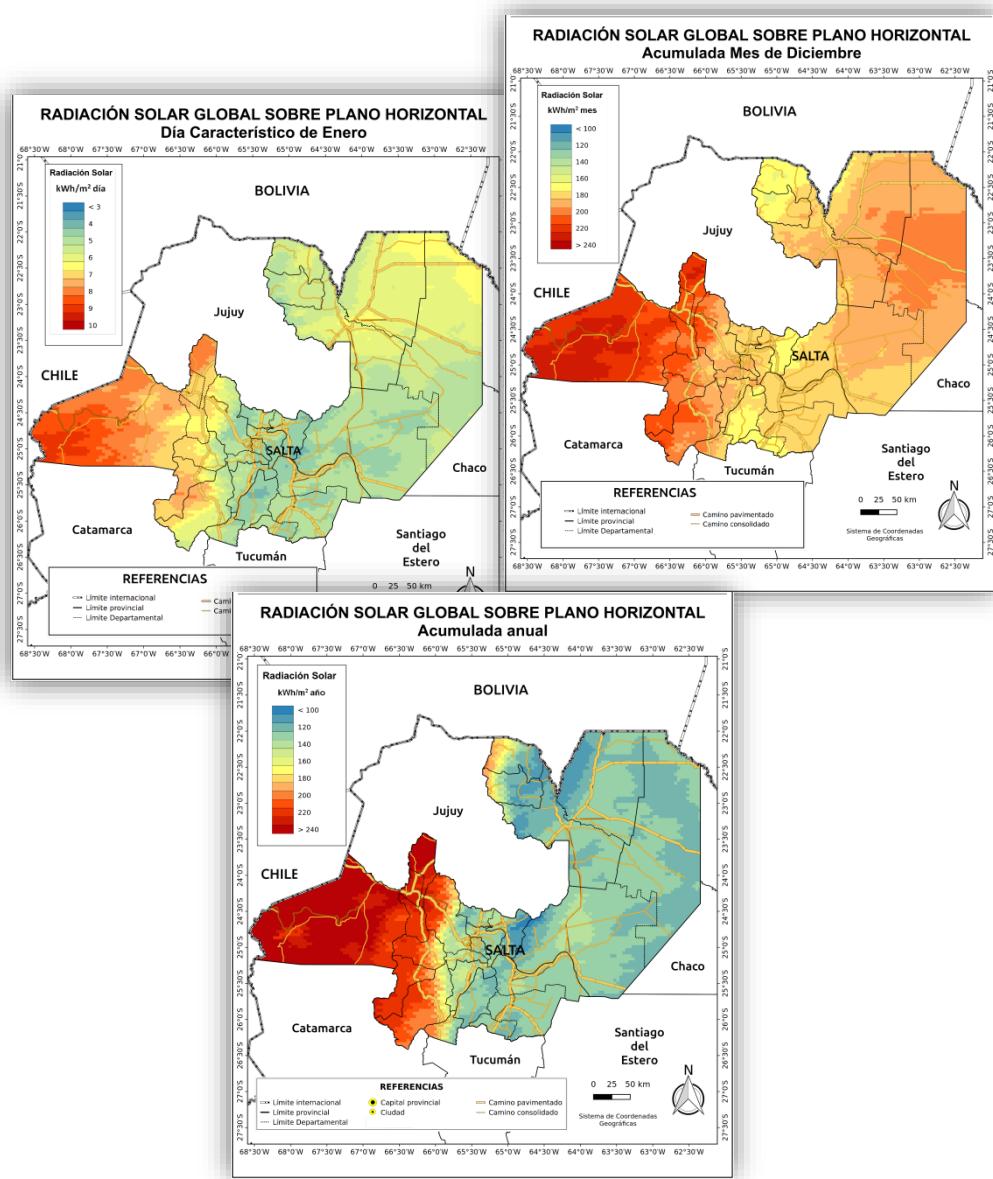


# ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PROVINCIA DE SALTA

## INFORME TÉCNICO



### Equipo de trabajo:

Dra. Judith Franco

Dra. Silvina Belmonte

Lic. Nilsa Sarmiento Barbieri

Ing. Pablo Dellicompagni

Ing. Karina Escalante

Abril 2018

## **ÍNDICE**

Resumen ejecutivo .....	3
1. ¿Por qué evaluar el recurso solar?.....	4
2. Metodología utilizada.....	4
2.1. Relevamiento de información de base.....	5
2.2. Descarga y procesamiento de imágenes satelitales .....	6
2.3. Validación y análisis de datos.....	7
2.4. Generación y edición de mapas finales .....	8
3. Resultados .....	8
3.1. Estructura y contenido del Sistema de Información .....	8
3.2. Definición y validación del modelo para el mapeo solar.....	9
3.3. Análisis del recurso solar en la provincia de Salta .....	11
3.4. Soportes del Atlas de Radiación Solar .....	13
4. Consideraciones generales .....	13
5. Bibliografía y fuentes consultadas .....	14
6. Glosario técnico.....	14

## **Resumen ejecutivo**

El presente documento resume el trabajo realizado para la elaboración del Atlas de radiación solar de la provincia de Salta. El mismo se desarrolla en el marco de un Proyecto de Investigación Plurianual (PIP) denominado Sistema de Soporte para la Toma de Decisiones en Energías Renovables (SSDER), llevado a cabo por el grupo Planificación Energética y Gestión Territorial del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Salta (U.N-Sa.).

El estudio del recurso solar constituye un insumo imprescindible para el diseño de políticas públicas energéticas que incluyan las energías renovables, aportando principalmente a la planificación y ejecución de proyectos de energía solar de diversa escala. En particular, en la provincia de Salta, el recurso solar presenta condiciones propicias para su potencial aprovechamiento energético.

Los mapas de radiación solar se desarrollan a partir del procesamiento de datos satelitales de la red Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF), con una resolución espacial aproximada de 16 km<sup>2</sup>. Los datos satelitales se validan y ajustan a partir de comparaciones con mediciones reales de estaciones meteorológicas disponibles para el NOA y estimaciones por métodos matemáticos de radiación de día claro aplicadas en estaciones virtuales.

Como resultados finales se obtienen los mapas de radiación solar para el día característico de cada mes, radiación solar acumulada mensual y radiación solar acumulada anual. Para todos los casos se refiere a radiación solar global sobre plano horizontal.

Las capas temáticas de radiación solar se presentan integradas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado con software libre. El SIG incluye un mapa base con límites departamentales, variables topográficas (modelo digital de elevación, pendientes y orientación), red hidrográfica, infraestructura vial, localidades principales y red eléctrica de alta y media tensión.

El atlas de radiación solar se entrega en diversos formatos para facilitar su consulta y uso (impreso y digital). En el caso de soporte digital, se presenta el SIG en formato QGIS y un proyecto con extensión .kmz para su proyección en Google Earth.

## **1. ¿Por qué evaluar el recurso solar?**

Las fuentes renovables de energía (solar, eólica, mini hidráulica, biomasa y geotermia) constituyen hoy en día valiosos recursos, más limpios que los originados en las fuentes fósiles. Estos recursos son cada vez más competitivos, en especial si se toma en consideración que permiten promover un desarrollo más sostenible.

El Atlas de Radiación Solar contribuye al conocimiento de la disponibilidad de la energía solar en el territorio de la provincia, cuantificando y estimando los promedios mensuales de la irradiación solar que incide sobre el territorio salteño a lo largo del año, con lo cual se facilita la identificación de regiones estratégicas, con potencial alto del recurso para la solución de necesidades energéticas de la población.

El uso de la radiación solar como fuente de generación eléctrica, tanto fotovoltaica como térmica, juega un rol destacado. También tiene importancia la utilización de la energía solar para calentar agua o para ser empleada en secado de productos agrícolas, entre otras aplicaciones. En todos los casos, el conocer las características del recurso permite al dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento energético.

## **2. Antecedentes**

El grupo de trabajo cuenta con la realización del mapa solar para la provincia de Salta como antecedente. Para la concreción del mismo, se empleó la metodología aquí planteada tomando como bases de datos a los mapas satelitales descargado de la red LSA SAF, a las mediciones terrestres en estaciones experimentales y a los datos generados mediante un algoritmo teórico experimental (modelo Hottel / ARG – P).

En esta oportunidad, el mapa del recurso solar para la provincia de Salta surgió como producto de un Proyecto de Vinculación concretado entre el grupo PEyGET, del INENCO – CONICET y la Secretaría de Energía del Ministerio de Producción, Trabajo y Desarrollo Sustentable de Salta.

## **3. Metodología utilizada**

El desarrollo de los mapas de radiación solar se realiza en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica), lo que posibilita el procesamiento espacial y la consulta de información georeferenciada.

Para el mapeo del recurso solar se trabaja con el procesamiento de imágenes satelitales y su validación con estaciones terrestres y virtuales, considerando antecedentes previos y resultados ya consolidados por el grupo de trabajo para otros espacios geográficos del NOA (*ver referencias al final del documento*).

El área de mapeo para la evaluación de la radiación solar considera la morfología y características del paisaje regional, por lo que se incluyen para el modelado y análisis de datos los sectores vecinos a la provincia de Salta.

Se optó por el trabajo con programas libres ya que, en contraste con los programas privativos, con estos es posible disponer y hacer uso del código fuente; es decir que se permite el acceso, la adecuación y la reproducción del programa. Los software utilizados se presentan en la tabla 1.

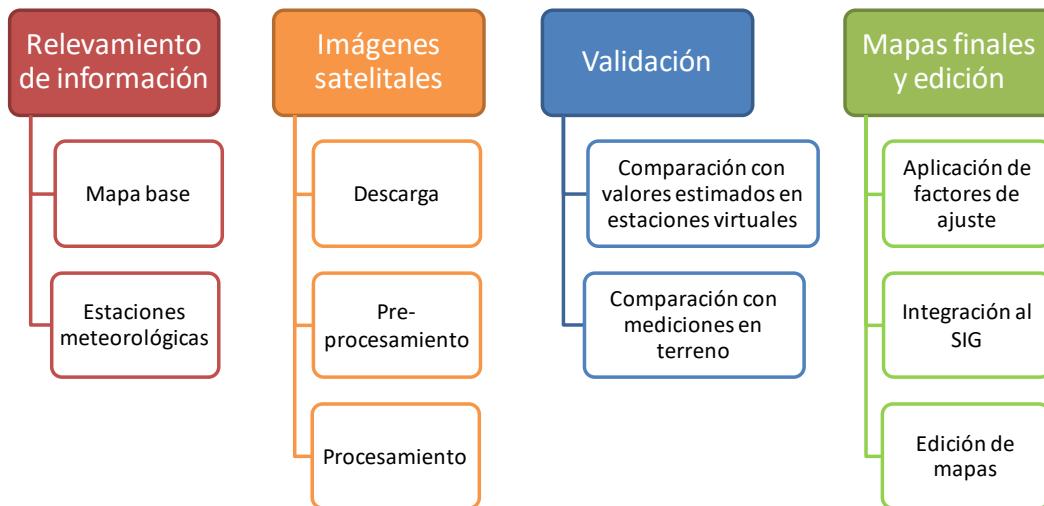
*Tabla 1: Programas utilizados para el mapeo de la radiación solar*

Programa	Aplicaciones para el mapeo solar
GRASS-GIS	Descarga y pre-procesamiento de imágenes satelitales. Modelado raster.
R	Funciones matemáticas de agregación de valores diarios y mensuales. Análisis estadísticos. Comparaciones y correlaciones.
Q GIS	Organización del Sistema de Información, visualización de capas

	temáticas y edición de mapas.
Software propio desarrollado por PeyGeT	Programa desarrollado por el grupo de trabajo para la estimación de la radiación solar global de día claro por los métodos de Hottel (Duffie y Beckman, 2005) y Salazar (2010). Desarrollado en lenguaje de programación C, bajo licencia GNU-GPLv2, de acceso libre y gratuito en:

El proceso metodológico general se resume en el diagrama de la Figura 1.

*Figura 1: Proceso metodológico general para el mapeo de la radiación solar*



### 3.1. Relevamiento de información de base

Las fuentes consultadas para la elaboración del **mapa base** de la provincia de Salta se mencionan en la Tabla 2.

*Tabla 2: Fuentes de información de base*

Capa temática	Tipo	Fuente
División político-administrativa (países, provincias, departamentos)	Vectorial (Polígonos)	IGN 250 <sup>1</sup>
Localidades principales	Vectorial (Puntos)	IGN 250
Red vial (rutas y caminos)	Vectorial (Líneas)	IGN 250 – Open Street Map
Red hidrográfica (ríos, lagos y salares)	Vectorial (Líneas / Polígonos)	IGN 250
Modelo digital de elevación (MDE)	Ráster	NASA <a href="http://srtm.usgs.gov">http://srtm.usgs.gov</a>
Imágenes satelitales	Ráster	LANDSAT 2015 MODIS 2014

<sup>1</sup> IGN: Sistema de Información Geográfica desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:250.000 y que abarca todo el territorio nacional. [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig)

En relación a datos medidos de radiación solar en **estaciones meteorológicas** existen escasos registros disponibles para la provincia de Salta y el NOA.

Registros de datos históricos se consultan en el atlas del Datos meteorológicos de estaciones del NOA (INENCO, 1984). En el mismo se presentan datos medidos para diferentes períodos de tiempo según el sitio considerado (anteriores a 1981) de radiación solar global sobre plano horizontal y a diferentes ángulos, y estimaciones de radiación difusa por el método de Liu Jordan. Estos datos se utilizan en forma orientativa para comparar el comportamiento de las curvas de radiación pero no fue posible correlacionarlos en forma directa con datos de las imágenes por limitaciones en cuanto a la ubicación geográfica real de las estaciones y el desfasaje de la serie temporal.

Los datos de mediciones de radiación solar para el período de análisis (2009-2015) se gestionan en diversas instituciones públicas y empresas que cuentan con estaciones meteorológicas instaladas. La Tabla 3 presenta las estaciones de la zona (Salta) y vecinas (Jujuy) que cuentan con datos de radiación solar medida para un período mayor a un año.

*Tabla 3: Estaciones meteorológicas con medidas de radiación solar*

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Pertenencia	Entidad Provisora	Escala temporal	Frecuencia
La Viña	25°18'21"	65°31'05"	1198	-	SIGA	MAY06-MAR16	60 MIN
Cafayate	26°06'00"	65°58'26"	1620	Bodega Etchart	SIGA	SET08-MAY16	30-60 MIN
Abra Pampa	22°47'56.4"	65°49'33.6"	3463	INTA AER Abrapampa	SIGA <sup>2</sup>	OCT11-ENE16	5-15 MIN
El Pongo	24°22'55.2"	65°8'31.2"	979	Finca La Posta	Secretaría Energía de Jujuy	SET06-FEB16	15 MIN
El Rincón	24°01'12.9"	67°02'22.6"	3800	Enirgi Group	Enirgi Group	JUN09-DIC16	15 MIN

En todas las estaciones el equipo de medición instalado es Davis Vantage Pro 2. El sensor de radiación solar (piranómetro solar) empleado por este tipo de estación realiza medidas globales de radiación sumando la radiación directa y componentes de la radiación solar difusa<sup>3</sup>.

### 3.2. Descarga y procesamiento de imágenes satelitales

Los datos satelitales fueron descargados de la red Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF) (sitio web: <http://landsaf.meteo.pt/>). Las imágenes proveen valores de Down-welling Surface shortwave flux (DSSF), se refiere a la energía radiativa en el intervalo de longitudes de onda corta, llega a la superficie de la Tierra por unidad de tiempo y unidad de superficie. Depende esencialmente del ángulo cenital solar, en la cobertura de nubes, y en menor medida de la absorción atmosférica y albedo de la superficie. El DSSF se utiliza para un amplio número de aplicaciones científicas como el pronóstico del tiempo, la hidrología, el clima, la agricultura y los estudios relacionados con el medio ambiente. En la predicción numérica del tiempo y modelos de circulación general de la atmósfera, las estimaciones obtenidas por satélite DSSF bien se pueden utilizar como variable de control o como un sustituto a la superficie de redes de medición de radiación.

<sup>2</sup> Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico de INTA.

<sup>3</sup> El transductor del sensor, que convierte la corriente eléctrica en radiación incidente, es un silicio fotodiodo con respuesta espectral de 400 a 1100 nm. De la tensión de salida del sensor, la consola calcula y muestra irradiancia solar. El sensor está calibrado contra un estándar secundario que se calibra periódicamente contra un Eppley PSP.

El método para la recuperación de DSSF que se implementa en el sistema LSA SAF sigue en gran medida los desarrollos previos obtenidos en MEtEO-Francia en el marco de la SAF en el mar y océano ártico (Brisson et al, 1999., OSI SAF, 2002). Los algoritmos se aplican por separado para el cielo claro y situaciones de cielo nublado. Cuando hay nubes la radiación que llega al suelo se reduce considerablemente. El DSSF es fuertemente anti-correlacionada con reflectancias observadas arriba de la atmósfera: mientras más brillante aparecen las nubes aparecen en las imágenes del satélite, más radiación es reflejada por ellos y menor radiación alcanza la superficie. En este caso, el albedo por fuera de atmósfera se calcula en primer lugar de los valores de reflectancia direccional observados mediante la aplicación de una conversión de banda ancha y un modelo de dependencia angular. El albedo fuera de la atmósfera sirve entonces como la información de entrada más importante para una sencilla parametrización física de la transferencia de radiación en el sistema de nubes y la atmósfera en la superficie. En el método de cielo despejado la estimación de DSSF se determina directamente con una parametrización empírica para la transmitancia efectiva de la atmósfera como una función de la concentración de los componentes atmosféricos.

Los datos DSSF de la LSA-SAF con una resolución temporal de 30 minutos para los años entre 2.009 y 2.015 fueron descargados en paquetes de 1.000 mapas (empaquetados en formato HDF5) para la parte del disco correspondiente a Sud América, realizado a través del formulario web y el ftp de la LSA-SAF y con una resolución espacial de 0,04 grados de lado (aproximadamente 4.5 Km para la provincia de Salta). De los 17.520 mapas que se deberían obtener por cada año se obtuvieron alrededor de 17.100 mapas aproximadamente por cada año. Los mapas faltantes están distribuidos de forma irregular durante todo el año.

