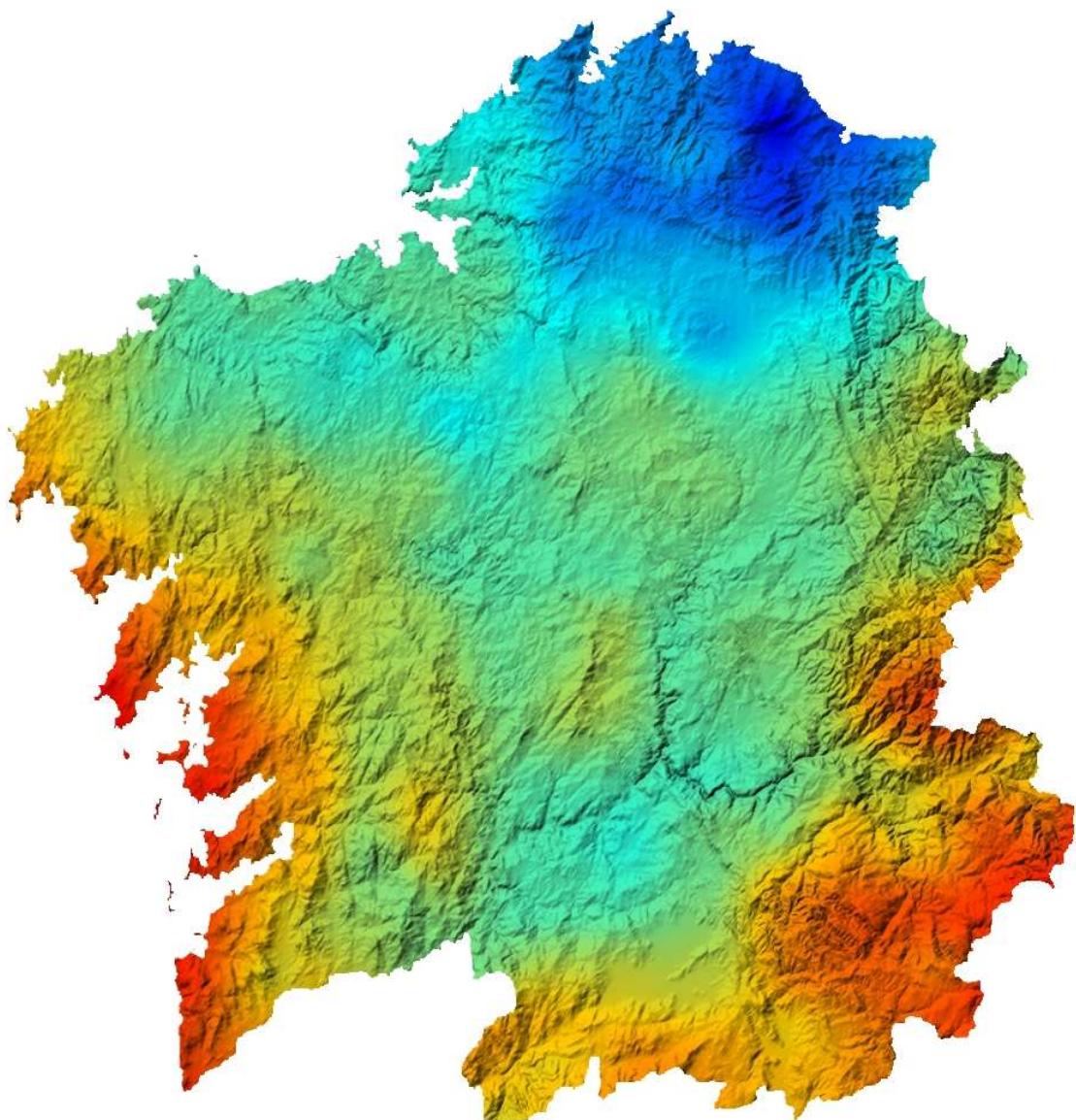


Atlas de Radiación Solar de Galicia



XUNTA DE GALICIA

Edita: XUNTA DE GALICIA

Conselleria de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructura (MeteoGalicia,
Área de Observación e Climatología)

Autores: Alberto Pettazzi, Santiago Salsón Casado

Año: 2011

Presentación

El desarrollo tecnológico y socio-económico registrado a nivel mundial en los últimos cuarenta años ha venido acompañado por una demanda energética siempre creciente; esta tendencia está reduciendo rápidamente las reservas planetarias de combustibles fósiles. Diferentes estudios señalan que el pico de extracción está próximo a alcanzarse, lo cual quiere decir que a partir de ese momento estas fuentes de energía entrarán en fase de agotamiento y encarecimiento de precios.

Al mismo tiempo, la utilización masiva de combustibles fósiles plantea el problema de la sostenibilidad ambiental y por esta razón se están llevando a cabo acciones enfocadas a la reducción de contaminantes y al fomento de tecnologías alternativas.

En este contexto, el empleo de fuentes de energía renovables se propone como una solución eficaz al problema, puesto que son inagotables, limpias y no perjudican los recursos naturales destinados a las generaciones futuras.

Entre las fuentes renovables, la energía solar destaca por su disponibilidad y por el hecho que se puede consumir en el mismo lugar donde se genera, minimizando así su impacto ambiental.

Debido al complejo patrón climático de Galicia, caracterizado por abundantes precipitaciones y elevada nubosidad, el empleo de la energía solar en esta Comunidad ha tenido un desarrollo paulatino. Sin embargo, estudios previos indican que los valores de insolación son superiores a los de otros países, como Alemania, donde el recurso solar está ampliamente explotado. Por lo tanto, también en Galicia, el aprovechamiento de este recurso solar resulta viable y representa una opción energética al alcance de todos.

Para utilizar correctamente la energía procedente del sol, es necesario caracterizarla de la manera más precisa y fiable posible. La tecnología actual - compuesta por satélites

meteorológicos, aplicaciones informáticas avanzadas y sensores cada vez más fiables y asequibles – permite estimar el recurso solar con elevada precisión y resolución, teniendo en cuenta no solo las características climáticas, sino también la topografía de la región.

Así, en este Atlas se recoge por primera vez un análisis pormenorizado de los valores de radiación solar en Galicia donde el Servicio Meteorológico Gallego, MeteoGalicia, ha analizado series temporales de datos de satélite con una duración de 23 años, complementadas con los valores observados en nuestra red de estaciones meteorológicas distribuidas por todo el territorio gallego. La obra además se complementa con mapas georreferenciados en formato digital que seguro permitirán a las empresas e investigadores en la materia mejorar el desarrollo de las energías renovables - en particular la energía solar - en Galicia, y ayudar a crear un futuro más sostenible.

Agustín Hernández Fernández de Rojas

Conselleiro de Medio Ambiente, Territorio e Infraestruturas

Índice

Presentación.....	3
1. Introducción.....	7
2. Contenido del Volumen.....	9
3. Herramientas de análisis.....	11
3.1 Medidas de insolación derivadas de imágenes de satélite.....	11
3.2 Otros productos de satélite	12
3.3 Medidas de insolación en superficie.....	12
3.4 Aplicaciones informáticas	13
4. Metodología de estudio	14
4.1 Elaboración de los mapas climáticos de insolación e índice de claridad	14
4.2 Elaboración de los mapas acoplados a modelo digital de terreno	17
5. Análisis de los resultados	19
5.1 Mapas de insolación y horas de sol para cielo despejado.....	19
5.2 Mapas procedentes de imágenes de satélite	22
5.3 Comparación de los resultados con estudios previos	28
6. Conclusiones.....	32
Referencias	35
Anexo A - Mapas de Insolación para cielo despejado.....	39
Anexo B - Mapas de Horas de Sol para cielo despejado.....	53
Anexo C - Mapas climáticos de Insolación	67
Anexo D - Mapas climáticos de Insolación sobre Modelo Digital del Terreno.....	81
Anexo E - Mapas climáticos de Índice de Claridad	95
Anexo F - Mapas de Fracción de Cubierta de Nubes	109
Glosario	123

1. Introducción

El sol proporciona a la Tierra toda - o casi - la energía necesaria para alimentar los procesos físicos y biológicos que tienen lugar en el planeta. La energía solar representa, además, la principal fuente de energía renovable disponible y, como todas las energías renovables, es inagotable, limpia y se puede consumir directamente en el mismo lugar en el que se produce.

A lo largo de su historia, el hombre ha intentado aprovechar al máximo este recurso con todos los medios que la tecnología le ha permitido. Hoy en día, el aprovechamiento de la radiación solar tiene como objetivo principal la producción de energía eléctrica y térmica.

A pesar de su abundancia – el sistema Tierra-Atmósfera recibe en una hora más de lo que las actividades humanas consumen en un año [1] – el aprovechamiento de la energía solar está condicionado por el nivel tecnológico, por las características geográficas, meteorológicas y climatológicas del lugar de aplicación. Por esta razón, es fundamental conocer de la forma más precisa posible la cantidad y la distribución de la radiación solar que incide en un determinado lugar, así como su variación a escala diaria, mensual y anual.

La insolación característica de una región particular se suele representar por medio de mapas mensuales y anuales que se realizan a partir de medidas en superficie ubicadas en determinados lugares. Con adecuadas técnicas de interpolación y extrapolación se pueden obtener, de valores puntuales, mapas válidos para toda la región. Además, la llegada de los satélites meteorológicos, ha permitido desarrollar metodologías para estimar con buena precisión la irradiancia superficial en un número de puntos ampliamente superior al número de sensores normalmente disponibles.

En la literatura existen numerosos trabajos relacionados con la estimación del recurso solar en una región determinada. A nivel europeo, el primer Atlas de radiación solar se remonta al año 1979 [2]. A día de hoy, la referencia está representada por el proyecto *ESRA (European Solar Radiation Atlas)* que propone mapas de radiación solar y otros parámetros de interés generados a través del tratamiento conjunto de datos de estaciones y medidas de los satélites geoestacionarios Meteosat [3].

A nivel nacional, la única referencia oficial es el *Atlas de la Radiación Solar de España* [4], que presenta mapas mensuales y anuales de horas de sol e irradiación global calculados en el periodo 1951-1983 a partir de observaciones en superficie. Debido a la antigüedad del trabajo, los resultados obtenidos son susceptibles de ser mejorados en cuanto a resolución y metodología empleada.

Un estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña ha estimado la irradiación global en la Península Ibérica a partir de las imágenes procedentes del satélite polar NOAA a lo largo del periodo 1998-2002 [5]. En este trabajo, la elevada resolución espacial de los mapas – 1 km frente a los 5 km del Meteosat – se ha logrado en detrimento de la baja resolución temporal de los datos empleados.

A nivel regional, el Grupo de Investigación de Energía Solar y Refrigeración de la Universidad de Vigo ha estimado la irradiación global en Galicia a partir de las imágenes procedentes del satélite Meteosat MSG-1 durante el periodo 2002-2004 [6]. Para ello, los datos de satélite han sido calibrados considerando representativa una sola estación meteorológica para todo el territorio gallego y la validación de los resultados se ha llevado a cabo frente a otra estación.

En la literatura también se pueden encontrar estudios enfocados a evaluar el recurso solar por medio de modelos de transferencia radiativos (MTR) acoplados a modelos digitales del terreno (MDT) e imágenes de satélite [7], [8]. Estas técnicas permiten

estimar la radiación solar en zonas de topografía compleja, como la gallega, y con una resolución espacial muy elevada.

Tomando como referencia los trabajos mencionados anteriormente, este Atlas tiene el objetivo de complementarlos en el ámbito de la comunidad gallega. Por esta razón, se ha analizado una serie temporal de datos de satélite de 23 años así como series de datos de radiación solar procedentes de 28 estaciones distribuidas en todo el territorio de Galicia.

Los mapas de irradiación así generados se completan con otros productos – irradiación y horas de sol teóricas, índice de claridad, fracción de cubierta nubosa – para proporcionar al usuario un conjunto de datos completo y de alta resolución espacial para Galicia.

2. Contenido del Volumen

El presente Atlas propone un conjunto de mapas - promedios mensuales y anuales - de una serie de parámetros útiles para evaluar el aprovechamiento del recurso solar en Galicia. Además de las ilustraciones, que contienen información más bien cualitativa, los mapas se ofrecen en formato digital (formato Geotiff) para su empleo en sistemas de información geográfica permitiendo, de esta manera, un aprovechamiento cuantitativo de los productos elaborados. En este trabajo se muestra la metodología seguida para la realización de los mapas, así como así como los resultados obtenidos en el proceso de validación.

Los productos ofrecidos en este Atlas se exponen a continuación:

- **Mapas climáticos de insolación**, obtenidos a partir de imágenes de los satélites Meteosat a lo largo del periodo 1985–2008. Los valores de insolación procedentes

de satélite han sido calibrados empleando los valores de insolación de 14 estaciones. Los mapas así obtenidos se han validado con las medidas procedentes de otras 14 estaciones.

- **Mapas climáticos de Índice de Claridad**, obtenidos a partir de los mapas climáticos de insolación y del modelo de transferencia radiativa para cielo despejado. El Índice de Claridad, K_T , definido como la fracción de radiación solar extraterrestre que alcanza el suelo, es un parámetro que indica no solo la disponibilidad del recurso solar, sino también las variaciones de las condiciones atmosféricas en un determinado lugar [9]. El Índice de Claridad se emplea también en modelos de transferencia radiativa para estimar la radiación solar que alcanza la superficie [10]
- **Mapas de insolación y horas de sol para cielo despejado**, calculadas a partir de valores climáticos de turbidez de la atmósfera, albedo y de un modelo de transferencia radiativa acoplado a un modelo digital de terreno (resolución de 270 m). Estos mapas proporcionan informaciones sobre los valores máximos teóricos permitidos a lo largo del año por la compleja topografía gallega.
- **Mapas de insolación generados a partir de modelo de transferencia radiativa acoplado a modelo digital del terreno e imágenes de satélite**. Este producto combina los resultados de los mapas climáticos de insolación con un modelo digital del terreno. De esta forma se puede ver el efecto producido por los factores climáticos que modulan la radiación solar (nubes, nieblas, turbidez de la atmósfera) sobre la topografía de Galicia.
- **Mapas de fracción de cubierta nubosa**, obtenidos a partir de imágenes de satélite a lo largo del periodo 2005–2009. Estos datos han sido proporcionados por el servicio SAF-Climate Monitoring, resultado de la colaboración conjunta de los servicios

meteorológicos finlandés, sueco, suizo, belga, alemán y holandés para generar y distribuir productos derivados de satélite relacionados con la climatología.

3. Herramientas de análisis

Para llevar a cabo este Atlas, se han empleado distintos conjuntos de datos procedentes de diferentes fuentes, así como se ha recurrido a distintas herramientas informáticas. A continuación se va a describir brevemente cada uno de ellos.

Medidas de insolación derivadas de imágenes de satélite

A partir del año 1980 se publican diferentes estudios que estiman la radiación solar a partir de datos procedentes de satélite [11], [12]. Entre ellos destaca el método Heliosat-2 [13], que emplea las imágenes de la banda visible de los satélites geoestacionarios. El método Heliosat-2 se basa en el principio según el cual la cantidad de nubes sobre una determinada área determina estadísticamente la radiación global incidente en el área. La estimación de la insolación se lleva a cabo en dos pasos: primero se calcula para cada píxel de la imagen el índice de nubosidad, que se emplea, en un segundo momento, para evaluar estadísticamente la radiación global.

Se ha demostrado que el método Heliosat-2 estima la radiación solar con suficiente precisión para generar mapas climatológicos, con una resolución de 10 km, sobre grandes regiones [14].

Los valores de irradiancia determinados a través de esta metodología están disponibles, a partir del año 1985, en Internet por medio del proyecto HelioClim (www.helioclim.org) [15]. Este servicio proporciona también otros parámetros relacionados con la radiación solar, como por ejemplo el factor de turbidez de Linke, que se ha empleado para generar los mapas de insolación y horas de sol teóricas presentados en este Atlas.

Otros productos de satélite

Los datos de albedo superficial y de fracción de cubierta nubosa han sido proporcionados por el servicio SAF-Climate Monitoring (www.cmsaf.eu) en forma de promedios mensuales para el periodo 2005-2009 y tienen una resolución de 15 km. Los datos proporcionados por este servicio fueron derivados a partir de las observaciones de los satélites Meteosat de segunda generación, NOAA y METOP.

El albedo - definido como la fracción de radiación solar reflejada por una superficie – es uno de los factores que determinan el balance radiativo de la Tierra. En el proceso de validación, se ha demostrado que los valores de albedo superficial derivados de satélite subestiman las medidas en el suelo en un 15% [16].

Las nubes también desempeñan un papel importante en el balance energético e hídrico de la Tierra. En particular, las nubes son el elemento que contribuye mayormente al albedo planetario.

La fracción de cubierta de nubes se define como el porcentaje de píxeles cubiertos por nubes detectados en el interior de una región de (15x15) km. Los valores así calculados han demostrado tener un error del 10% en latitudes medias [17].

A lo largo del presente trabajo se han empleado también imágenes del satélite Meteosat MSG-2 para detectar los días despejados a lo largo del año 2009. Concretamente, se han empleado las imágenes quincenales del canal visible de alta resolución.

Medidas de insolación en superficie

Las estimaciones de satélite han sido complementadas con medidas de insolación en superficie, llevadas a cabo por piranómetros instalados en distintas estaciones meteorológicas. En este trabajo se han seleccionado principalmente estaciones que pertenecen a la red de la Xunta de Galicia y que son gestionadas por MeteoGalicia,

servicio meteorológico regional (www.meteogalicia.es; Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras).

La insolación se mide en 75 estaciones por medio de piranómetros; los datos diezminutales analizados abarcan el periodo 2001-2009, aunque no todas las estaciones tienen la misma longitud de series de datos.

En este trabajo se han incluido también datos de insolación procedentes de la red de estaciones del Estado, gestionada por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología; www.aemet.es). Concretamente, se han incluido las estaciones de Coruña-Observatorio (periodo 1985-2002) y de Vigo-Peinador (periodo 1980-1991).

Aplicaciones informáticas

Los productos derivados de satélite y de las estaciones meteorológicas, así como los valores de turbidez de la atmósfera han sido procesados por medio de distintas aplicaciones informáticas: bases de datos, sistemas de información geográfica (GIS), herramientas de interpolación y control de calidad.

Antes de guardarse en una base de datos, los datos de radiación procedentes de satélite y de las estaciones meteorológicas han sido sometidos a un proceso de control de calidad, disponible también vía web, que pretende eliminar los valores extremos (inusualmente altos o bajos) [18]. Los datos de las estaciones de la Xunta de Galicia, además, se someten diariamente a rutinas operacionales de control de calidad gestionadas por el departamento de Climatología y Observación de MeteoGalicia [19].

Los mapas han sido generados por medio del software GIS GRASS (Geographic Resources Analysis Support System) [20]. Dentro del paquete de utilidades que incluye GRASS, hace falta destacar el módulo r.sun [21], que permite estimar las componentes de la radiación solar – directa, difusa, reflejada – y las horas de sol modulándolas sobre un modelo digital del terreno. De esta forma, es posible tener en cuenta los efectos de

sombreado causados por la topografía del terreno sobre superficies adyacentes y también la orientación e inclinación de ellas.

Esta aplicación proporciona valores instantáneos y acumulados diarios, según las necesidades del usuario. El módulo r.sun emplea un modelo de transferencia radiativa (MTR) para cielo despejado basado en el modelo empleado para el Atlas Europeo de Radiación Solar [22] y necesita como parámetros de entrada el albedo superficial, el coeficiente de Turbidez de Linke y un modelo digital del terreno. Aunque se emplee un MTR para cielo despejado, proporcionando información adicional sobre el estado del cielo, es posible estimar la radiación solar en condiciones de cielo cubierto.

Finalmente, para realizar los mapas ha sido necesario utilizar unas herramientas de interpolación geoestadística, proporcionadas por el software Surfer (Golden Software Inc., Golden, Colorado, EEUU).

4. Metodología de estudio

Elaboración de los mapas climáticos de insolación e índice de claridad

Para realizar los mapas climáticos de insolación ha sido necesario llevar a cabo tres tareas principales, que se detallan a continuación:

- ***Recopilación de datos de satélite.*** Las estimaciones de insolación diaria a partir de imágenes de satélite se han recogido por medio del servicio SoDa (Solar Radiation Data; <http://www.soda-is.com/eng/index.html>) [23] incluido en el proyecto HelioClim. Los valores de insolación han sido deducidos por el método Heliosat-2. Se han seleccionados los valores entre las latitudes 41.5° N-44° N y las longitudes 6.5° O-9.75° O con una resolución de 0.05°, aproximadamente 5 km a estas latitudes.

De esta forma se ha obtenido una malla de 3366 puntos, y cada uno de ellos contiene los datos diarios de insolación a lo largo del periodo 1985-2008.

Los valores así obtenidos se han insertado en una base de datos, donde han sido procesados para obtener los promedios mensuales de insolación. Por medio del software GRASS y de la técnica de interpolación por splines, se han generado los mapas con una resolución de 270 m.

- ***Recopilación de datos de estaciones meteorológicas.*** Los datos procedentes de las estaciones han sido sometidos a un proceso de validación que tiene el objetivo de eliminar los valores de irradiación diaria anormalmente altos (mayores que el 110% de la irradiación para cielo despejado) o bajos (menores que el 3% de la irradiación extraterrestre). Posteriormente, se ha llevado a cabo un análisis visual para detectar posibles fallos sistemáticos de los piranómetros. Para cada estación, se han comparado los valores diarios de irradiación con los de otras estaciones cercanas y con características similares a la primera. Finalmente, se han obtenido los promedios mensuales de insolación.

Este proceso de filtrado ha reducido el conjunto de estaciones a 28, de las cuales 14 han sido seleccionadas para la calibración de los datos de satélite y otras tantas para la validación de los mapas así obtenidos. La selección de los dos conjuntos se ha hecho de manera que los grupos fuesen lo más parecidos posible entre ellos por tipo de sensor, ubicación y serie temporal. Los resultados se muestran en la Tabla 1 y en la Fig.1.

- ***Calibración de los datos de satélite con las medidas superficiales.*** El cálculo de los residuos ha permitido llevar a cabo la calibración de los datos de satélite con las medidas procedentes de las estaciones. En primer lugar se ha calculado la diferencia entre los valores mensuales de insolación estimados por el método Heliosat-2 y los

medidos en el suelo. A continuación, las diferencias obtenidas se han interpolado para toda Galicia por medio de la técnica geoestadística Kriging [24], pues esta metodología está recomendada para interpolar datos de radiación solar procedentes de estaciones meteorológicas [25]. Finalmente, los mapas climáticos se han obtenido sumando los datos de satélite originales a los residuos interpolados anteriormente.

Para realizar los mapas climáticos del Índice de claridad K_T , definido como la fracción de radiación solar extraterrestre que llega al suelo, ha sido necesario calcular la radiación extraterrestre incidente en la atmósfera. Este parámetro se ha calculado por medio del módulo GRASS r.sun, suponiendo un modelo digital del terreno completamente llano, y valores nulos de albedo superficial y Turbidez de Linke.

<i>Conjunto de calibración</i>			<i>Conjunto de validación</i>		
Estación	Periodo	Sensor	Estación	Periodo	Sensor
Ferrol	07/2001-12/2009	Schenk	Pedro Murias	07/2001-12/2009	Schenk
Alto do Rodicio	07/2001-12/2009	Schenk	Coruña	01/1985-08/2002	n. d.
Ancares	09/2001-12/2009	Schenk	Marco da Curra	05/2004-12/2009	Schenk
Sambreixo	07/2005-12/2009	Schenk	Guitiriz	07/2006-12/2009	Schenk
Santiago EOAS	07/2005-12/2009	Schenk	Pol	02/2006-12/2009	Schenk
Baltar	09/2005-12/2009	Skye	Fontecada	10/2003-12/2009	Schenk
Foz	03/2006-12/2009	Skye	Melide	07/2007-12/2009	Skye
Olas	06/2006-12/2009	Skye	Conchada	10/2006-12/2009	Schenk
As Petarelas	12/2006-12/2009	Schenk	Castrove	06/2007-12/2009	Skye
O Xipro	09/2007-12/2009	Skye	Monte Medo	08/2005-12/2009	Skye
Sanxenxo	12/2006-12/2009	Skye	Vigo Campus	06/2006-12/2009	Middleton
Malpica	08/2005-12/2009	Schenk	Viana do Bolo	06/2005-12/2009	Li-Cor
Serra do Faro	12/2005-12/2009	Skye	Verín	04/2007-12/2009	Skye
Vigo Peinador	01/1980-06/1991	n. d.	Entrimo	09/2006-12/2006	Skye

Tab. 1: Características principales de los conjuntos de calibración y validación empleados

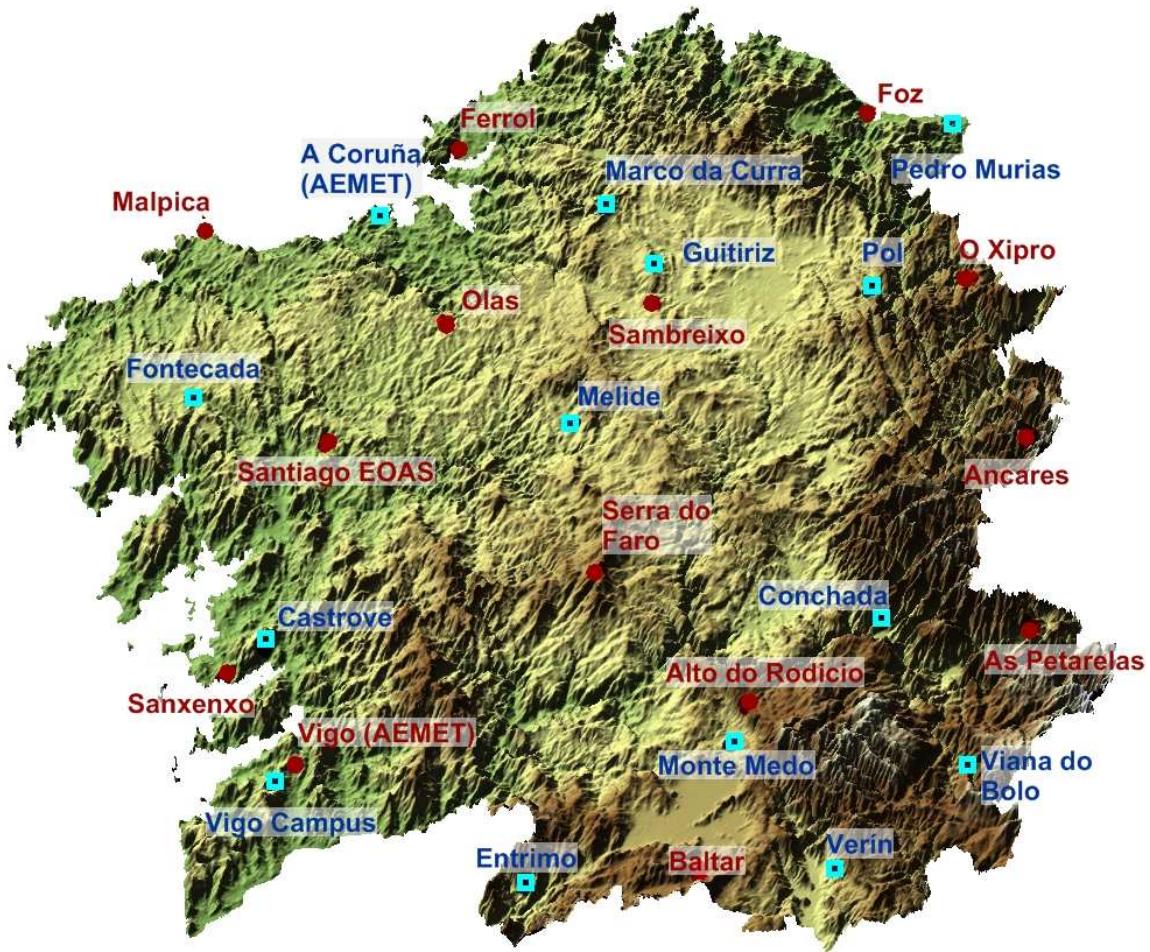


Fig. 1: Ubicación de los conjuntos de estaciones de calibración (en rojo) y de validación (en azul)

Elaboración de los mapas acoplados a modelo digital de terreno

Los productos generados usando el modelo de transferencia radiativa junto con el modelo digital de terreno son de dos tipos: mapas generados en condiciones de cielo despejado, y mapas generados teniendo en cuenta la cubierta nubosa.

