | 13,1 | 16,4 | 19,5 | 22,0 |
| AMTUes | 24,1 | 23,1 | 21,2 | 17,4 | 13,2 | 9,1 | 8,8 | 10,6 | 13,1 | 16,0 | 20,7 | 22,7 |
| Diferencia | +0,5 | +0,5 | +0,8 | +0,6 | -0,4 | -1,1 | -0,7 | -0,6 | +0,0 | -0,4 | +1,2 | +0,7 |
| temp. máx. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 29,3 | 27,8 | 25,5 | 21,8 | 18,1 | 14,8 | 14,1 | 16,2 | 18,0 | 21,4 | 24,9 | 27,5 |
| AMTUes | 29,5 | 28,1 | 25,9 | 23,3 | 18,2 | 13,9 | 13,5 | 15,5 | 17,7 | 21,2 | 26,6 | 28,2 |
| Diferencia | +0,2 | +0,3 | +0,4 | +1,5 | +0,1 | -0,9 | -0,6 | -0,7 | -0,3 | -0,2 | +1,7 | +0,7 |
| temp. mín. | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 18,2 | 18,2 | 16,1 | 12,5 | 10,1 | 6,5 | 5,8 | 7,3 | 9,1 | 12,0 | 14,4 | 16,7 |
| AMTUes | 18,7 | 18,9 | 17,2 | 12,5 | 9,1 | 5,4 | 4,9 | 6,5 | 9,4 | 11,4 | 15,2 | 17,7 |
| Diferencia | +0,5 | +0,7 | +1,1 | +0,0 | -1,0 | -1,1 | -0,9 | -0,8 | +0,3 | -0,6 | +0,8 | +1,0 |
| humedad | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 66,6 | 72,6 | 75,9 | 73,3 | 79,2 | 78,5 | 76,6 | 75,4 | 75,4 | 74,8 | 68,2 | 67,2 |
| AMTUes | 65,6 | 74,5 | 77,0 | 75,0 | 76,6 | 79,7 | 72,8 | 76,3 | 73,5 | 69,8 | 69,2 | 67,9 |
| Diferencia | -1,0 | +1,9 | +1,1 | +1,7 | -2,6 | +1,2 | -3,8 | +0,9 | -1,9 | -5,0 | +1,0 | +0,7 |
| presión | ene | feb | mar | abr | may | jun | jul | ago | set | oct | nov | dic |
| Datos base | 1011,1 | 1011,7 | 1013,3 | 1014,8 | 1017,2 | 1017,3 | 1017,8 | 1017,6 | 1017,3 | 1014,0 | 1012,1 | 1010,9 |
| AMTUes | 1010,6 | 1013,2 | 1012,8 | 1013,9 | 1017,5 | 1016,1 | 1018,0 | 1020,1 | 1015,7 | 1014,9 | 1012,1 | 1006,3 |
| Diferencia | -0,5 | +1,5 | -0,5 | -0,9 | +0,3 | -1,2 | +0,2 | +2,5 | -1,4 | +0,9 | +0,0 | -4,6 |

Gráficos de evaluación por localidad

Los gráficos se encuentran en las siguientes hojas.

MONTEVIDEO

Figura C.1: Comparación mensual entre el AMTUes y los datos base de Montevideo.

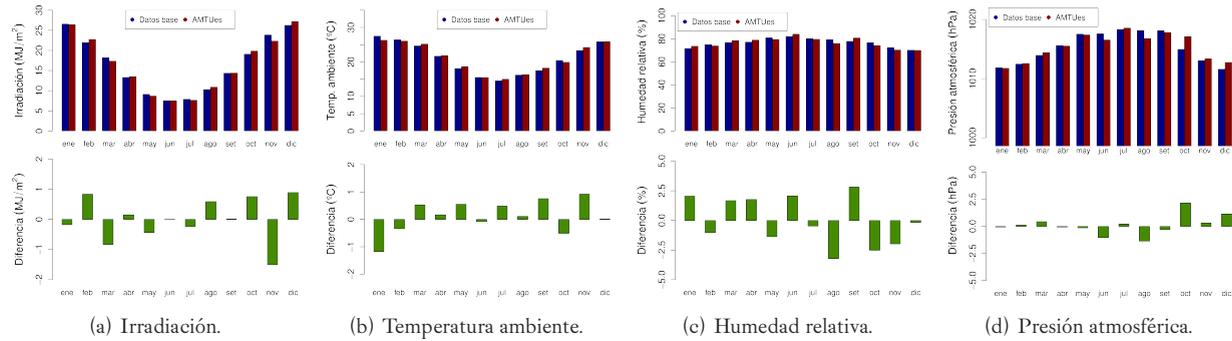
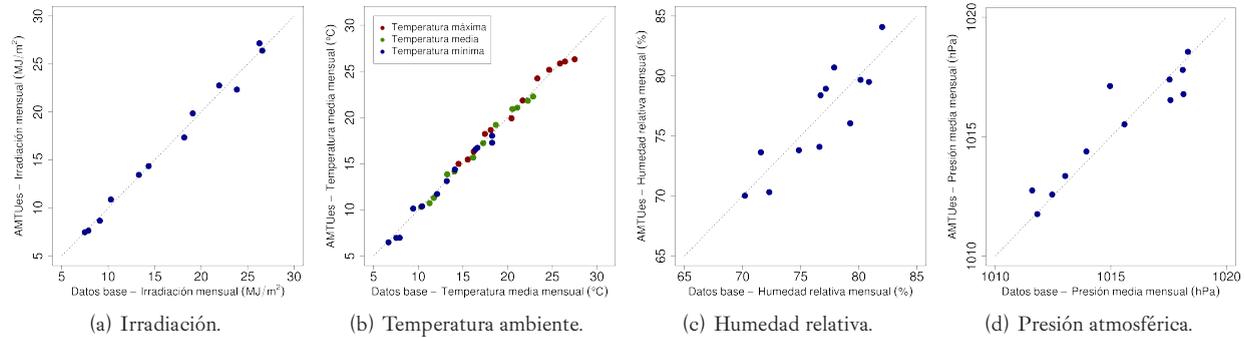


Figura C.2: Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUes y los datos base de Montevideo.



MONTEVIDEO

Figura C.3: Comparación de ciclos diarios entre el AMTUs y los datos base de Montevideo.