El primer es el pre-procesamiento de las imágenes que consiste en la transformación en formatos de HDF5 a Geotiff y la georreferenciación al código EPSG 22183 (“POSGAR 94 / Argentina 3”) usando la herramienta libre GDAL.

Todos los mapas se importan en GRASS GIS y registran en bases de datos espacio-temporales independientes. Usando el módulo para operaciones matemáticas en mapas raster de GRASS GIS, en combinación con el lenguaje y entorno libre de programación R, se obtienen los mapas de radiación global sobre plano horizontal diarios, y con ellos el promedio de valores mensuales y anuales.

Esta etapa requiere de una workstation, computador de altas prestaciones, para almacenar y procesar el volumen tan grande de imágenes (superior a 1 Terabyte).

### **3.3. Validación y análisis de datos**

Para la validación de los datos satelitales de radiación solar se utilizan dos métodos:

1- Comparación con valores estimados en estaciones virtuales.

Con la aplicación de herramientas SIG, se generaran diversas estaciones virtuales mediante un muestreo estratificado por altitud basado en el MDE. Esta estratificación está orientada a obtener puntos de referencia al azar para la evaluación del comportamiento de los datos satelitales en zonas bajas y altas de la región. Dadas las características geográficas de la provincia de Salta, la diferencia altitudinal es una de las variables de mayor incidencia en la evaluación de la radiación solar.

Para cada estación virtual se calcula la radiación global acumulada sobre plano horizontal, para los días julianos<sup>4</sup> característicos de cada mes ( $\text{kWh/m}^2\text{-día}$ ). En las estaciones cuya altitud es inferior o igual a los 2500 msnm se empleó el método de Hottel de día claro (Duffie y Beckman, 2005). Para las estaciones de altura superior a los 2500 msnm se emplea el modelo ARG-P desarrollado por el Dr. Germán Salazar de la Universidad Nacional de Salta

---

<sup>4</sup> Día Juliano característico de cada mes: Corresponde al día del mes en el cual la radiación extraterrestre tiene el mismo valor que la radiación extraterrestre promedio del mes.

(Salazar et al., 2010). Ambos modelos se emplean también para calcular la radiación acumulada mensual ( $\text{kWh}/\text{m}^2\text{-mes}$ ).

Tomando como base las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de las mismas estaciones virtuales, se determinan los mismos parámetros de radiación solar a partir de los datos satelitales LSA SAF y se comparan los valores obtenidos.

## 2- Comparación con valores medidos en estaciones terrestres.

Los datos provistos por las estaciones terrestres son procesados y promediados según la serie de años disponible en cada caso, para el cálculo de la radiación global acumulada sobre plano horizontal, para los días julianos característicos de cada mes ( $\text{kWh}/\text{m}^2\text{-día}$ ), y la radiación acumulada mensual ( $\text{kWh}/\text{m}^2\text{-mes}$ ). Estos parámetros fueron comparados con los datos satelitales LSA SAF.

Las diferencias entre los valores de radiación solar, dados por imágenes satelitales y por mediciones en tierra, se determinan por comparación directa, para cada punto geográfico correspondiente a cada estación terrestre de medición.

## 3.4. Generación y edición de mapas finales

En base al análisis comparativo anterior, se valida el uso de las imágenes procesadas para el mapeo del recurso solar y, de ser necesario, se determinan factores de ajuste para el desarrollo de los mapas finales de radiación solar. Estos factores se aplican en las capas del SIG correspondientes.

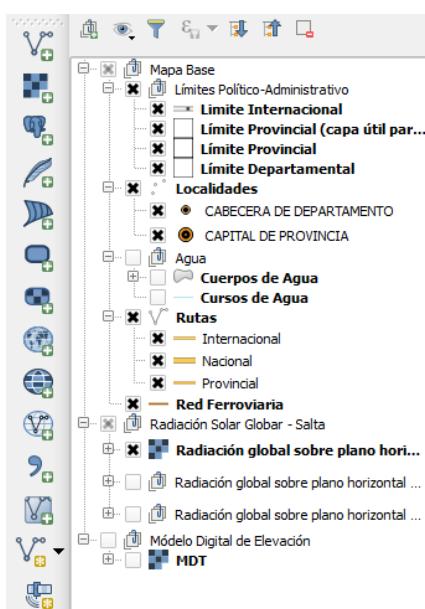
Finalmente se integran las imágenes ráster de radiación solar al mapa base y se analizan los resultados. Las capas temáticas son editadas para su presentación en formato impreso y digital.

# 4. Resultados

## 4.1. Estructura y contenido del Sistema de Información

El Sistema de Información Geográfica fue desarrollado para la provincia de Salta, incorporando las capas temáticas correspondientes al Mapa Base y al Atlas de Radiación Solar (ver anexo: Atlas de Radiación Solar Salta Referencias SIG). La estructura general del SIG, se puede observar en la captura de pantalla de la Figura 2. El sistema de referencias utilizado fue coordenadas geográficas, datum wgs84.

Figura 2: Estructura general del proyecto en QGIS



## **4.2. Definición y validación del modelo para el mapeo solar**

Se analiza el grado de ajuste entre las curvas, para las diversas comparaciones aplicadas con radiación solar estimada y medida. La variable considerada es radiación solar global sobre plano horizontal.

*Comparación de datos satelitales con estaciones virtuales:*

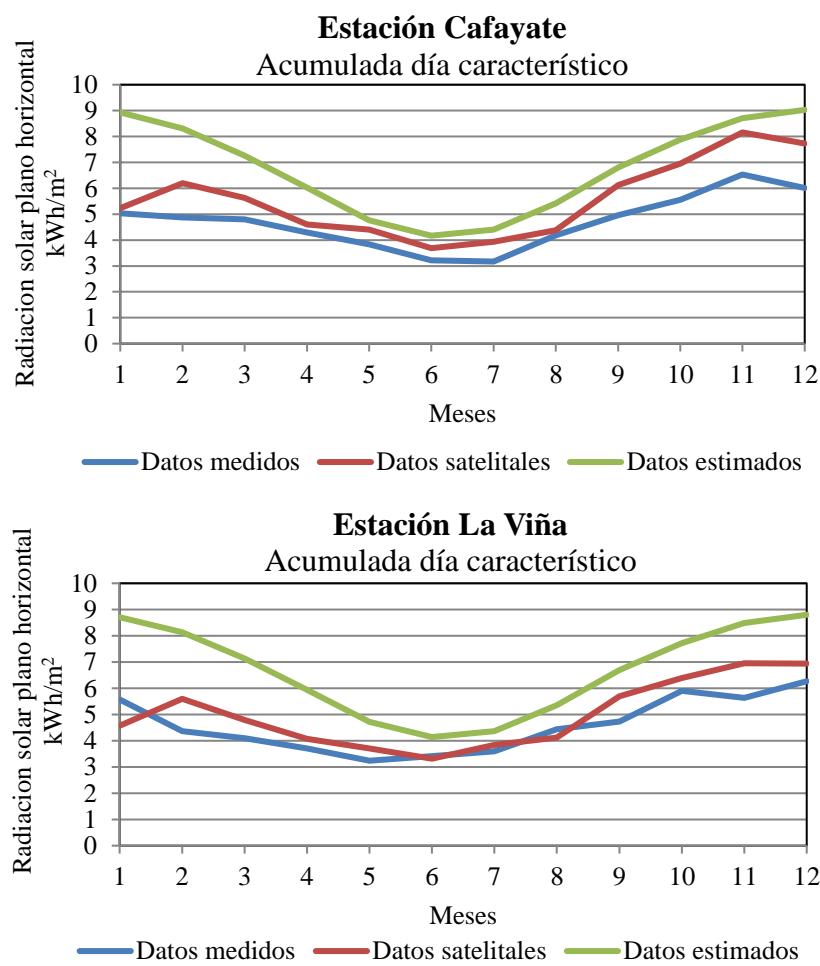
Los valores de radiación solar provistos por las imágenes satelitales resultaron en todos los casos inferiores a la radiación solar de día claro estimada por los modelos de Hottel y Salazar. Esto confirma que los datos satelitales incorporan los efectos de nubosidad y otras dispersiones de la atmósfera en los valores de radiación provistos por LSA SAF. En el caso de los valores de invierno, la correlación es mayor a 0.85, independientemente de la posición geográfica de las estaciones virtuales, lo que es esperable por ser la época seca característica de toda la región. Para la época lluviosa (verano) la variabilidad de los datos es mayor ( $R$  entre 0.5 y 0.8), coincidentemente con una mayor diversidad de condiciones de sitio (altitud, latitud, orografía, precipitaciones). Asimismo las diferencias en valores absolutos de radiación son menores en la época seca (abril a setiembre), acercándose los valores satelitales de radiación global a los valores estimados de radiación de día claro.

*Comparación de datos satelitales con mediciones de estaciones terrestres:*

### Día característico

En el análisis realizado con los datos medidos, se observa un buen ajuste en cuanto a **valores diarios de radiación solar para el día característico del mes**. Los valores son casi idénticos para la temporada seca (otoño-invierno), mostrándose mayor variabilidad nuevamente en los meses de verano (+-20%). No obstante, no es posible aplicar un factor de corrección o ajuste para aplicar a los valores de día característico dados los pocos datos medidos reales disponibles y la irregularidad en las variaciones (series de 5-6 años como máximo, para días característicos son sólo 5-6 datos). Si bien existen variaciones mensuales, los coeficientes de correlación lineal anuales para la radiación global acumulada sobre plano horizontal, para los días julianos característicos resultan aceptables: 0,96 (Cafayate) y 0,86 (a Viña). Los gráficos de la Figura 3 permiten visualizar estas observaciones para las estaciones de referencia con datos de radiación disponibles para la provincia de Salta. Considerar que los datos estimados son de radiación de día claro.

*Figura 3: Comparación de datos satelitales con mediciones de estaciones terrestres- Día característico*



#### Radiación acumulada mensual

En relación a los valores de **radiación solar acumulada mensual**, el ajuste de los datos satelitales y medidos es cercano al 90% para todas las estaciones comparadas entre los meses de abril a setiembre. Para los meses de verano, el comportamiento de la curva es similar para las distintas estaciones consideradas, observándose una subestimación de los valores de radiación en las imágenes satelitales para el mes de enero y una sobreestimación para los meses de octubre, noviembre y diciembre (Ver Figura 4). En función del análisis de las diferencias, se planteó un factor de ajuste ( $F_c$ ) promedio para dichos meses, el que fue aplicado a las imágenes satelitales correspondientes (Tabla 4). De esta manera, el error asociado al método de estimación de la radiación solar utilizado en el mapeo con imágenes satelitales se reduce al 5%. Para los meses de febrero y marzo, las variaciones son menores al 5% por lo que no se incorporó factor de ajuste.

*Figura 4: Comparación de datos satelitales con mediciones de estaciones terrestres- Radiación solar acumulada mensual.*

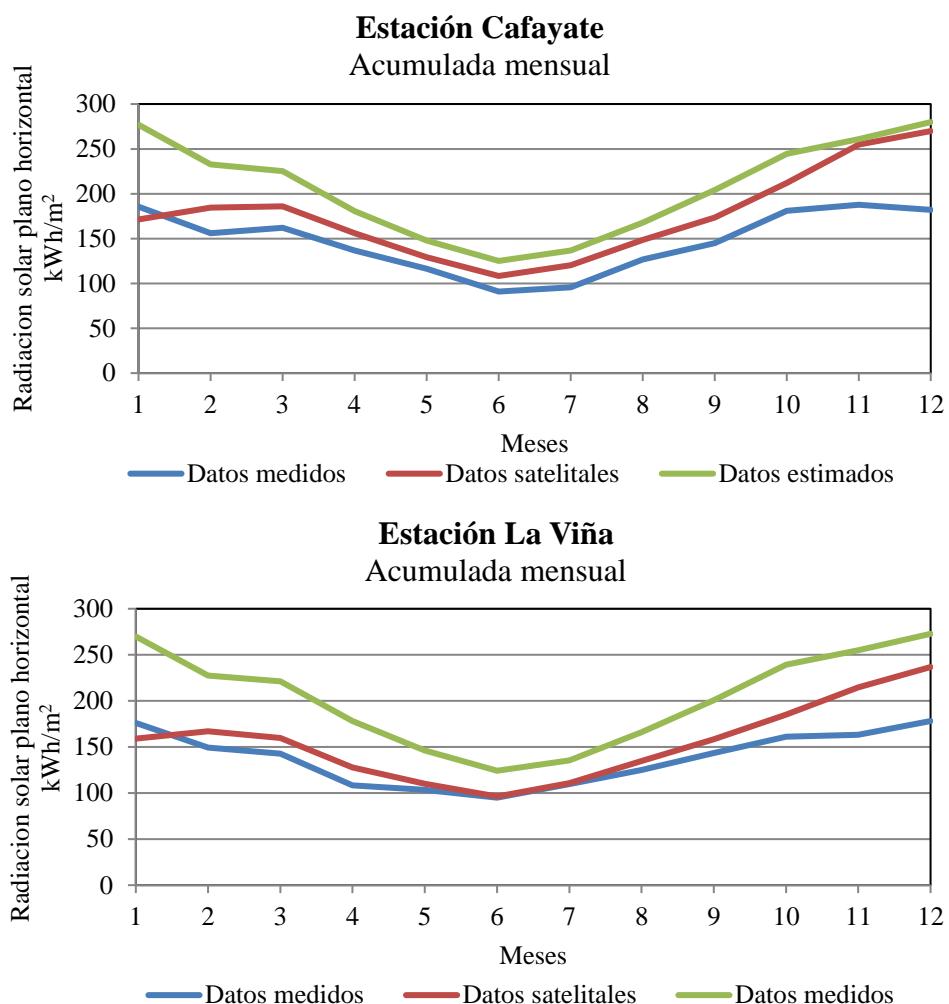


Tabla Nº 4: Factores de ajuste para la estimación de la radiación solar

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Fc *	<b>1.107</b>	0.96	0.95	0.95	1.01	0.99	1.02	0.99	0.97	<b>0.93</b>	<b>0.833</b>	<b>0.811</b>

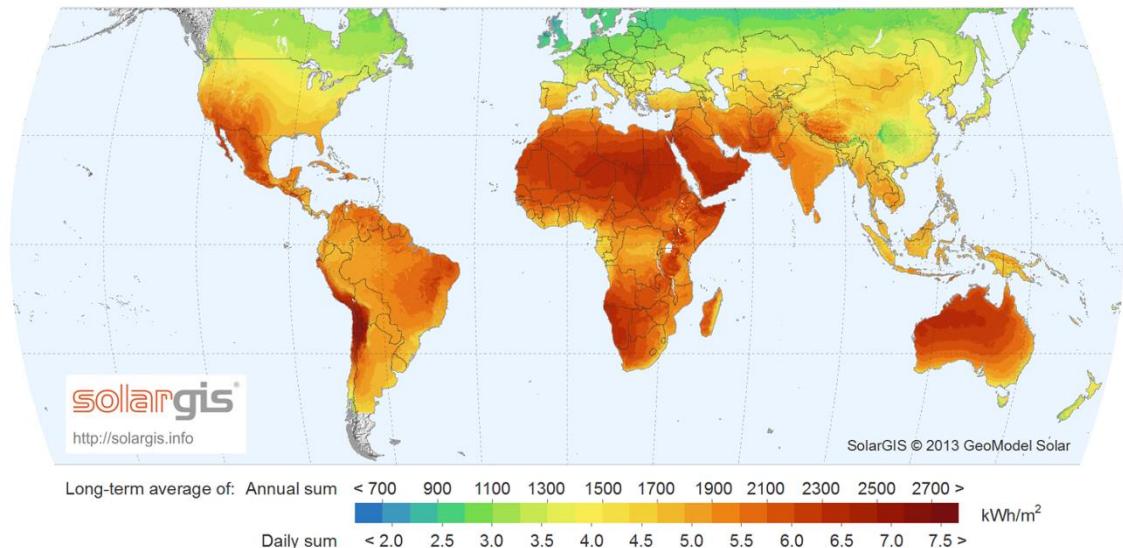
\*Fc: Este factor representa el promedio de las diferencias entre datos satelitales y medidos para las estaciones con datos.

#### 4.3. Análisis del recurso solar en la provincia de Salta

Adjunto a éste informe se presenta el Atlas de Radiación Solar de la provincia de Salta. Los mapas finales elaborados corresponden a la Radiación solar global sobre plano horizontal para el día característico de cada mes, radiación acumulada mensual y radiación acumulada anual, expresada en kWh/m<sup>2</sup>.

A partir de los mapas generados, se puede afirmar que Salta es una provincia con un muy buen recurso solar, correspondiente a una de las 7 zonas con mayor radiación en el mundo (Figura 5) con una radiación anual mayor a 2300 kWh/m<sup>2</sup>.

Figura 5: Mapa mundial de radiación solar



Los valores máximos de radiación solar diaria se concentran en el mes de noviembre (6 a 9 kWh/m<sup>2</sup>) y los mínimos en el mes de junio (2.5 a 5 kWh/m<sup>2</sup>). La radiación disminuye en los meses de diciembre y enero por efecto de la nubosidad y las precipitaciones que caracterizan esta zona geográfica, volviendo a incrementarse a partir de febrero o marzo según el sector de la provincia. Esta afirmación se corresponde con los datos de precipitaciones de la provincia (Figura 6).

Por otra parte, los valores de radiación solar en la provincia de Salta se ven fuertemente influenciados por las variaciones altitudinales del terreno (la altitud varía entre 350 y 5000 msnm). Las zonas elevadas presentan los valores más altos de radiación durante todo el año. El efecto de nubosidad es más fuerte en las zonas bajas y de valles, por lo que la radiación disminuye significativamente en estos sectores, particularmente en los meses de verano.