- **Mapas con cielo despejado.** Se han generado para cada mes del año unos mapas de insolación global diaria y horas de sol, que representan los valores máximos que estos parámetros pueden alcanzar en Galicia. Para generar los mapas mensuales, se ha ejecutado el módulo r.sun para cada día del año y luego se ha calculado el promedio a lo largo del mes. Se ha empleado un modelo digital del terreno con resolución de 270 m y albedo superficial promediado mensualmente a lo largo del periodo 2005-2009. Para tener en cuenta la turbidez de la atmósfera, se han empleado los valores mensuales del coeficiente de Turbidez de Linke (T_L), proporcionados por el servicio SoDa. Estos datos, obtenidos por medio de distintas técnicas de interpolación a partir de medidas in situ y satélites, tienen una resolución de 5 km y una extensión temporal variable que cubre el periodo 1954-2001 [26]. Para el presente estudio, se han recogido los valores de T_L en 70 puntos de Galicia, en correspondencia de las estaciones meteorológicas de MeteoGalicia, puesto que la ubicación de estas coincide con lugares de particular interés meteorológico y climatológico. Los valores de T_L han sido normalizados al nivel del mar, se han interpolado por esplines a toda la región gallega y luego se han recalculado los valores de T_L corregidos por la altura del modelo digital del terreno [21]. De esta forma se han obtenido doce mapas mensuales con los valores de T_L .
- **Mapas con cubierta nubosa.** Se han generado para cada mes del año unos mapas de insolación global diaria obtenidos por medio del módulo r.sun teniendo en cuenta la cubierta nubosa. Para ello, se ha definido el índice de cielo despejado K_c [21]:

$$K_c = \frac{I}{I_c}$$

Donde I es la insolación medida al suelo e I_c la insolación estimada para condiciones de cielo despejado. En este caso, I es la insolación medida por satélite e I_c es la insolación estimada por el módulo r.sun empleando un modelo digital del terreno con resolución de 5 km. Esta resolución ha sido elegida por que la insolación estimada para cielo despejado tiene que ser comparable con la insolación medida por satélite, que tiene una resolución de 5 km aproximadamente.

A partir de la climatología de K_c así obtenida, los valores de insolación para cielo cubierto han sido obtenidos multiplicando el valor de K_c por la insolación obtenida para cielo despejado a partir de un modelo digital del terreno con 270 m de resolución. De esta forma, se ha podido tener en cuenta del efecto de las nubes sobre un modelo digital del terreno de alta resolución.

5. Análisis de los resultados

Los mapas mensuales y anuales de todos los parámetros analizados están recogidos en los Anexos A-F. Estos mapas han sido sometidos a un proceso de validación, llevado a cabo frente al conjunto de estaciones descrito anteriormente, mediante un análisis estadístico. Para ello, se ha evaluado el comportamiento de la desviación media (Mean Bias Error, MBE), de la desviación media absoluta (Mean Absolute Error, MAE) y del error cuadrático medio (Root Mean Squared Error, RMSE).

Los resultados obtenidos se han comparado con los expuestos en estudios anteriores, para evaluar analogías y diferencias.

Mapas de insolación y horas de sol para cielo despejado

La precisión del módulo r.sun, acoplado al conjunto de datos de entrada anteriormente descrito, ha sido evaluada durante 15 días caracterizados por cielo despejado en toda

Galicia. Los días han sido seleccionados por medio de las imágenes quinceminutales del canal visible de alta resolución del satélite Meteosat MSG-2. Los mapas de insolación diaria obtenidos por el módulo r.sun se han comparado con el conjunto de estaciones de validación. Los resultados se recogen por fecha y por lugar en las Tablas 2 y 3.

Los mapas de horas de sol teóricas no se han validado pues su distribución depende únicamente de parámetros astronómicos (relaciones Tierra-Sol) [27] y topográficos (orientación, pendiente y altitud de las superficies).

Fecha	MBE [%]	MAE [%]	RMSE [%]
01/05/2009	1.06	5.67	6.24
02/05/2009	0.91	5.02	6.13
05/05/2009	-1.22	5.08	5.49
30/05/2009	-0.81	3.89	4.48
31/05/2009	-2.89	3.35	4.59
01/06/2009	-3.51	4.01	4.72
21/06/2009	-3.94	3.98	4.84
11/08/2009	1.85	4.31	5.29
14/08/2009	4.33	5.91	6.79
22/08/2009	2.54	4.3	5.11
29/08/2009	0.71	4.62	5.31
05/09/2009	2.91	6.16	7.77
25/09/2009	5.34	8.91	10.88
14/10/2009	0.08	8.52	10.11
16/10/2009	-3.44	9.56	10.84
Promedio	0.26	5.55	6.57

Tab. 2: Validación temporal del módulo r.sun en días despejados

Analizando los resultados expuestos en Tab. 2, se nota que, en general, el módulo r.sun estima con suficiente precisión la radiación superficial en días despejados. La estimación resulta ser mejor a lo largo del periodo junio-septiembre, cuando hay menor cantidad de nubes y brumas locales que pueden no haber sido detectadas por el satélite.

Analizando los resultados de la validación por zonas (Tab. 3), se nota que el módulo r.sun subestima y sobreestima la radiación en superficie en el mismo número de estaciones. Por lo general, el mejor acuerdo se produce en las estaciones del norte de Galicia.

Los mapas mensuales de insolación generados están recogidos en el Anexo A. Como ha de esperarse, los valores mínimos ocurren en diciembre y los máximos en junio. Analizando las imágenes, se puede notar el efecto de la latitud: los valores de insolación aumentan en dirección de norte a sur. Cabe destacar que, a igual latitud, las zonas de las Rías Baixas reciben más radiación que las del interior; esto se debe a las condiciones climáticas de la atmósfera, caracterizada por valores del coeficiente T_L más bajos en proximidad de la costa que en el interior. De esta forma, una atmósfera menos turbia garantiza valores mayores de radiación.

Estación	MBE [%]	MAE [%]	RMSE [%]
Pedro Murias	-2.02	3.7	4.02
Marco da Curra	-2.31	3.65	4.53
Guitiriz	-3.13	4.55	5.1
Pol	2.49	3.56	4.57
Fontecada	-1.7	2.33	3.73
Melide	-6.27	6.27	6.66
Conchada	6.03	6.11	7.55
Castrove	7.9	10.1	12.3
Monte Medo	-6.41	6.41	7.27
Vigo Campus	5.46	6.52	6.92
Viana do Bolo	-0.64	4.94	6.43
Verín	-2.15	7.79	8.52
Entrimo	5.77	6.44	7.68

Tab. 3: Validación espacial del módulo r.sun en días despejados

Los mapas evidencian también como la topografía de Galicia modifica la insolación recibida: de esta forma, las vertientes norte reciben menos radiación que las expuestas al sur. Este efecto es más evidente en los meses invernales, cuando el sol está más bajo sobre el horizonte. En este periodo se manifiestan valores extremos: comparando las imágenes del Anexo A con las generadas a partir de satélite (Anexo C), se registran valores sensiblemente más bajos en las caras norte (en diciembre, $0.3 \text{ kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ contra $1.08 \text{ kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) y más altos en las caras sur de las laderas (en diciembre, $5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ contra $1.47 \text{ kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Esto se debe al hecho de que el sol, más bajo

sobre el horizonte, incide por menos tiempo sobre las caras norte e incide más perpendicularmente sobre las expuestas al sur.

El análisis de las horas de sol (Anexo B) recalca lo evidenciado en el estudio de la insolación: los valores máximos se alcanzan en el mes de junio y los mínimos en diciembre. Aunque no sea tan pronunciado el efecto latitudinal, la topografía del terreno juega un papel importante en modular la distribución de las horas de sol teóricas: las vertientes norte y las zonas encañonadas, reciben menos insolación y por menor tiempo. En particular, en los meses invernales hay zonas, sobre todo en el cañón del río Sil y en los Ancares, en las que las horas de sol son nulas, incluso con cielo despejado.

Mapas procedentes de imágenes de satélite

Los mapas de radiación elaborados a partir de imágenes de satélite han sido sometidos a un proceso de validación, espacial y temporal, según la metodología descrita anteriormente. En particular, los parámetros estadísticos se han evaluado para tres conjuntos de datos de insolación: procedente de satélite, procedente de satélite y calibrada con las estaciones, estimada con el módulo r.sun corregida por el índice de cielo despejado K_c . Los resultados se ilustran en las tablas 4-9.

Mes	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Enero	1.57	3.29	3.35
Febrero	-15.14	-1.7	-2.08
Marzo	0.74	-3.84	-4.34
Abril	4.34	0.37	-0.25
Mayo	7.61	0.9	0.27
Junio	3.16	-1.14	-1.79
Julio	0.43	-2.04	-2.69
Agosto	-1.21	-1.87	-2.49
Septiembre	-10.71	-3.24	-3.79
Octubre	-8.82	-5.25	-5.7
Noviembre	5.02	-1.84	-2.07
Diciembre	11.85	-1.31	-1.3
Anual	-0.01	-1.47	-1.91

Tab.4: Desviación Media (MBE) [%] obtenida por los distintos conjuntos de datos en los distintos meses del año

Mes	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Enero	9.5	8.65	14.56
Febrero	15.14	6.83	9.85
Marzo	6.57	6.53	7.9
Abril	5.84	5.4	5.42
Mayo	8.12	4.09	4.35
Junio	7.23	5.66	5.7
Julio	6.67	6.1	6.18
Agosto	6.79	4.45	4.88
Septiembre	11.75	5.25	6.08
Octubre	10.67	8.03	9.83
Noviembre	7.03	5.28	10.11
Diciembre	12.06	4.52	12.16
Anual	8.95	5.9	8.09

Tab.5: Desviación Media Absoluta (MAE) [%] obtenida por los distintos conjuntos de datos en los distintos meses del año

Mes	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Enero	12.78	11.64	17.64
Febrero	16.25	9.47	11.85
Marzo	7.97	8.44	9.87
Abril	7.21	6.62	7.07
Mayo	9.75	5.25	5.79
Junio	10.01	6.72	6.99
Julio	9.02	7.26	7.58
Agosto	9.2	5.99	6.48
Septiembre	13.65	6.73	7.44
Octubre	12.97	9.76	11.35
Noviembre	9.31	7.12	12.14
Diciembre	13.77	5.49	14.79
Anual	10.99	7.54	9.92

Tab.6: Error cuadrático medio (RMSE) [%] obtenido por los distintos conjuntos de datos en los distintos meses del año

El análisis temporal de los resultados (Tab. 4-6) evidencia una ligera subestimación de la radiación medida en superficie. Evaluando la insolación únicamente con los datos de satélite, se produce una mayor oscilación del bias, que se va compensando a nivel anual, alcanzando un valor medio de -0.01% (Tab. 4). Sin embargo, analizando mes por mes los valores de MBE, la menor oscilación del bias la producen los datos de satélite

calibrados. También el análisis de la desviación media absoluta (Tab. 5) evidencia la mejor estimación de la radiación solar en superficie por las medidas de satélite calibradas. Concretamente, usando este conjunto de datos se disminuye el MAE de casi un tercio a nivel anual. A nivel mensual, se registran mejoras hasta el 9%, en el mes de febrero. Analizando la desviación típica (RMSE), se confirma lo deducido de los anteriores parámetros estadísticos: exceptuando el mes de marzo, el mejor conjunto que estima la insolación resulta ser el de los datos de satélite calibrados.

Estación	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Pedro Murias	11.4	8.85	6.88
Coruña (AEMET)	-2.69	-5.93	-10.64
Marco da Curra	-4.24	-2.65	-14.92
Guitiriz	-4.6	0.38	2.95
Pol	-7.43	-1.45	6.03
Fontecada	5	4.7	7.79
Melide	-6.57	-4.92	-4.99
Conchada	-2.17	-3.5	1.29
Castrove	0.01	2.1	6.58
Monte Medo	5.36	-1.89	-5.78
Vigo Campus	-3.79	-9.11	-11.65
Viana do Bolo	3.03	0.18	-5.3
Verín	-2.92	-8.43	-7.7
Entrimo	8.28	0.84	2.79

Tab.7: Desviación Media (MBE) [%] obtenida por los distintos conjuntos de datos en las distintas estaciones

Estación	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Pedro Murias	14.84	8.85	7.14
Coruña (AEMET)	4.4	6.85	10.64
Marco da Curra	6.53	2.65	14.92
Guitiriz	9.27	3.72	4.31
Pol	11.63	4.36	8.53
Fontecada	7.8	4.78	7.79
Melide	10.68	6.33	6.4
Conchada	5.9	3.71	3.63
Castrove	8.84	4.89	7.3
Monte Medo	7.54	5.44	6.02
Vigo Campus	6.35	9.73	12.34
Viana do Bolo	7.73	3.19	5.66
Verín	11.95	10.94	10.8
Entrimo	11.8	6.91	7.71

Tab.8: Desviación Media Absoluta (MAE) [%] obtenida por los distintos conjuntos de datos en las distintas estaciones

Estación	Satélite	Satélite Calibrado	r.sun corregido
Pedro Murias	16.59	10.58	9.04
Coruña (AEMET)	7.05	8.1	12.45
Marco da Curra	8.87	3.48	17
Guitiriz	11.3	4.45	6.02
Pol	14.42	5.49	11
Fontecada	8.98	6.11	8.8
Melide	13.42	8	8.05
Conchada	8.07	4.36	4.59
Castrove	10.29	6.7	9.44
Monte Medo	10.08	6.18	7.08
Vigo Campus	7.63	11.12	14.03
Viana do Bolo	8.26	4	8.35
Verín	13.19	12.39	12.42
Entrimo	14.78	10.36	12.11

Tab.9: Error cuadrático medio (RMSE) [%] obtenido por los distintos conjuntos de datos en las distintas estaciones

El análisis espacial de los resultados (Tab. 7-9) evidencia que en 8 estaciones la irradiación derivada a partir de datos de satélite subestima las medidas en superficie. Así, el conjunto de datos que mejores resultados proporciona resulta ser el de datos de satélite calibrados, exceptuando las estaciones de Vigo-Campus y de Coruña. En estos casos, la mayor desviación obtenida por el satélite calibrado frente a la obtenida considerando únicamente los datos de satélite, se debe principalmente a fenómenos locales, sobre todo en Vigo. Aquí, la estación de calibración de Vigo-Peinador está ubicada en una zona caracterizada por nieblas y por lo tanto el proceso de calibración ha proporcionado, para toda la zona de alrededor, valores de irradiación menores que los reales. Considerando únicamente los datos de satélite se obtiene un mejor acuerdo con la estación de validación Vigo-Campus, ya que la resolución del Meteosat (5 km) no permite apreciar este fenómeno local.

Hace falta destacar también que el módulo r.sun acoplado a los datos de satélite calibrados proporciona resultados mejores que los obtenidos considerando únicamente

los datos de satélite, pero peores respecto al conjunto satélite más medidas. Esto es debido a que el modulo r.sun así configurado lleva consigo los errores propios sumados a la incertidumbre asociada al conjunto satélite-medidas.

En conclusión, el proceso de validación ha permitido establecer que las mejores estimaciones de irradiación se obtienen a partir de los datos de satélite calibrados con medidas en superficie.

En el Anexo C se recogen, por lo tanto, los mapas climáticos de insolación obtenida a partir de datos de satélite calibrados con medidas en superficie. Los mapas se presentan sobrepuertos al modelo digital del terreno, para poder apreciar el efecto que la topografía gallega ejerce sobre la radiación recibida.

Como cabe esperar en el hemisferio norte, los valores máximos de insolación ocurren entre junio y julio, y los mínimos entre diciembre y enero. Analizando las imágenes, se nota cómo el efecto latitudinal, que aparece evidenciado en los mapas de insolación teórica (Anexo A), es mitigado por otros factores. En primer lugar, la radiación incidente se ve condicionada por la topografía. Debido a este factor, se pueden apreciar valores más altos en zonas elevadas: los Ancares, en la provincia de Lugo, las Serras do Faro y do Suido en la provincia de Pontevedra, las montañas de la provincia de Ourense (Serra do Eixe, da Queixa y do Xurés). De la misma manera, se observan valores más bajos en la proximidad de los valles: el ejemplo más evidente está representado por el cañón del río Sil, limitado por las Serras do Eixe y do Courel y por la zona donde este río confluye con el río Miño.

Otro factor que influye en la distribución de la insolación es el clima: una atmósfera menos turbia y con menos nubes proporcionará más radiación, como en el caso de las Rías Baixas, que reciben los valores de irradiación más altos de Galicia. La presencia de nieblas en los valles y en las llanuras reduce considerablemente la cantidad de radiación

que alcanza el suelo, como en el caso de la Terra Cha. El efecto conjunto de la topografía y del clima resulta evidente en la Mariña Lucense, donde las nieblas costeras se quedan atrapadas entre la costa y la barrera natural representada por la Serra do Xistral: en esta zona se registran a lo largo de todo el año los valores de insolación más bajos de toda Galicia. Este efecto se ve más acentuado en los meses de verano, como demuestran también trabajos anteriores [28], [29].

Los mapas generados incorporando los datos calibrados de satélite en el módulo r.sun se ilustran en el Anexo D. En estos mapas se estima la insolación superficial teniendo en cuenta el efecto conjunto de la atenuación de la radiación debida a las nubes y del modelo digital del terreno. Analizando los mapas, y comparándolos con los de Anexo A, se puede notar que las características climáticas de la atmósfera reducen la radiación que llega al suelo de manera variable según la zona. La atenuación es mayor en los meses invernales, debido a la mayor presencia de nubes y precipitaciones. En este periodo, las nubes dejan pasar entre el 50% y el 60% de la radiación que se recibiría si el cielo fuera despejado. En verano, la atenuación es del (20-30) % en toda Galicia, exceptuando las zonas de la Mariña Lucense y del cañón del Sil, donde se alcanzan valores del 40%. Este efecto se puede ver claramente en las Fig. D-6 - D-8.

En el Anexo E se recogen los mapas del Índice de Claridad K_T . Como cabe esperar, la distribución de los valores recalca la distribución de la insolación, representada en el Anexo C. Analizando los mapas mensuales, se observa que los valores más altos de K_T se encuentran en las Rías Baixas y en las montañas de la provincia de Ourense. En los meses de verano, estas regiones alcanzan valores típicos de cielo despejado ($K_T \geq 0.6$) [30]. Las zonas con los valores más bajos de Índice de Claridad son las de la Mariña Lucense.

Comparación de los resultados con estudios previos

El rango de valores de los distintos parámetros obtenidos en este trabajo, así como su variación espacial y temporal, han sido comparados con otros estudios anteriormente publicados.

La agencia espacial norteamericana (NASA) muestra en su página web (<http://earth-www.larc.nasa.gov/cgi-bin/cgiwrap/solar/sse.cgi>) mapas mensuales de insolación y de K_T derivados de satélite a lo largo durante el periodo 1983-2005. En las Fig. 2-a y 2-b, pueden verse los promedios anuales de insolación y K_T , respectivamente.

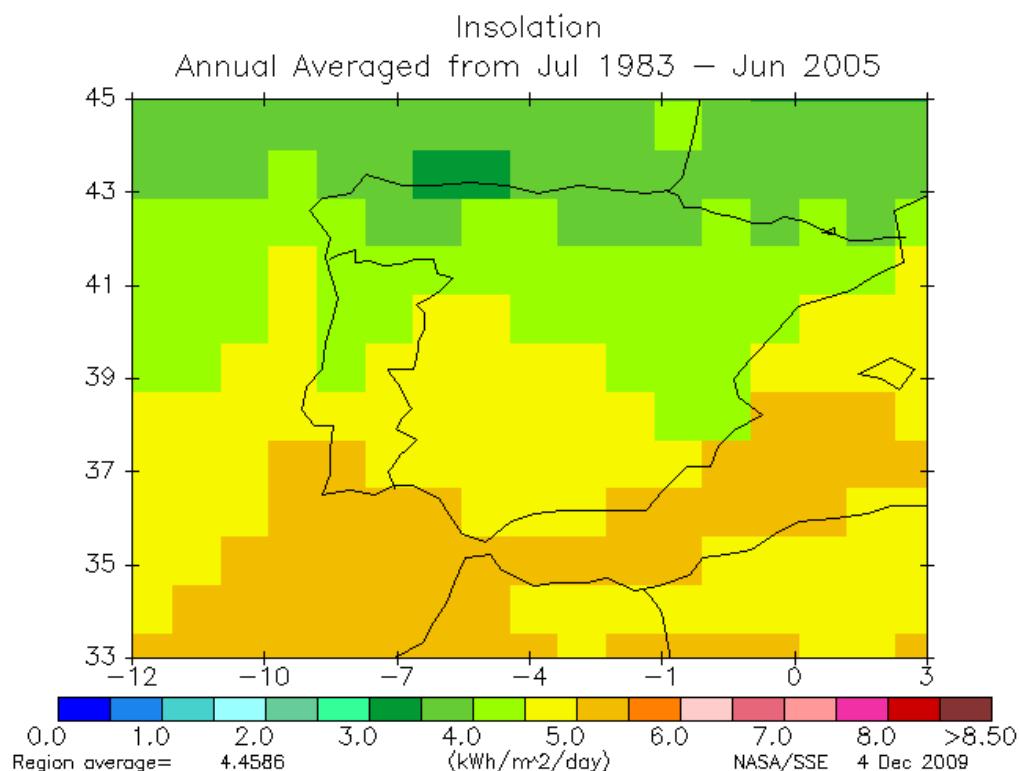


Fig. 2-a: Distribución anual de la insolación en la península ibérica (Fuente: NASA)

A pesar de la baja resolución de las imágenes (90 km aproximadamente), se puede notar que para ambos parámetros el rango de valores coincide con el de los mapas en las Fig. C-1 y E-1. También la distribución espacial parece coincidir, con la zona norte de la

provincia de Lugo caracterizada por menores valores de radiación solar. El análisis de los mapas mensuales confirma también el buen acuerdo entre los dos conjuntos de datos.

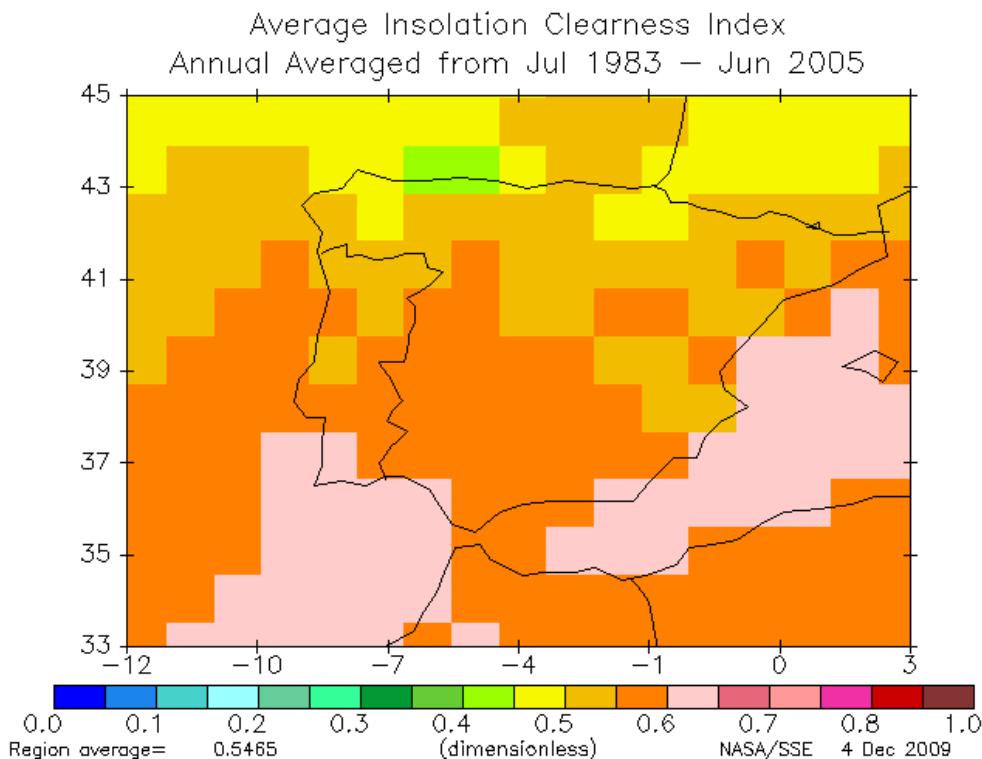


Fig. 2-b: Distribución anual del Índice de Claridad en la península ibérica (Fuente: NASA)

Analizando el trabajo de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) [5], se aprecia un buen acuerdo en los rangos de valores de irradiación y las distintas zonas climáticas también coinciden. Sin embargo, el análisis estadístico muestra que la precisión alcanzada es inferior, con valores medios anuales de MBE y RMSE de -3.8% y 24.2% respectivamente. En el presente Atlas se han obtenidos MBE y RMSE de -1.47% y 7.54% respectivamente. Esto se debe principalmente a dos factores: la elección del tipo de satélite y el conjunto de estaciones de validación y de calibración. En el estudio de la

UPC se ha escogido un satélite polar, que asegura una elevada resolución espacial en detrimento de una menor resolución temporal, y los resultados se han comparado frente a 2 estaciones ubicadas en la costa.

El Atlas de radiación solar de Galicia publicado por la Universidad de Vigo [6] ha evidenciado que la radiación en esta comunidad aumenta al disminuir la latitud y del interior hacia la costa. Analizando los mapas contenidos en el Anexo C, se observa el papel importante que desempeñan las características topográficas y climáticas de Galicia. En particular, resultan determinantes la altitud y las condiciones atmosféricas de cada sitio.

En las Tablas 10 y 11 se muestran los resultados de la validación del anterior Atlas frente al conjunto de estaciones empleado en el presente trabajo.

Analizando los promedios mensuales (Tab. 10), se observa que los mapas presentados en el Anexo C obtienen mejores valores de MAE y RMSE. A nivel anual, el MBE del Atlas de la Universidad de Vigo es mejor, pero las desviaciones mensuales son en general más amplias.

Analizando el promedio anual en cada estación (Tab. 11), la desviación media anual obtenida en el anterior Atlas es generalmente mejor, pero el análisis de la desviación media absoluta y del error cuadrático medio demuestra que los mapas publicados en el Anexo C proporcionan una mayor precisión.

Finalmente, los mapas contenidos en la referencia oficial para España [4] difieren notablemente de los presentados en los del Anexo C, sobre todo en la distribución espacial. Según la fuente oficial, la ciudad de Pontevedra recibe anualmente la misma insolación que el norte de la provincia de Lugo y los máximos absolutos los recibe la zona alrededor de la ciudad de Lugo.

Mes	MBE [%]	MAE [%]	RMSE [%]
Enero	5.5	9.2	11.62
Febrero	-16.06	16.06	17.61
Marzo	3.4	8.15	9.37
Abril	6.83	7	8.5
Mayo	11.11	11.11	11.98
Junio	8.79	9.95	11.76
Julio	4.17	5.02	6.92
Agosto	-4	6.72	8.37
Septiembre	-4.58	8.59	10.24
Octubre	-14.44	15.96	17.66
Noviembre	3.99	8.25	10.05
Diciembre	1.14	6.21	7.4
Anual	0.49	9.35	10.96

Tab. 10: Validación temporal del anterior Atlas de radiación solar de Galicia elaborado por la Universidad de Vigo

Estación	MBE [%]	MAE [%]	RMSE [%]
Pedro Murias	14.99	15.32	16.31
Coruña (AEMET)	-0.64	4.09	5.04
Marco da Curra	0.36	4.97	7.05
Guitiriz	1.56	9.16	10.2
Pol	-1.23	10.48	12.77
Fontecada	-0.95	6.01	8.38
Melide	-2.82	10.18	12.89
Conchada	0.9	7.11	8.54
Castrove	-2.29	11.17	13.07
Monte Medo	4.24	7.71	9.30
Vigo Campus	-7.48	10.52	12.06
Viana do Bolo	0.24	8.49	9.88
Verín	-2.64	14.8	16.42
Entrimo	2.6	10.89	12.38

Tab. 11: Validación espacial del anterior Atlas de radiación solar de Galicia elaborado por la Universidad de Vigo

6. Conclusiones

Para el correcto aprovechamiento del recurso solar es fundamental conocer de la forma más precisa posible la cantidad y la distribución de la radiación solar que incide en un determinado lugar, así como su variación a escala diaria, mensual y anual.

Este Atlas nace con el objetivo de proporcionar el conjunto más actualizado de datos relacionados con la radiación solar en Galicia a fecha de hoy. Así, se han elaborados mapas mensuales y anuales de insolación real y teórica, horas de sol teóricas, índice de claridad y fracción de cubierta nubosa. Estas tareas se han llevado a cabo empleando datos de satélite, de estaciones meteorológicas y un modelo de transferencia radiativo acoplado a un modelo digital del terreno. Los mapas generados se ofrecen también en formato digital para el aprovechamiento cuantitativo de los datos obtenidos.