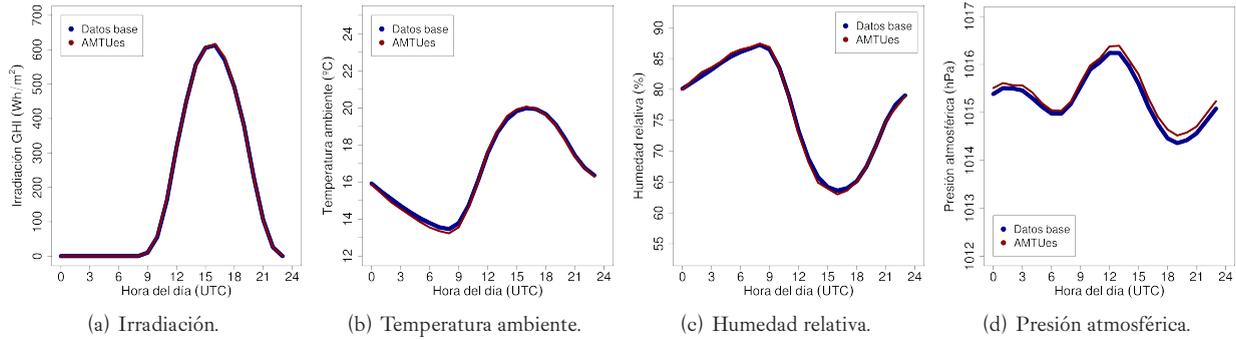
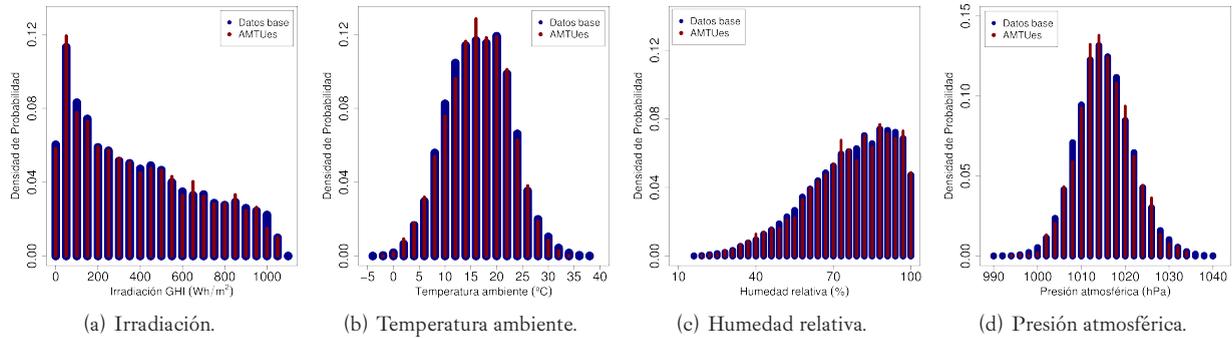


Figura C.4: Comparación de los histogramas entre el AMTUs y los datos base de Montevideo.



SALTO

Figura C.5: Comparación mensual entre el AMTUes y los datos base de Salto.

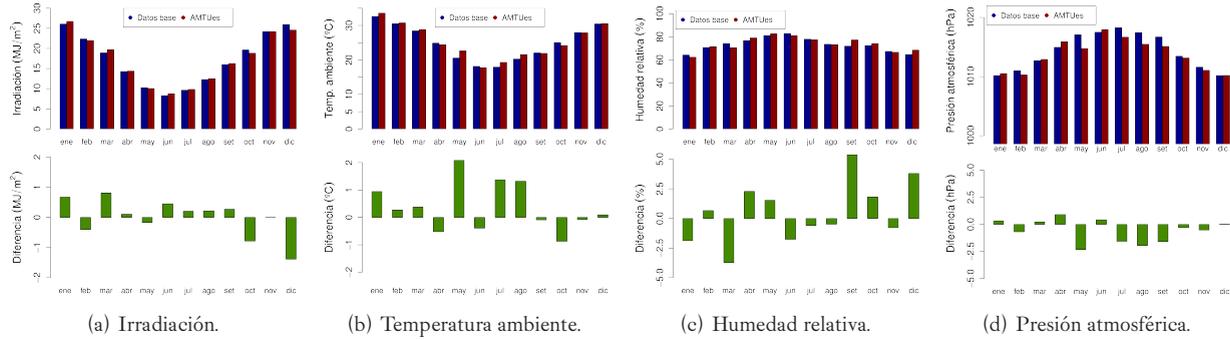
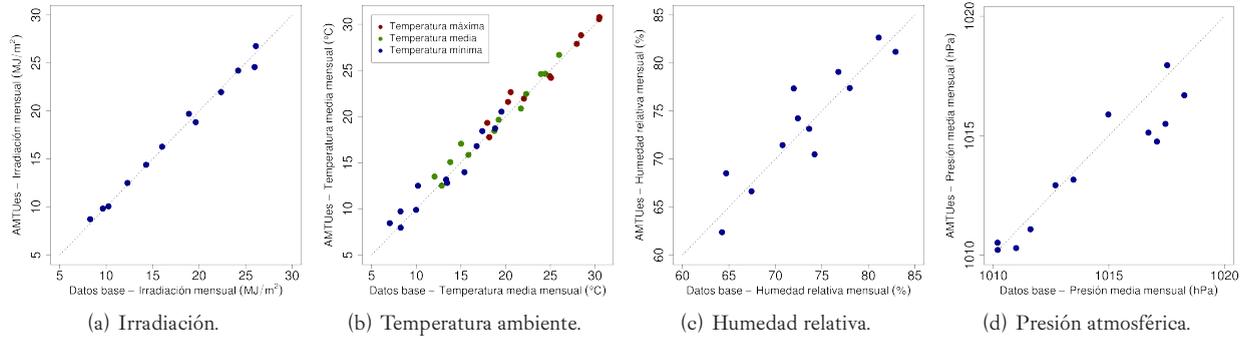


Figura C.6: Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUes y los datos base de Salto.



SALTO

Figura C.7: Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Salto.