Figura 6: Precipitación media anual de la región Salta - Jujuy

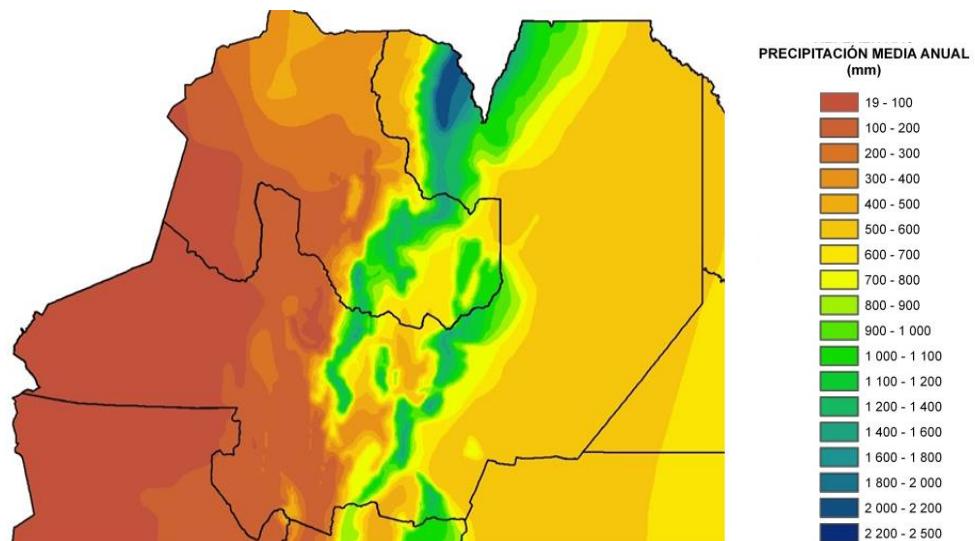


Imagen tomada de Atlas climático digital de la República Argentina - INTA, 2010.

#### 4.4. Soportes del Atlas de Radiación Solar

La presentación final del Atlas de Radiación Solar de la provincia de Salta se realiza en diversos formatos para su mejor aprovechamiento y utilidad (Tabla 5) y se anexan al presente informe técnico.

Tabla 5: Formatos de presentación del Atlas de Radiación Solar

Formato / Soporte	Contenido	Aplicaciones y usos	Material complementario
<b>Proyecto QGIS (digital)</b>	Capas temáticas de mapa base y radiación solar.	Visualización del SIG, prendido y apagado de capas. Consulta espacial de datos de radiación. Acceso a la información de base. Posibilidad de procesamiento SIG.	Instructivo de uso Instalador QGIS. Manual QGIS.
<b>Proyecto .kmz (digital)</b>	Capas temáticas de radiación solar (.kmz)	Visualización de las capas en Google Earth. Consulta interactiva de la radiación diaria, mensual y anual por pixel.	Instructivo de uso
<b>Atlas de Radiación Solar (impreso y digital)</b>	Mapas de referencia: Carta imagen, redes eléctricas, MDE. Mapas de radiación solar: diarios, mensuales y anual.	Visualización general de la provincia. Consulta general de datos de radiación.	

#### 5. Consideraciones generales

El mapeo del recurso solar fue realizado principalmente en base a datos satelitales provistos por LSA SAF, validados con estimaciones de día claro y mediciones de estaciones terrestres.

Si bien fue viable incorporar ajustes para disminuir la incertezza debido al método satelital (menor a un 5% para valores mensuales y anuales), no fue posible disminuir la incertidumbre derivada de las variaciones climáticas interanuales y las condiciones particulares de sitio, por las siguientes limitaciones:

- Escasas estaciones terrestres disponibles con mediciones de radiación.
- Series cortas de tiempo y vacíos de información para las estaciones con datos.
- Inexistencia de mediciones de nubosidad y/o precipitaciones que permitan correlacionar dichas variables con mayor precisión.

En consecuencia, se recomienda la incorporación de nuevas estaciones meteorológicas estratégicamente localizadas en toda la provincia, a fin de incrementar las mediciones de radiación solar y otras variables de interés.

Finalmente, los resultados obtenidos en cuanto al mapeo solar indican una enorme potencialidad de la provincia de Salta para la implementación de proyectos de Energía Solar y el diseño de políticas con fuerte énfasis en este recurso renovable.

## 6. Bibliografía y fuentes consultadas

- Belmonte, S., Núñez, V., Franco, J. y J. Viramonte – 2006 –“Mapas de radiación solar para el Valle de Lerma (Salta – Argentina)”. Revista AVEREMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente) V10 (2006): 11.49 - 11.56. ISSN: 0329-5184.
- Belmonte, S.; Núñez, V.; Viramonte, J.; Franco, J. – 2009 - “Potential renewable energy resources of the Lerma Valley, Salta, Argentina for its strategic territorial planning”. Renewable and Sustainable Energy Review 13 (2009): 1475-1484. ISSN: 1364-0321. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/>
- Bianchi A. y S. Cravero - 2010 - Atlas climático digital de la República Argentina. Ediciones INTA. ISBN/ISSN 978-987-1623-95-2
- Brisson A., LeBorgne P., Marsouin A.-1999- Development of Algorithms for Surface Solar Irradiance retrieval at O&SI SAF low and Mid Latitude, METEO-France/CMS, Lannion.
- INENCO -1984 - Datos meteorológicos de estaciones del NOA.
- John A. Duffie & William A. Beckman- 2005- Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, John Wiley and Sons.
- Ramirez Camargo L., Altamirano M., Belmonte S., Dorner W. – 2015 – “Comparación de fuentes satelitales, de re-análisis y métodos estadísticos para el mapeo de la radiación solar en el Valle de Lerma (Salta-Argentina)”. Revista AVERMA (Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente). Vol. 19 (2015). ISSN 2314-1433.
- Ramirez Camargo Luis, Judith Franco, Nilda María Sarmiento Barbieri, Silvina Belmonte, Karina Escalante, Raphaela Pagany, and Wolfgang Dorner - 2016 – “Technical, Economical and Social Assessment of Photovoltaics in the Frame of the Net-Metering Law for the Province of Salta, Argentina”. Energies 2016, 9(3):133. [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies). ISSN 1996-1073.
- Salazar G., Hernández A. y Saravia L. (2010). “Practical models to estimate horizontal irradiance in clear sky conditions: Preliminary results”. Renewable Energy. 35 – pps. 2452 – 2460.
- Sarmiento Barbieri N., Belmonte S., Franco J., Dellicompagni P., Escalante K., Sarmiento J.. Towards a Support Decision System: a Solar Radiation Atlas for the Province of Salta. Renewable Sustain Energy (Actualmente bajo revisión. Artículo presentado en revista en Febrero del 2017).

### Cartografía e imágenes satelitales

Instituto Geográfico Nacional - SIG 250 [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig)

Land Surface Analysis Satellite Applications Facility. Datos satelitales de radiación solar. <http://landsaf.meteo.pt/>

Look images with Geographic Reference de imágenes Landsat distribuidas por Earth Explorer <http://earthexplorer.usgs.gov/>

MODIS RAPID RESPONSE <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response/modis-subsets>.

NASA <http://srtm.usgs.gov>

Open Street Map <https://www.openstreetmap.org/> - <http://download.geofabrik.de/south-america.html>

## 7. Glosario técnico

**Radiación solar global:** Refiere a la irradiación total que llega a la superficie terrestre, su valor está dado por la suma de las componentes de irradiación directa y difusa. Está expresada en kW/m<sup>2</sup>.

**Radiación global sobre plano horizontal:** es la que se recibe en el plano horizontal, es decir con ángulo de inclinación cero.

**Radiación diaria:** Se refiere a la irradiación recibida acumulada por  $\text{m}^2$  en el día expresada en  $\text{kWh/m}^2$ .

**Día Juliano característico de cada mes:** Corresponde al día del mes en el cual la radiación extraterrestre tiene el mismo valor que la radiación extraterrestre promedio del mes.

**Radiación acumulada mensual:** Se refiere a la irradiación recibida acumulada por  $\text{m}^2$  en el mes expresada en  $\text{kWh/m}^2$ .

**Radiación acumulada anual:** Se refiere a la irradiación recibida acumulada por  $\text{m}^2$  en el año expresada en  $\text{kWh/m}^2$ .

# ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PROVINCIA DE SALTA

## SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

### CAPAS GEOGRÁFICAS VECTORIALES:

centros\_poblados.shp: capa geográfica vectorial de puntos generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de los asentamientos humanos de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

cuerpos\_de\_agua.shp: capa geográfica vectorial de polígonos generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de los principales cuerpos de agua, salinas, salares y bañados de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

cursos\_de\_agua.shp: capa geográfica vectorial de líneas generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de los principales cursos de agua (ríos, arroyos, etc.) de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

departamentos\_salta\_poligono.shp: capa geográfica vectorial de polígonos generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de los principales departamentos de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

departamentos\_salta\_lineas.shp: capa geográfica vectorial de líneas generada a partir de la cobertura departamentos\_salta para ser utilizada en la elaboración de los mapas del Atlas. Representa la localización de los principales departamentos de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

limites\_politico\_administrativos.shp: capa geográfica vectorial de líneas generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de los límites internacionales y provinciales de la provincia de Salta y jurisdicciones colindantes a escala 1:250.000.

puntos\_etiqueta: capa geográfica vectorial de puntos generada para ser utilizada en la elaboración de los mapas del Atlas. Representa la localización de etiquetas para las jurisdicciones colindantes con la provincia de Salta a escala 1:250.000.

para\_atlas: capa geográfica vectorial de puntos generada para ser utilizada en la elaboración de los mapas del Atlas. No tiene ningún sentido en términos espaciales.

red\_vial: capa geográfica vectorial de líneas generada por el Instituto Geográfico Nacional. La misma fue obtenida del sitio web [www.ign.gob.ar/sig](http://www.ign.gob.ar/sig) fecha de consulta: 24/04/16 y representa la localización de rutas y caminos de la provincia de Salta y jurisdicciones colindantes a escala 1:250.000.

red\_vial\_OSM: capa geográfica vectorial de líneas generada por OpenStreetMap (OSM) <https://www.openstreetmap.org/>. La misma fue obtenida del sitio web <http://download.geofabrik.de/south-america.html> fecha de consulta: 20/07/16 y

representa la localización de la red vial de la provincia de Salta a escala 1:250.000. OpenStreetMap es un mapa del mundo, creado por usuarios voluntarios y de uso libre bajo una licencia abierta. Se consideró pertinente su uso por el detalle espacial de sus datos. Al no contar con la estructura de atributos del IGN, se intentó reproducir la misma. Sin embargo por la cantidad de datos vectoriales y la falta de información de campo actualizada pueden existir falta de asignación de algunos atributos o asignaciones erróneas de categorías.

rutas\_disueltas: capa geográfica vectorial de líneas generada a partir de fusión de los elementos de la cobertura red\_vial\_OSM (técnica dissolve) para ser utilizada en la elaboración de los mapas del Atlas. Representa la localización de las principales rutas de la provincia de Salta a escala 1:250.000.

ju\_grilla\_año: capa geográfica vectorial de polígonos generada a partir de la capa raster de radiación solar global sobre plano horizontal acumulada anual (anual\_acumulada.tif). La misma representa el valor anual de cada pixel de la capa raster.

ju\_grilla\_mes: capa geográfica vectorial de polígonos generada a partir de las capas raster de radiación solar global sobre plano horizontal acumulada mensuales (mes\_xx\_xxxx.tif). La misma representa el valor mensual de cada pixel de cada capa raster mensual.

ju\_grilla\_dia: capa geográfica vectorial de polígonos generada a partir de las capas raster de radiación solar global sobre plano horizontal acumulada del día característico del mes (mes\_xx\_xxxx.tif). La misma representa el valor de día característico de cada pixel de cada capa raster diaria.

#### CAPAS GEOGRÁFICAS RASTER:

Landsat\_2015.tif: capa geográfica raster generada a partir de Look images with Geographic Reference de imágenes Landsat distribuidas por Earth Explorer <http://earthexplorer.usgs.gov/>

El mosaico se compuso a partir de 8 escenas pertenecientes a los Path/Row 232/75, 232/76, 232/77, 231/75, 231/76, 231/77, 230/76 y 230/77. Las imágenes del Path 232 fueron tomadas el 1 de agosto, las 231 el 13 de octubre y las 230 el 19 de agosto. Todas las fechas correspondieron al año 2015. Se recomienda para estas imágenes una escala de uso de 1:250.000.



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL**  
**Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial**  
**Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET**

**Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO**

---

modis\_2014215298 : capa geográfica raster generada a partir de imágenes MODIS distribuidas por el sistema MODIS RAPID RESPONSE <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/rapid-response/modis-subsets>. Las imágenes utilizadas corresponden a los días 3 de Agosto y 25 de Octubre de 2.014.

mdt\_nasa\_sirgas: modelo digital de elevación (MDE) generado a partir de datos de la NASA <http://srtm.usgs.gov> con resolución 90m, provisto por Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo - IRNED (2009).

**ARCHIVO DE VISUALIZACION Y CONSULTA DE CAPAS EN GOOGLE EARTH**

A partir de algunas capas geográficas utilizadas en el presente trabajo se elaboró un archivo KMZ con el objetivo de facilitar la visualización y consulta del Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta en Google Earth.

El KMZ se compone de 1 directorio principal donde se organizó la siguiente información espacial:

**RADIACIÓN SOLAR GLOBAL:** contiene grillas e imágenes de día característico, acumulada mensual y acumulada anual. Esta información se organizó de la siguiente manera:

- Radiación global sobre plano horizontal kWh/m<sup>2</sup> (día característico).
  - Valores día característico: grilla de consulta con los valores de día característico mensual para cada pixel.
- Radiación global sobre plano horizontal kWh/m<sup>2</sup> (acumulada mensual).
  - Valores mensuales: grilla de consulta con los valores de radiación solar acumulada mensual para cada pixel.
  - Valores anuales: grilla de consulta con los valores de radiación solar acumulada anual para cada pixel.

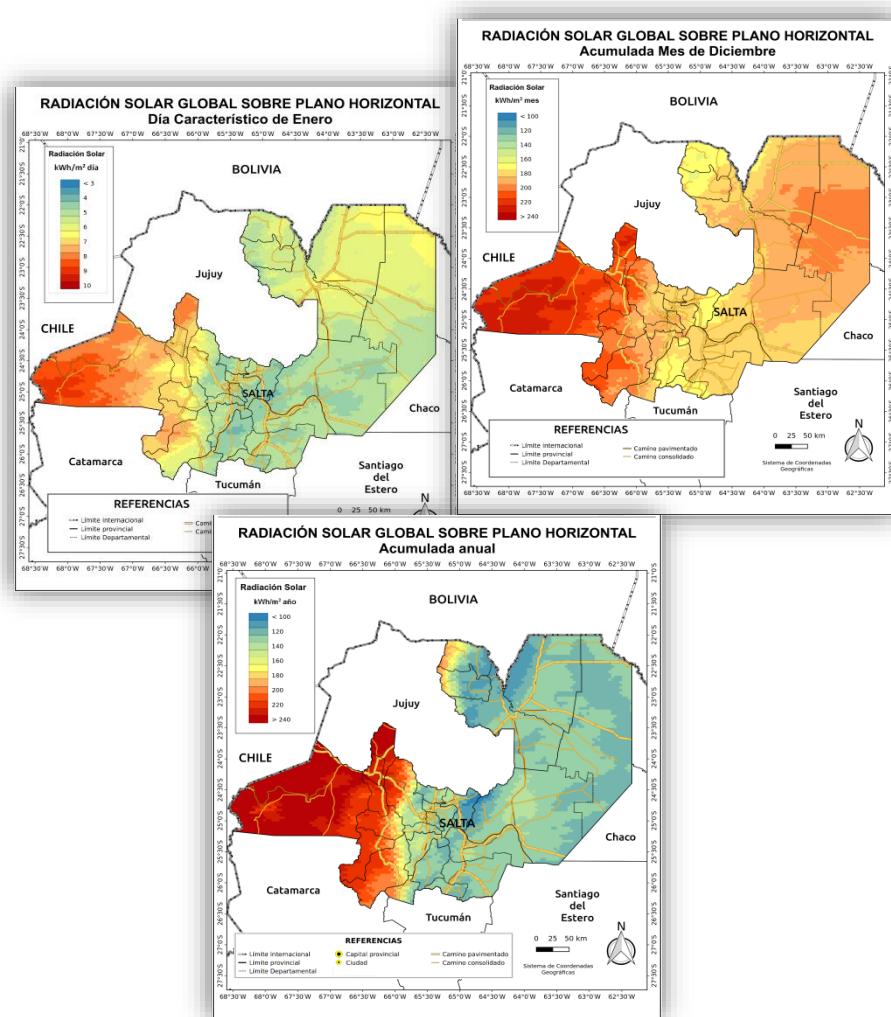


INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO

# ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PROVINCIA DE SALTA

## MAPAS



Abril 2018



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL**  
**Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial**  
**Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET**

**Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO**

---

## **ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE LA PROVINCIA DE SALTA**

### **EXPLICACIÓN GENERAL**

El Atlas de radiación solar de la provincia de Salta se desarrolló en el marco de un Proyecto de Vinculación concertado entre la Secretaría de Energía del Ministerio de Producción, Trabajo y Desarrollo Sustentable de Salta y el grupo Planificación Energética y Gestión Territorial del Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO) dependiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Universidad Nacional de Salta (U.N.Sa.).

Los mapas de radiación solar fueron desarrollados a partir del procesamiento de datos satelitales de la red Land Surface Analysis Satellite Applications Facility (LSA SAF), con una resolución espacial aproximada de 16 km<sup>2</sup>. Los datos satelitales fueron validados y ajustados a partir de comparaciones con mediciones reales de estaciones meteorológicas disponibles para el NOA y estimaciones por métodos matemáticos de radiación de día claro aplicadas en estaciones virtuales.

Las capas temáticas de radiación solar se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado con software libre. El sistema de referencias utilizado fue coordenadas geográficas, DATUM WGS 84.

Mayores detalles sobre las fuentes de datos y la metodología utilizada para el mapeo del recurso solar pueden consultarse en los documentos ‘Atlas de Radiación Solar - Salta - INFORME TECNICO’ y ‘Atlas de Radiación Solar Salta - Referencias SIG’.