Los resultados evidencian que la mejor precisión se alcanza fusionando las medidas de insolación procedentes de satélite con las medidas en superficie. De esta manera, los promedios anuales de la desviación media absoluta y del error cuadrático medio toman valores de 5.9% y 7.54% respectivamente, contra los 8.95% y 10.99% que se obtienen usando únicamente los datos de satélite. A nivel mensual, las mejoras pueden ser aún más amplias.

El empleo de un modelo de transferencia radiativo acoplado a un modelo digital del terreno ha demostrado también ser una herramienta válida para estimar la irradiación y las horas de sol teóricas; por medio de esta metodología es posible tener en cuenta con gran detalle los efectos de sombreado causados por la topografía del terreno sobre superficies adyacentes y también la orientación e inclinación de ellas. El proceso de validación de los resultados ha demostrado que, para días despejados, la desviación media absoluta y el error cuadrático medio asumen valores anuales de 5.55% y de 6.57%, respectivamente. Por medio del coeficiente de cielo despejado K_c , se han

modulado los mapas teóricos de insolación con los valores procedentes de satélite.

Como era de esperar, los mapas así generados tienen una incertidumbre ligeramente superior que la asociada al conjunto de datos de satélite calibrado, pero resultan ser una herramienta igualmente útil para estudios que requieren un nivel de detalle muy alto.

Comparando los resultados obtenidos en este trabajo con estudios previos, se obtiene, por lo general, un buen acuerdo en el rango de valores de irradiación, pero hay diferencias en su distribución espacial. Esto se debe principalmente al proceso de calibración, dado que en los otros estudios, éste ha sido realizado con pocas estaciones.

En cualquier caso, los mapas presentados en este Atlas mejoran notablemente la resolución espacial de los estudios anteriores.

Analizando los mapas de insolación contenidos en este Atlas, se observa que este parámetro está condicionado fuertemente por la topografía y por las características climáticas. Por eso, la zona que menos insolación recibe, en media, es la de la Mariña Lucense ($3 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y la que más es la de las Rías Baixas ($4.2 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). A lo largo del año, Galicia recibe entre $1.08 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y $7.22 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Comparado con el resto de España, se puede afirmar que la zona norte de la provincia de Lugo es una de las regiones del país que menos radiación recibe en todo el año. Sin embargo, las Rías Baixas reciben solo el 20% menos de la radiación que alcanza las zonas más soleadas de la Península.

El análisis de los mapas de índice de claridad K_T y de fracción de nubes muestra la misma tendencia que los mapas climáticos de insolación, evidenciando la elevada variabilidad de las condiciones atmosféricas de Galicia. En particular, las Rías Baixas y el sur de la provincia de Ourense, en los meses de verano, son las únicas zonas con cielo despejado. Al contrario, la zona norte de la provincia de Lugo está caracterizada por una alta concentración de nubes durante todo el año.

Referencias

- [1] Morton O. (2006). *Solar energy: A new day dawning?: Silicon Valley sunrise.* Nature, Nature 443, 19-22.
- [2] CCE (1979). *Atlas européen du rayonnement solaire, Vol.I: rayonnement global sur des surfaces horizontales.* Première édition. Grösschen Verlag, Dortmund.
- [3] Aguiar A., Albuison M., Beyer H. G., Borissenkov E. P., Bourges B., Czeplak G., Lund H., Joukoff A., Scharmer K., Page J. K., Trezenbach U., Wald L. (2000). *The European solar radiation Atlas. Vol. I: Fundamentals and maps. Vol. II: Database and exploitation software.* École des mines de Paris.
- [4] Font Tullot I. (1984). *Atlas de la radiación solar en España.* Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones. Madrid.
- [5] Vera Mella N. (2005). *Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península ibérica.* Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- [6] Vázquez Vázquez M., Santos Navarro J. M., Prado Cerqueira M. T., Vázquez Ríos D., Rodrigues Fernandes F. M. (2005). *Atlas de radiación solar de Galicia.* Universidad de Vigo.
- [7] Núñez, M., Reyes J. J., Marroquín A., Ramiro A. (2004). *Mapas de valores medios mensuales de irradiación solar estimados para Extremadura a partir de otros datos meteorológicos.* XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española. Badajoz, 11-13 febrero 2004.
- [8] Batlles F. J., Polo J., Rosiek S., Zarzalejo L., Martínez M., Ramírez L., Bosch J. L., Espinar B., Pozo. D. (2006). *Estimación de la radiación global diaria en zonas de topografía compleja utilizando modelos digitales del terreno e imágenes de*

Meteosat: comparación de los resultados. XXIX Jornadas Científicas de la Asociación Meteorologica Española. Pamplona, 24-26 abril 2006.

- [9] Kudish A. I., Ianetz A. (1996). *Analysis of daily clearness index, global and beam radiation for Beer Sheva, Israel: partition according to day type and statistical analysis.* Energy conversion and management, 37, 4, 405-416.
- [10] Celik A. N. (2002). *A simplified model based on clearness index for estimating yearly performance of hybrid PV energy systems.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 10, 8, 545-554.
- [11] Hiser H. W., Senn H. V. (1980). *Mesoscale mapping of available solar energy available at Earth's surface by use of satellites.* Solar Energy, 24, 2, 129-141.
- [12] Cano D., Monget M., Albuison M., Guillard H., Regas N., Wald L. (1986). *A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data.* Solar Energy, 37, 1, 31-39.
- [13] Rigollier C., Lefèvre M., Wald L., (2004). *The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation data from satellite images.* Solar Energy, 77(2), 159-169.
- [14] Lefèvre M., Wald L., Diabaté L., (2007). *Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance.* Solar Energy, 81, 240-253.
- [15] Cros S., Lefèvre M., Albuison M., Wald L., (2004). *From meteorological satellite data to solar radiation climatological products: the HelioClim database.* European Geophysical Union, 1st general assembly, Geophysical Research Abstracts, vol. 6.
- [16] EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (2009). Surface Broadband Albedo Product User Manual. Ref.: SAF/CM/FMI/PUM/SAL Version 1.1

- [17] EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (2009). Clouds Product User Manual. Ref.: SAF/CM/DWD/PUM/CLOUDS Version 1.2
- [18] Geiger M., Diabaté L., Ménard L., Wald L., (2002). *A Web service for controlling the quality of global solar irradiation.* Solar Energy, 73, 6, 475-480.
- [19] Secretaría xeral de calidade e avaliación ambiental (2009). *Proceso de recepción e validación de datos, Integración na serie histórica validada.* PO 07.04.03. Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestruturas. Xunta de Galicia.
- [20] Neteler M., Mitasova H. (2007). *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach.* Third edition. Springer, New York.
- [21] Hofierka J., Súri M. (2002). *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications.* GRASS users conference. Trento, Italia, 11-13 septiembre 2002.
- [22] Rigollier C., Bauer O., Wald L. (2000). *On the clear sky model of the ESRA – European Solar Radiation Atlas – with respect to the Heliosat method.* Solar Energy, 68, 1, 33-48.
- [23] Wald L., Albuisson M., Best C., Delamare C., et al. (2002). *SoDa: a project for the integration and exploitation of networked solar radiation databases.* Environmental Communication in the Information Society. 713-720.
- [24] Webster R., Oliver M. A. (2007). *Geostatistics for environmental scientists.* Second Edition. Wiley & Sons, Ltd.
- [25] Beyer H., Czeplack G., Terzenbach U., Wald L. (1997). *Assessment of the method used to construct clearness index maps for the new European Solar Radiation Atlas (ESRA).* Solar Energy, 61, 6, 389-397.

- [26] Remund J., Wald L., Lefévre M., Ranchin T., Page J. (2003). *Worldwide Linker turbidity information*. ISES Solar World Congress. Goteborg, Sweden, 16-19 June 2003.
- [27] Iqbal M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Academic Press
- [28] Pettazzi A., Souto J. A. (2008). *Analysis of the incoming solar radiation and other significant parameters to estimate the solar resource at eight sites in Galicia (NW Spain)*. Eurosun, International Solar Energy Conference. Lisboa, Portugal, 7-10 Octubre 2008.
- [29] Pettazzi A., Souto J. A. (2008). *Estimation of solar resource map at Galicia by using self-learning techniques*. Eurosun, International Solar Energy Conference. Lisboa, Portugal, 7-10 Octubre 2008.
- [30] Markvart T., Castañer L. (2003). *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications*. Elsevier.