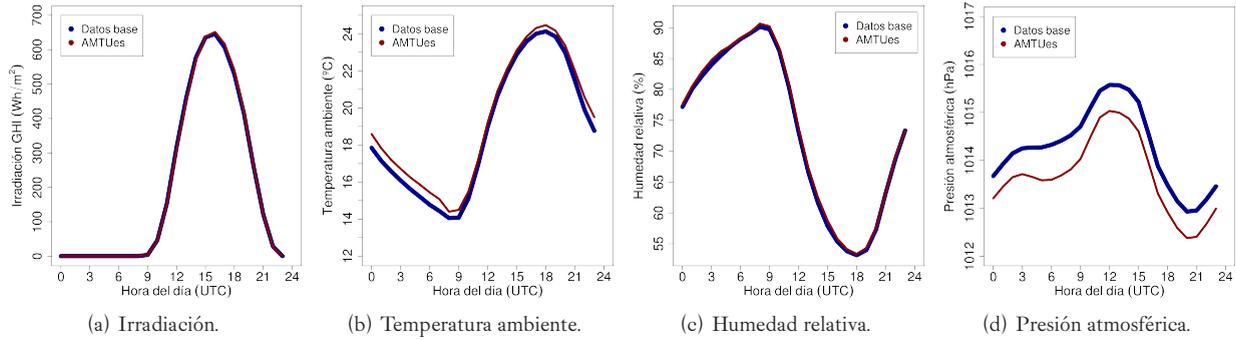
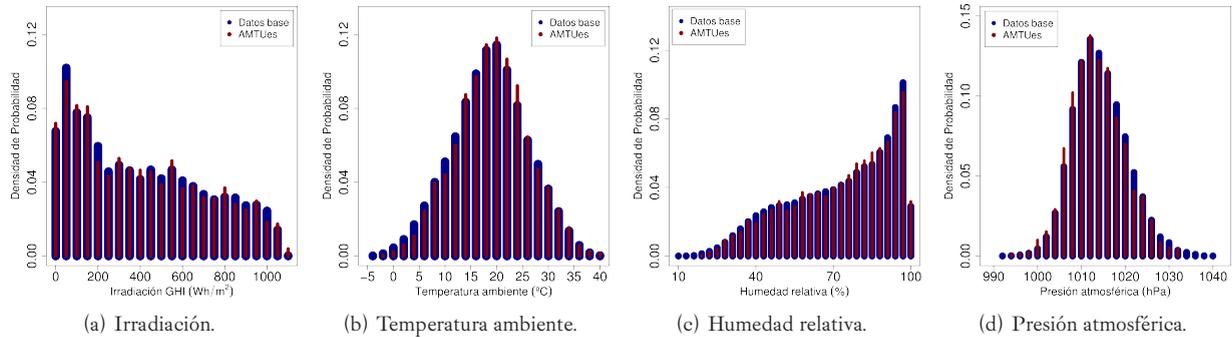


Figura C.8: Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Salto.



RIVERA

Figura C.9: Comparación mensual entre el AMTÚes y los datos base de Rivera.

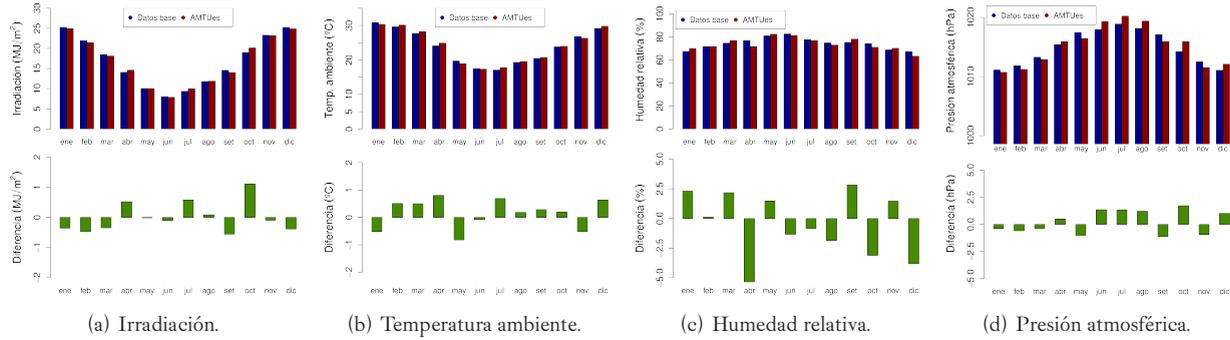
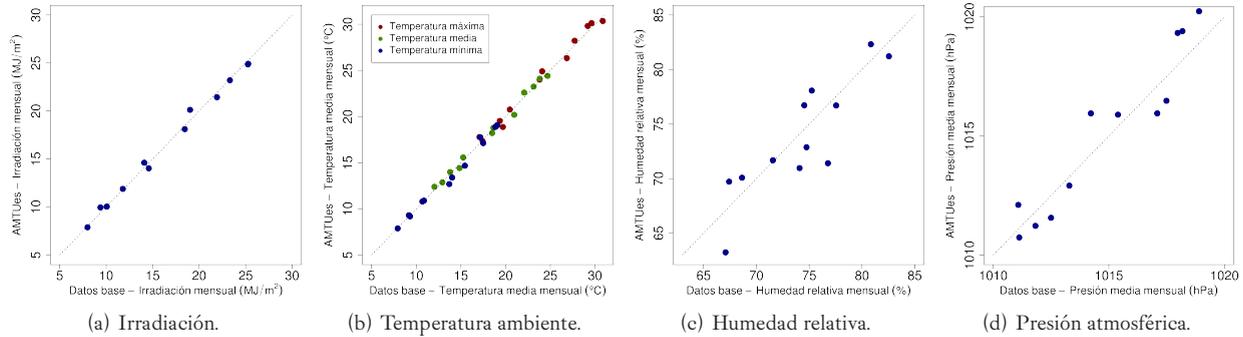


Figura C.10: Diagramas de dispersión mensual entre el AMTÚes y los datos base de Rivera.



RIVERA

Figura C.11: Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Rivera.