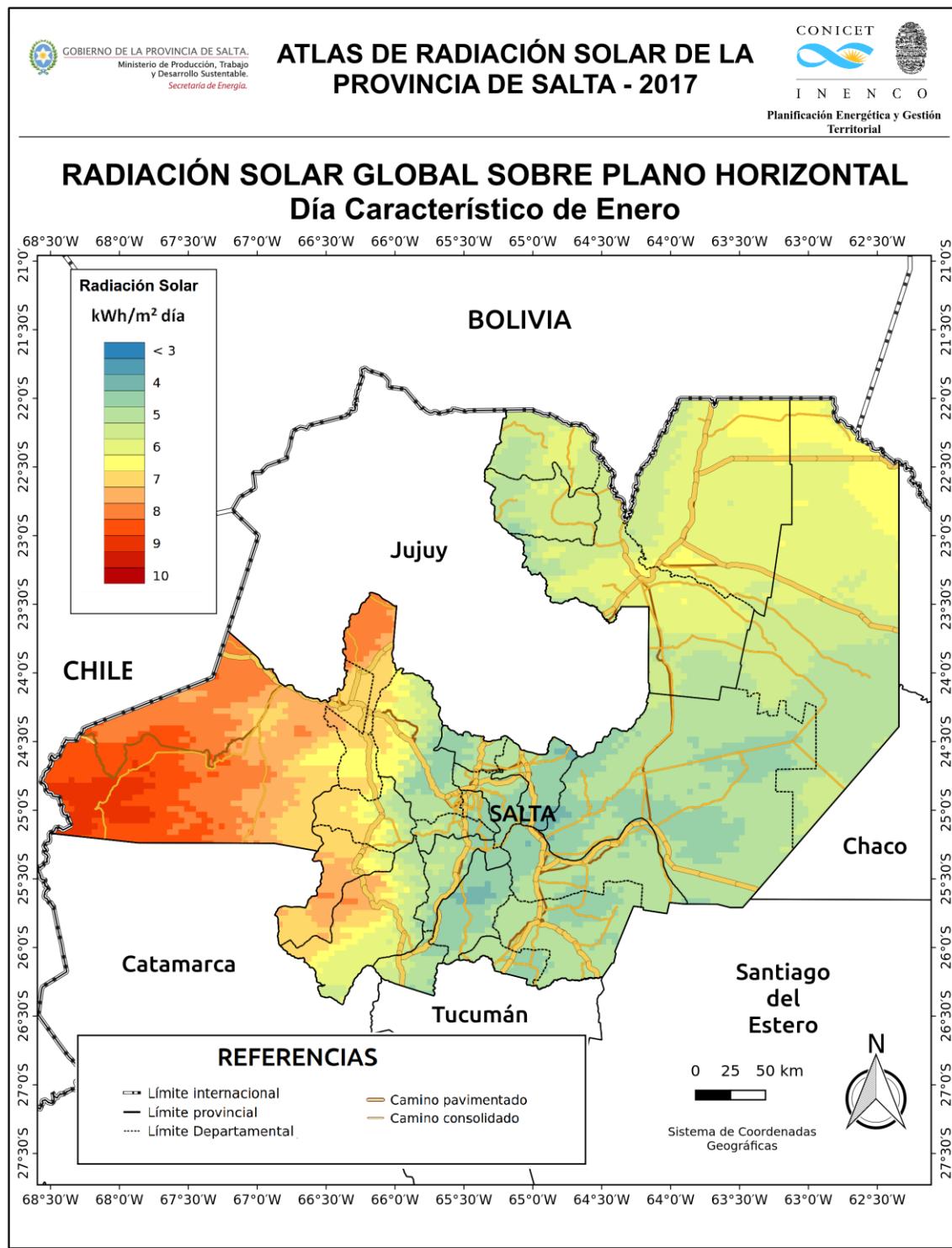
Para el presente documento se editaron los mapas más significativos para el análisis del recurso solar y la toma de decisiones, incluyéndose: Carta imagen de la provincia y distribución de líneas de alta y media tensión, modelo digital de elevación y mapas de radiación solar global sobre plano horizontal para el día característico de cada mes, radiación solar acumulada mensual y radiación solar acumulada anual.

El estudio del recurso solar constituye un insumo imprescindible para el diseño de políticas públicas energéticas que incluyan las energías renovables, aportando principalmente a la planificación y ejecución de proyectos de energía solar de diversa escala. En particular, en la provincia de Salta, el recurso solar presenta excelentes condiciones para su potencial aprovechamiento energético.



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

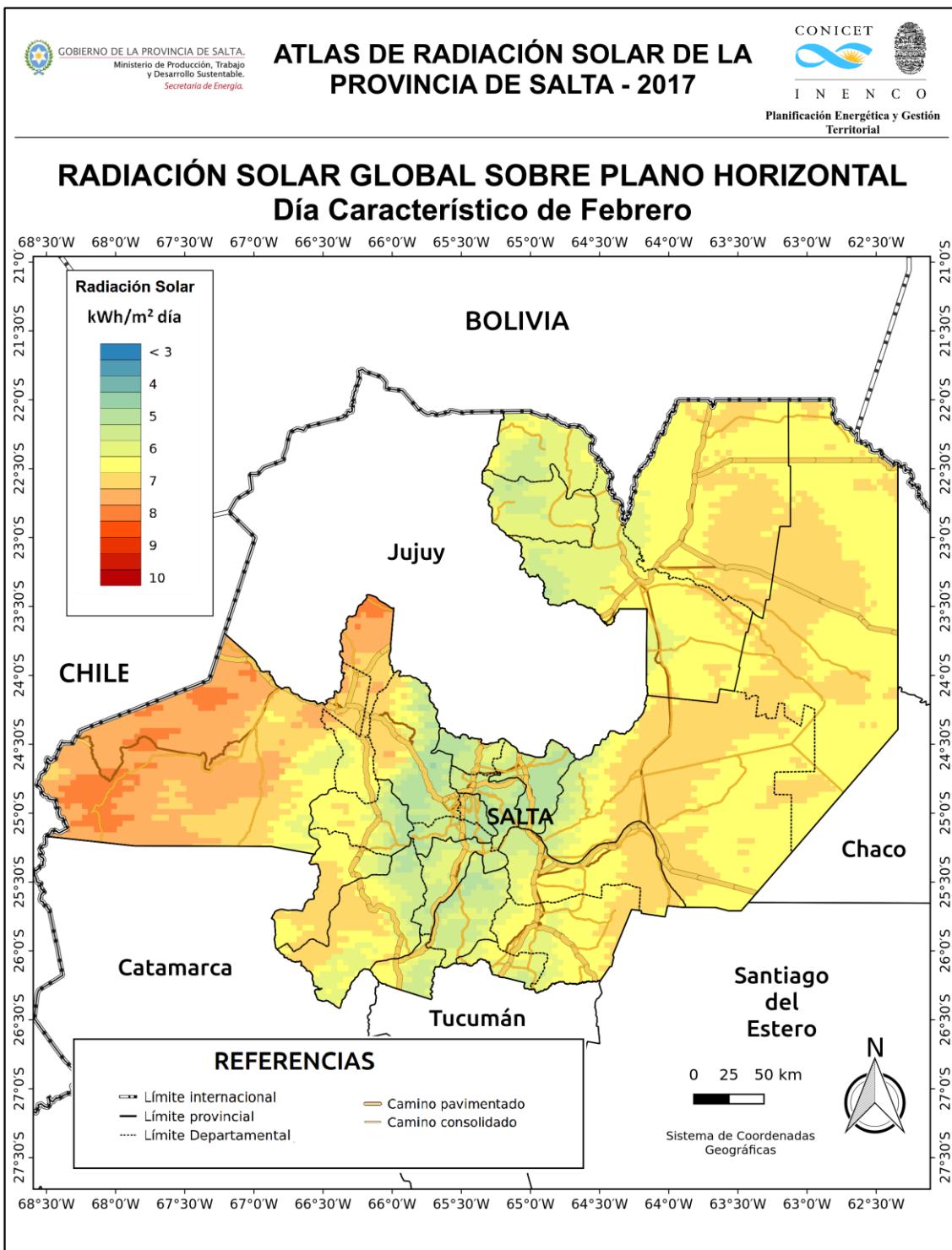
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

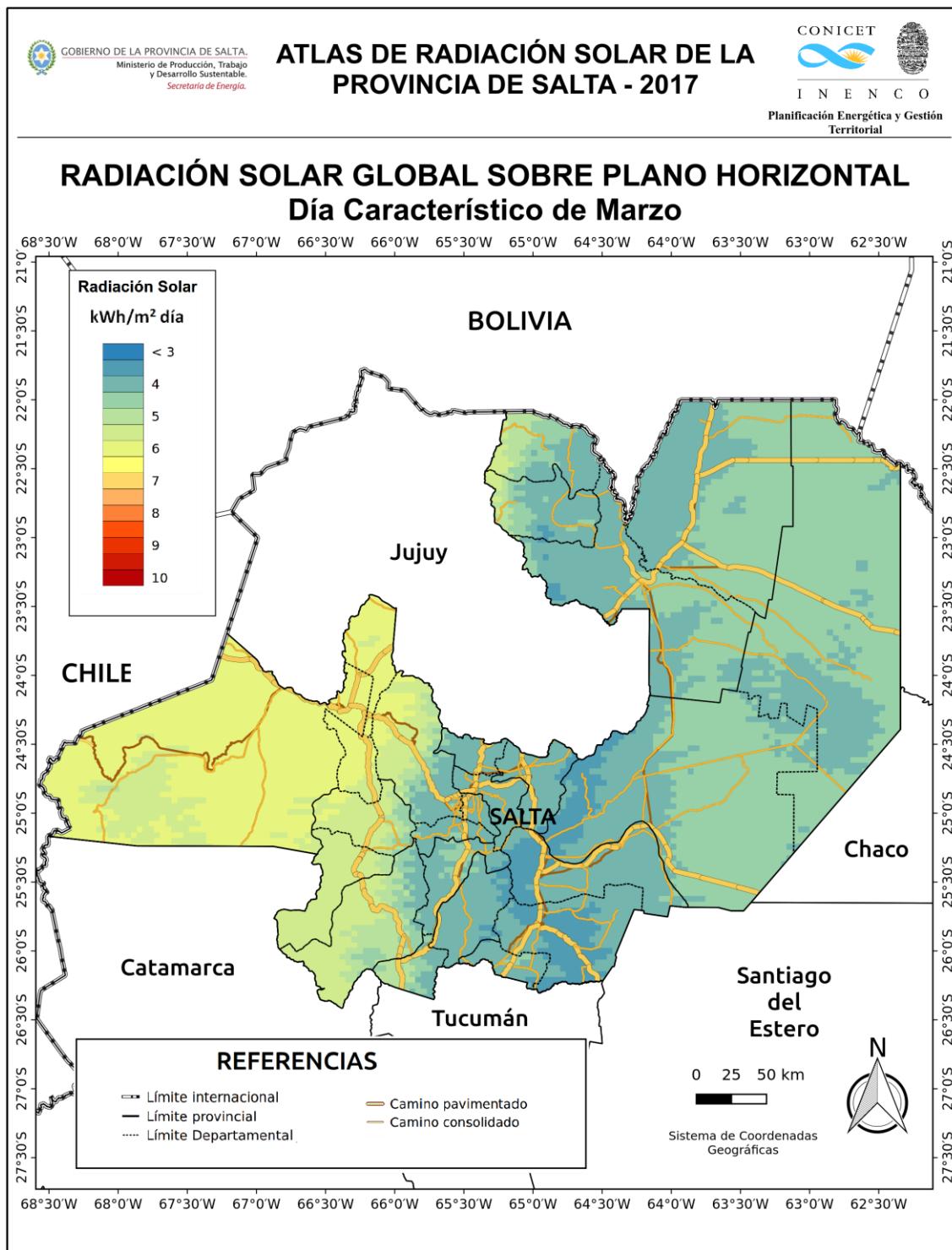
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

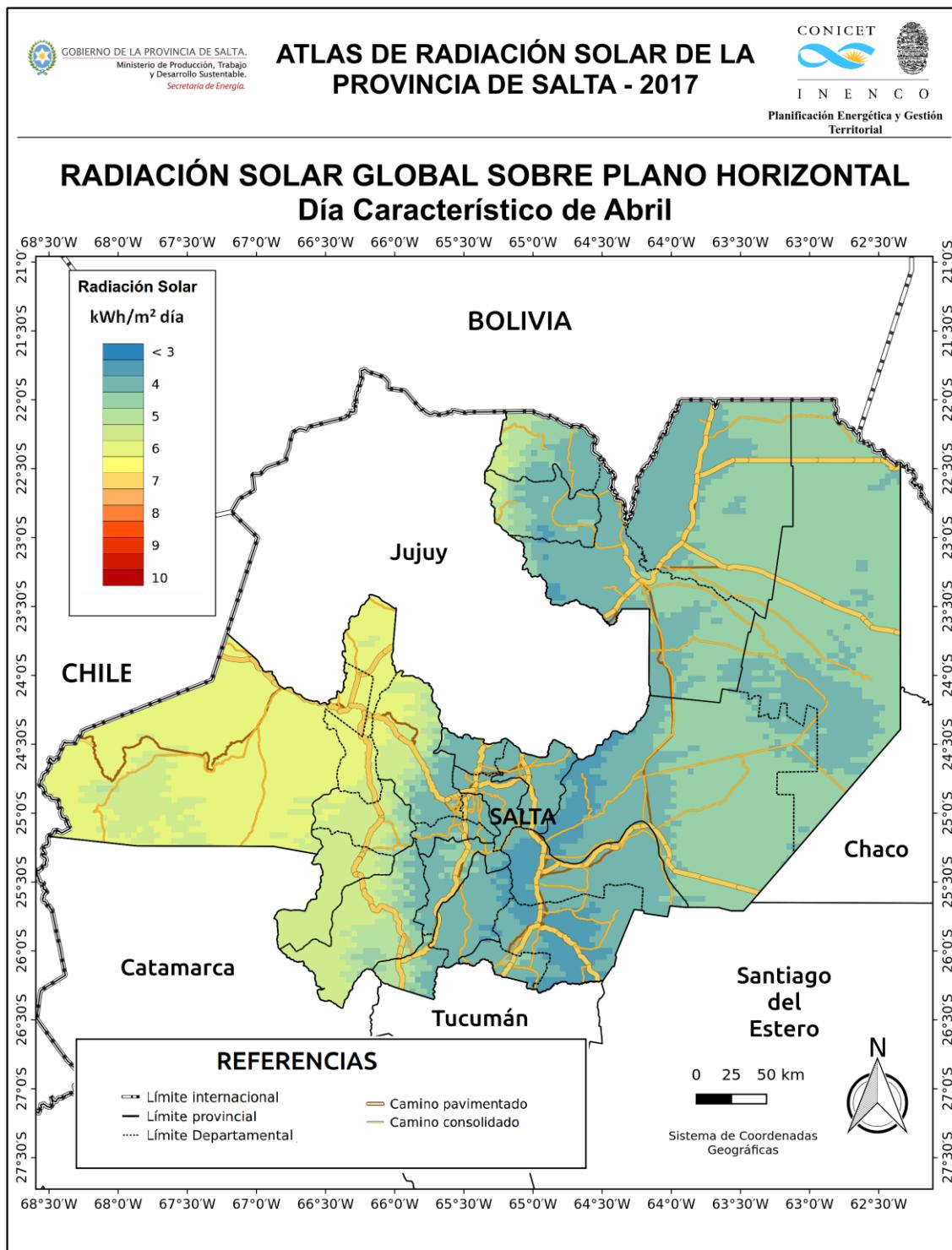
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

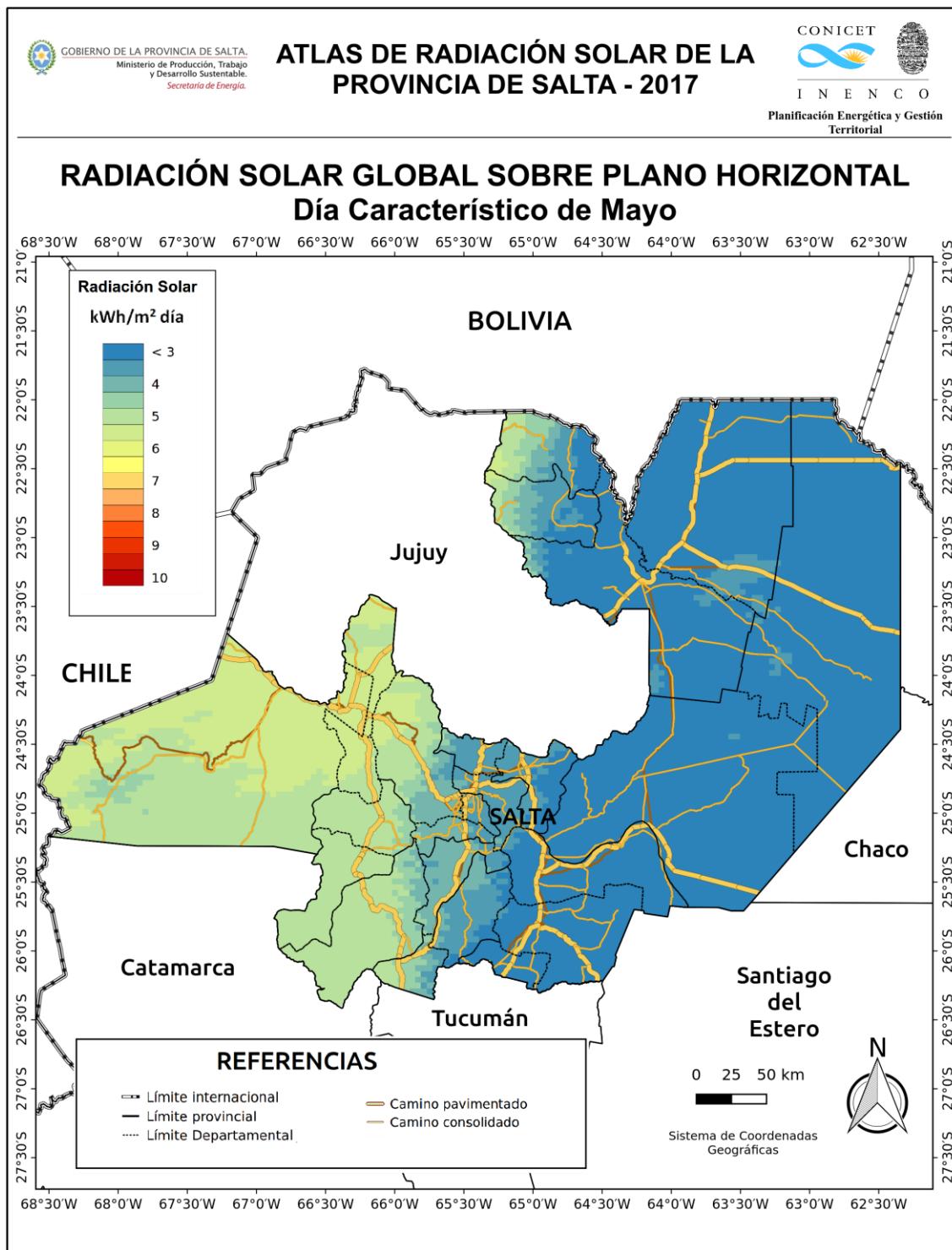
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