Anexo A

Mapas de Insolación para cielo despejado

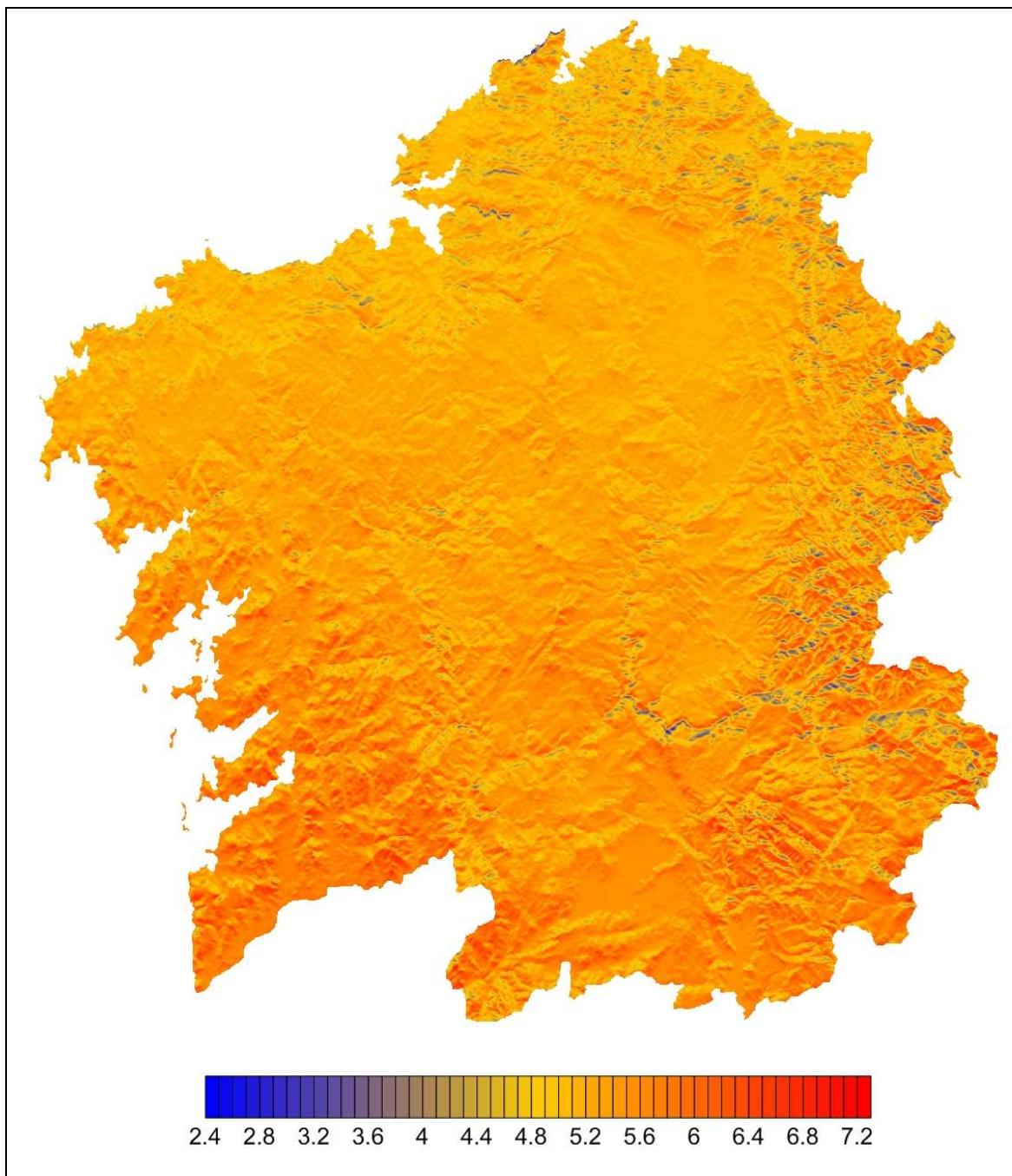


Fig. A-1: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Anual

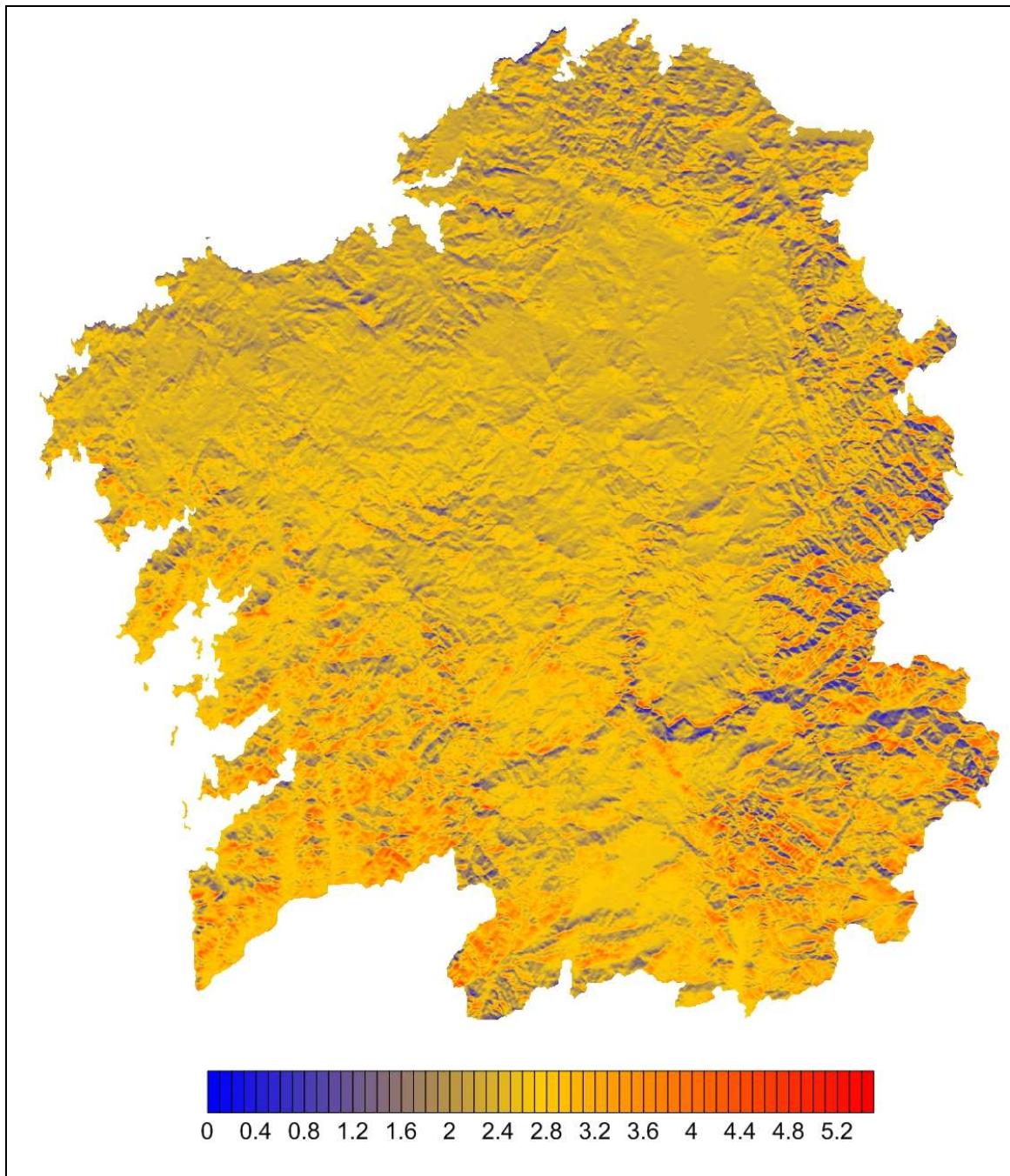


Fig. A-2: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Enero

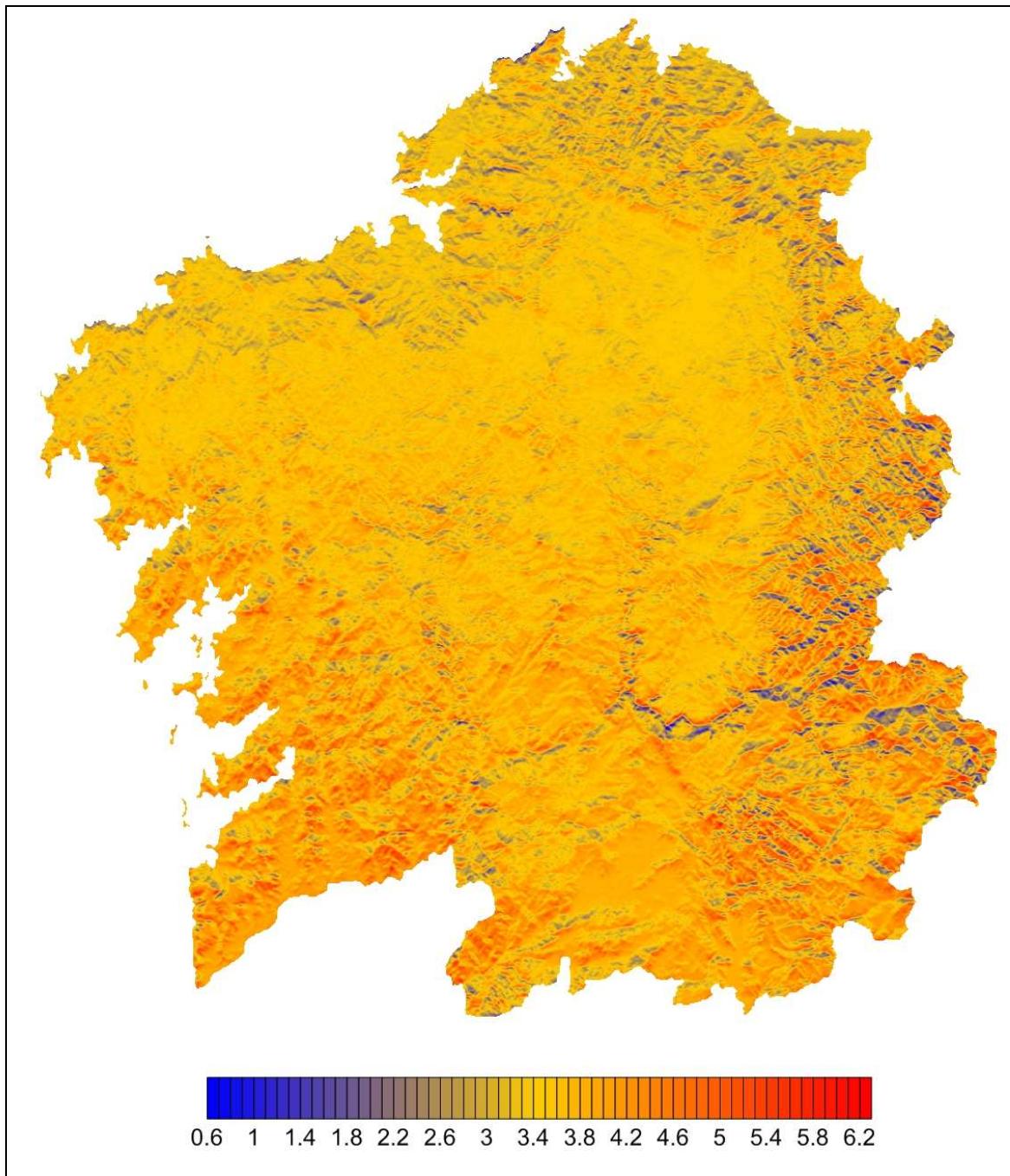


Fig. A-3: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Febrero

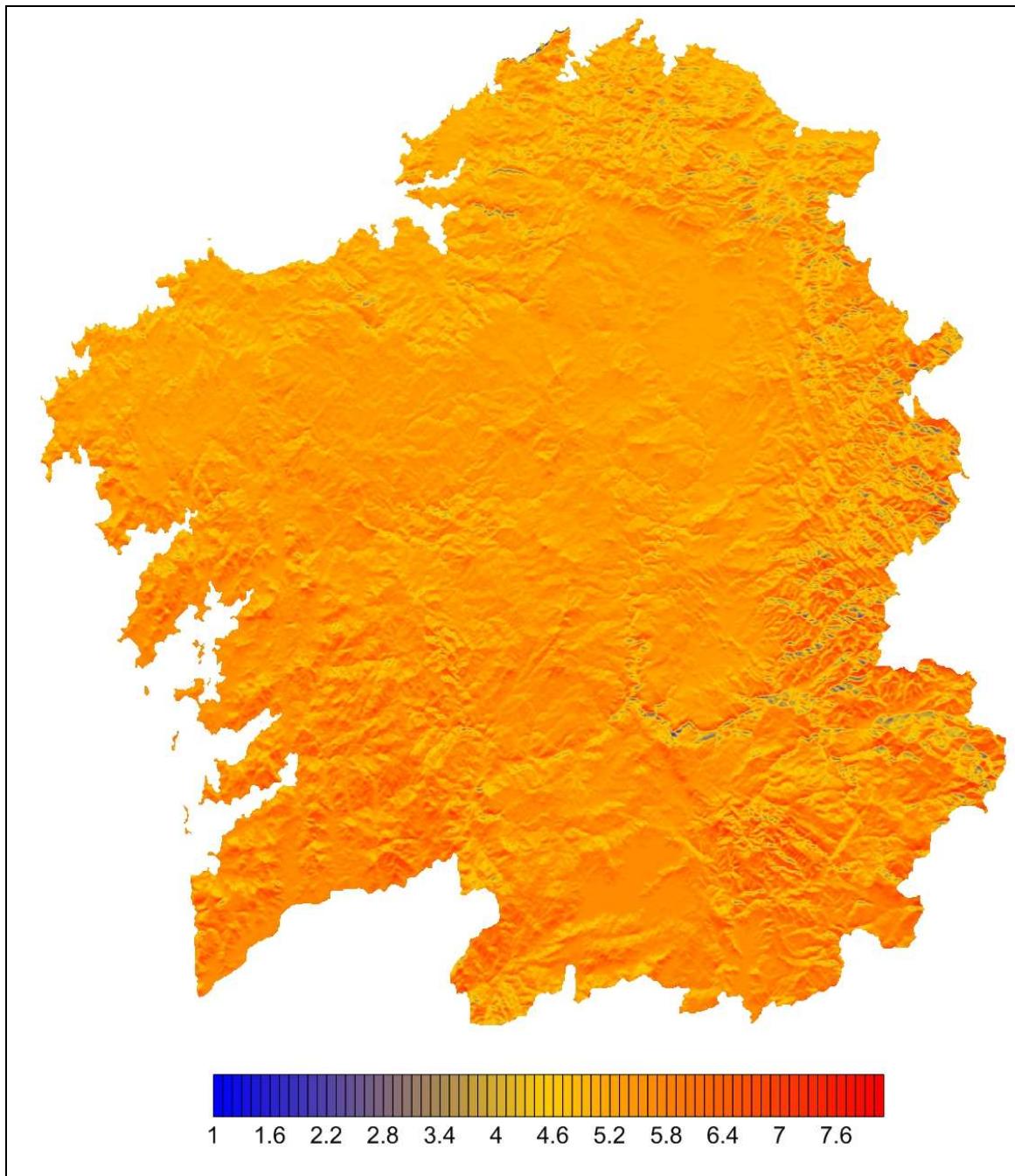


Fig. A-4: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Marzo

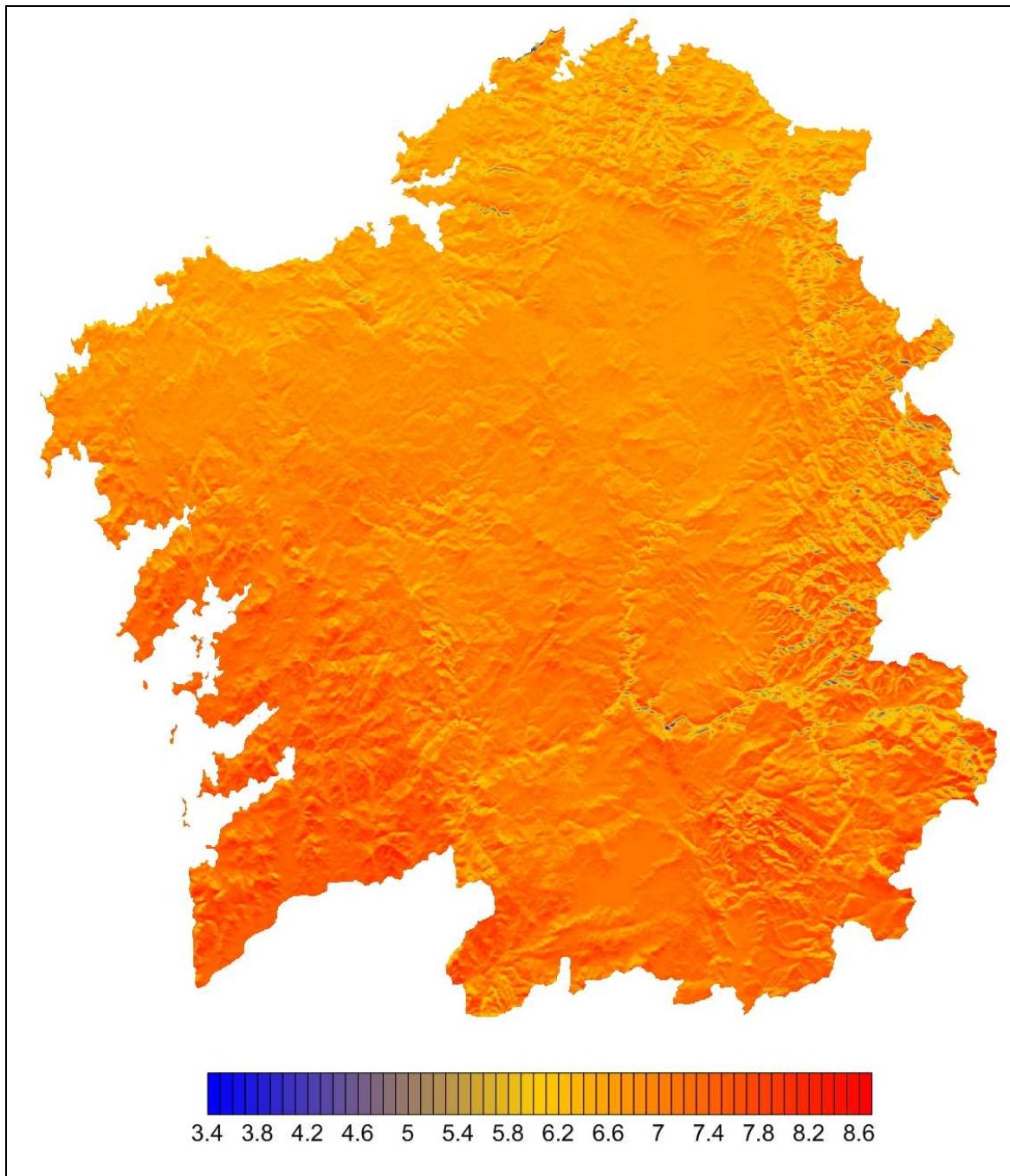


Fig. A-5: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Abril

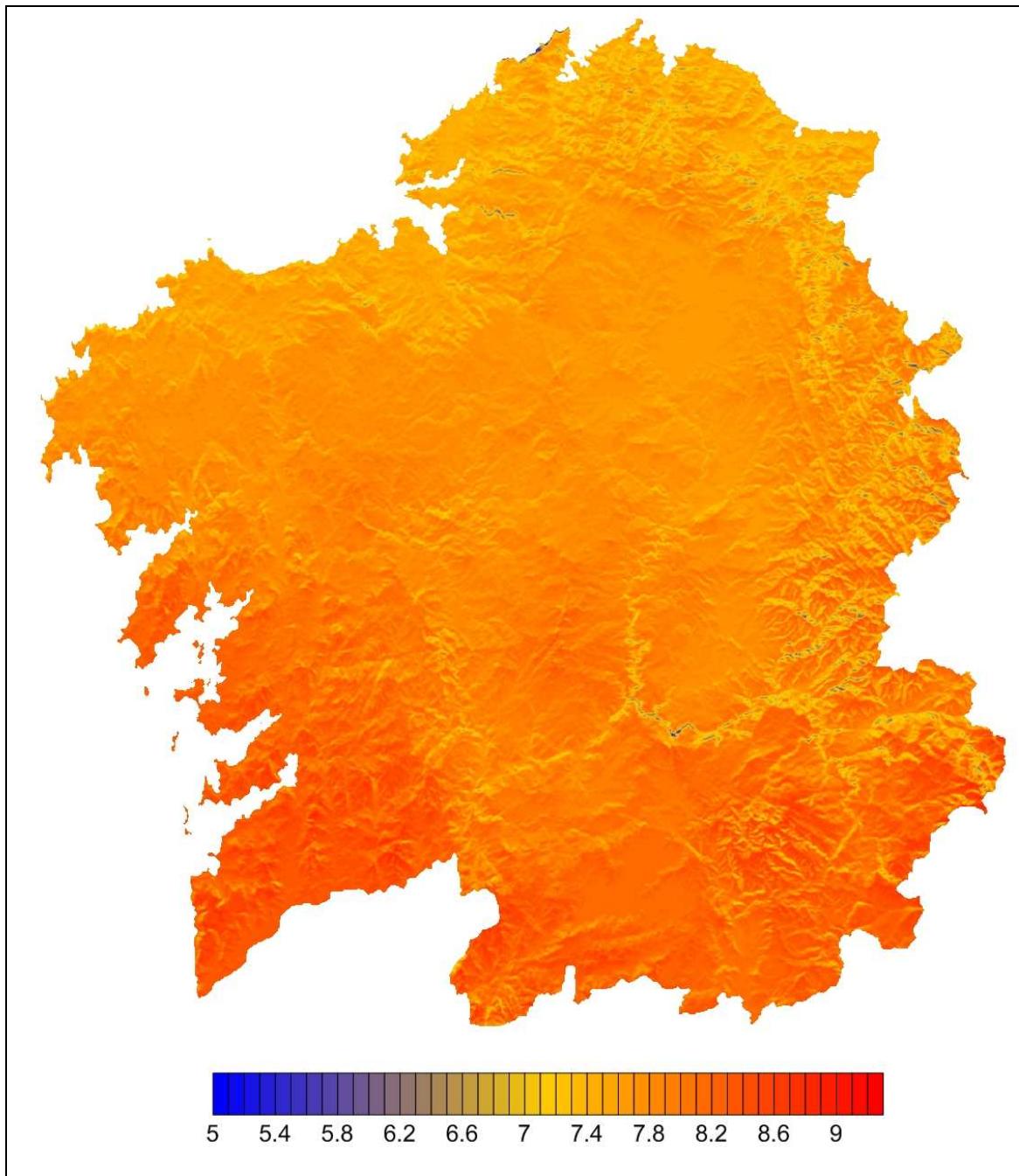


Fig. A-6: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Mayo

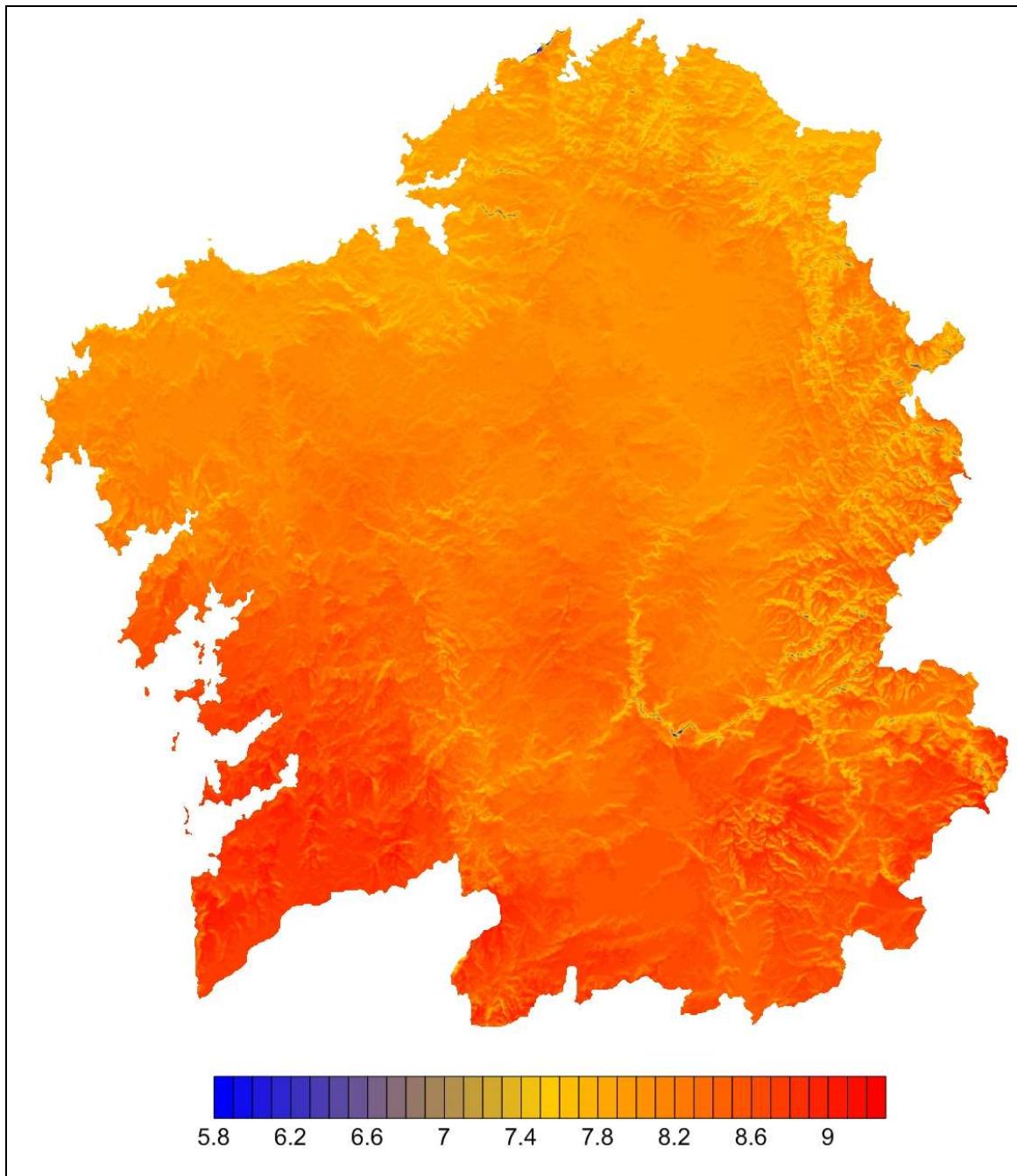


Fig. A-7: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Junio

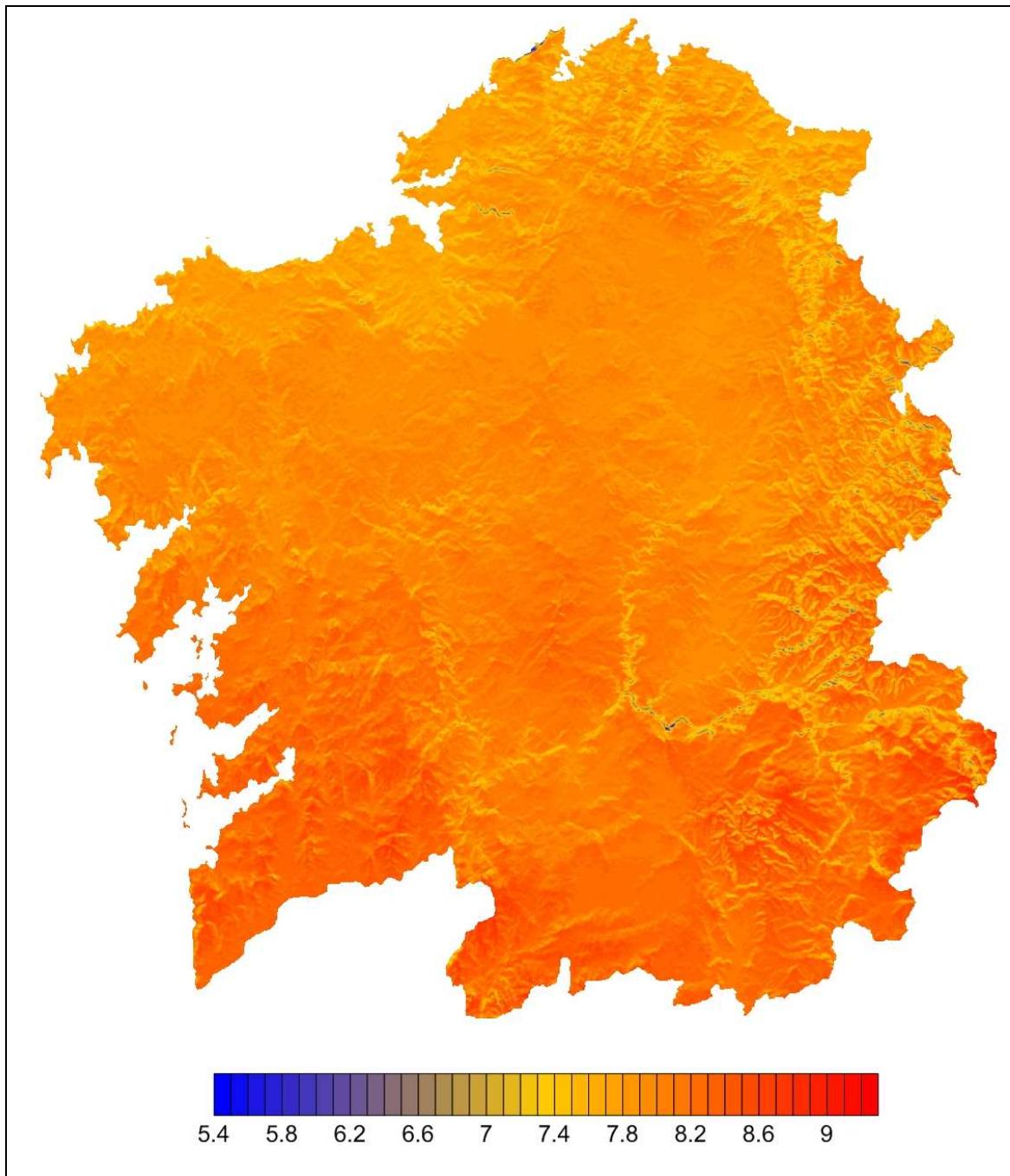


Fig. A-8: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Julio

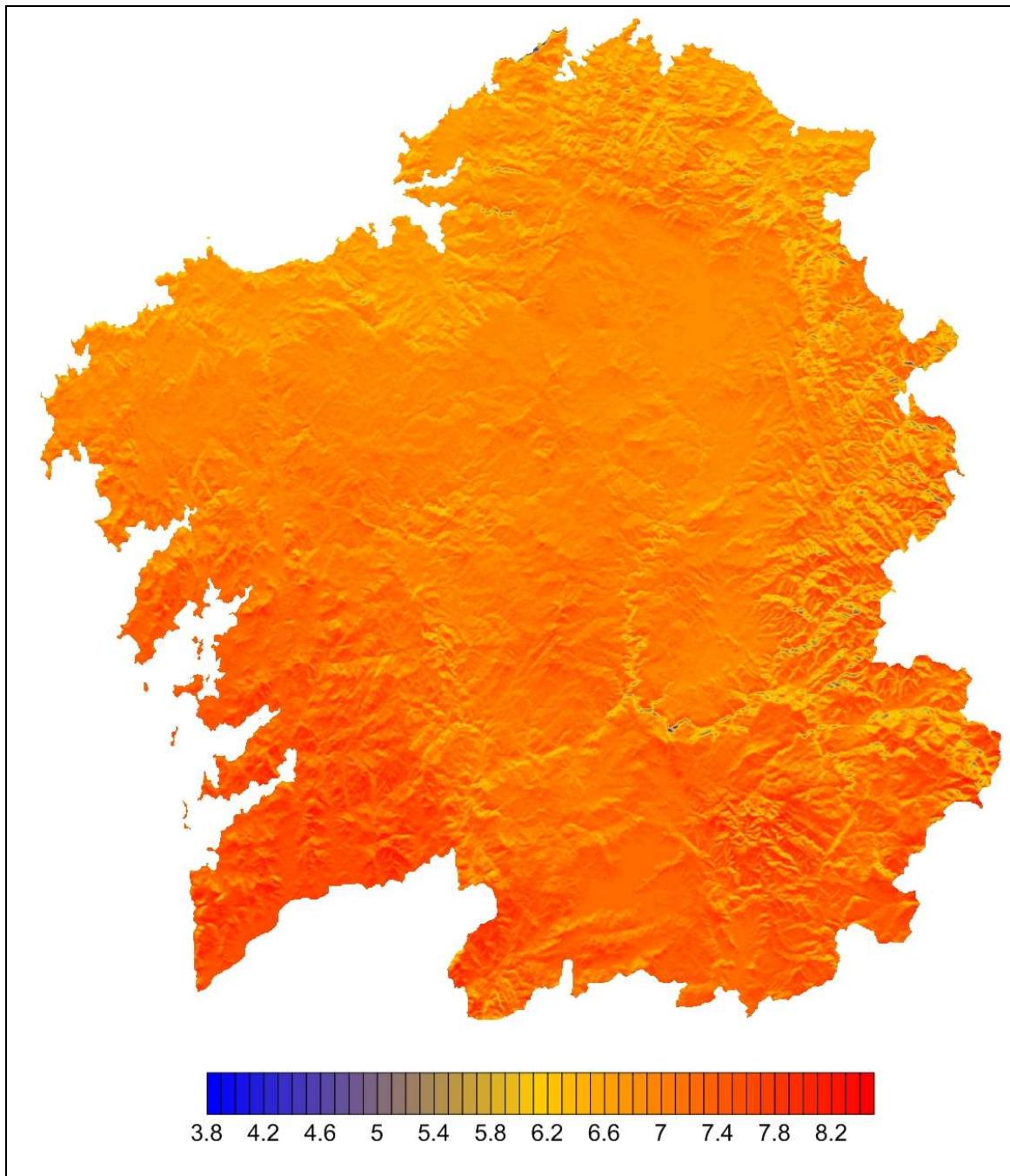


Fig. A-9: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Agosto

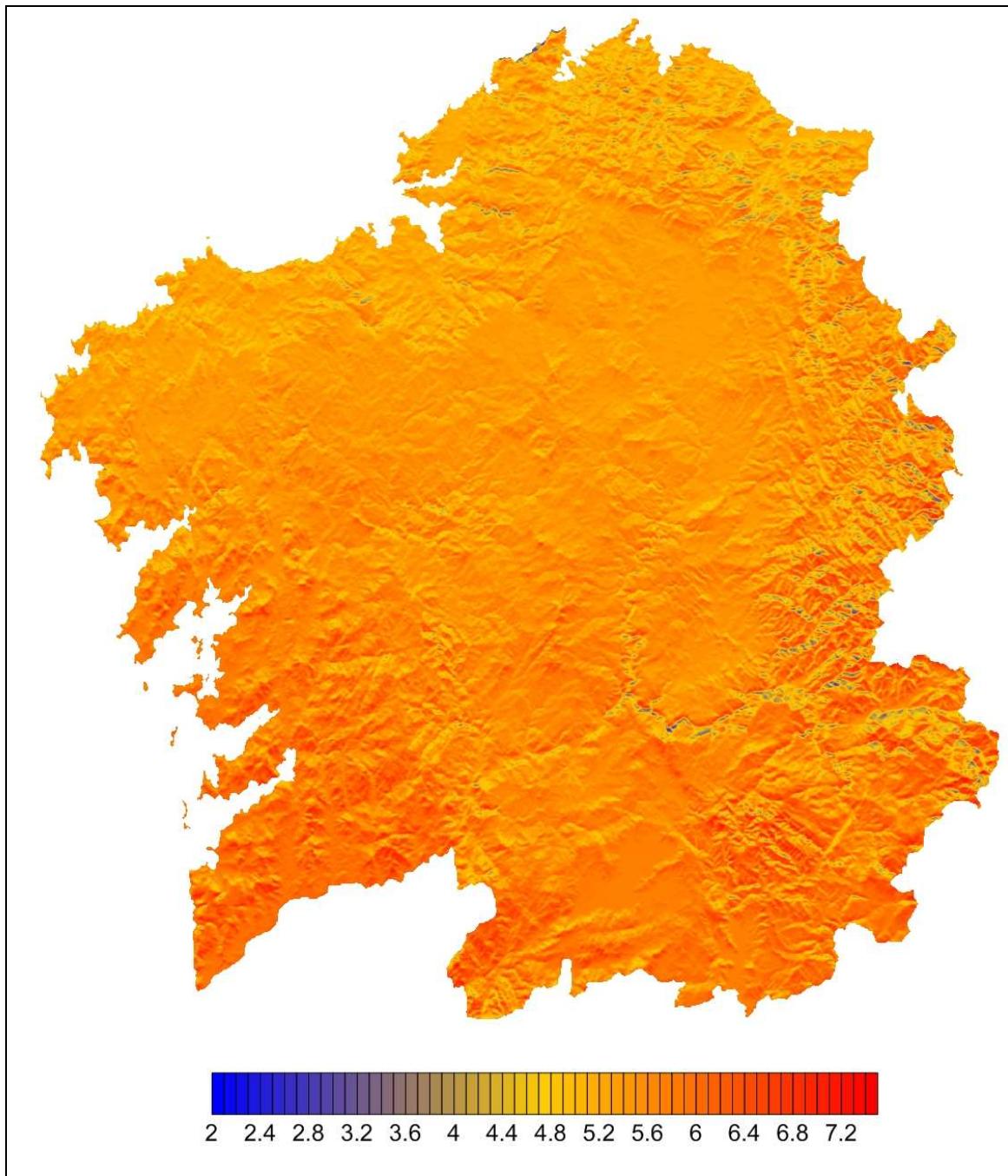


Fig. A-10: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Septiembre

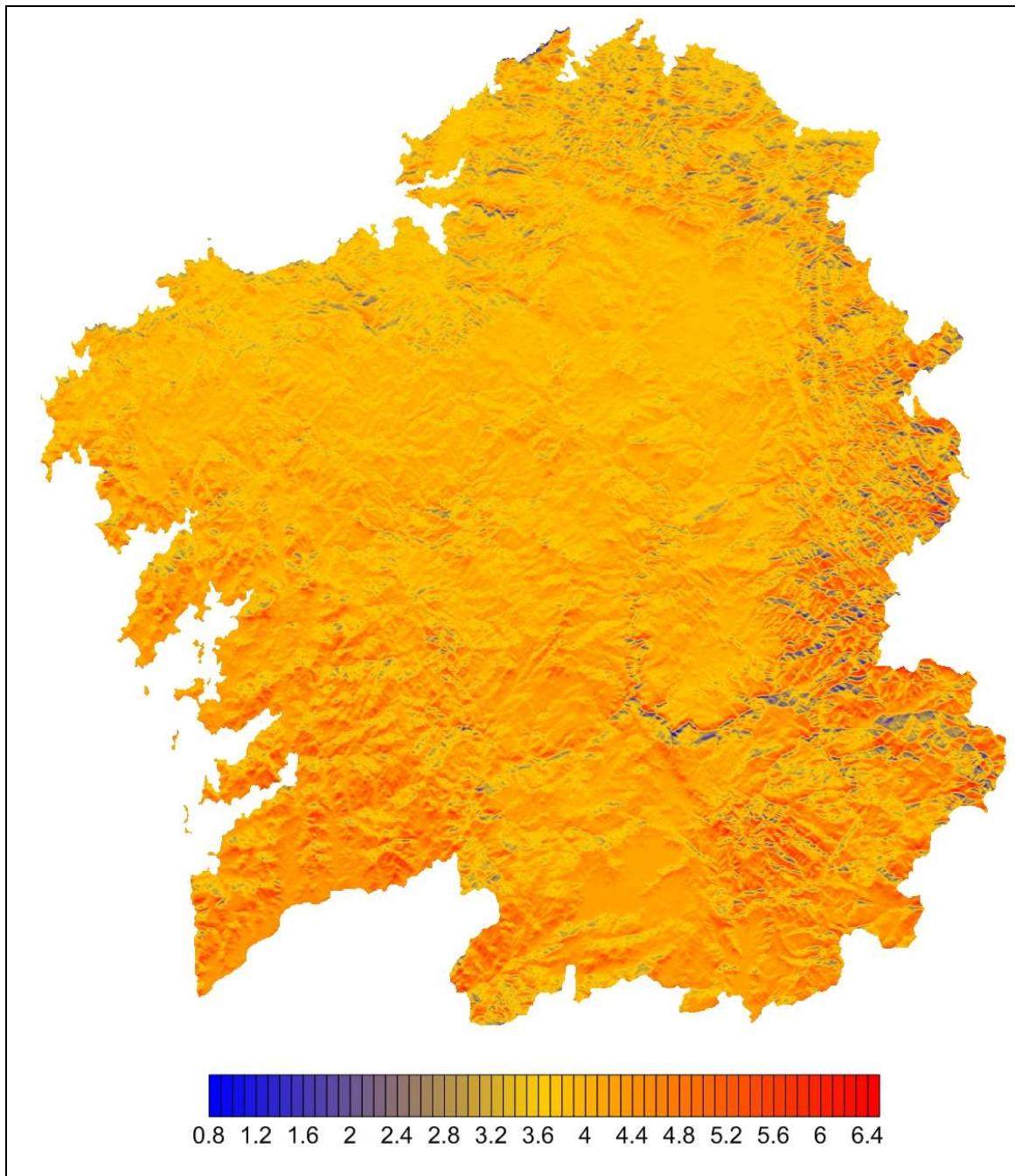


Fig. A-11: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Octubre

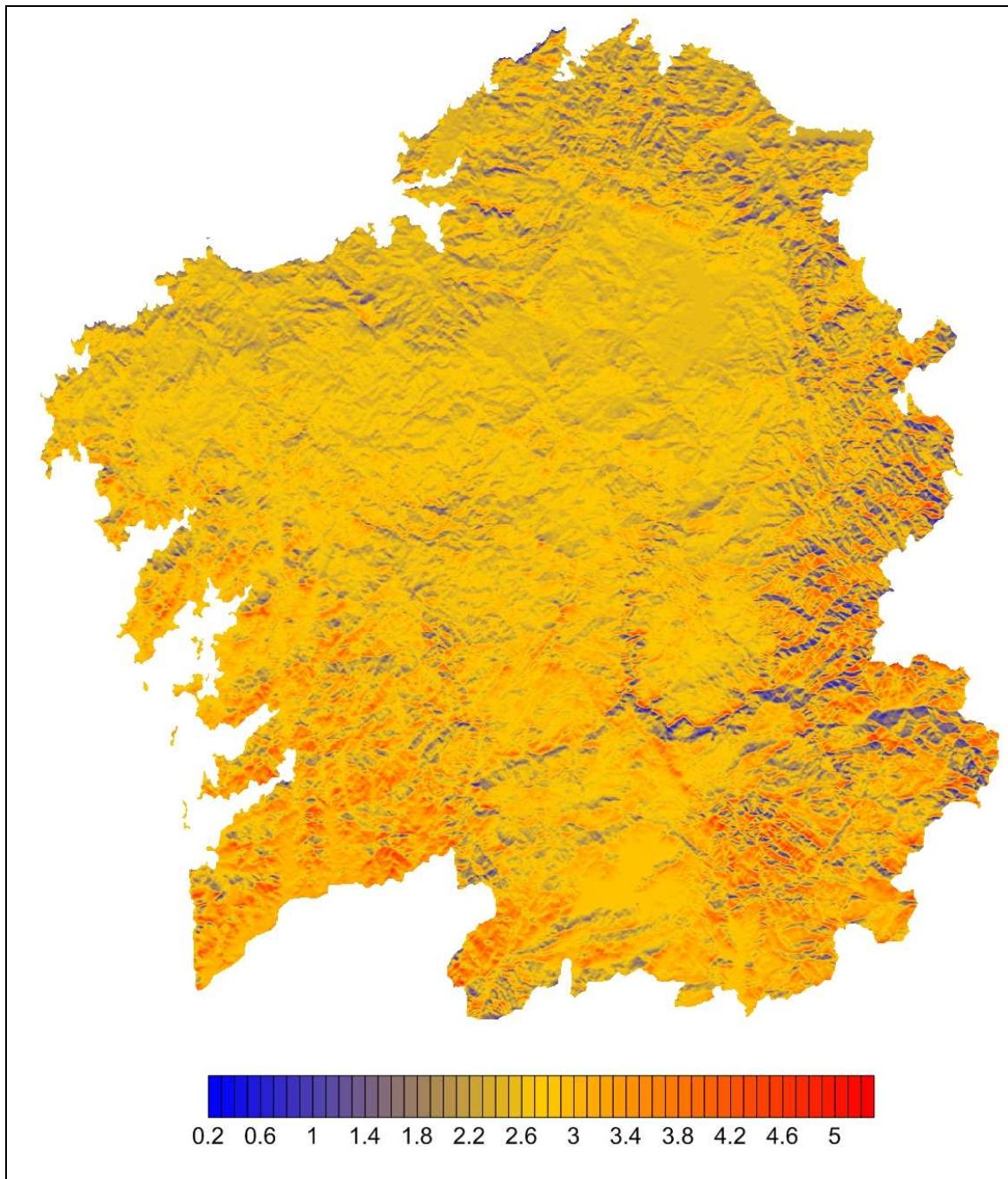


Fig. A-12: Insolación Global para cielo despejado [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Noviembre