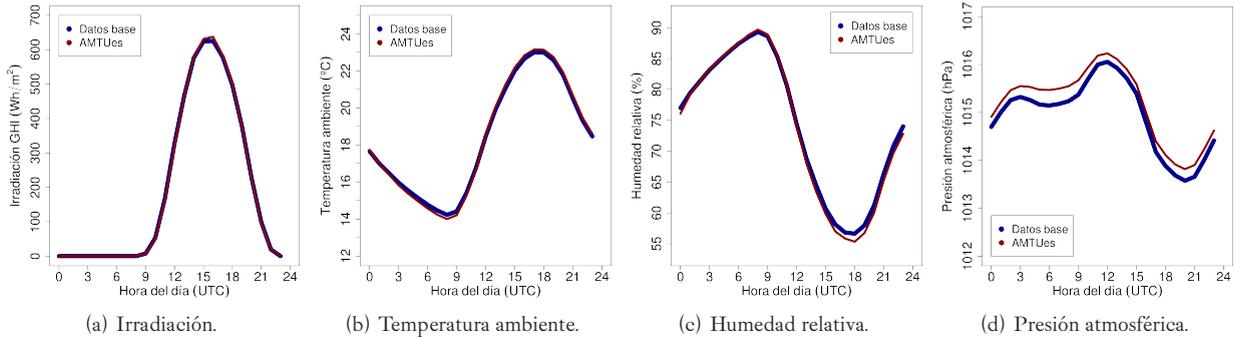
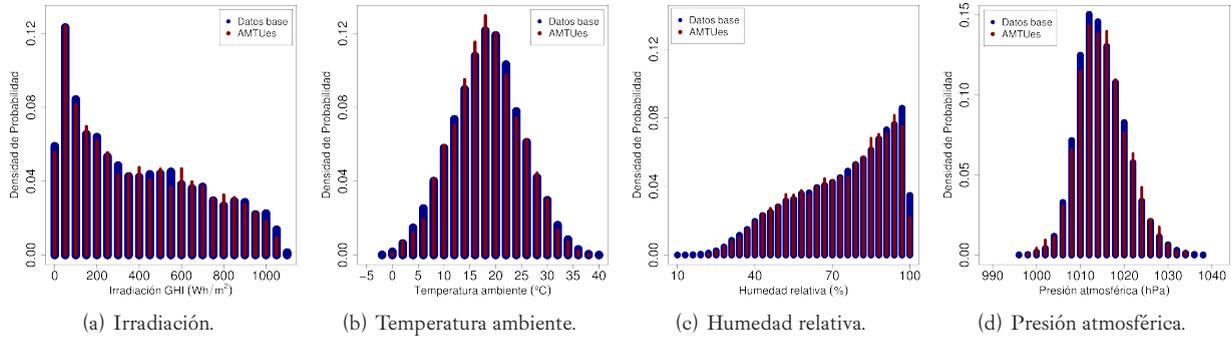


Figura C.12: Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Rivera.



ROCHA

Figura C.13: Comparación mensual entre el AMTÚes y los datos base de Rocha.

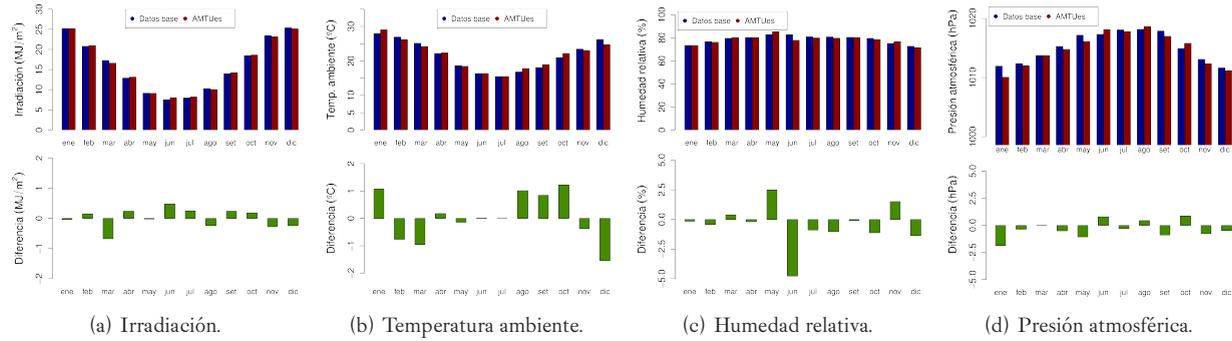
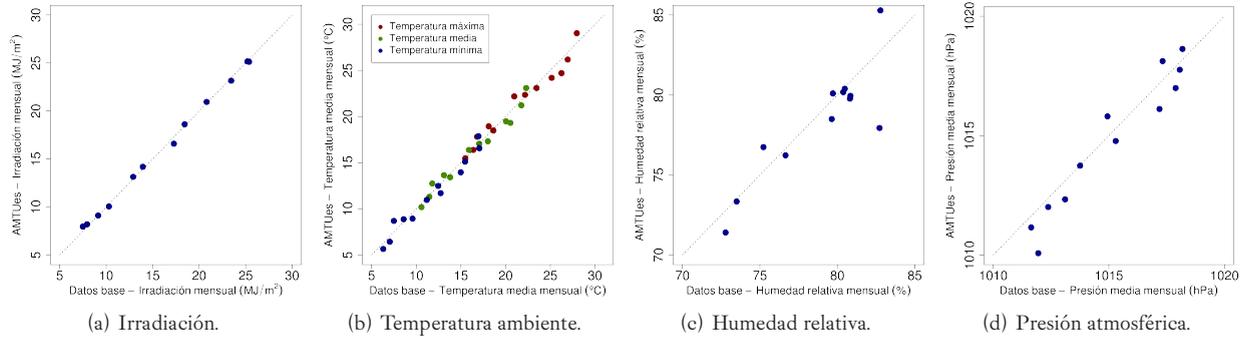


Figura C.14: Diagramas de dispersión mensual entre el AMTÚes y los datos base de Rocha.



ROCHA

Figura C.15: Comparación de ciclos diarios entre el AMTUES y los datos base de Rocha.