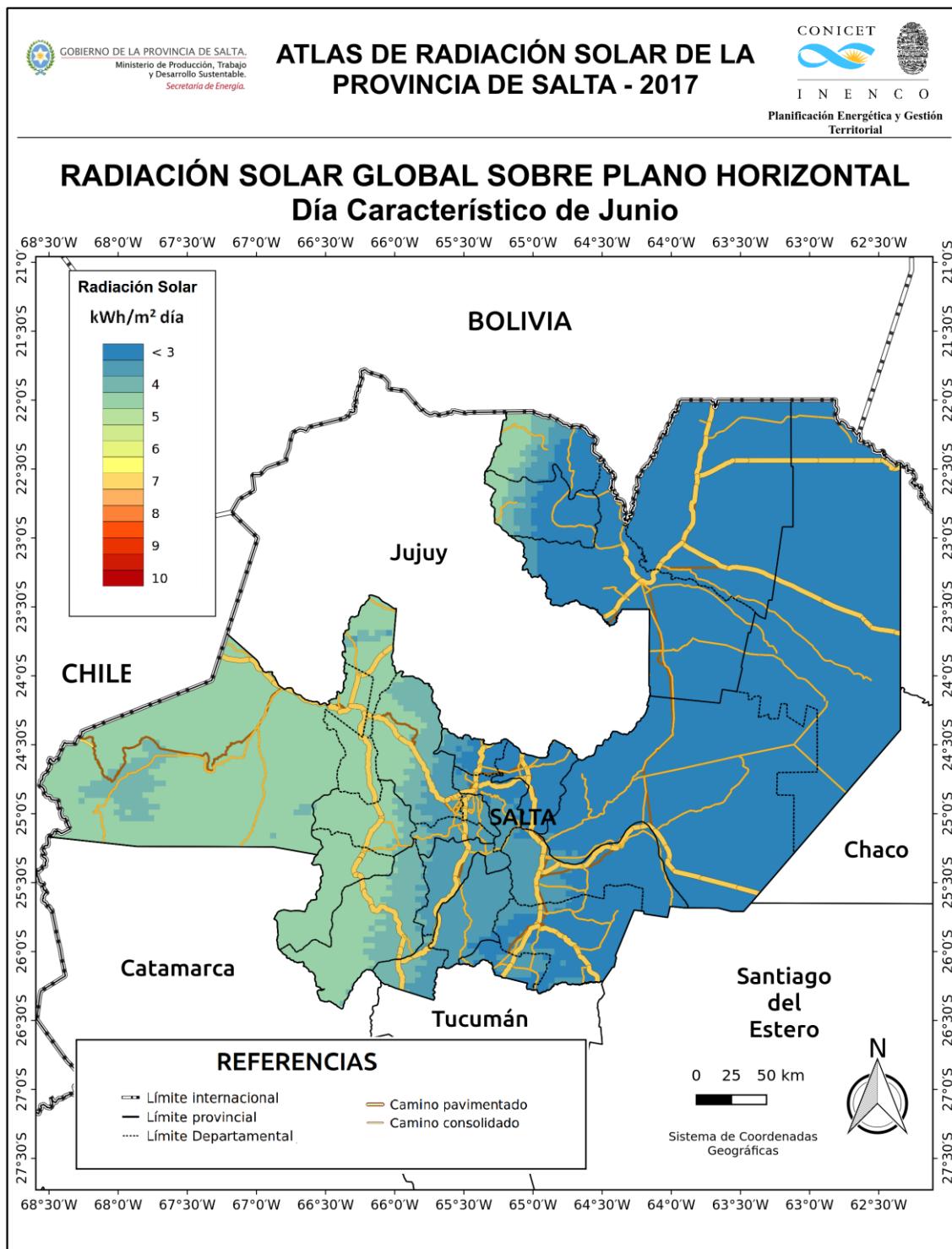
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

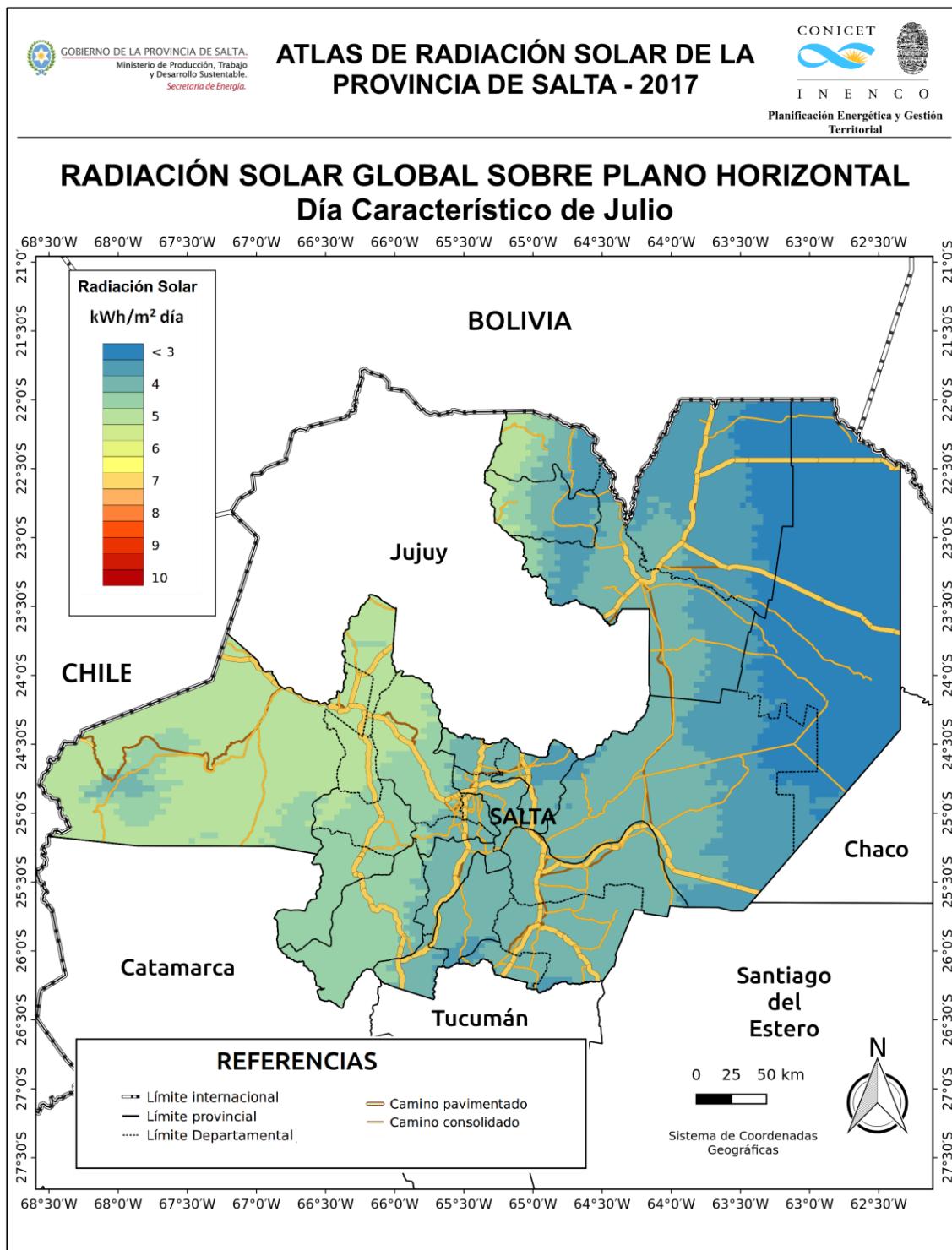
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

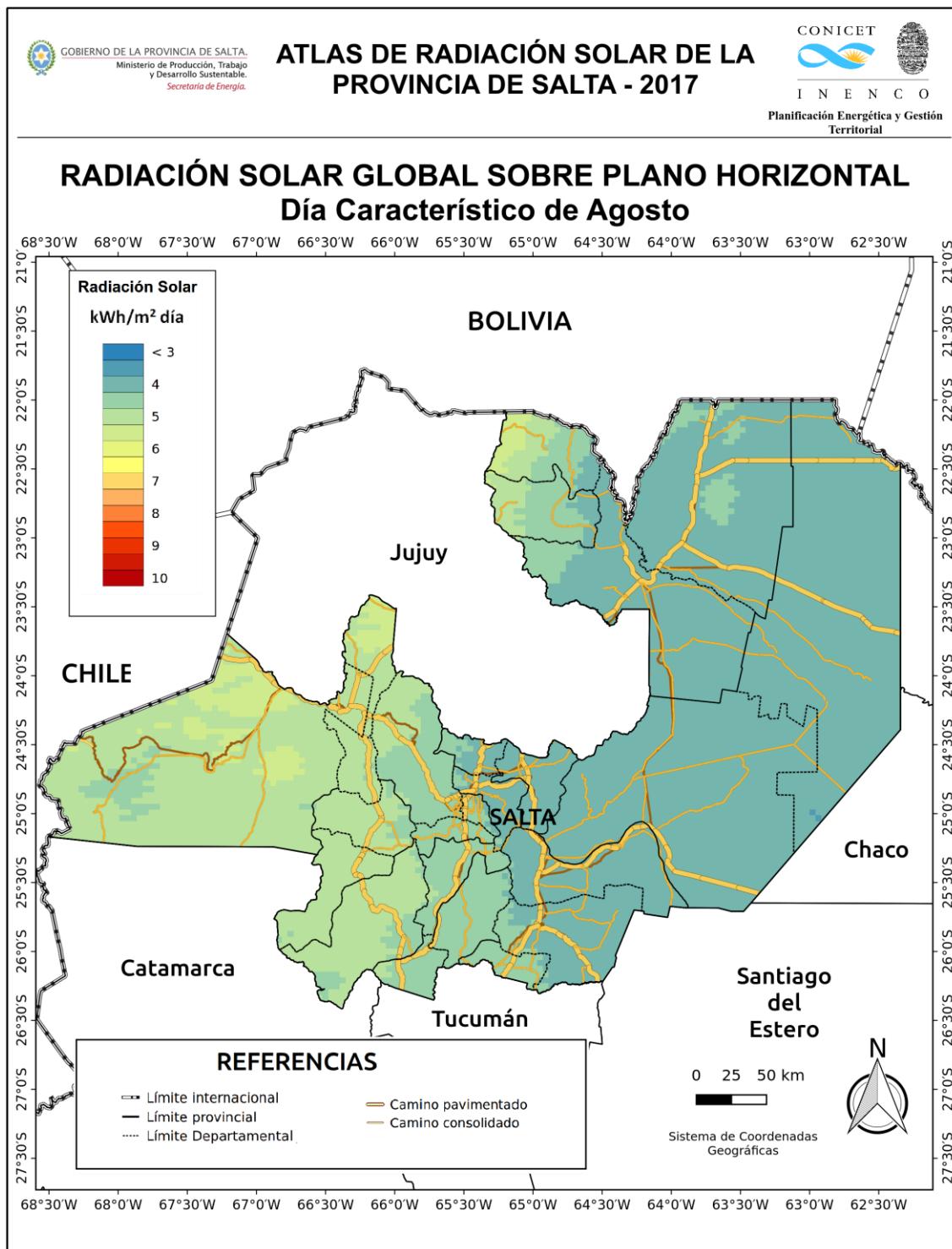
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

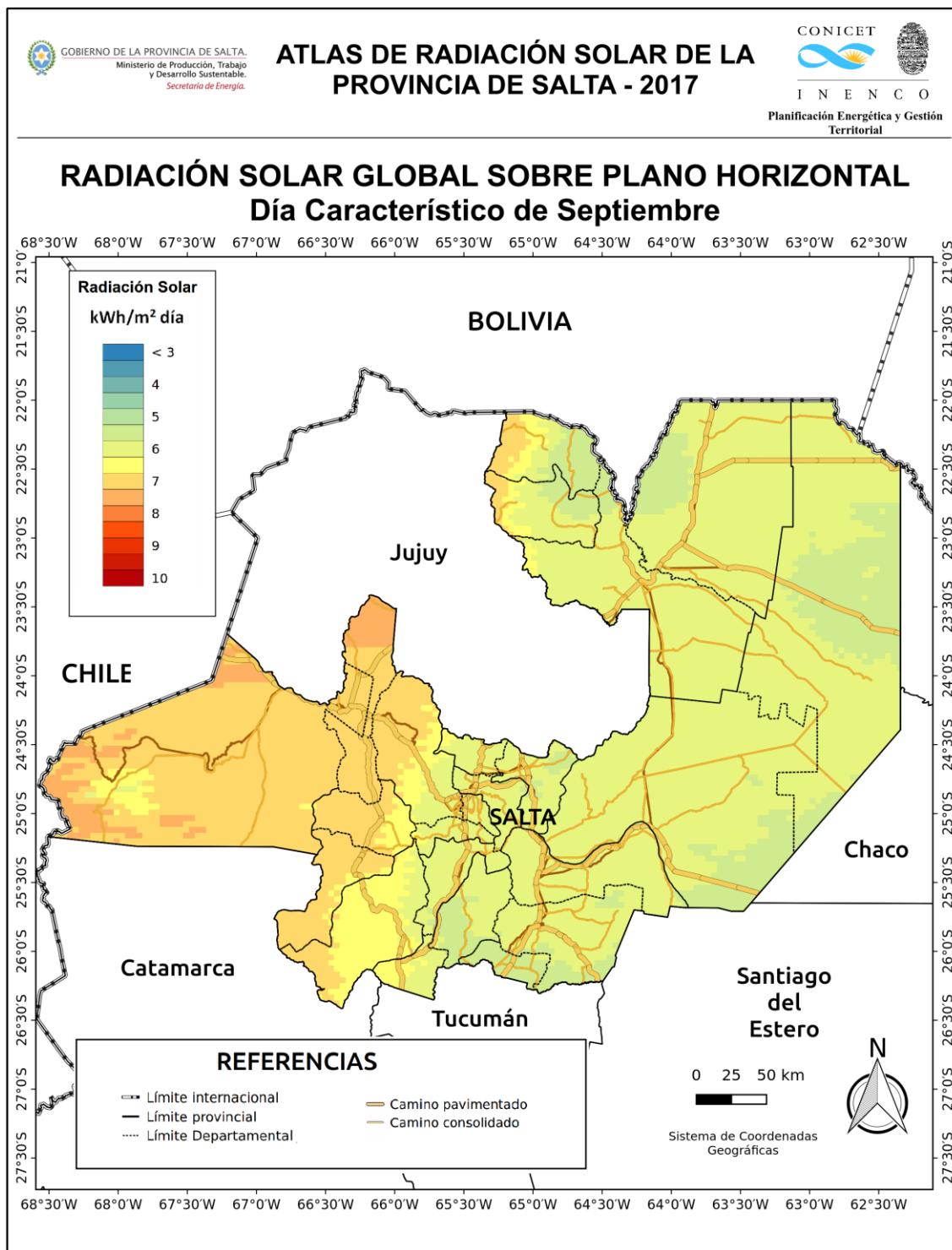
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

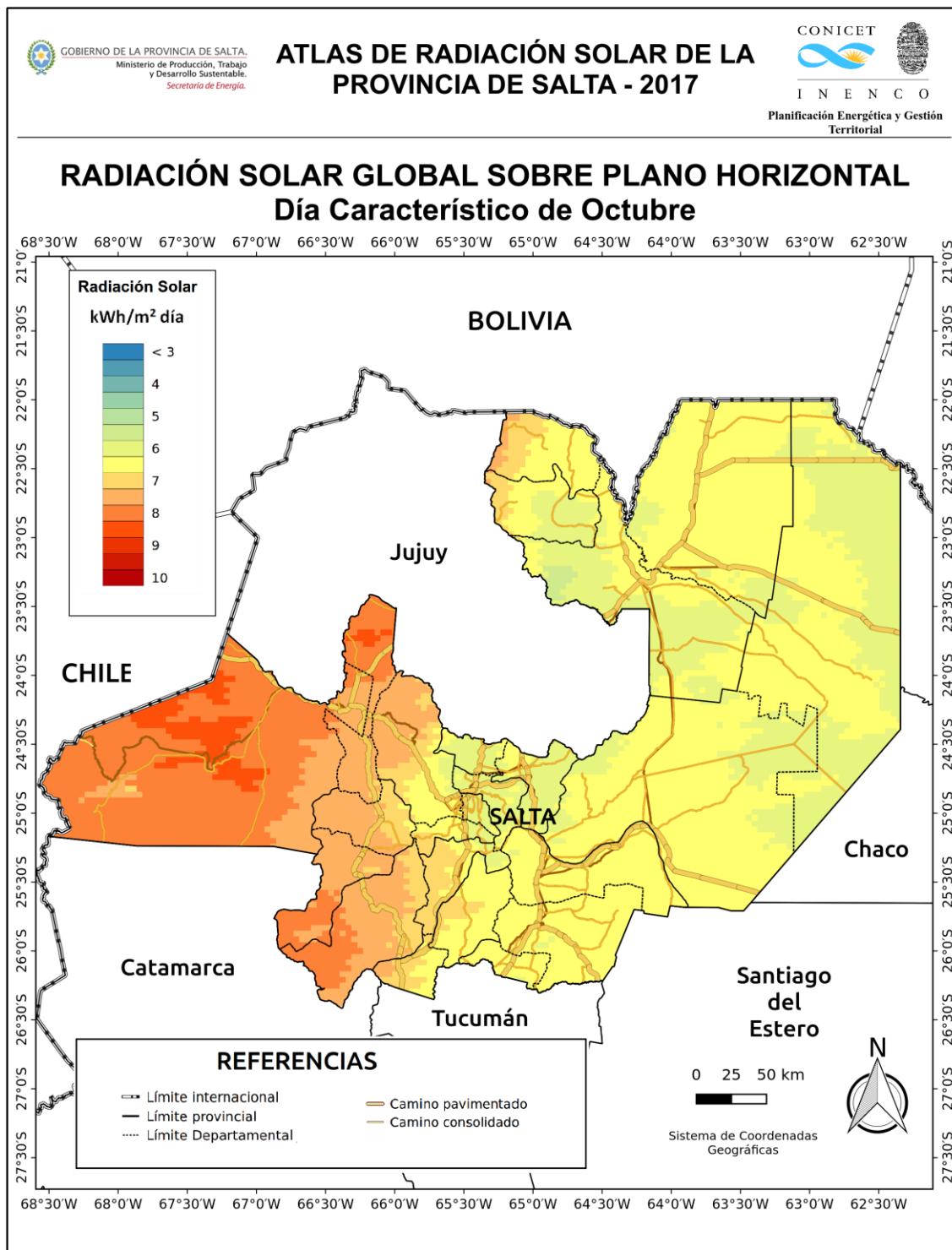
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