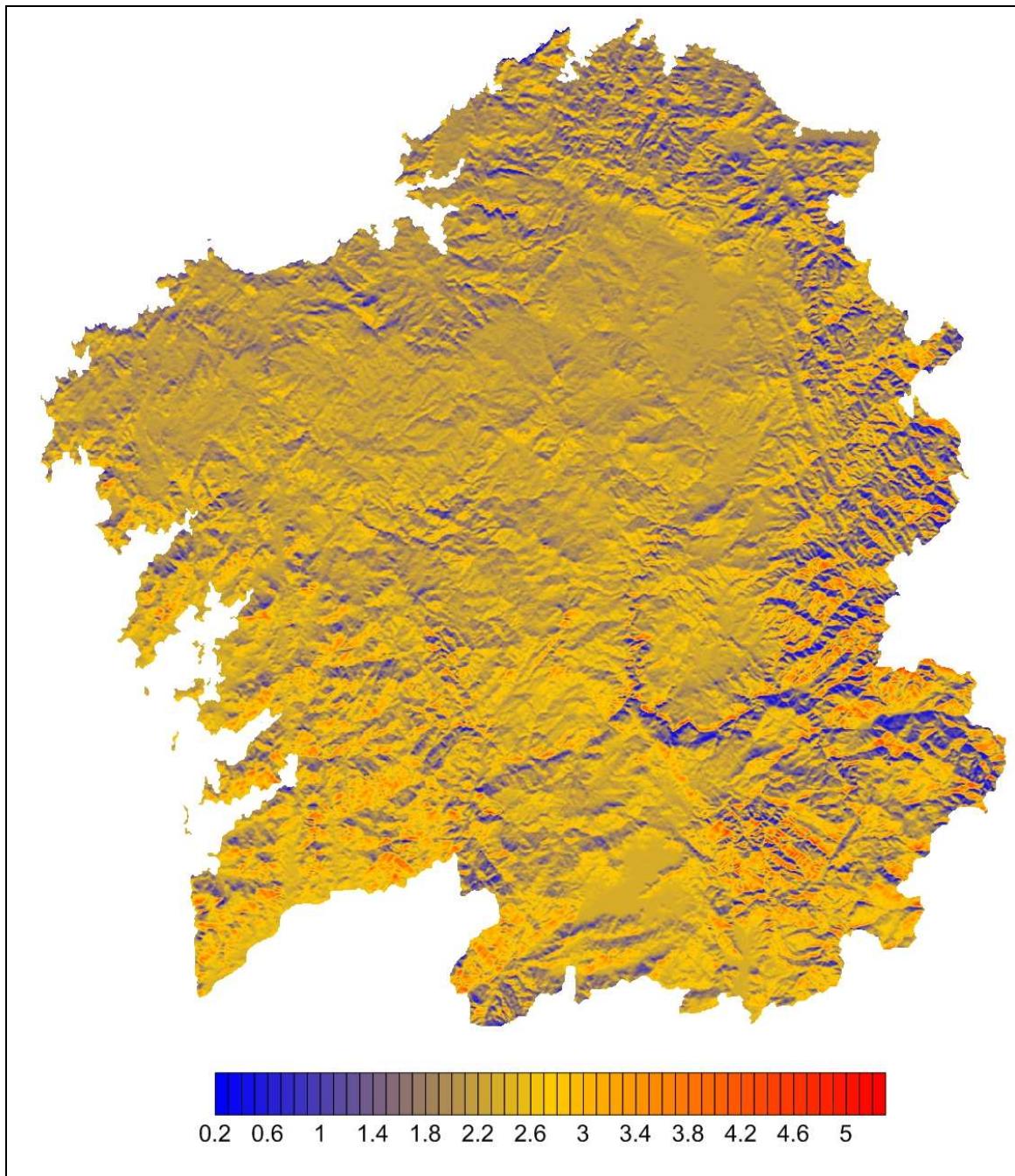


Fig. A-13: Insolación Global para cielo despejado [kWh m⁻² dia⁻¹] – promedio

Diciembre

Anexo B

Mapas de Horas de Sol para cielo despejado

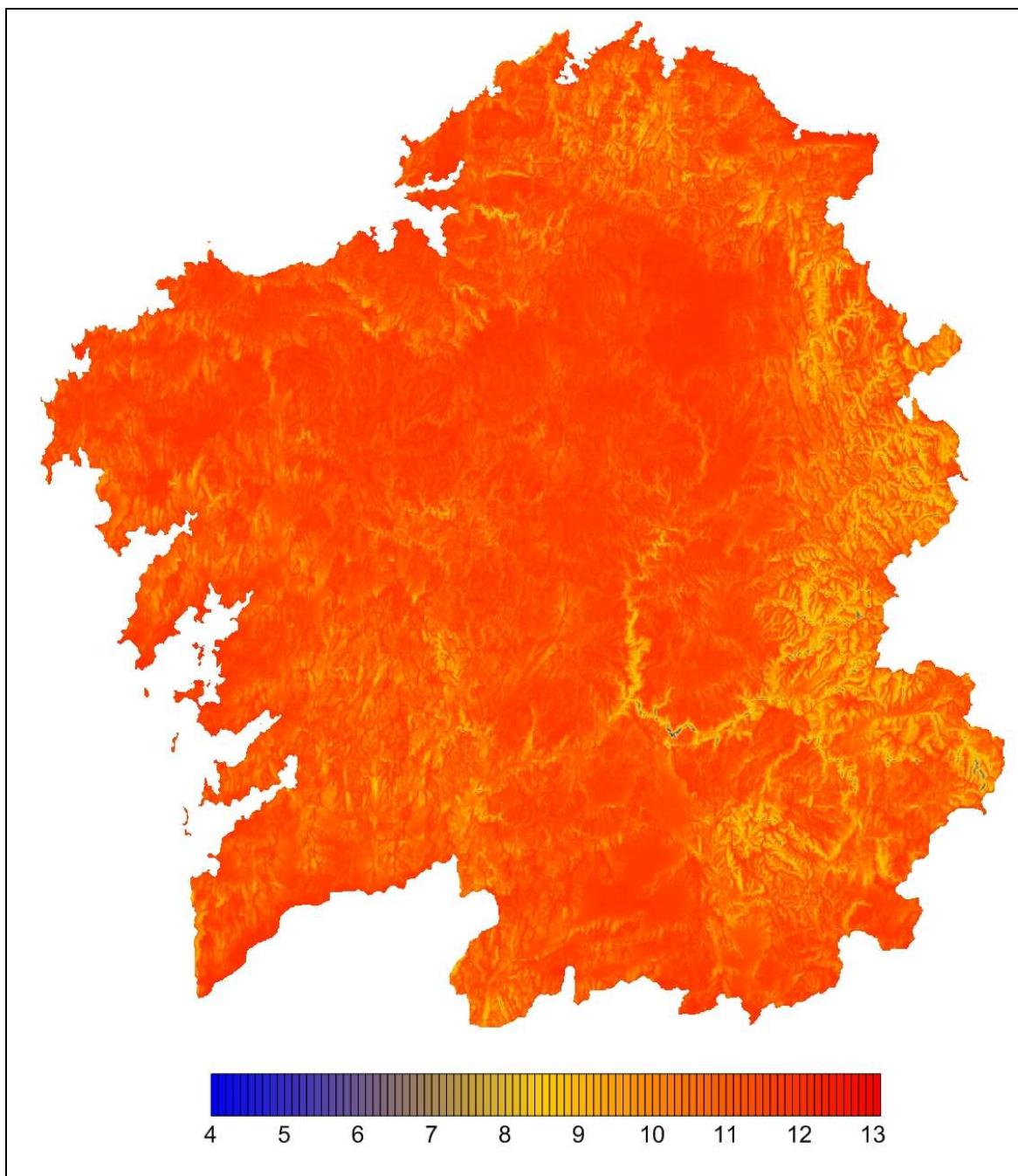


Fig. B-1: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Anual

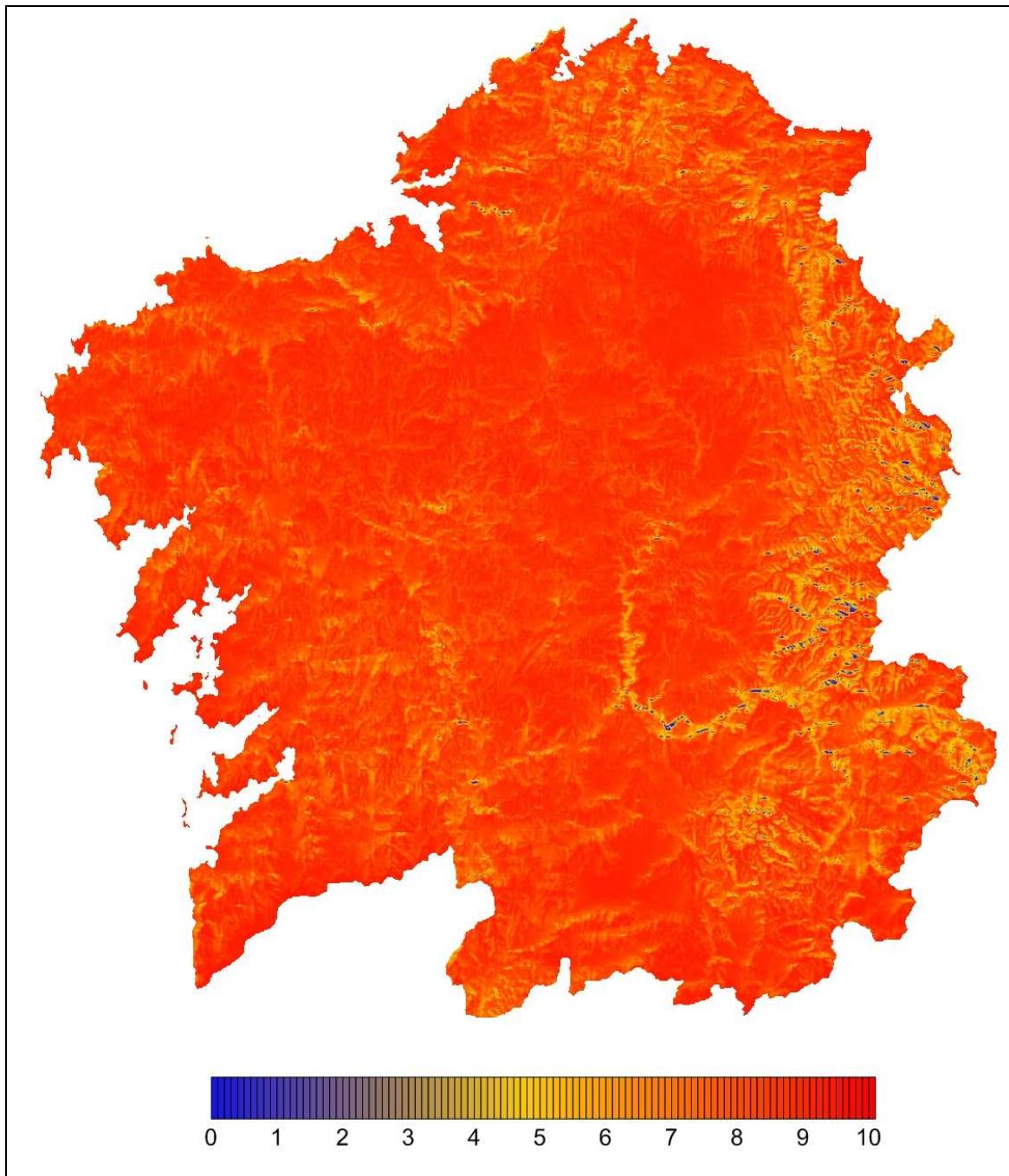


Fig. B-2: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Enero

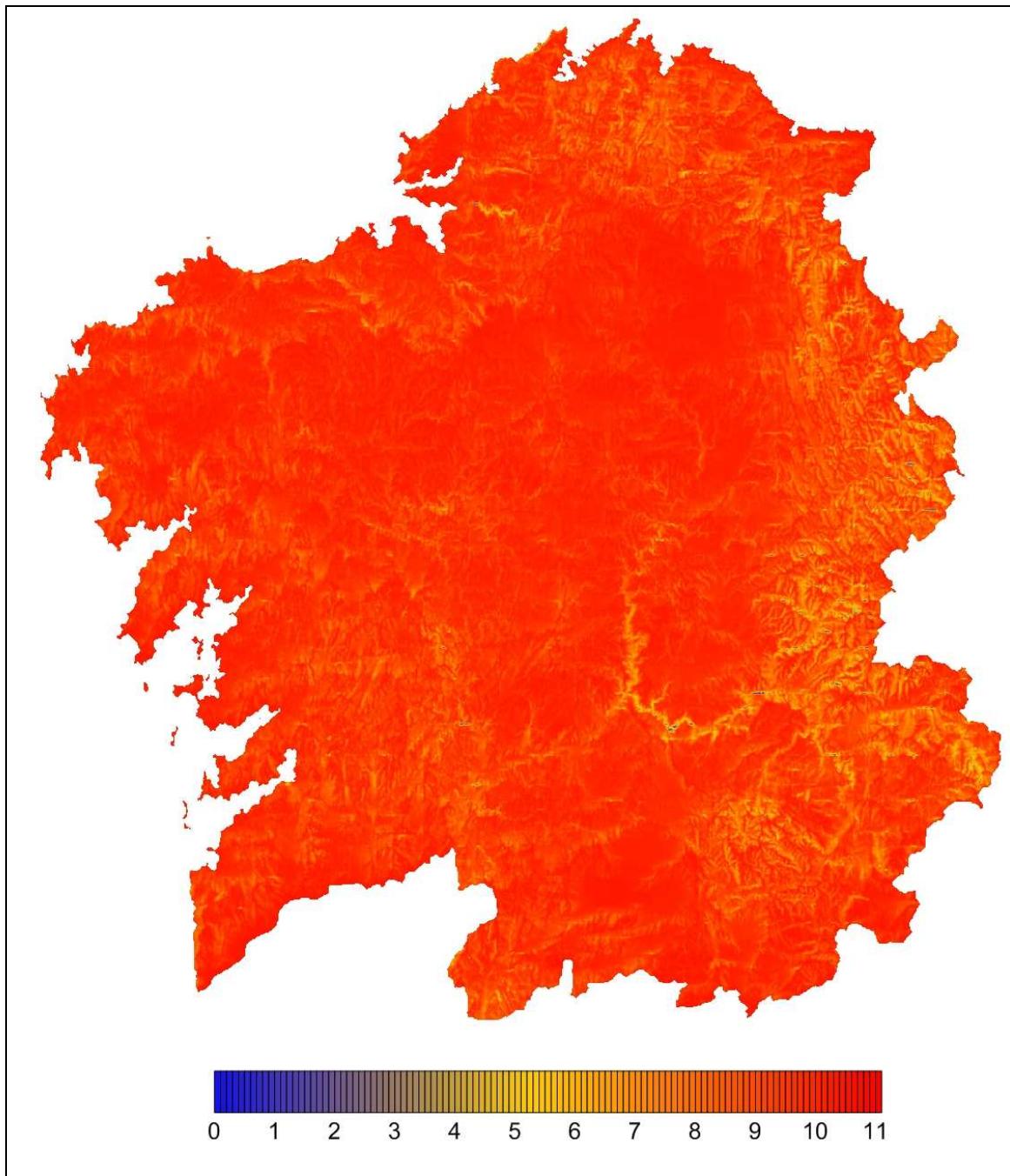


Fig. B-3: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Febrero

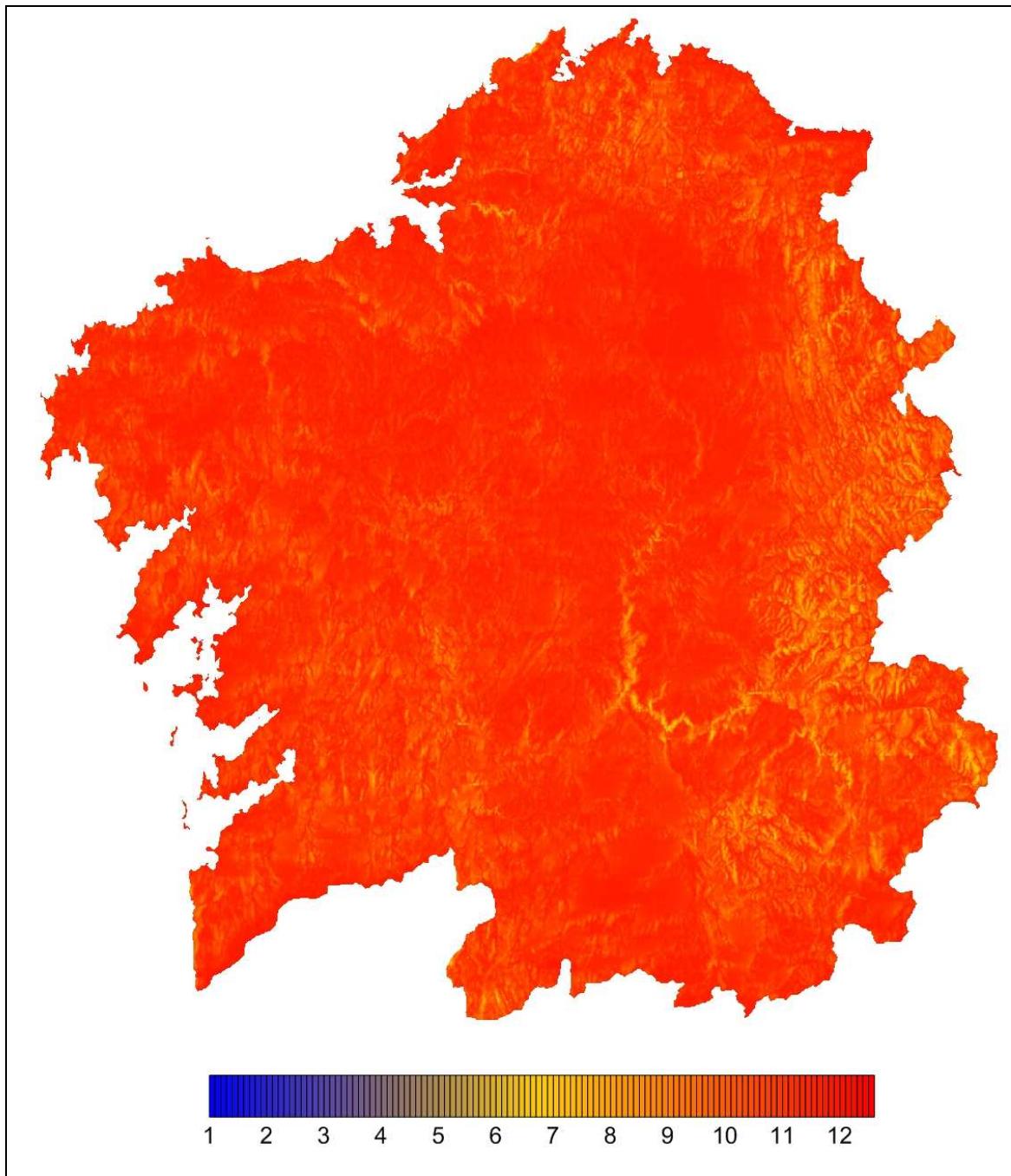


Fig. B-4: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Marzo

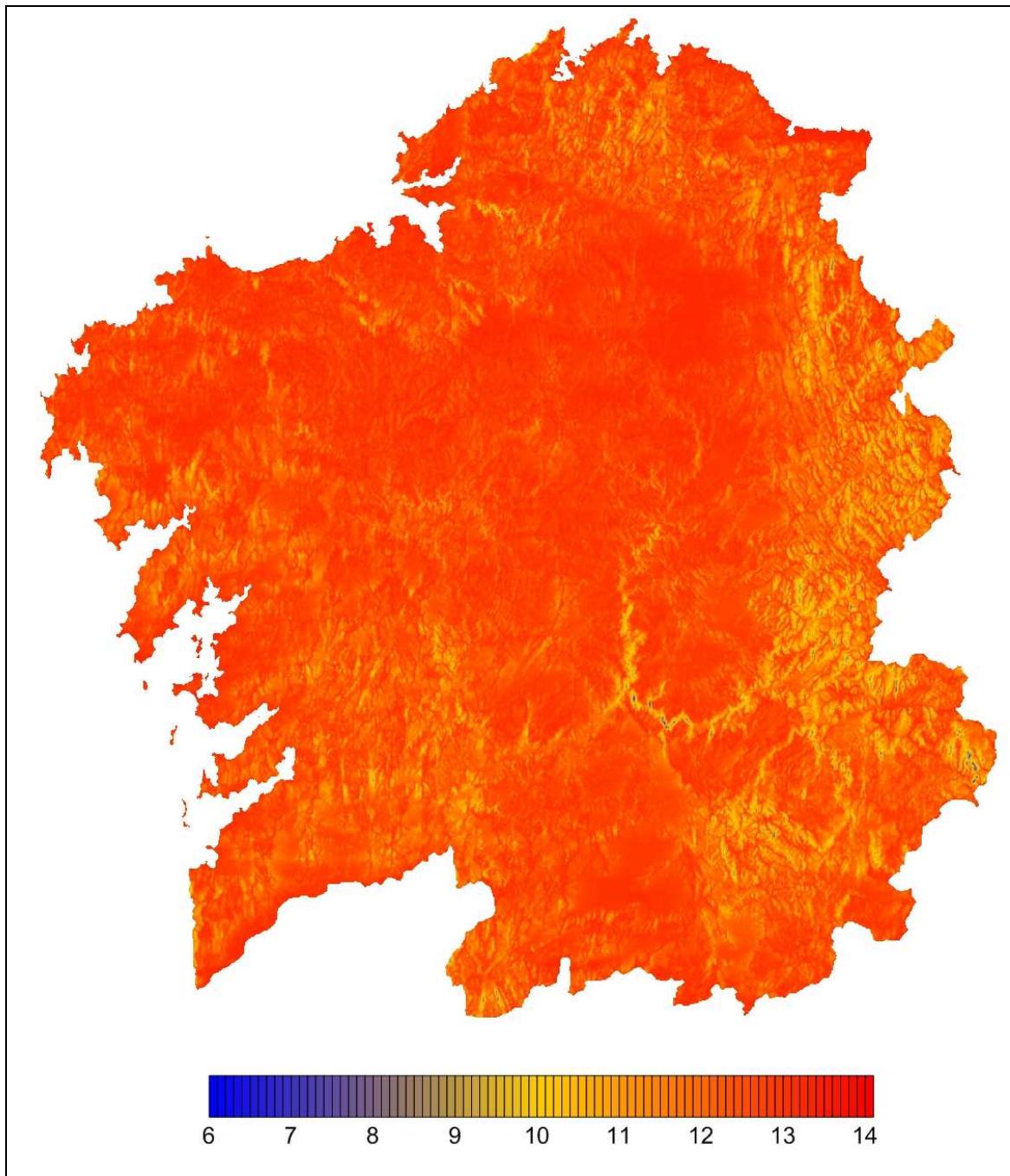


Fig. B-5: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Abril

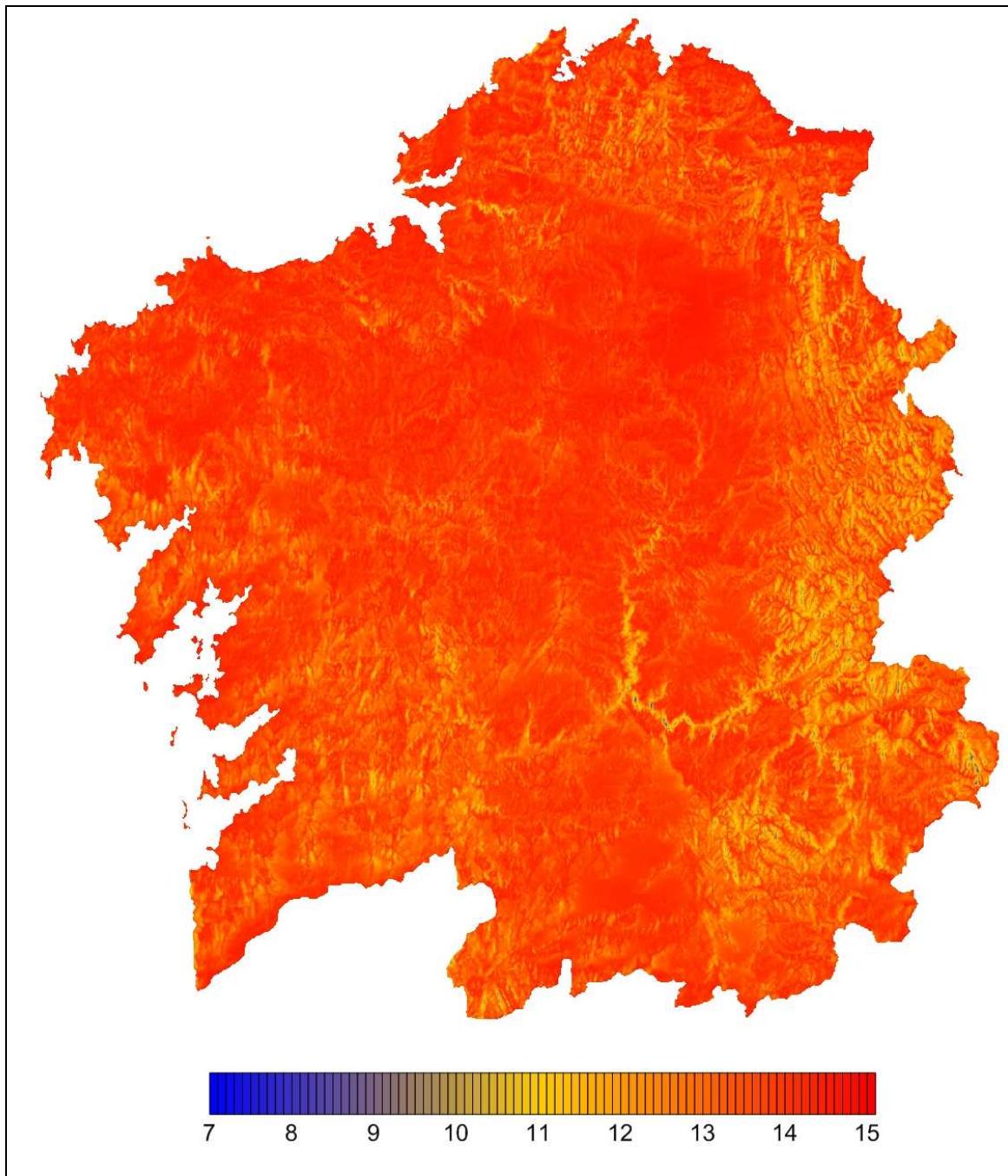


Fig. B-6: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Mayo

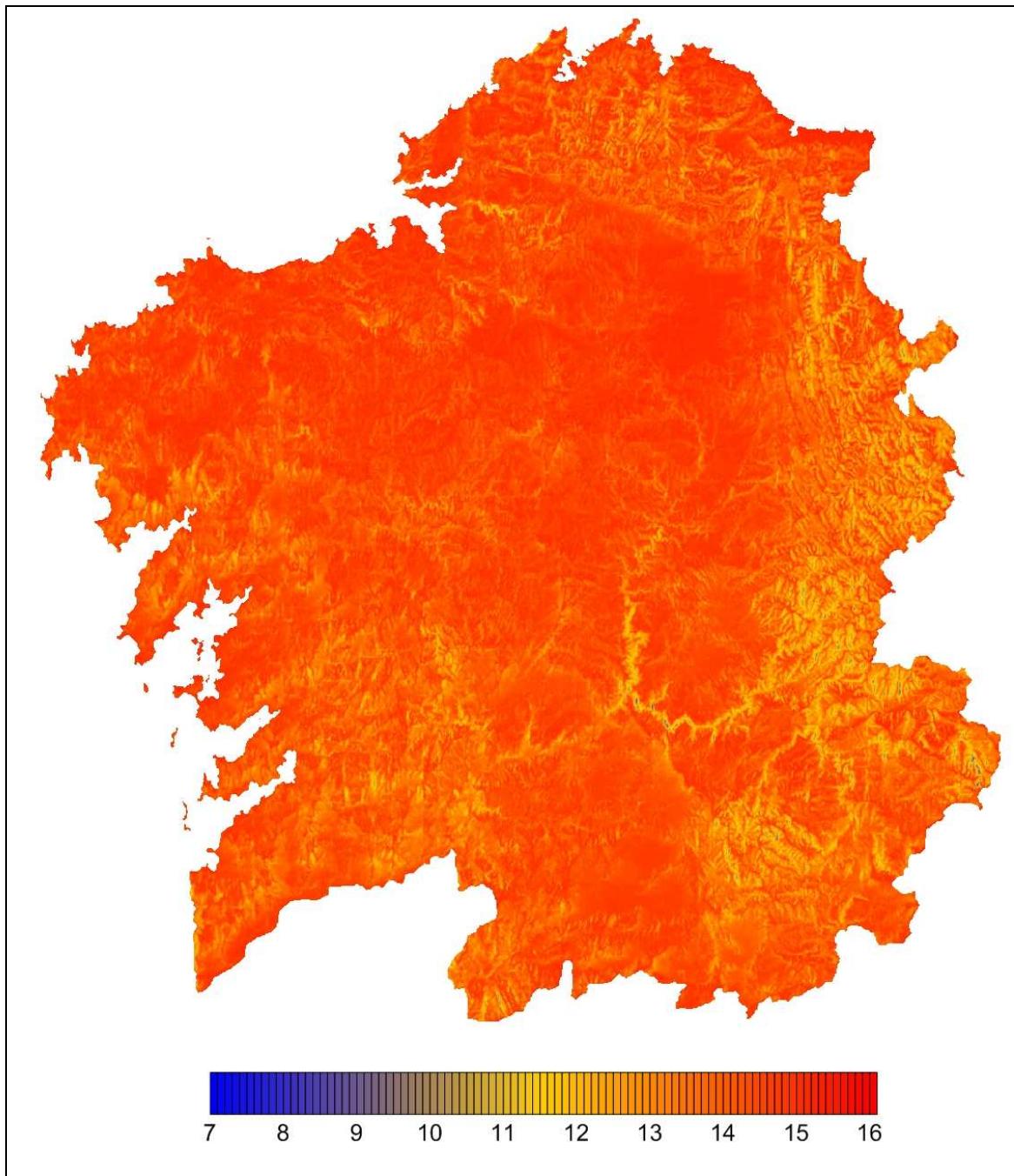


Fig. B-7: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Junio