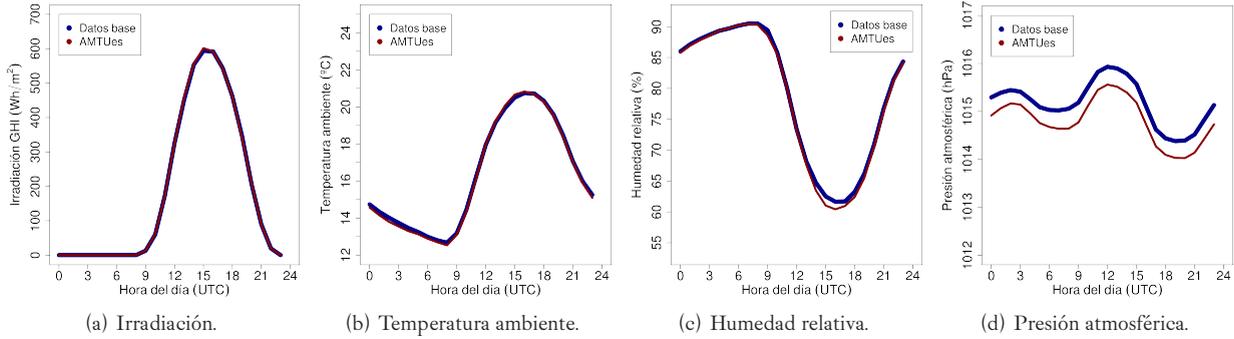
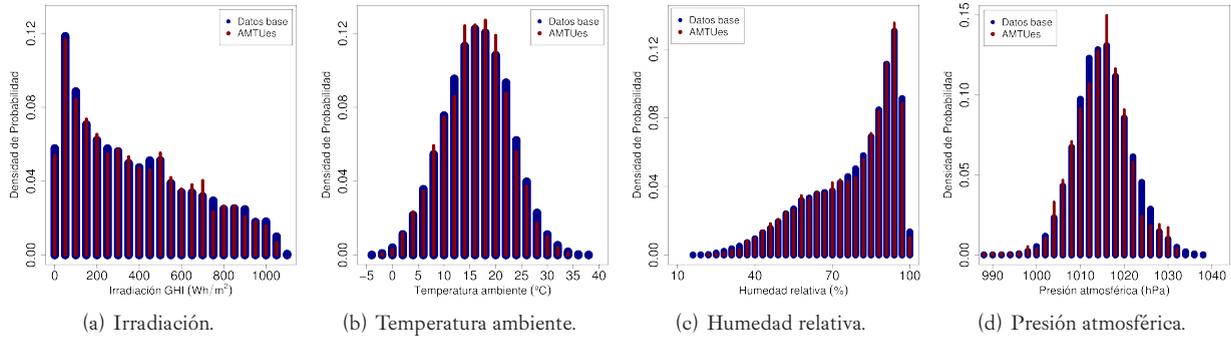


Figura C.16: Comparación de los histogramas entre el AMTUES y los datos base de Rocha.



COLONIA

Figura C.17: Comparación mensual entre el AMTUes y los datos base de Colonia.

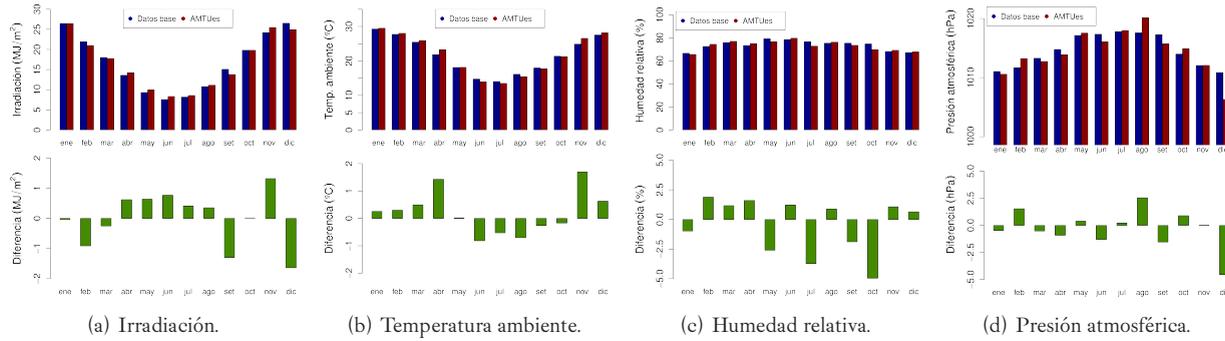
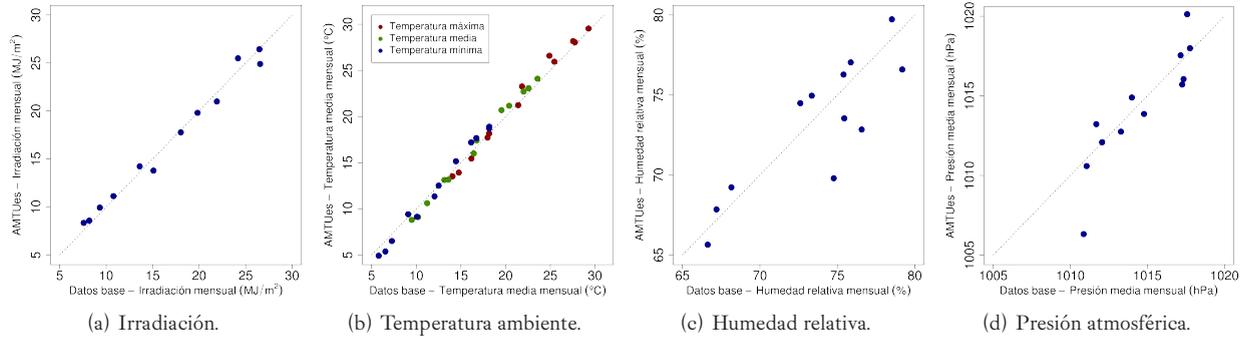


Figura C.18: Diagramas de dispersión mensual entre el AMTUes y los datos base de Colonia.



COLONIA

Figura C.19: Comparación de ciclos diarios entre el AMTUes y los datos base de Colonia.

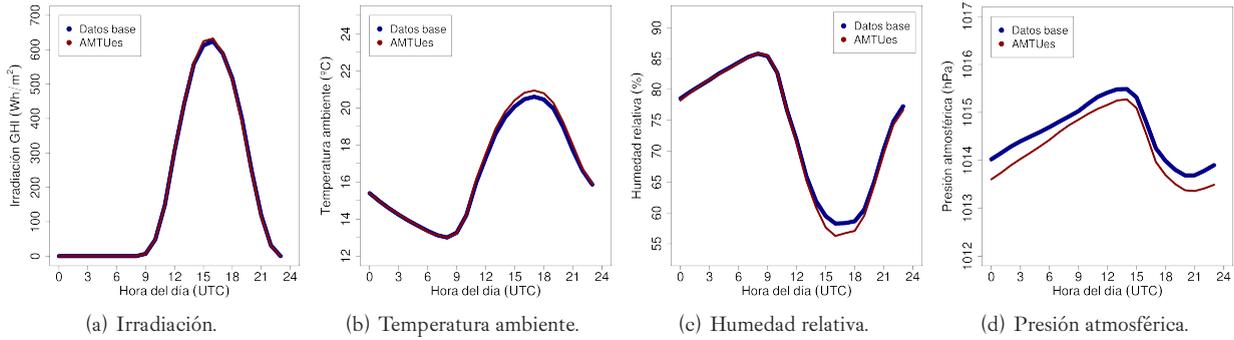
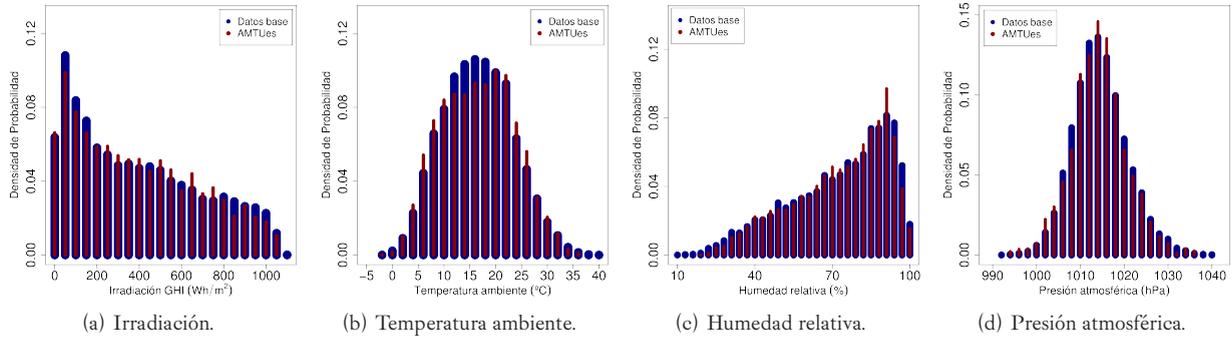