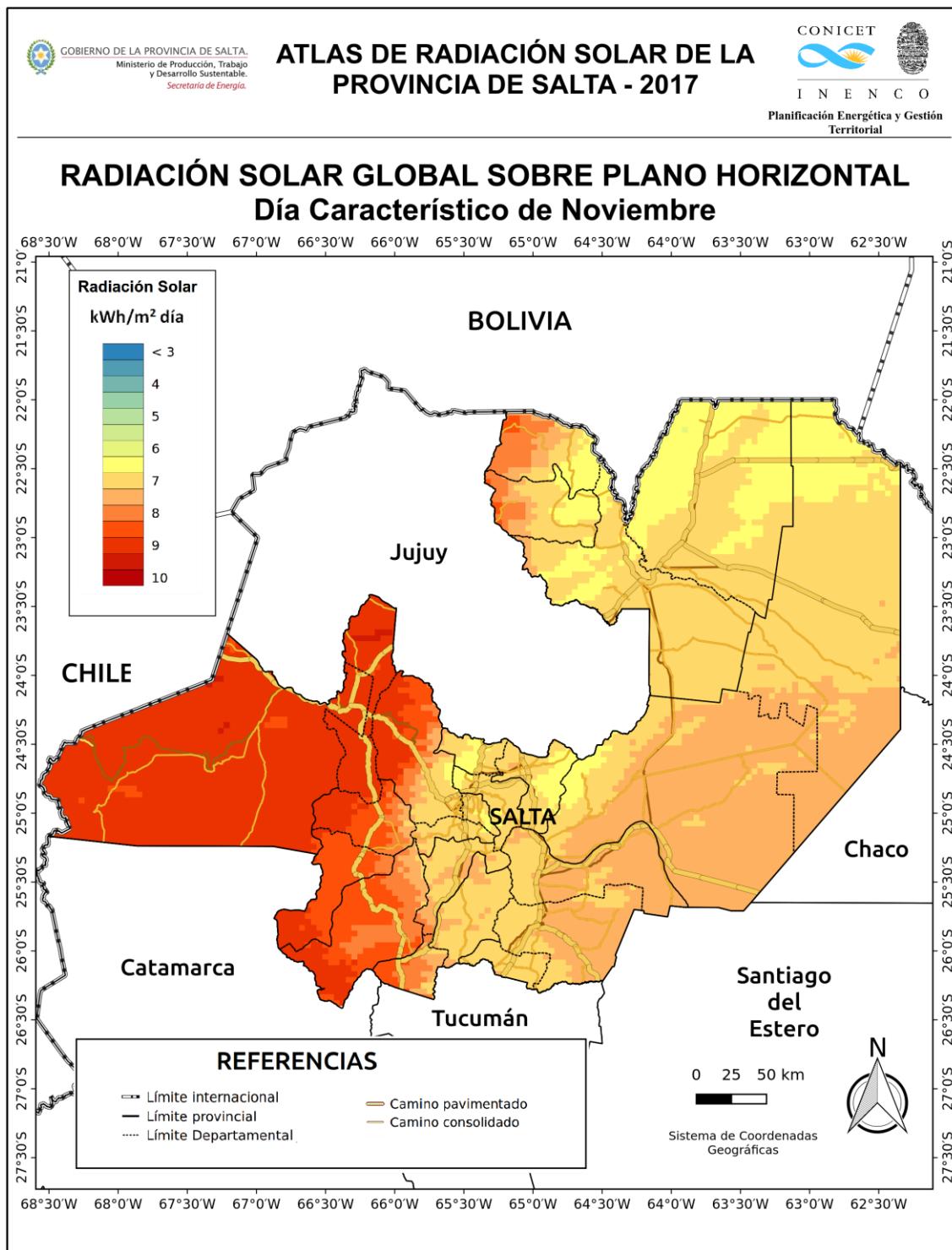
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

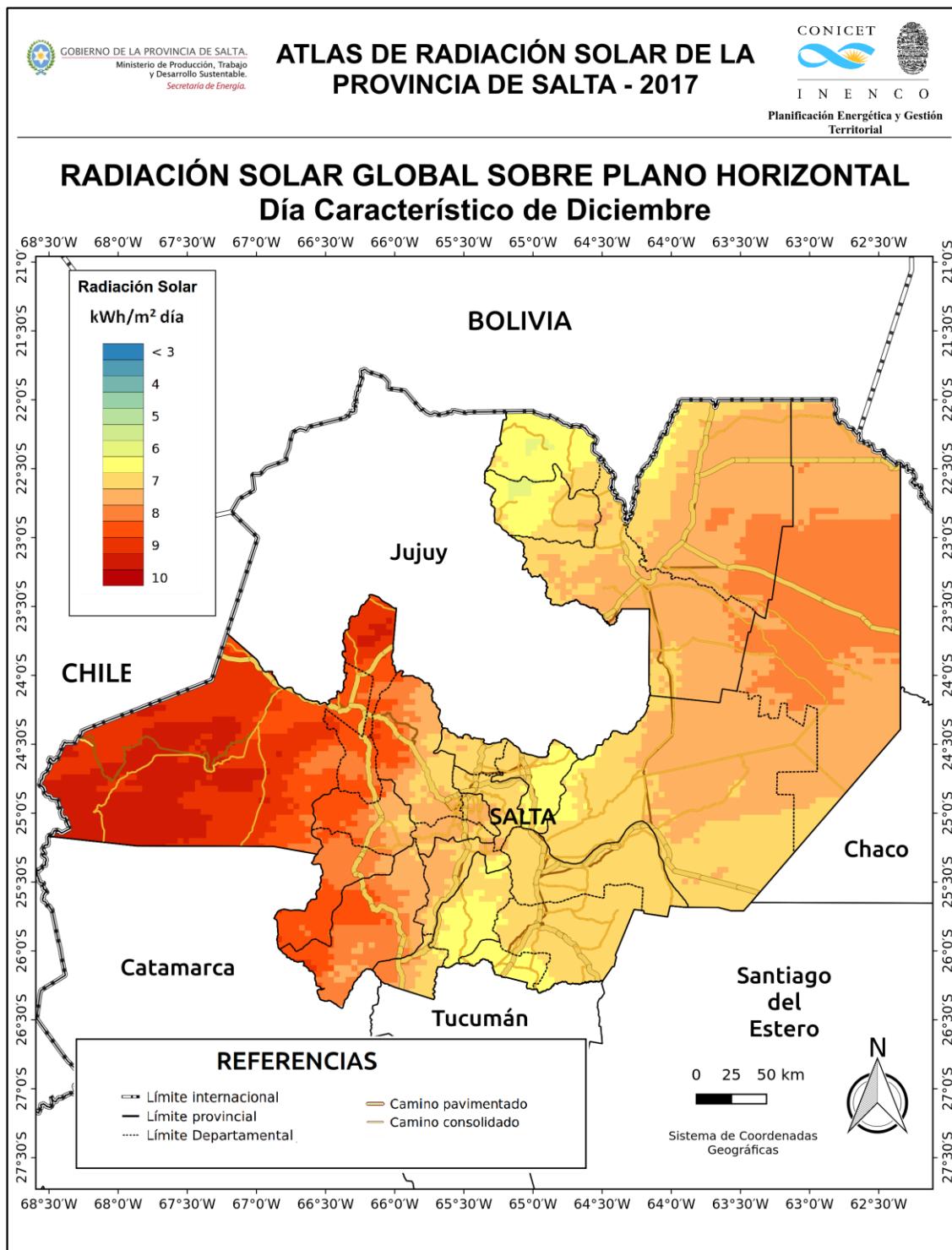
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

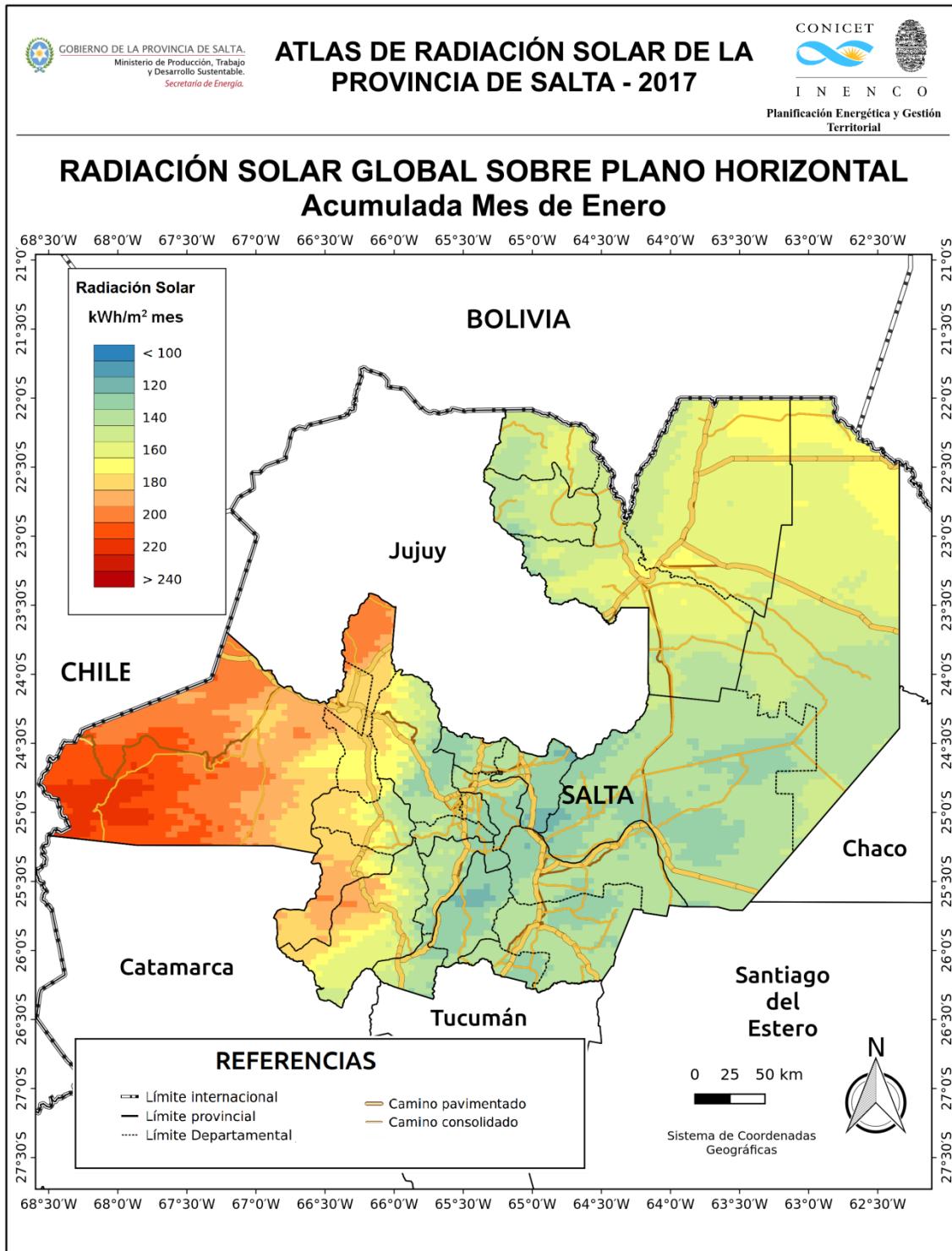
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

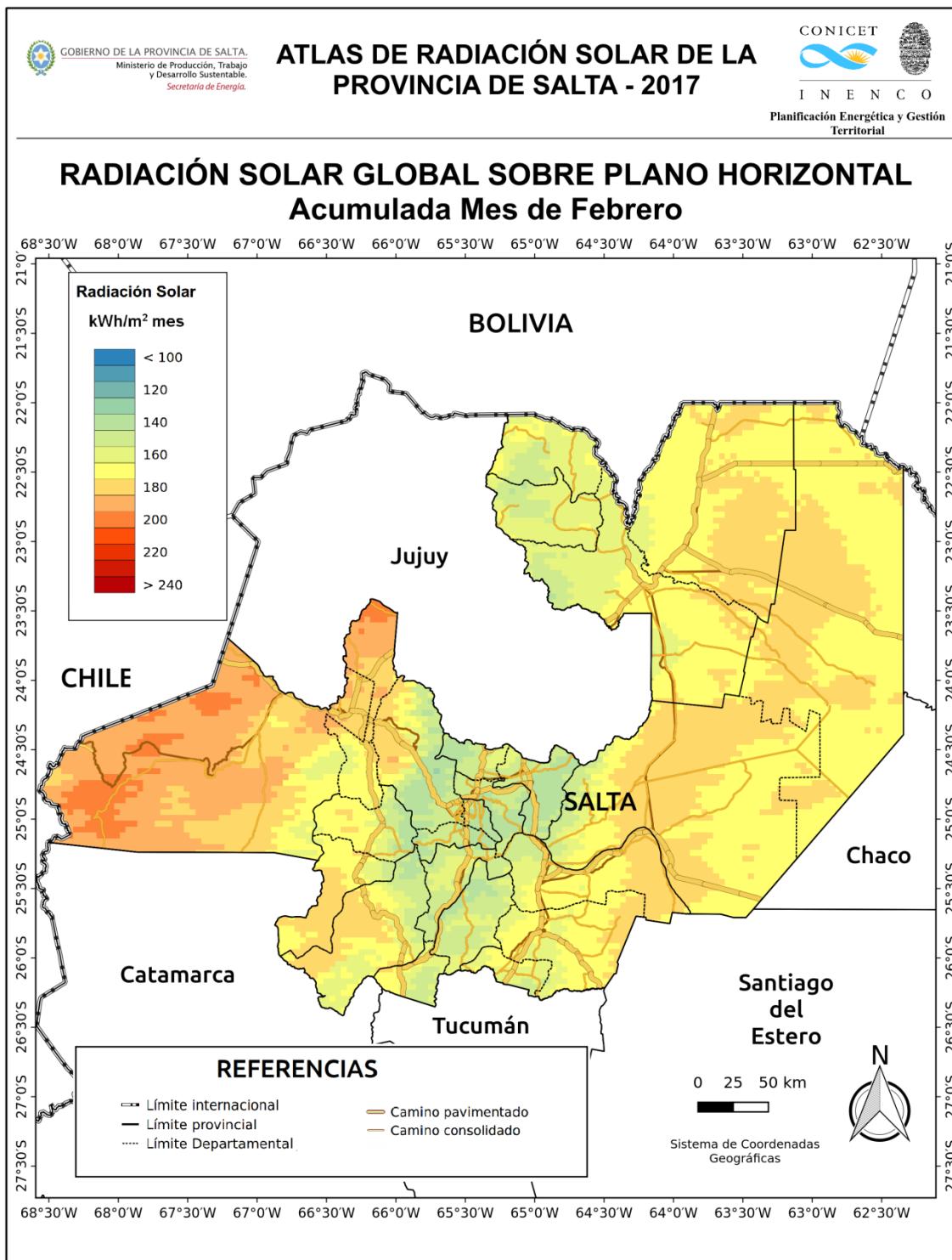
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