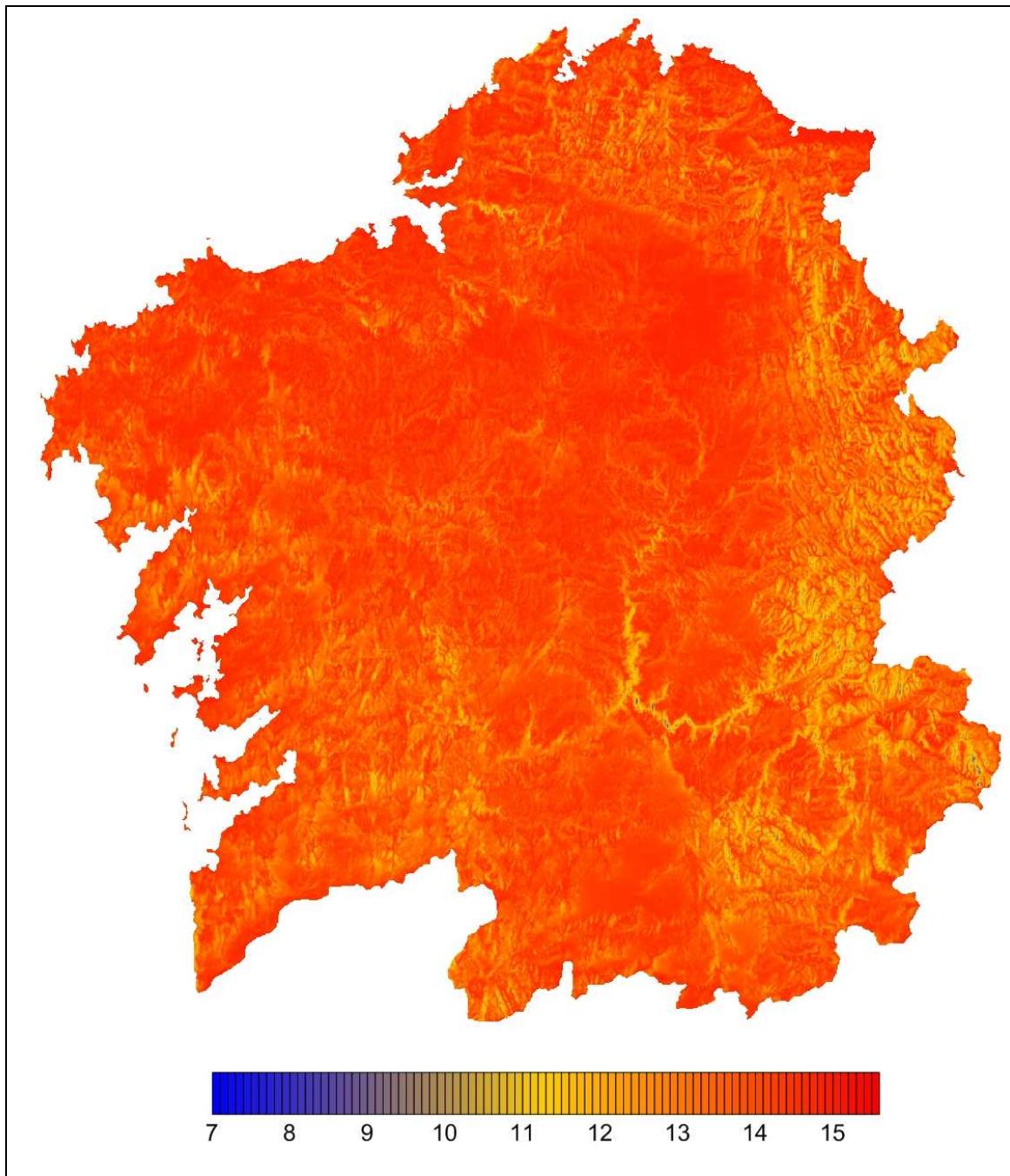


Fig. B-8: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Julio

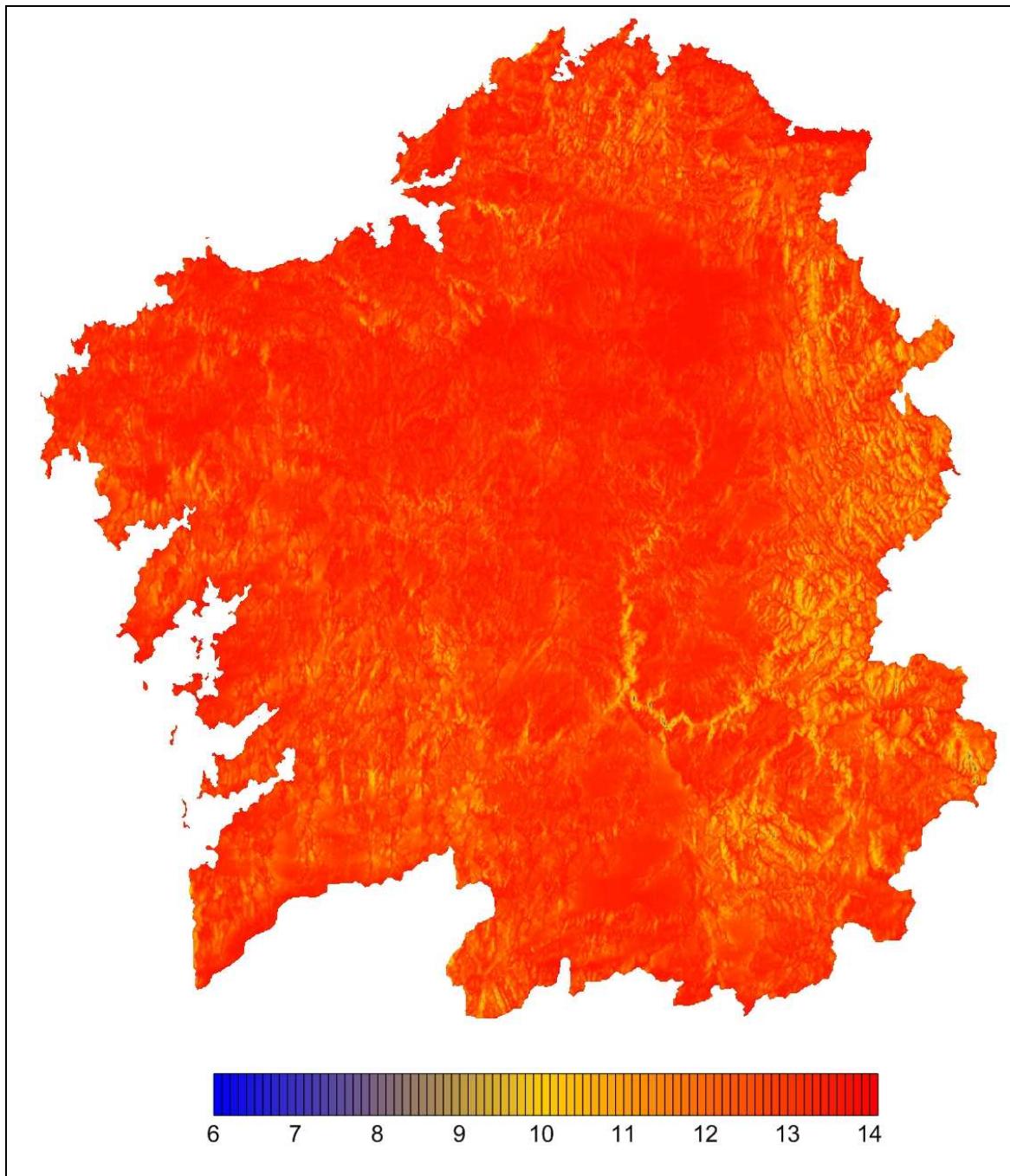


Fig. B-9: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Agosto

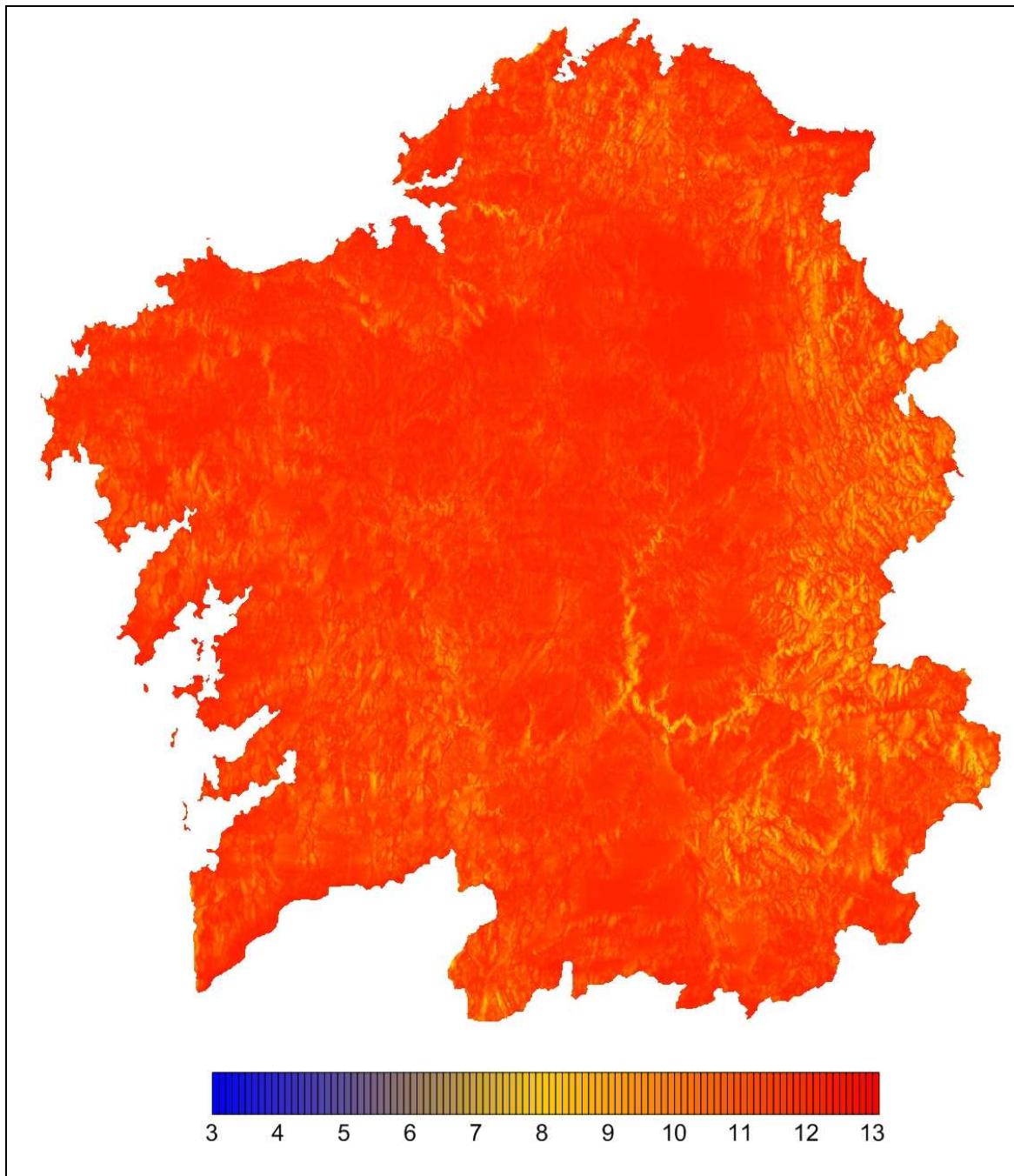


Fig. B-10: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Septiembre

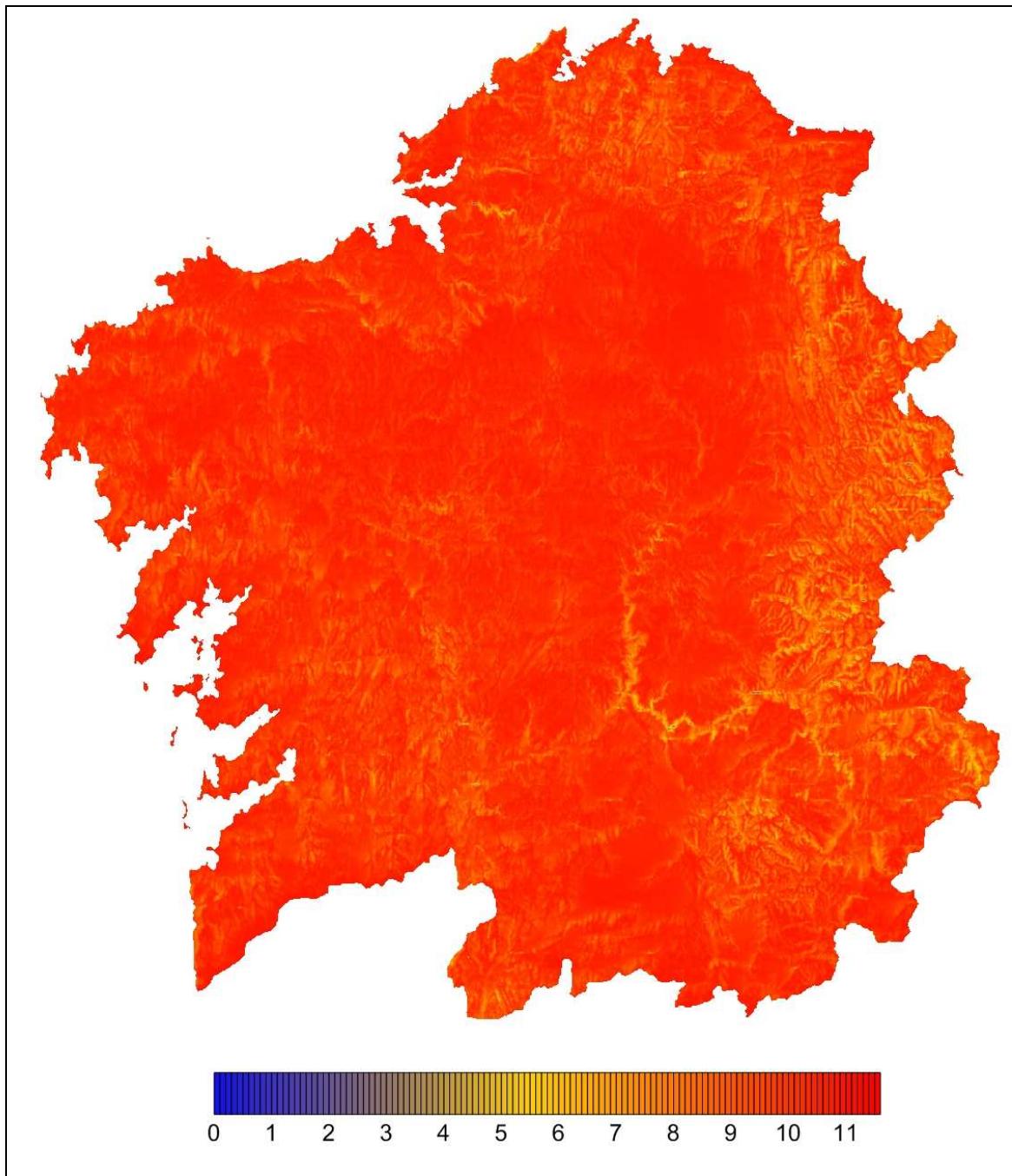


Fig. B-11: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Octubre

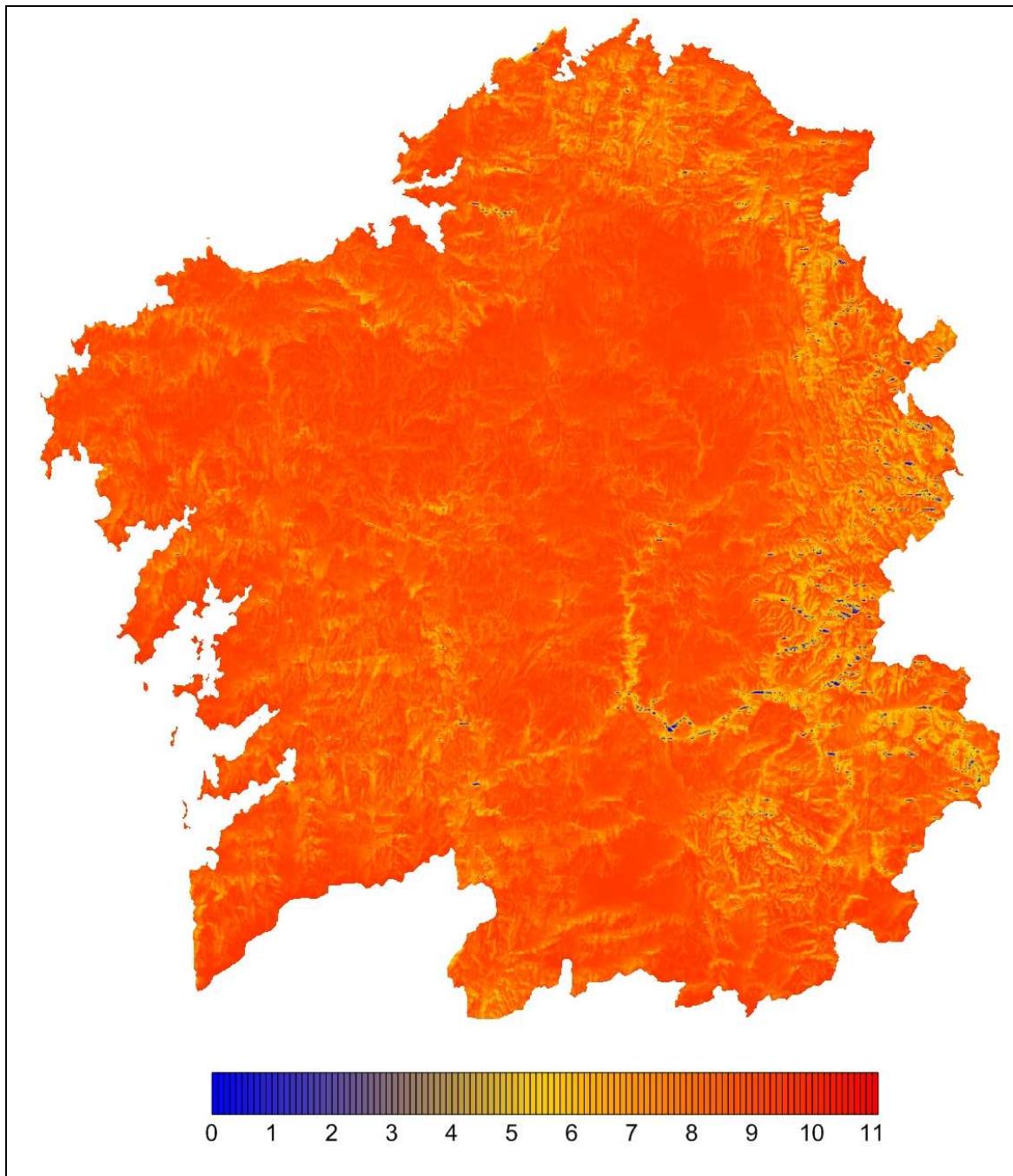


Fig. B-12: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Noviembre

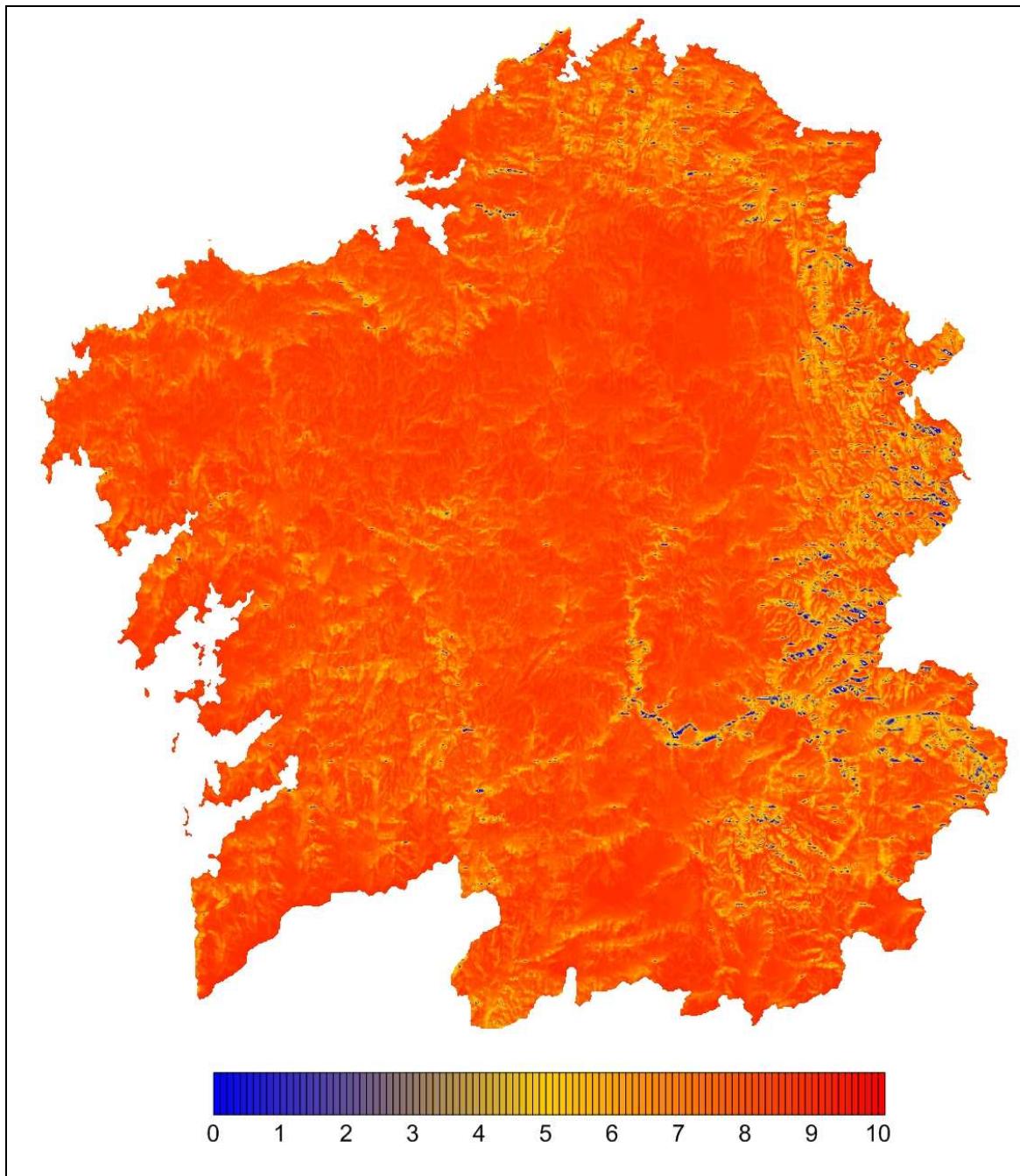


Fig. B-13: Horas de Sol para cielo despejado – promedio Diciembre

Anexo C

Mapas climáticos de Insolación

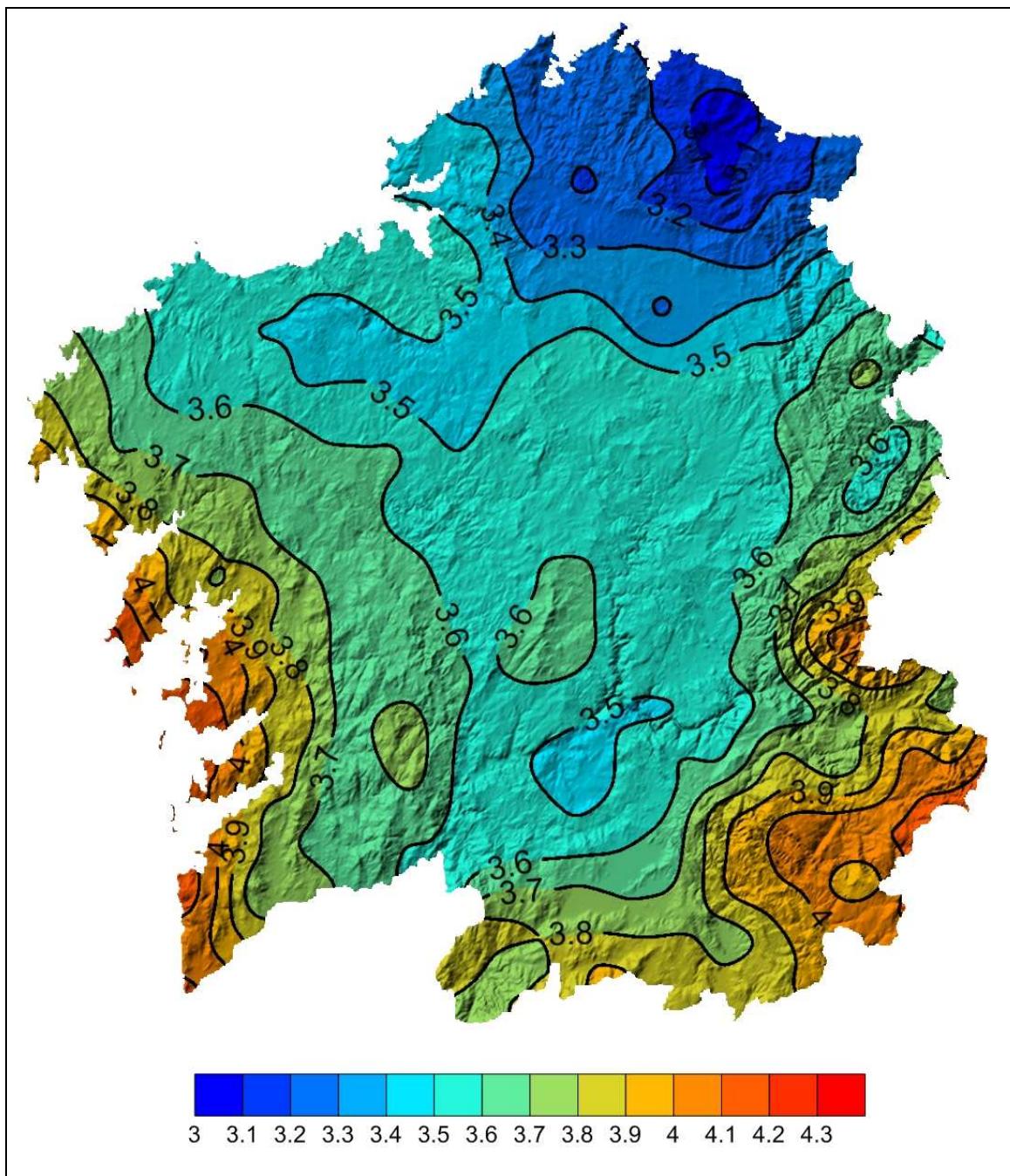


Fig. C-1: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Anual

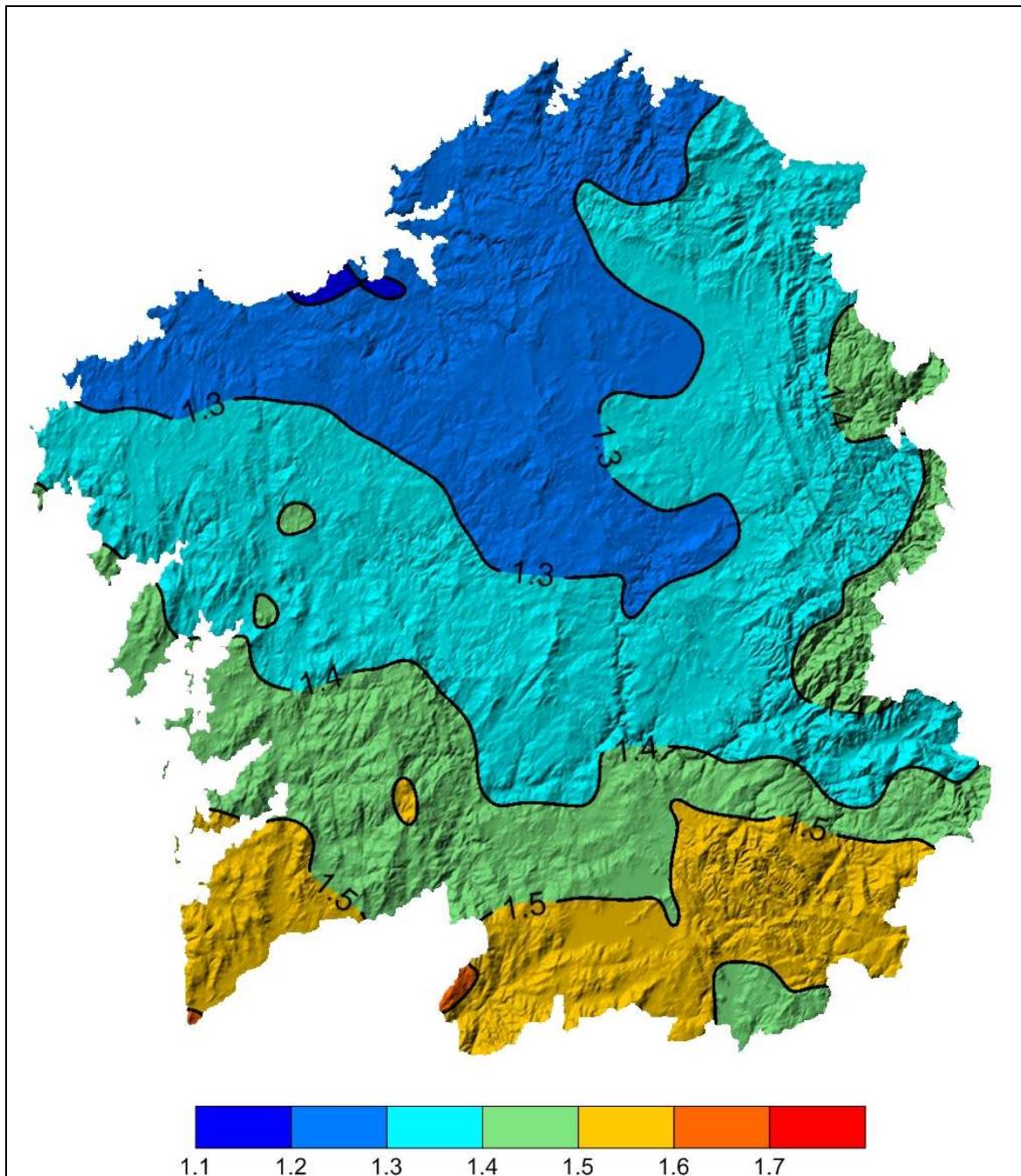