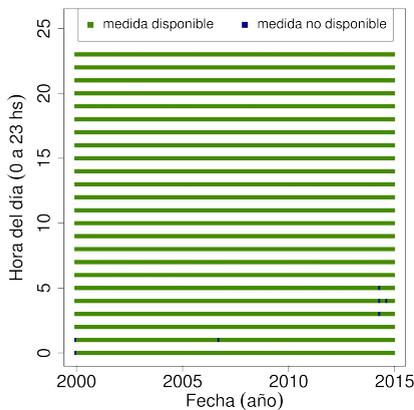
Figura C.20: Comparación de los histogramas entre el AMTUes y los datos base de Colonia.



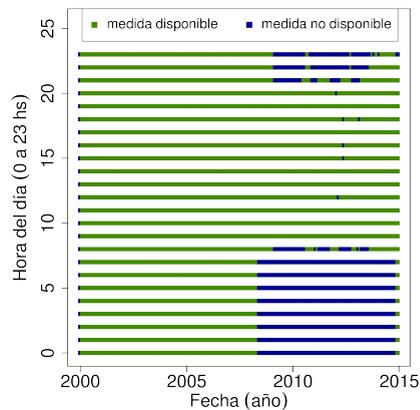
Régimen de estaciones INUMET

A continuación se muestran los regímenes de funcionamiento de las estaciones convencionales del INUMET. Los datos de estas estaciones fueron inspeccionados para analizar la viabilidad de la elaboración de los AMT en dichas localidades. En las figuras se aprecia de manera compacta la disponibilidad de datos horarios en cada sitio. No se incluyen las estaciones de Punta del Este, Florida, Durazno y Paso de los Toros porque sus datos empiezan el 05/2010.

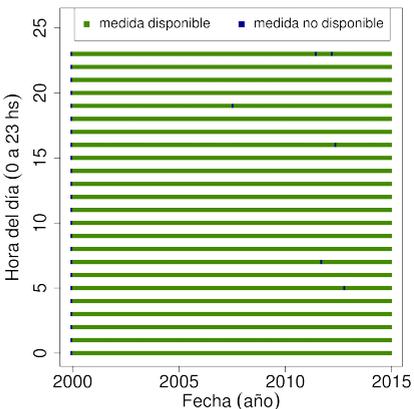
Figura D.1: Datos existentes (azul) y no existentes (verde) como función de la hora del día y la fecha. Sólo se muestran las estaciones INUMET relevantes (periodo 2000–2014).