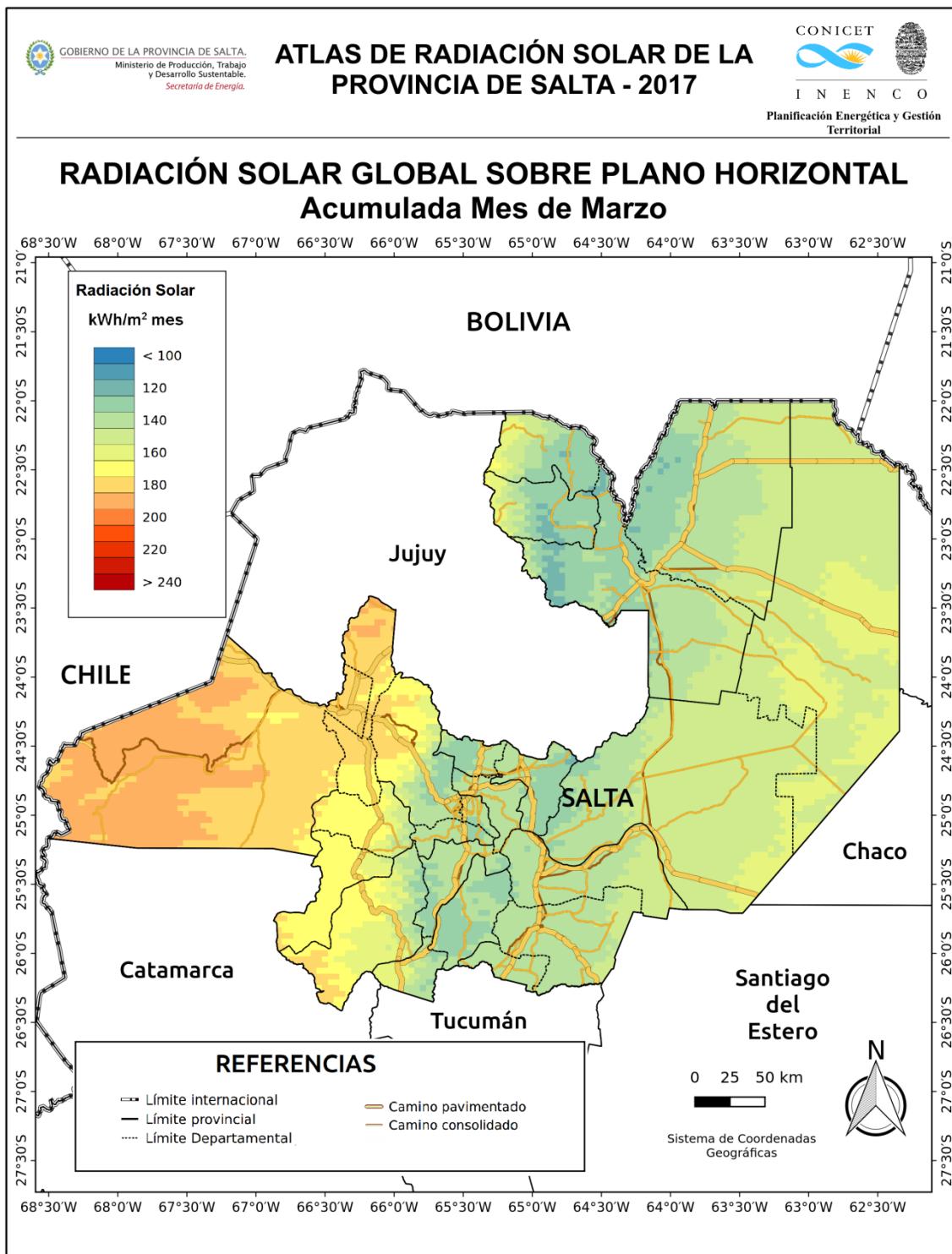
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

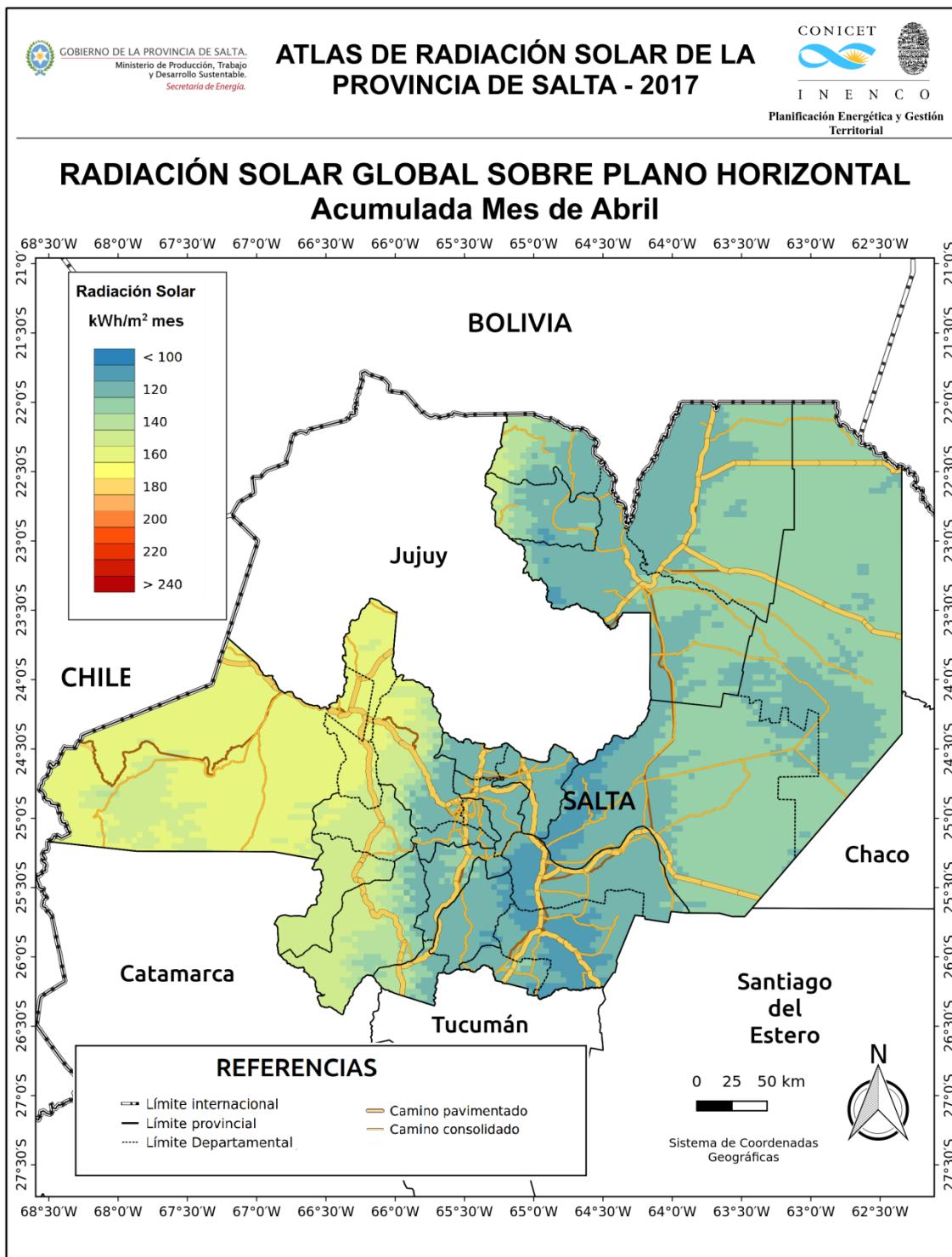
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

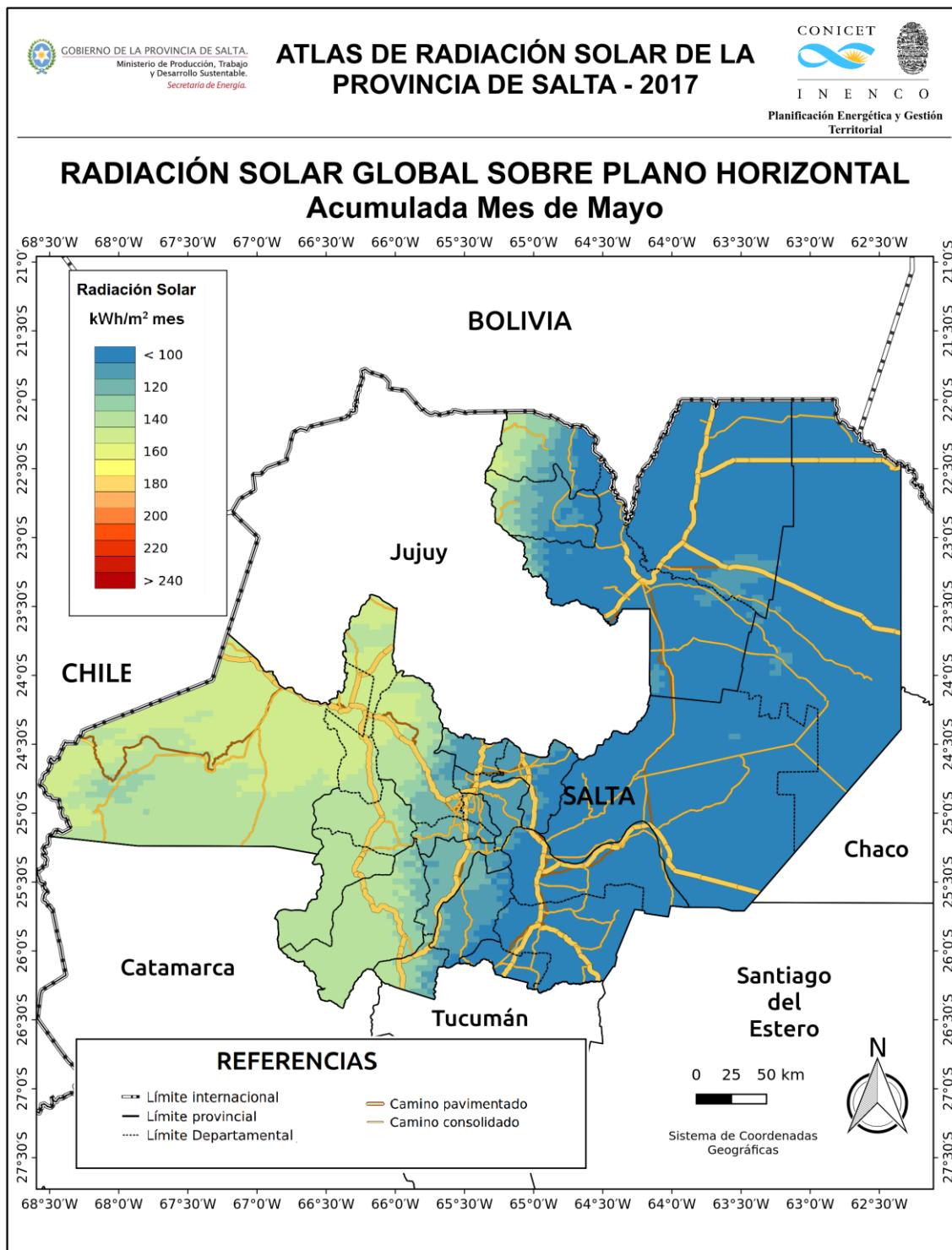
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

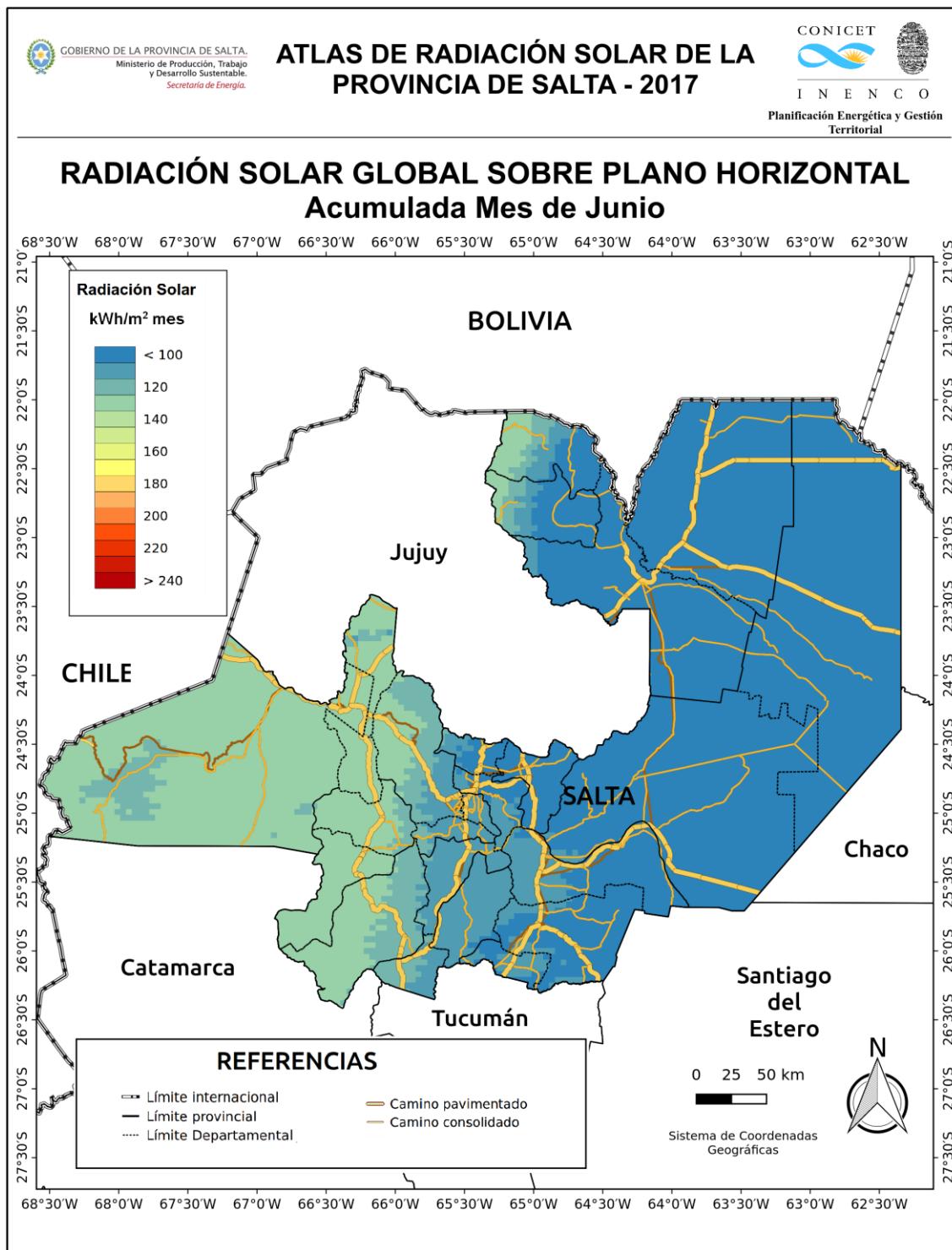
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

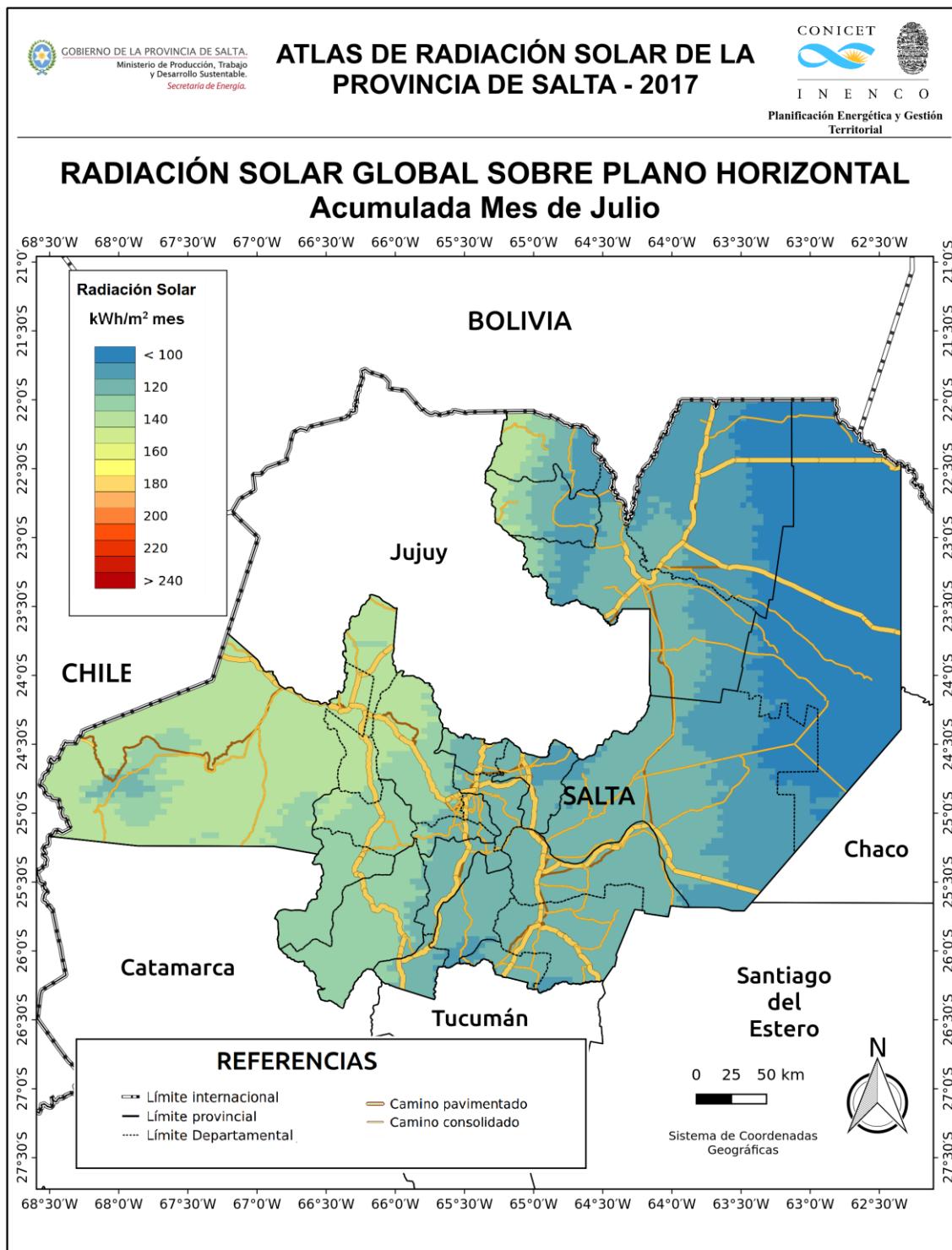
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