Fig. C-2: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Enero

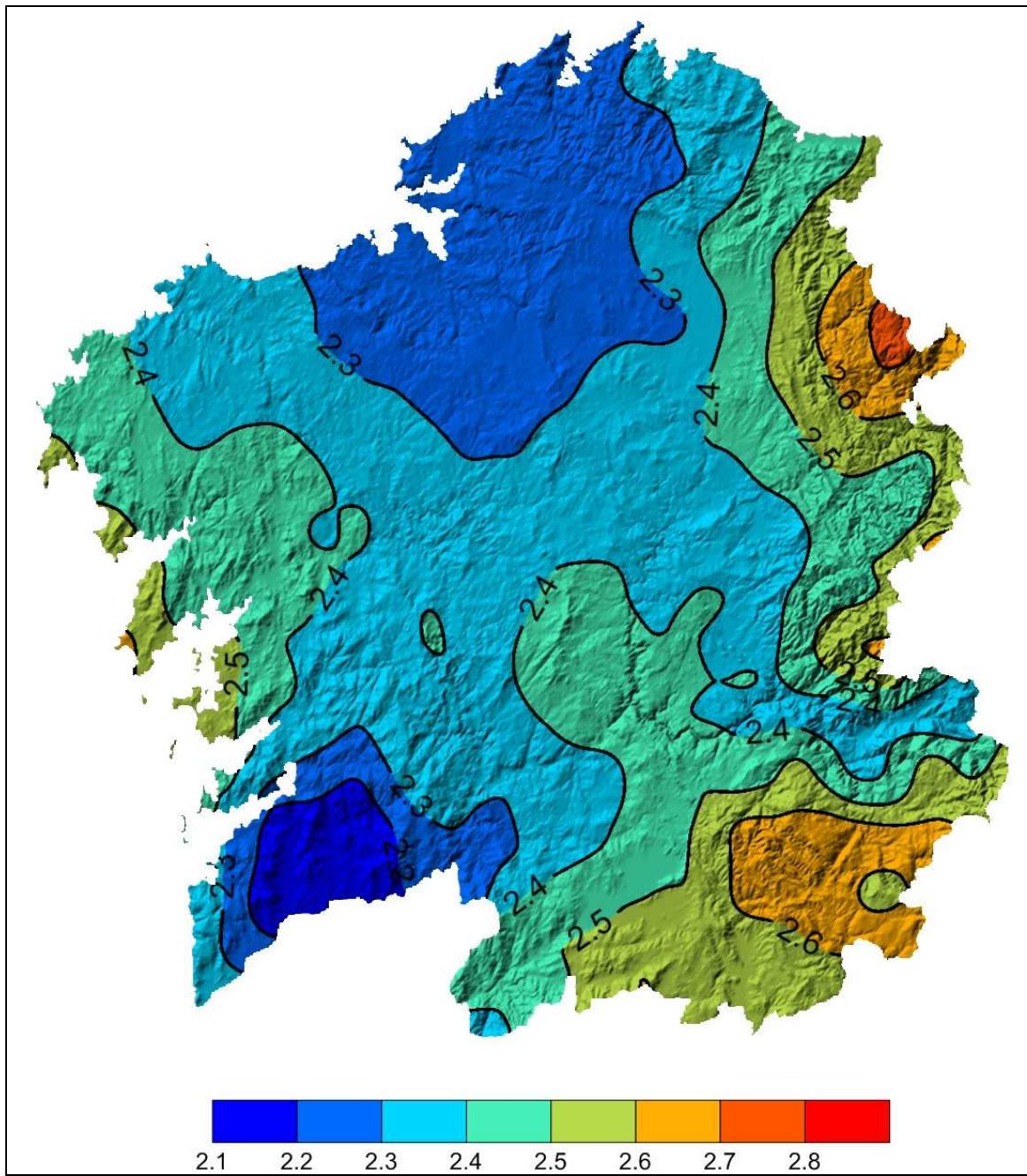


Fig. C-3: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Febrero

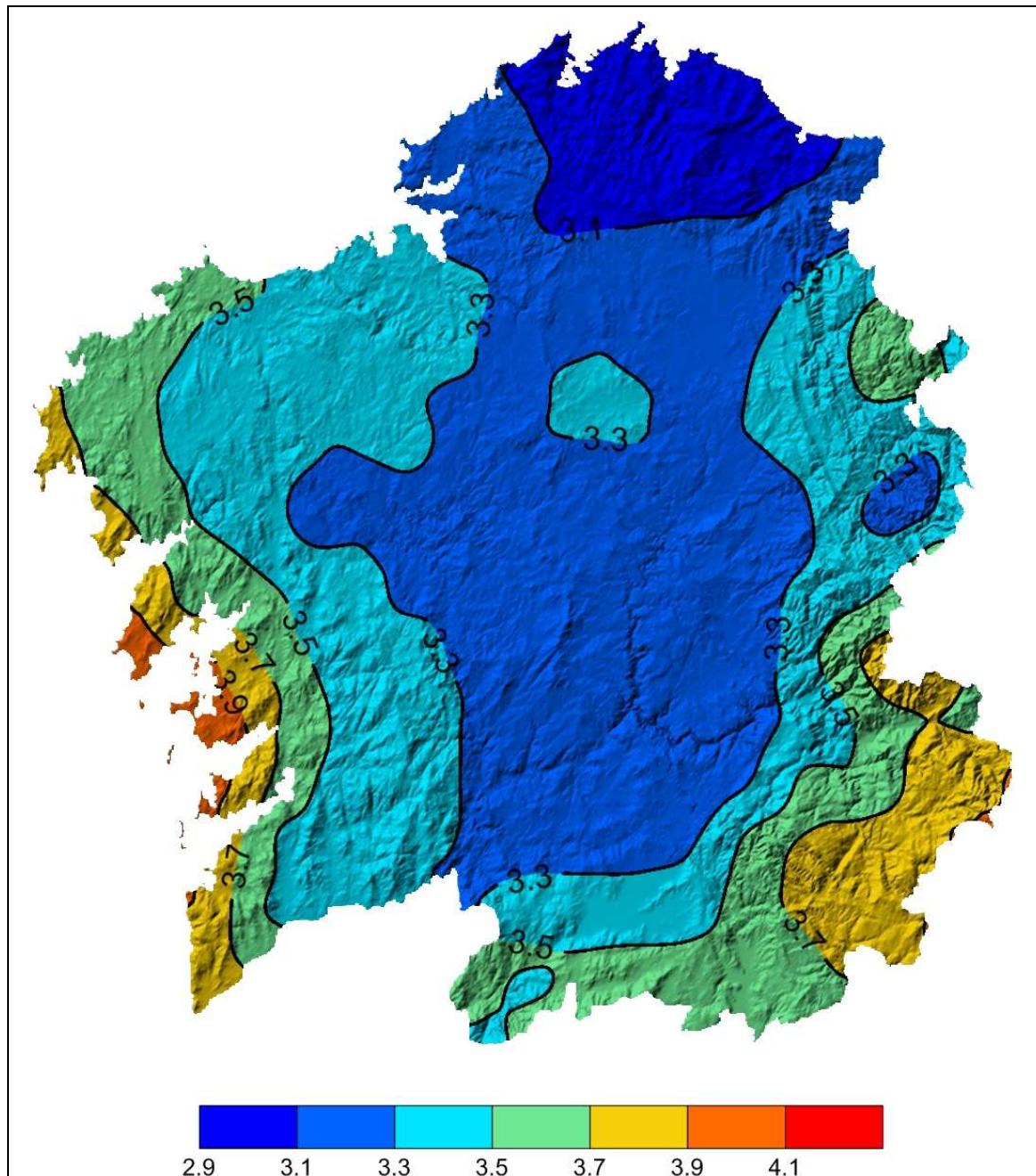


Fig. C-4: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Marzo

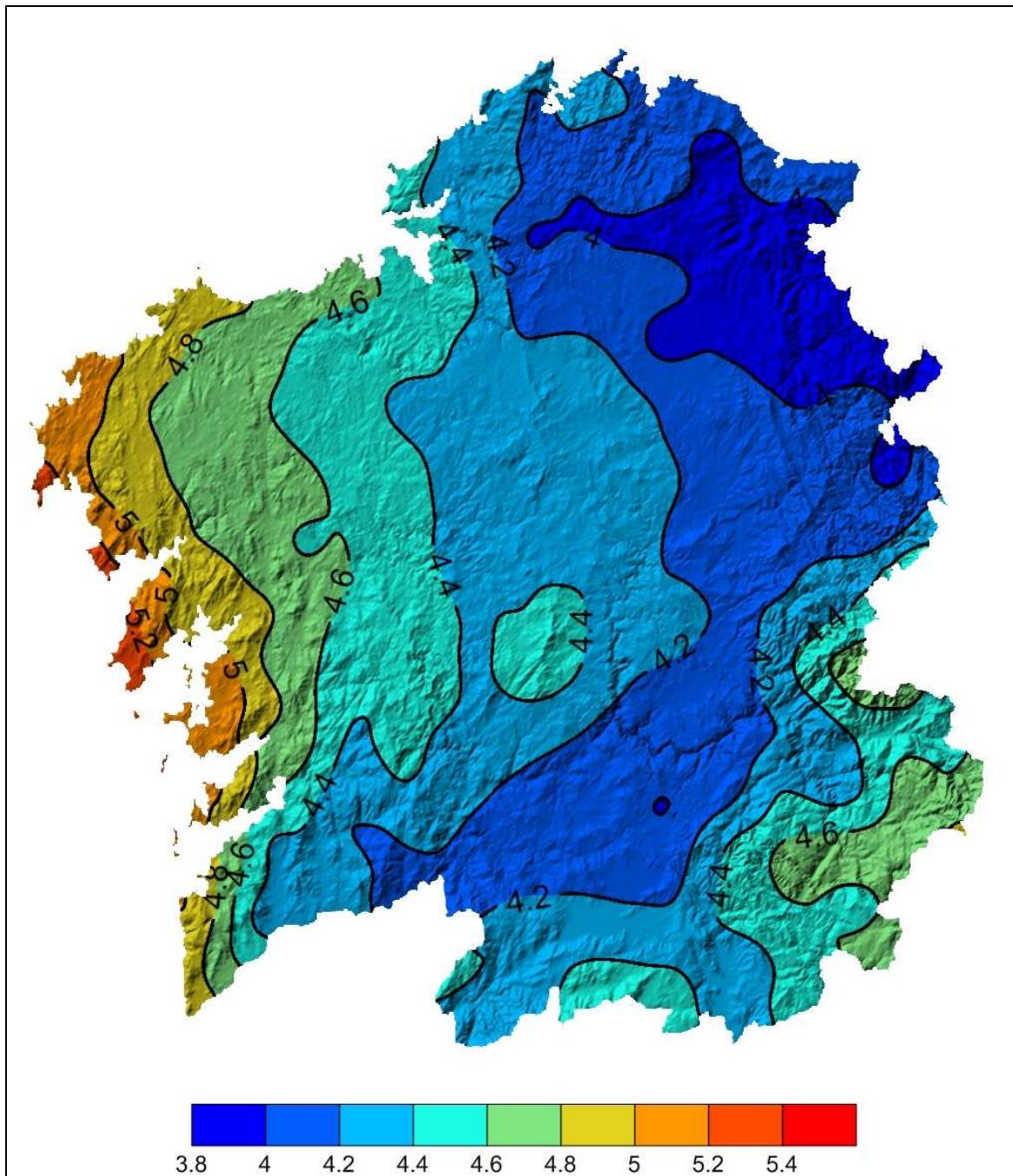


Fig. C-5: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Abril

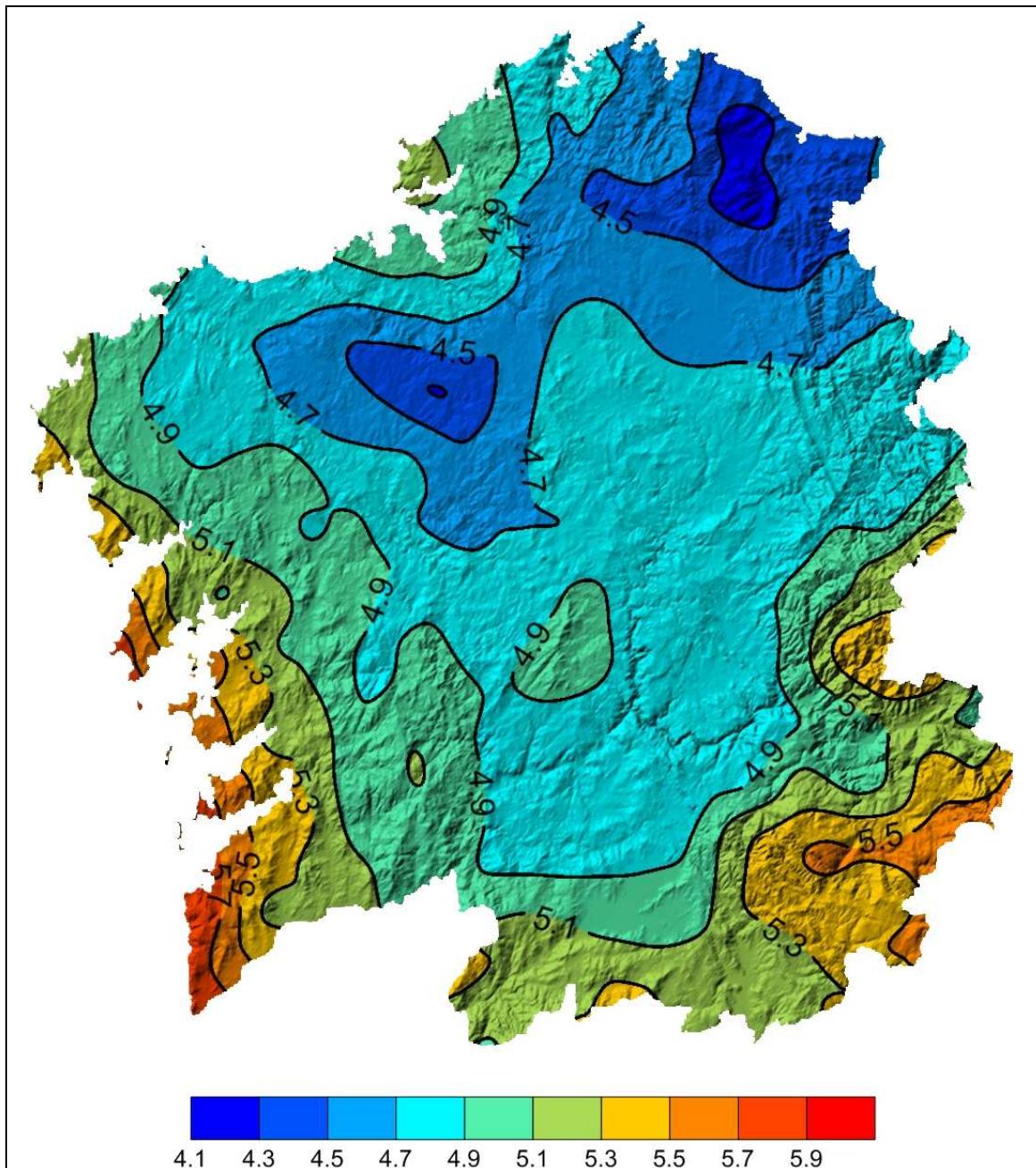


Fig. C-6: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Mayo

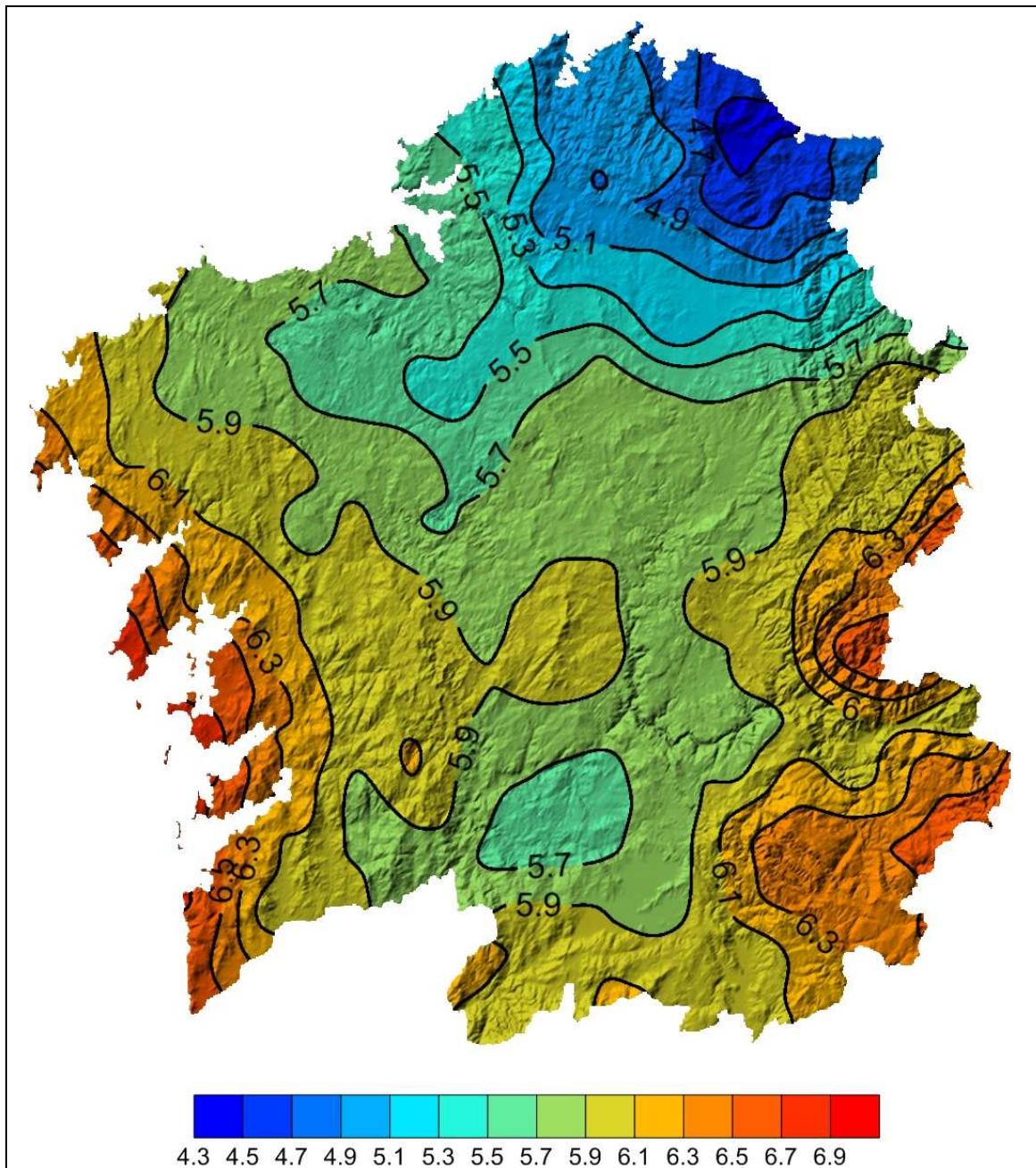


Fig. C-7: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Junio

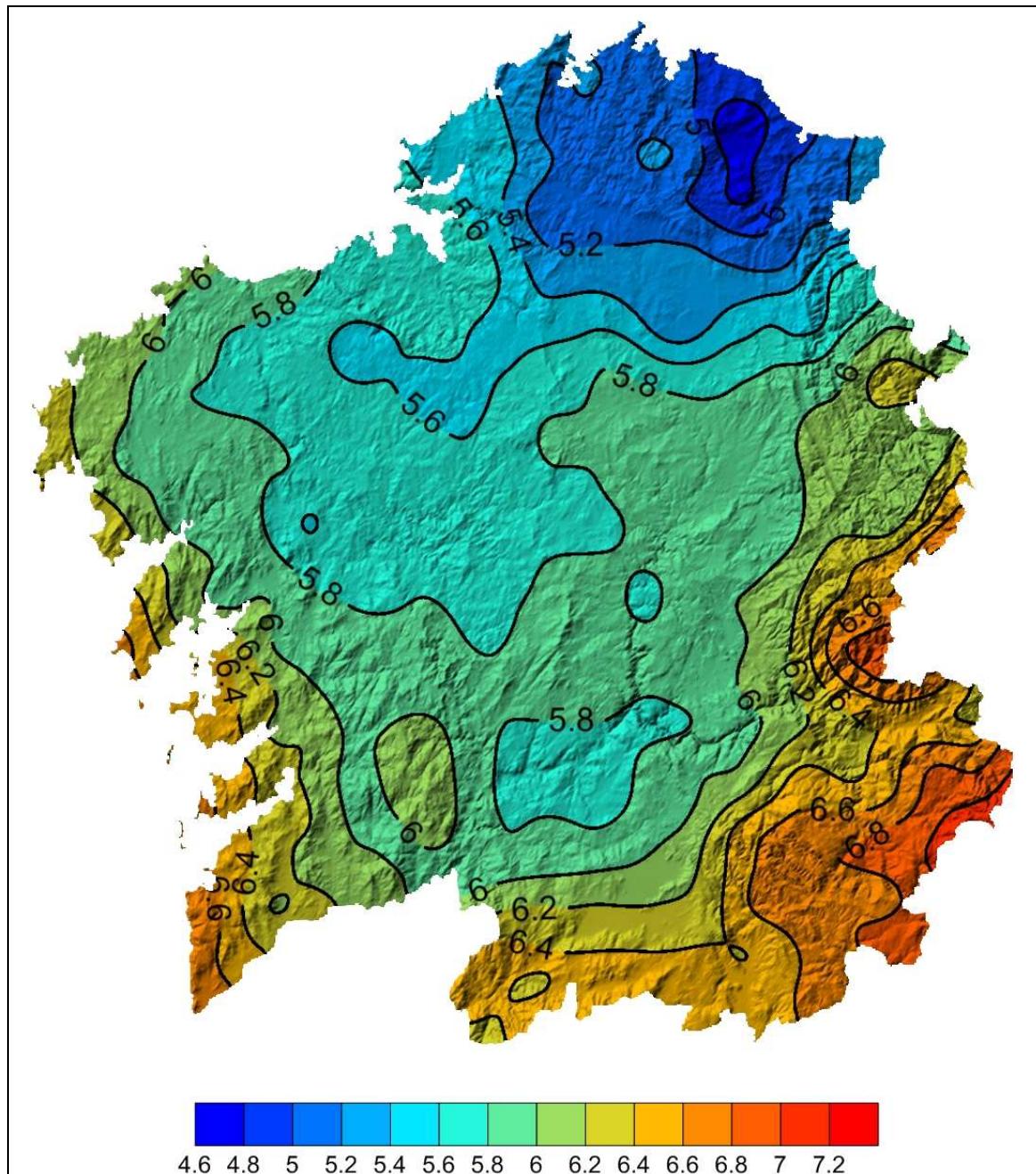


Fig. C-8: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Julio

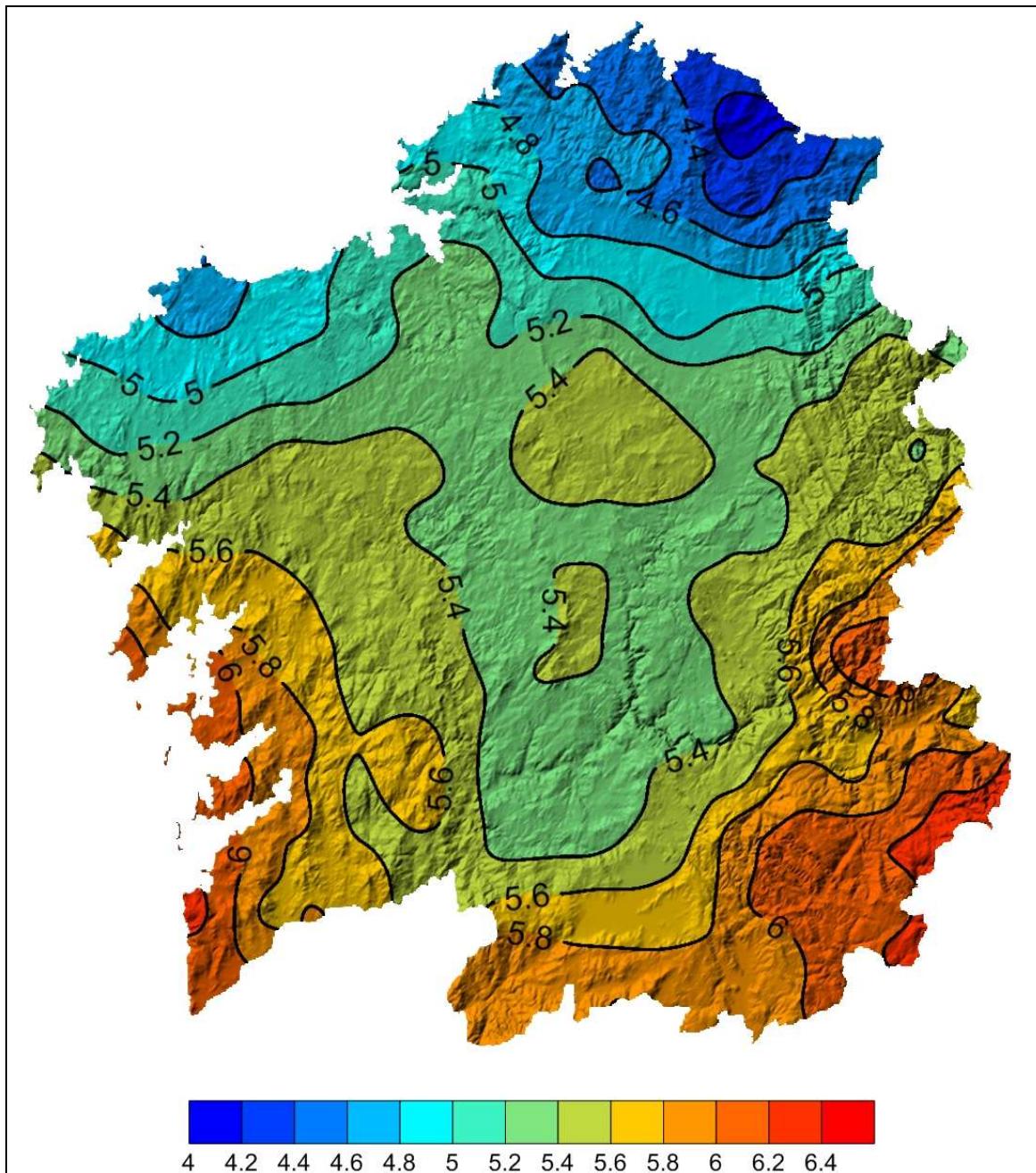


Fig. C-9: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Agosto

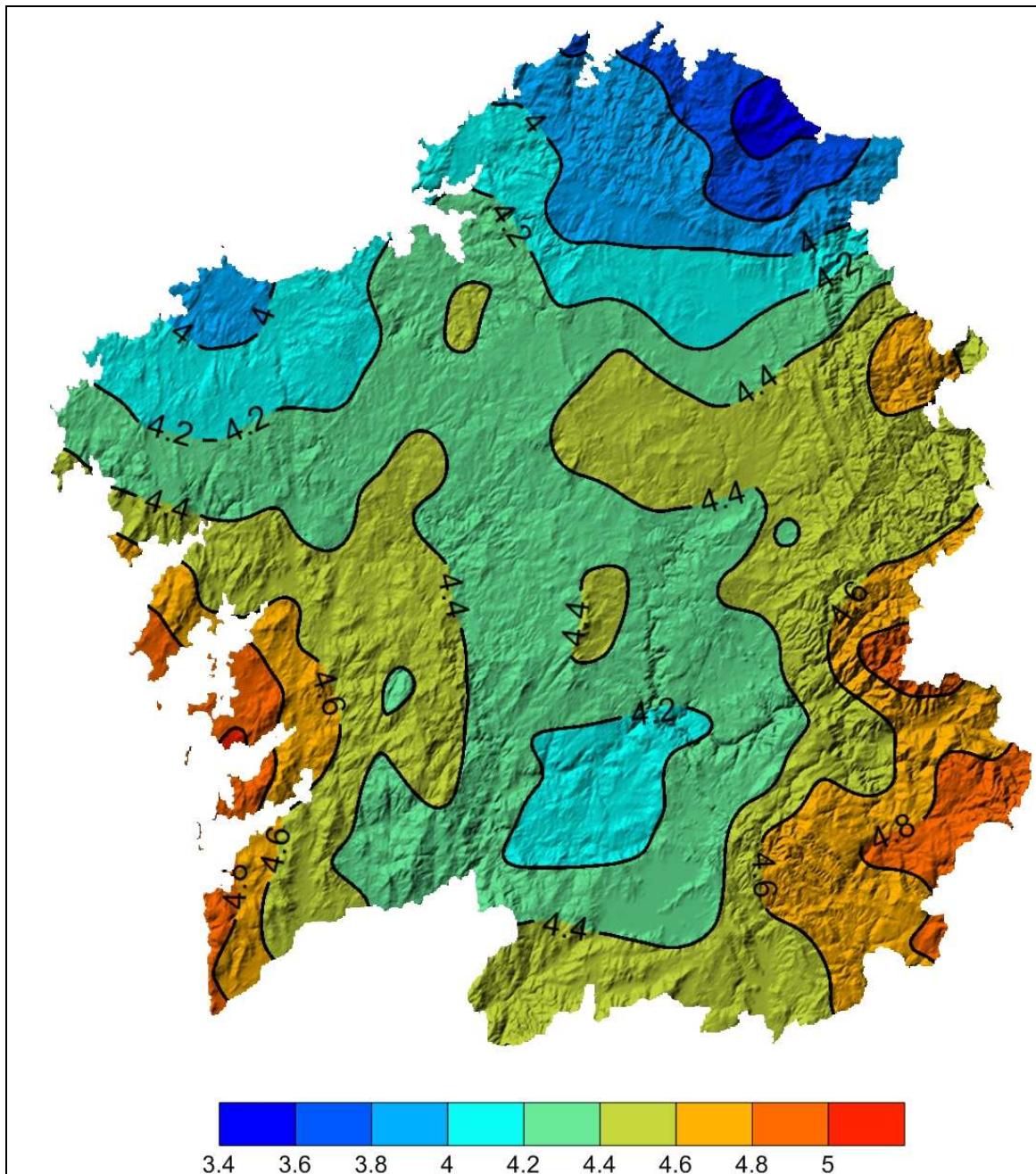


Fig. C-10: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Septiembre