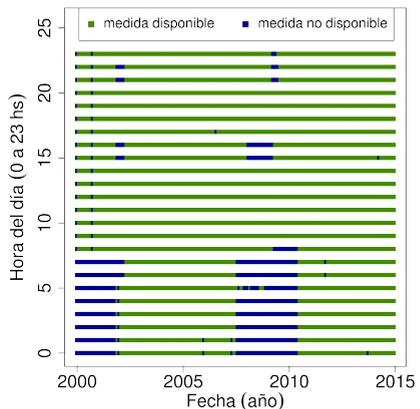
(a) Estación Carrasco INUMET



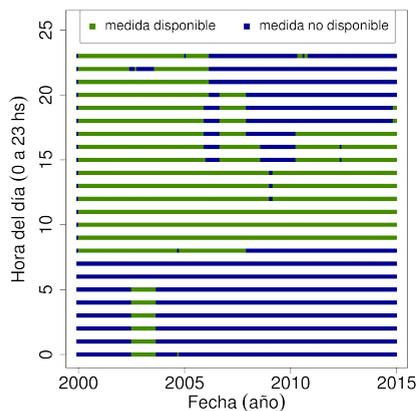
(b) Estación Salto INUMET



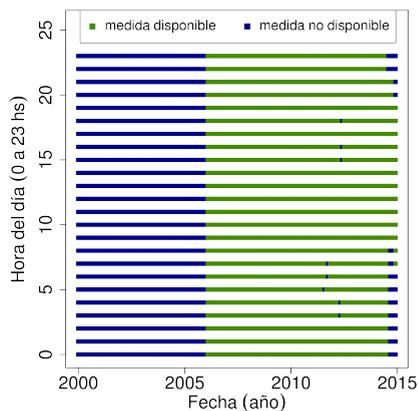
(c) Estación Rivera INUMET



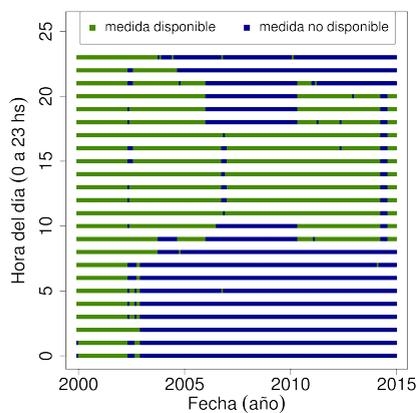
(d) Estación Rocha INUMET



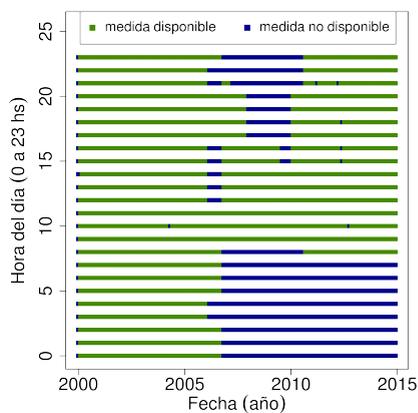
(e) Estación Treinta y Tres INUMET



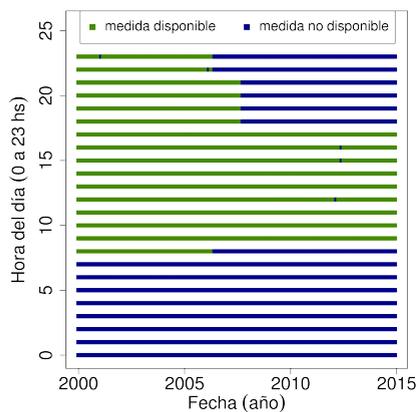
(f) Estación Artigas INUMET



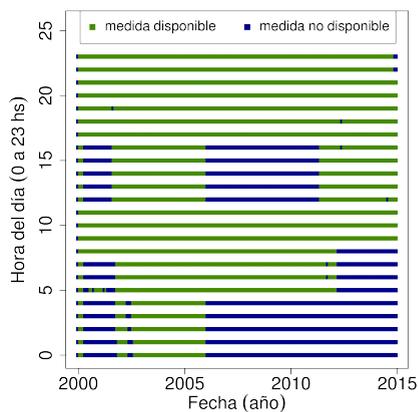
(g) Estación Colonia INUMET



(h) Estación Mercedes INUMET



(i) Estación Paysandú INUMET



(j) Estación Melo INUMET

Bibliografía

- [1] 3TIER: *3TIER Global Solar Dataset: Methodology and Validation*. Publicación de 3TIER, Octubre 2013, 2013.
- [2] Hall, I., R. Prairie, H. Anderson y E. Boes: *Generation of typical meteorological years for 26 SOLMET stations*. SAND78-1601. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories., 1978.
- [3] Marion, W. y K. Urban: *User's manual for TMY2 data sets*. Technical report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1995.
- [4] Wilcox, S. y W. Marion: *User's manual for TMY3 data sets*. Technical Report TP-581-43156, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008.
- [5] Pusat, Saban, Ismail Ekmekci y Mustafa Tahir Akkoyunlu: *Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey*. Renewable Energy, 75:144–151, 2015, ISSN 0960-1481. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114006041>.
- [6] Ohunakin, Olayinka S., Muyiwa S. Adaramola, Olanrewaju M. Oyewola y Richard O. Fagbenle: *Generation of a typical meteorological year for north-east, Nigeria*. Applied Energy, 112:152–159, 2013, ISSN 0306-2619. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913004856>.
- [7] Lee, Kwanho, Hochun Yoo y Geoff J. Levermore: *Generation of typical weather data using the ISO Test Reference Year (TRY) method for major cities of South Korea*. Building and Environment, 45(4):956–963, 2010, ISSN 0360-1323. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132309002807>.
- [8] Anderson, T.N., M. Duke y J.K. Carson: *A Typical Meteorological Year for Energy Simulations in Hamilton, New Zealand*. Transactions of Engineers New Zealand (Engineering treNz), 003, 2007.
- [9] Chan, Apple L.S., T.T. Chow, Square K.F. Fong y John Z. Lin: *Generation of a typical meteorological year for Hong Kong*. Energy Conversion and Management, 47(1):87–96, 2006, ISSN 0196-8904. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890405000543>.
- [10] Skeiker, Kamal: *Generation of a typical meteorological year for Damascus zone using the Filkenstein-Schäfer statistical method*. Energy Conversion and Management, 45(1):99–112, 2004, ISSN 0196-8904. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890403001067>.

- [11] Bulut, H.: *Typical solar radiation year for southeastern Anatolia*. Renewable Energy, 29:1477–1488, 2004.
- [12] Eighth International IBPSA Conference: *Analysis of the Typical Meteorological Year (TMY) of Cyprus and house load simulation*, Eindhoven, Netherlands, August 11-14 2003.
- [13] Duomarco, J.L. y C.A. Luongo: *Año meteorológico típico para el Uruguay*. Informe técnico, División Publicaciones y Ediciones, Universidad de la República, Uruguay, Noviembre 1979.
- [14] Piccion, A. y S. Milicua: *Tratamiento de datos climáticos de localidades de Uruguay para evaluación térmica y energética de proyectos y edificios*. Informe técnico, Facultad de Arquitectura, Universidad de la República, Uruguay, Marzo 2005.
- [15] Alonso Suárez, R., G. Abal y M. D'Angelo: *Año meteorológico típico para energía solar: región Sudoeste*. Encuentro Nacional de Energías Renovables, página 9 pp., 2012.
- [16] Alonso Suárez, R., G. Abal, R. Siri y P. Musé: *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, 28 August–4 November 2011.
- [17] Alonso Suárez, R., G. Abal, R. Siri y P. Musé: *Brightness-dependent Tarpley model for global solar radiation estimation using GOES satellite images: application to Uruguay*. Solar Energy, 86:3205–3215, 2012.
- [18] Alonso Suárez, R., G. Abal, R. Siri y P. Musé: *Satellite-derived Solar Irradiation Map for Uruguay*. Energy Procedia, 57(0):1237–1246, 2014, ISSN 1876-6102. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214014398>, 2013 ISES Solar World Congress.
- [19] Organization, World Meteorological: *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 8, Seventh edition World Meteorological Organization, 2008.
- [20] Abal, G., M. D'Angelo, J. Cataldo y A. Gutierrez: *Mapa Solar del Uruguay: Memoria Técnica*. Unidad de Comunicación de Udelar (UCUR), Universidad de la República, 2011. Versión 1.0, Disponible en <http://les.edu.uy>.
- [21] Abal, G., R. Alonso Suárez, D. Aicardi y L. Dovat: *Red de Medida Continua de Irradiancia Solar*. Laboratorio de Energía Solar (LES), Universidad de la República, 2015.
- [22] Noia, M., C. Ratto y R. Festa: *Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: I. Satisistical models*. Solar Energy, 51(6):449–456, 1993.
- [23] Noia, M., C. Ratto y R. Festa: *Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: II. Physical models*. Solar Energy, 51(6):457–465, 1993.