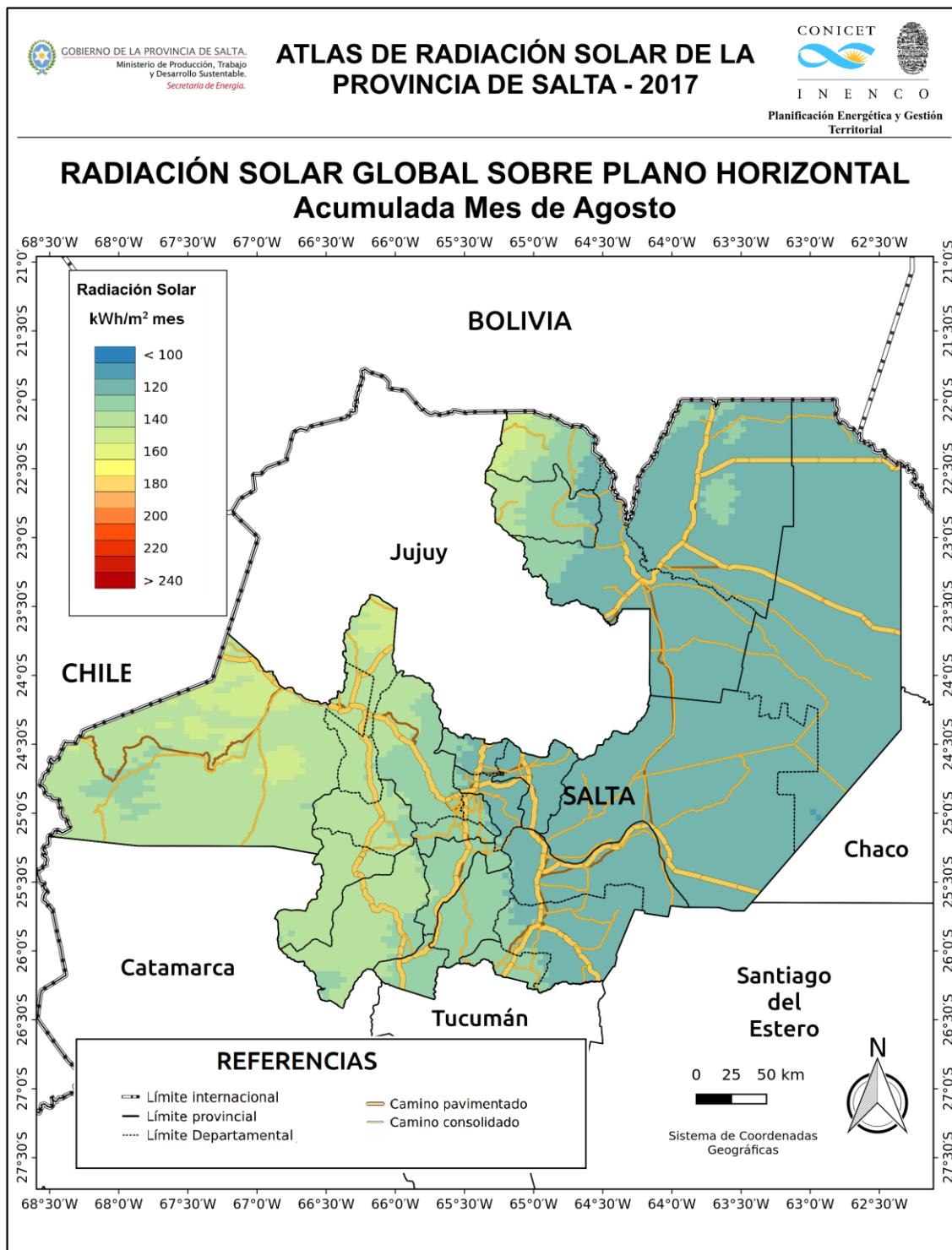
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

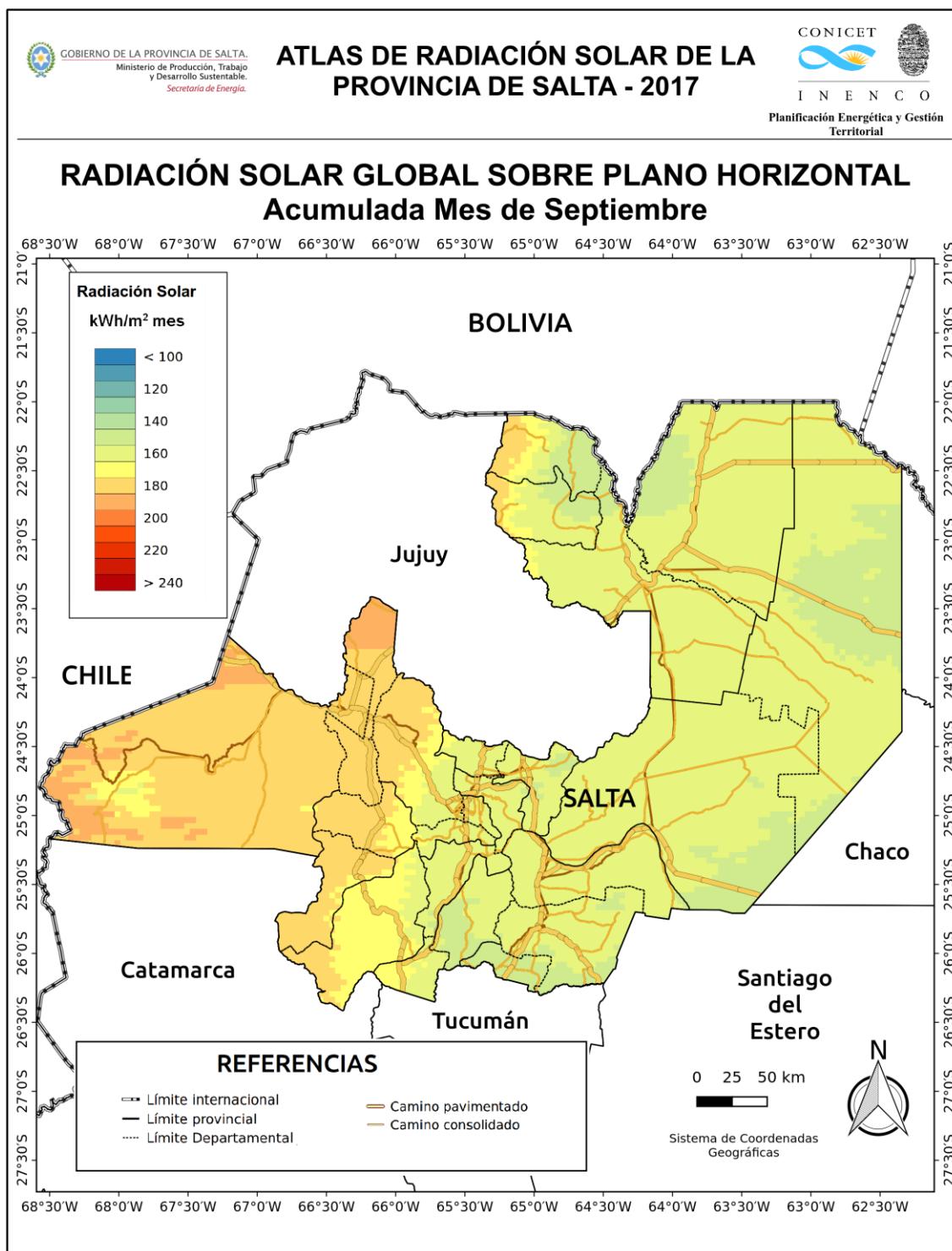
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

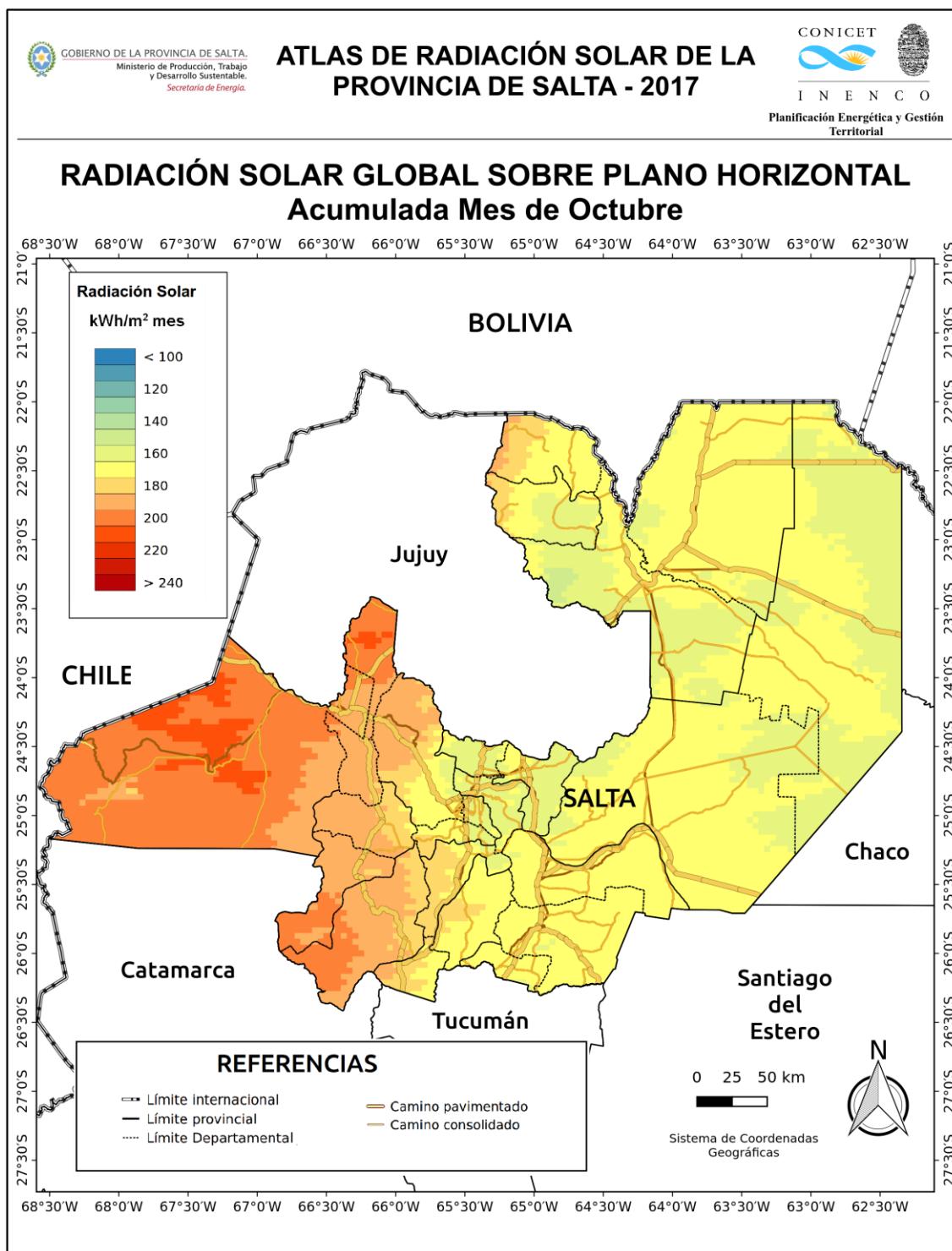
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

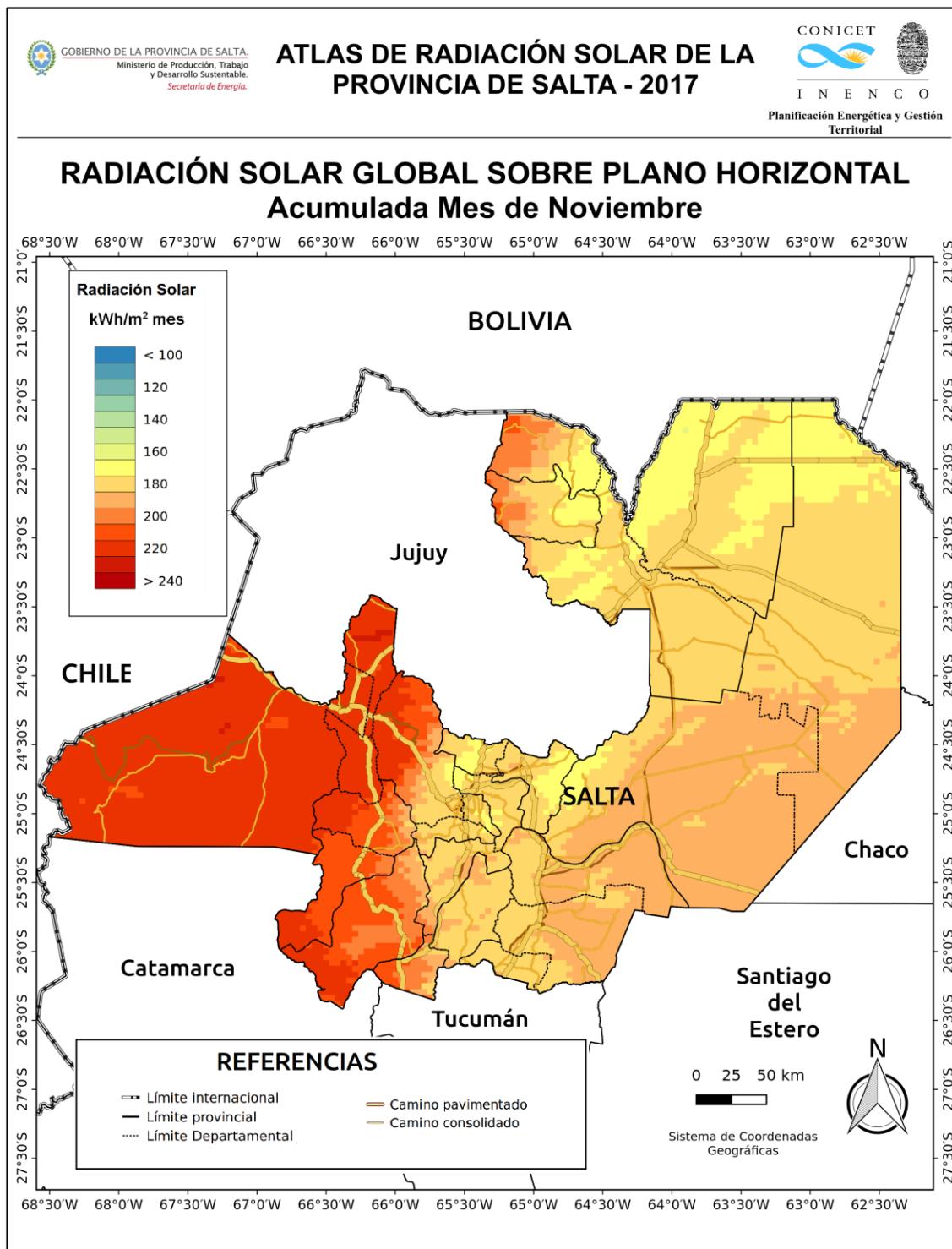
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

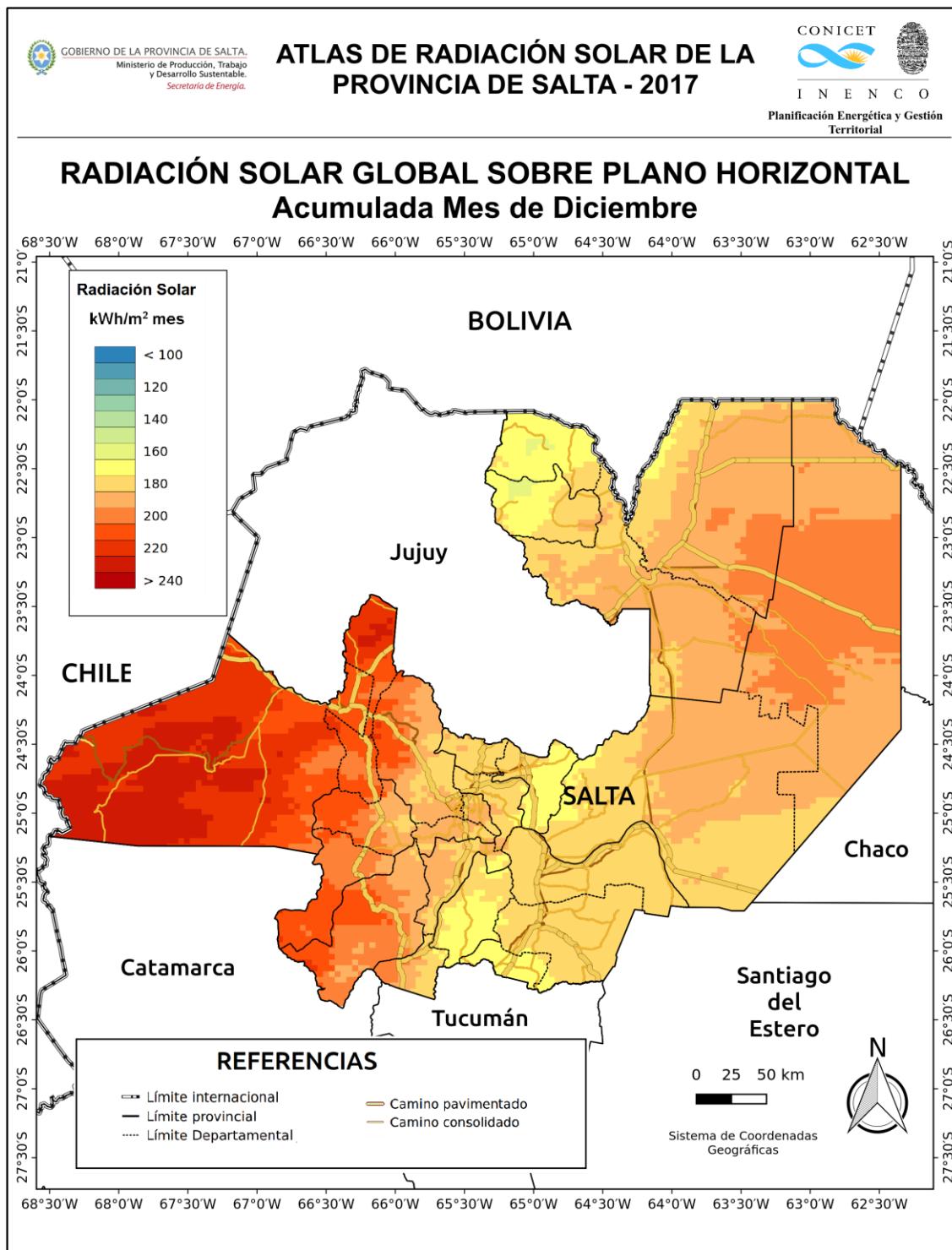
Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO





INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ENERGIA NO CONVENCIONAL  
Grupo Planificación Energética y Gestión Territorial  
Proyecto de Investigación Plurianual - CONICET

Atlas de Radiación Solar de la Provincia de Salta – 2017 – INFORME TÉCNICO