- [24] Perez, R., R. Seals y A. Zelenka: *Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the production of site/time specific irradiance data*. Solar Energy, 60(2):89–96, 1997, ISSN 0038-092X.
- [25] Zelenka, A., R. Perez, R. Seals y D. Renné: *Effective Accuracy of Satellite-Derived Hourly Irradiances*. Theoretical and Applied Climatology, 62:199–207, 1999, ISSN 0177-798X. <http://dx.doi.org/10.1007/s007040050084>, 10.1007/s007040050084.
- [26] Perez, R: *A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation*. Solar Energy, 73(5):307–317, 2002. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X02001226>.
- [27] Rigollier, C: *The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images*. Solar Energy, 77(2):159–169, 2004. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X04001082>.
- [28] Ceballos, J.C., Marcus Jorge Bottino y Jaidete Monteiro De Souza: *A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery*. Journal of Geophysical research, 109:1–14, 2004.
- [29] Pinker, R.T. y I. Laszlo: *Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale*. J. Appl. Meteorol., 31:194–211, 1992.
- [30] Justus, C., M. Paris y J. Tarpley: *Satellite-measured insolation in the United States, Mexico, and South America*. Remote Sensing of Environment, 20(1):57–83, Agosto 1986, ISSN 00344257. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0034425786900143>.
- [31] Iqbal, M.: *An introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 1983, ISBN 978-0-12-373750-8.
- [32] Duffie, J.A. y W.A. Beckman: *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey, third edición, 2006, ISBN 978-0-471-69867-8.
- [33] Wu, Xiangqian y Fengying Sun: *Post-launch calibration of GOES Imager visible channel using MODIS*. En *Proc. SPIE 5882*, 2005.
- [34] Comité UNIT de Eficiencia Energética en Edificios: *Norma UNIT 1026:1999. Aislamiento térmico de edificios. Zonificación climática*. Informe técnico, Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 1999.
- [35] Gonzalez, Rafael C. y Richard E. Woods: *Digital Image Processing (3rd Edition)*. Prentice Hall, 3ª edición, 2007, ISBN 013168728X.

- [36] Alonso Suárez, R., M. D'Angelo y G. Abal: *Distribución Espacial y Temporal de la Irradiación Solar en el Uruguay*. En *Proceedings IV Congreso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES*, Sao Paulo, Brazil, 18-21 September 2012.
- [37] Finkelstein, J. y R. E. Schafer: *Improved goodness-of-fit tests*. *Biometrika*, 58:641–645, 1971.
- [38] Angström, A.: *Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation*. Q. J. Royal Meteorological Society, 50(210):121–126, 1924. <http://www3.interscience.wiley.com/journal/115304454/abstract?CRETRY=1&SRETRY=0>.
- [39] Prescott, J.A.: *Evaporation from a water surface in relation to solar radiation*. *Trans. R. Soc. Sci. S. Austr*, 64:114–118, 1940.
- [40] Abal, G., D. Aicardi, R. Alonso Suárez y A. Laguarda: *Performance of empirical models for diffuse fraction in Uruguay*. *Solar Energy*, 141:166–181, 2017, ISSN 0038-092X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1630562X>.
- [41] Ruiz-Arias, J.A., H. Alsamamra, J. Tovar-Pescador y D. Pozo-Vázquez: *Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions*. *Energy Conversion and Management*, 51(5):881–893, 2010, ISSN 0196-8904. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409004695>.
- [42] Boland, J, B Ridley y B Brown: *Models of diffuse solar radiation*. *Renewable Energy*, 33:575–584, 2008.
- [43] Skartveit, Arvid, Jan Asle Olseth y Marit Elisabet Tuft: *An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo*. *Solar Energy*, 63:173–183, 1998.
- [44] Kasten, F. y A.T. Young: *Revised Optical air mass tables and approximation formula*. *Applied Optics*, 28:4735–4738, 1989.
- [45] Reindl, D.T., W.A. Beckman y J.A. Duffie: *Evaluation of hourly tilted surface radiation models*. *Solar Energy*, 45:9–17, 1990.
- [46] Remund, J., L. Wald, M. Lefecre, T. Ranchin y J. Page: *Worldwide Linke turbidity information*. ISES Solar World Congress 2003, Jun 2003, Goteborg, Sweden. International Solar Energy Society (ISES), página 13, 2003.
- [47] Younes, S. y T. Muneer: *Clear-sky classification procedures and models using a world-wide data-base*. *Applied Energy*, 84(6):623–645, 2007.
- [48] Reno, M.J., C.W. Hansen y J.S. Stein: *Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis*. Informe técnico, SANDIA LABS, 2012.

- [49] Perez, R., P. Ineichen, R. Seals y A. Zelenka: *Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions*. Solar Energy, 45(2):111–114, 1990.
- [50] Ineichen, Pierre: *Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks*. Solar Energy, 80(4):468–478, 2006.
- [51] Gueymard, Christian A.: *REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation – Validation with a benchmark dataset*. Solar Energy, 82(3):272–285, 2008, ISSN 0038-092X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07000990>.
- [52] Mueller, R.W., K.F. Dagestad, P. Ineichen, M. Schroedter-Homscheidt, S. Cros, D. Dumortier, R. Kuhlemann, J.A. Olseth y G.: *Rethinking satellite-based solar irradiance modelling: The SOLIS clear-sky module*. Remote Sensing of Environment, 91(2):160–174, 2004.
- [53] Ineichen, Pierre y Richard Perez: *A new airmass independent formulation for the Linke turbidity coefficient*. Solar Energy, 73(3):151–157, 2002, ISSN 0038-092X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X02000452>.
- [54] Rigollier, Christelle, Olivier Bauer y Lucien Wald: *On the clear sky model of the {ESRA} — European Solar Radiation Atlas — with respect to the heliosat method*. Solar Energy, 68(1):33–48, 2000.
- [55] Laguarda, A. y G. Abal: *Clear-Sky broadband irradiance: first model assessment in Uruguay*. En *ISES Conference Proceedings, Solar World Congress 2017*, volumen Solar Radiation Availability and Variability, 2017.
- [56] Badosa, J., J. Wood, P. Blanc, C. N. Long, L. Vuilleumier, D. Demengel y M. Haefelin: *Solar irradiances measured using SPNI radiometers: uncertainties and clues for development*. Atmospheric Measurement Techniques, 7(12):4267–4283, 2014. <http://www.atmos-meas-tech.net/7/4267/2014/>.
- [57] Stackhouse, P.W., D. Westberg, J.M. Hoell, W.A. Chandler y T. Zhang: *Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology (Version 3.1.2)*. Informe técnico, NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center, June 24, 2015. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- [58] Laue, E.G.: *The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations*. Solar Energy, 13(1):43–57, 1970, ISSN 0038-092X. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X7090006X>.