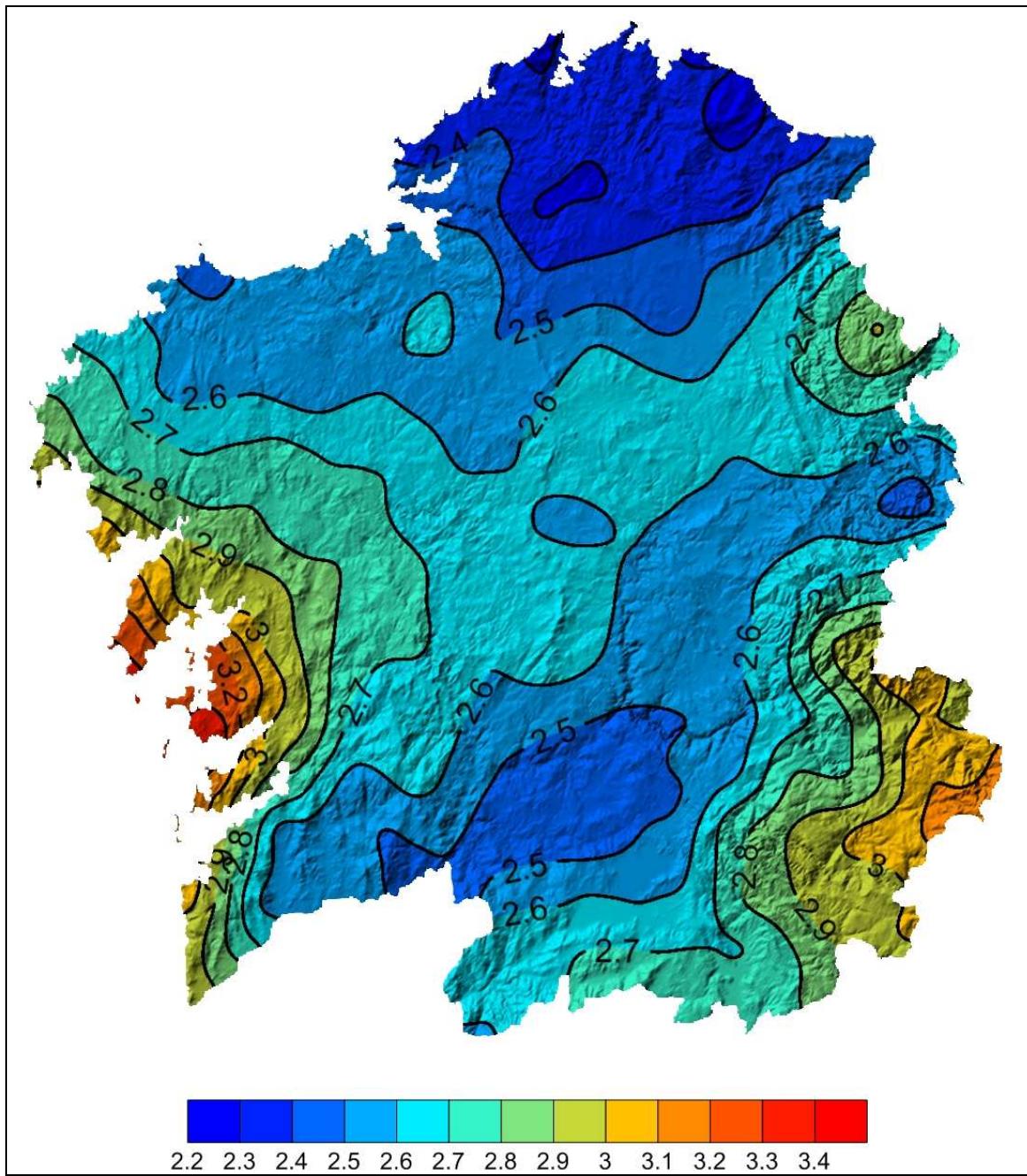


Fig. C-11: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Octubre

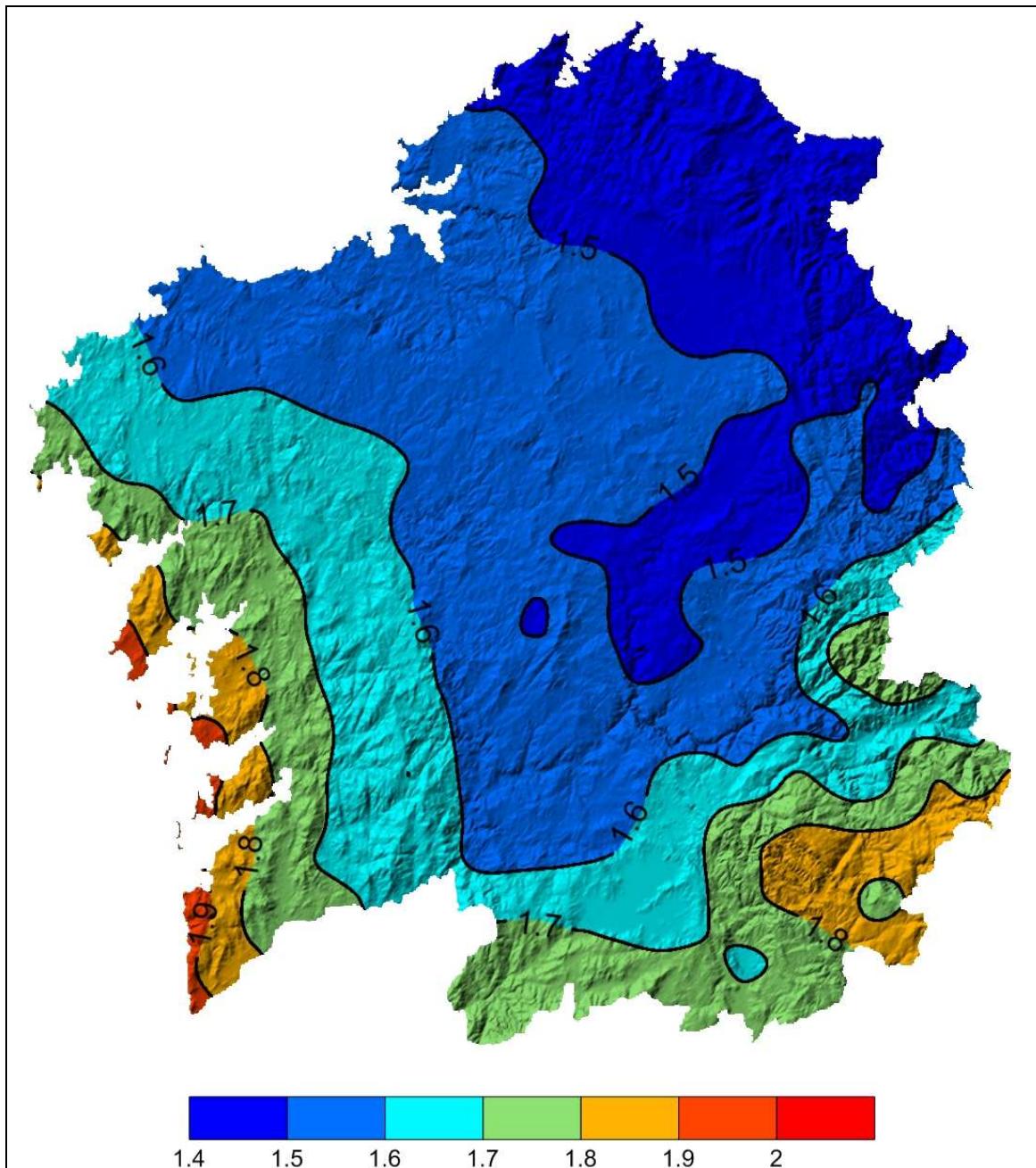


Fig. C-12: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Noviembre

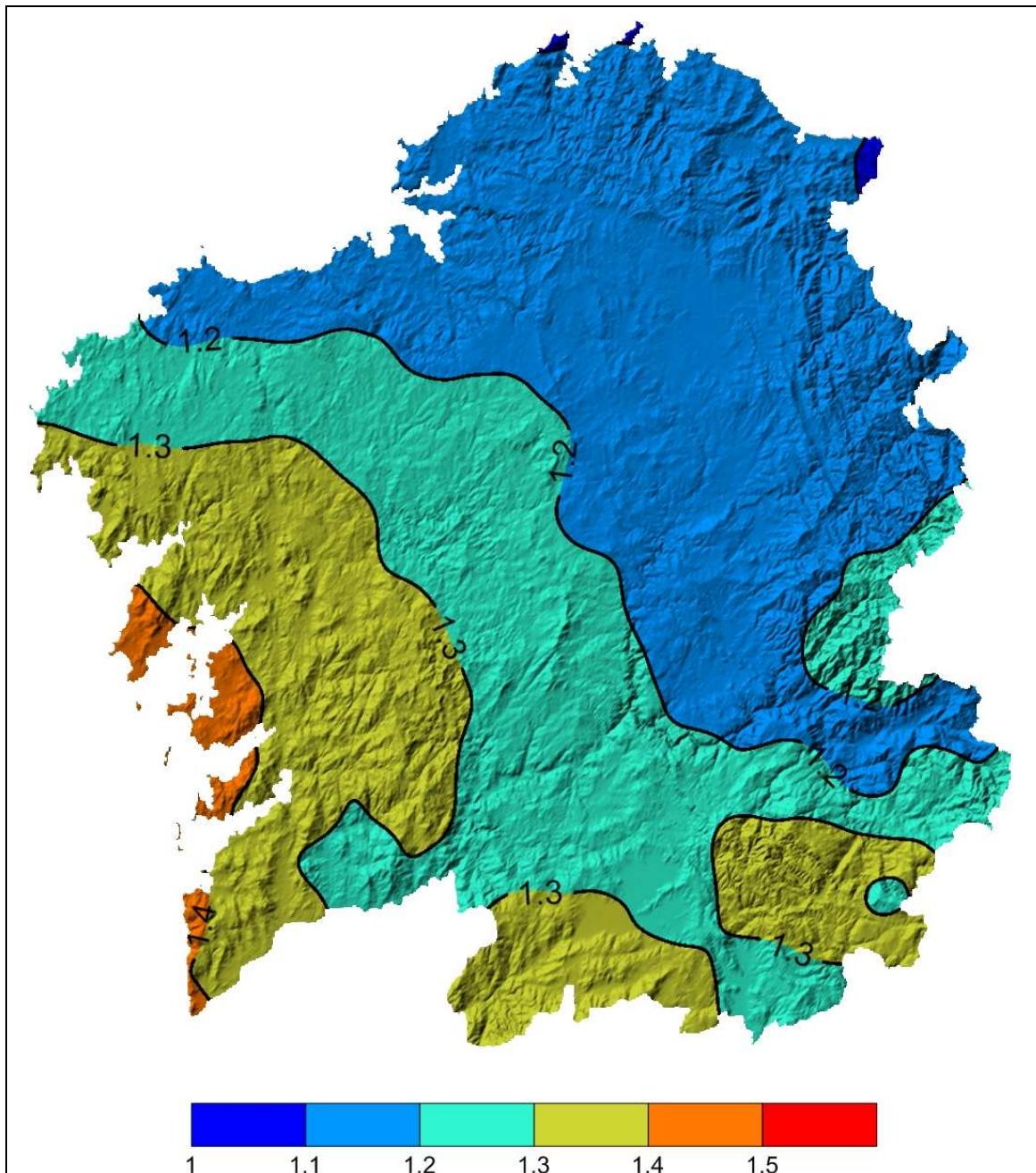


Fig. C-13: Insolación Global diaria [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio mensual Diciembre

Anexo D

Mapas climáticos de Insolación sobre Modelo Digital del Terreno

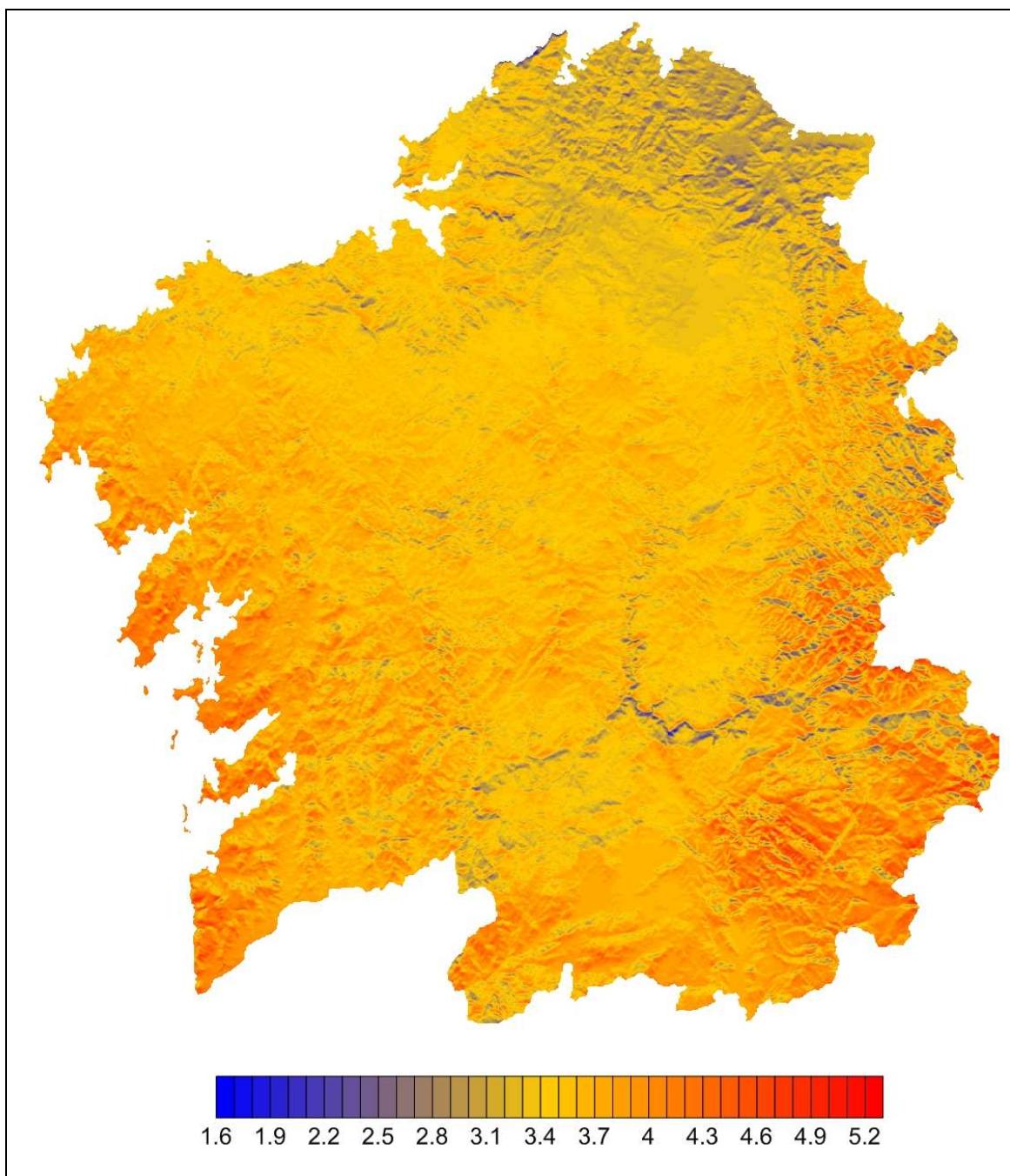


Fig. D-1: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [kWh m⁻² dia⁻¹] – promedio Anual

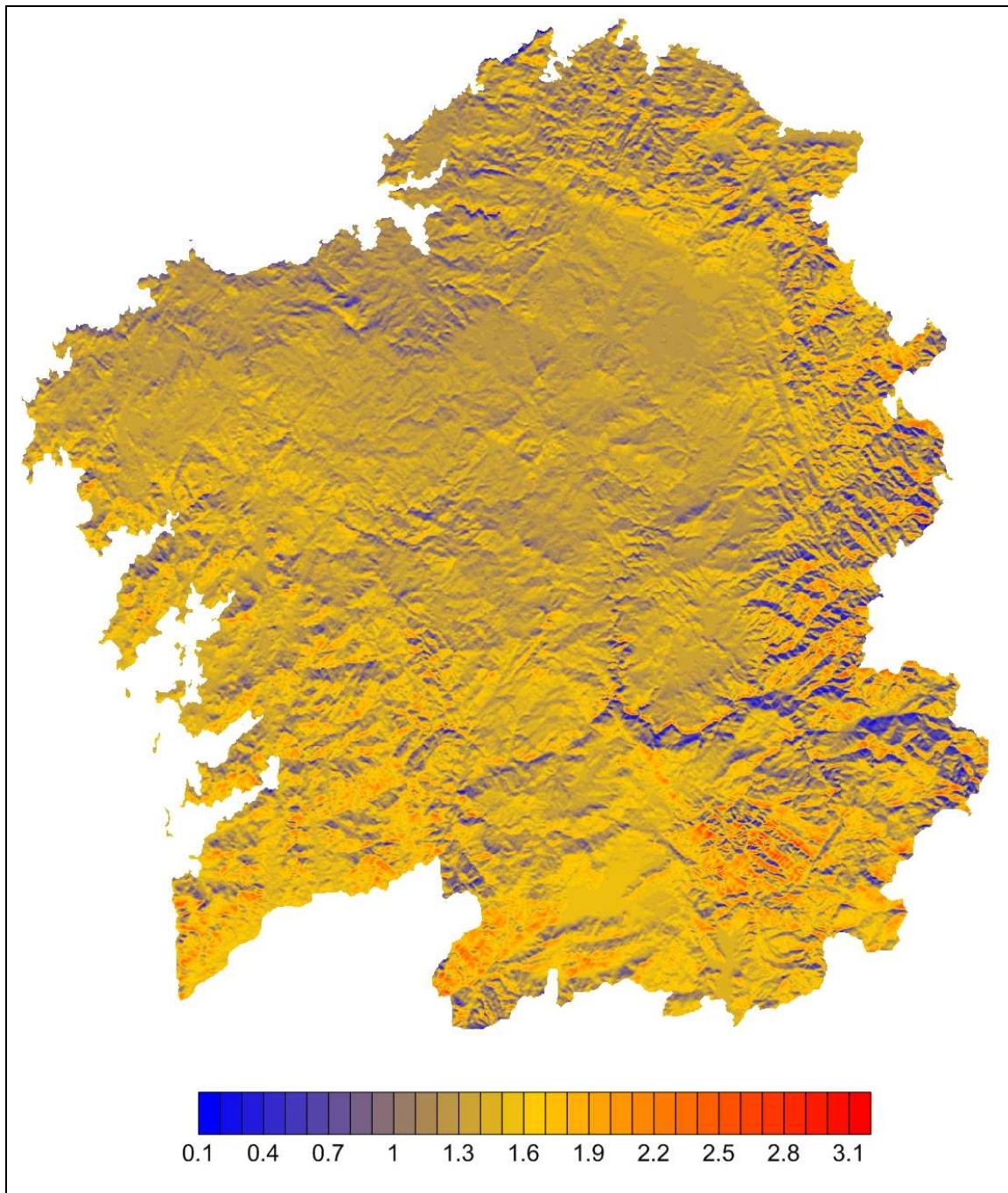


Fig. D-2: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Enero

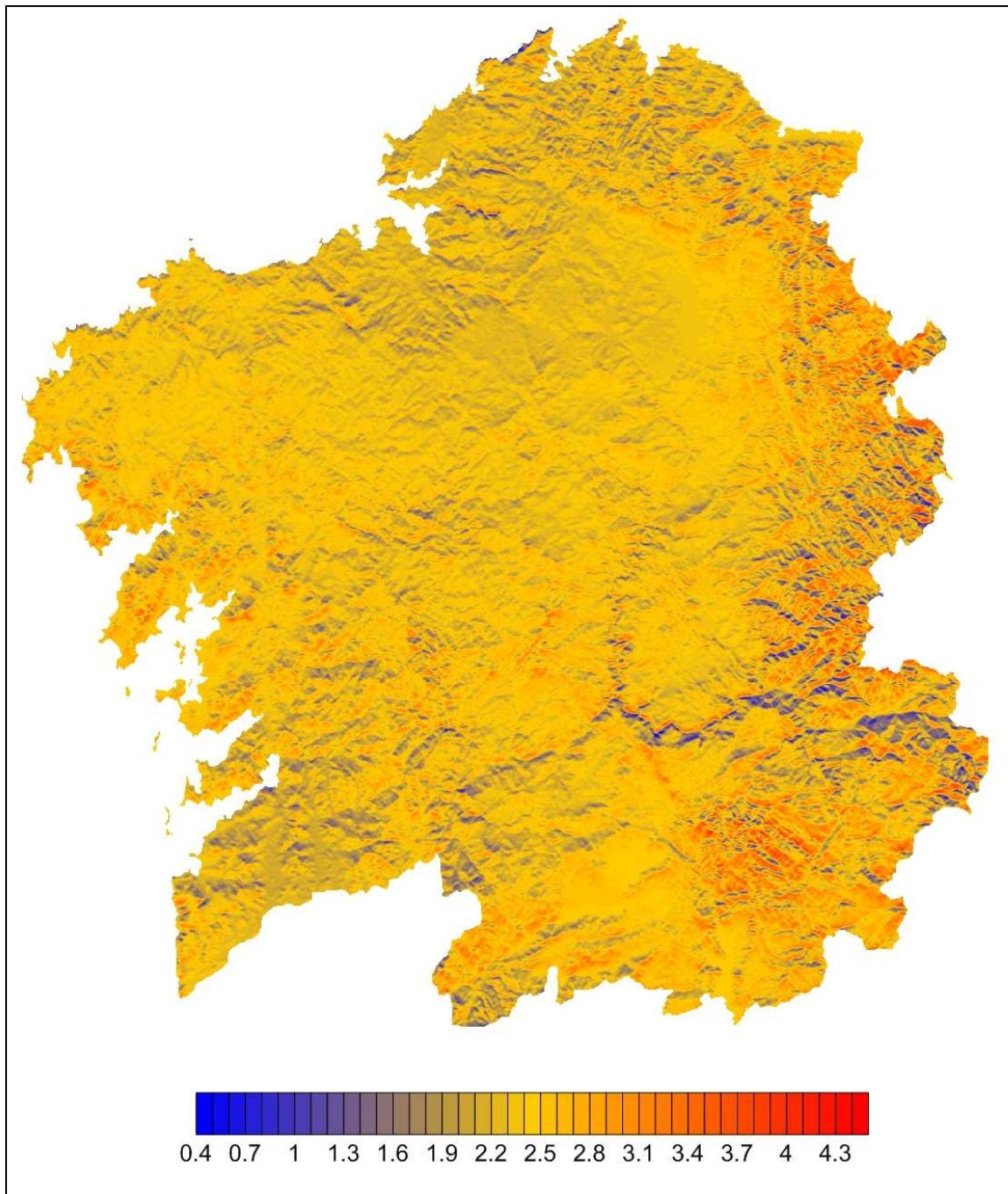


Fig. D-3: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Febrero

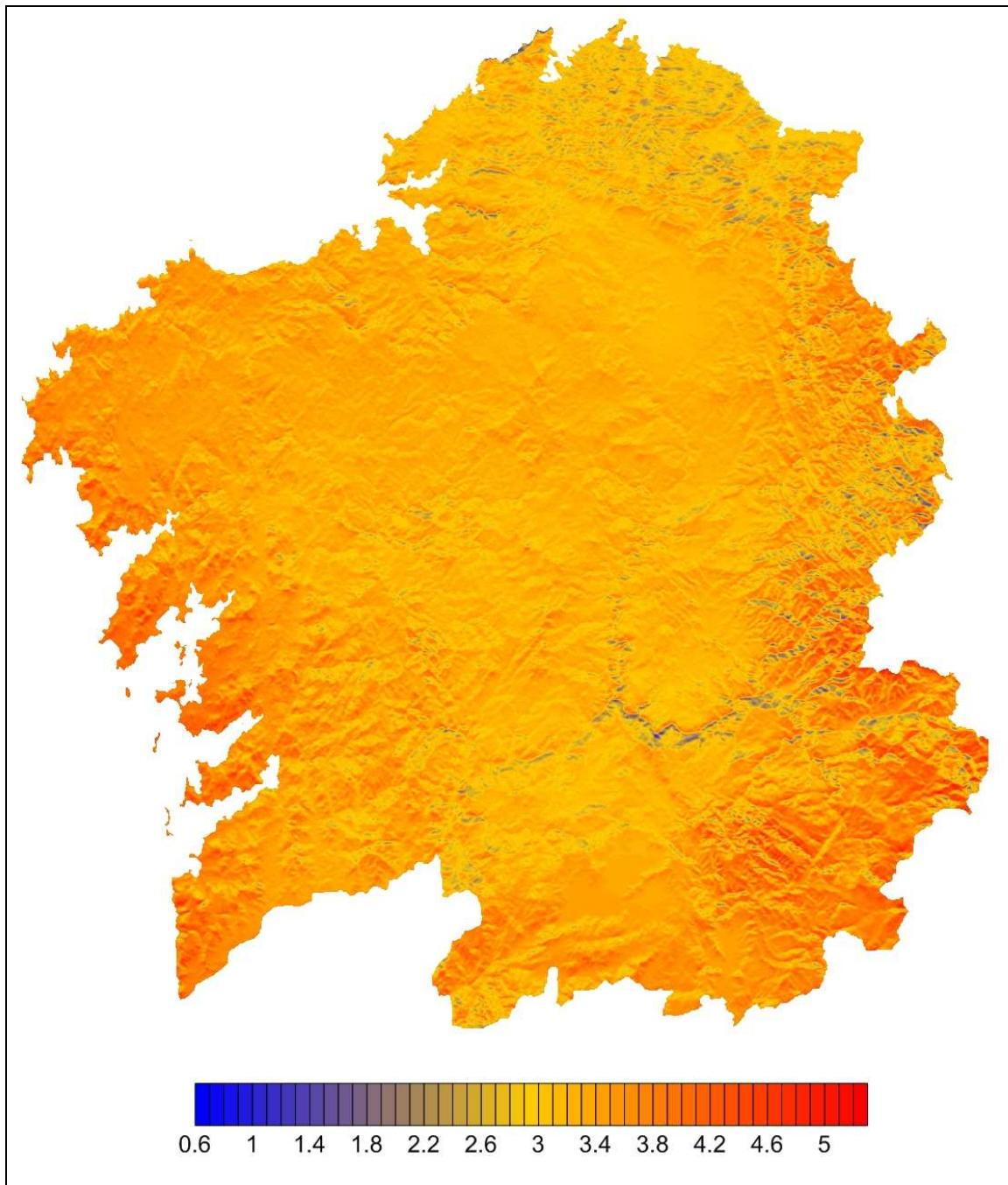


Fig. D-4: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Marzo

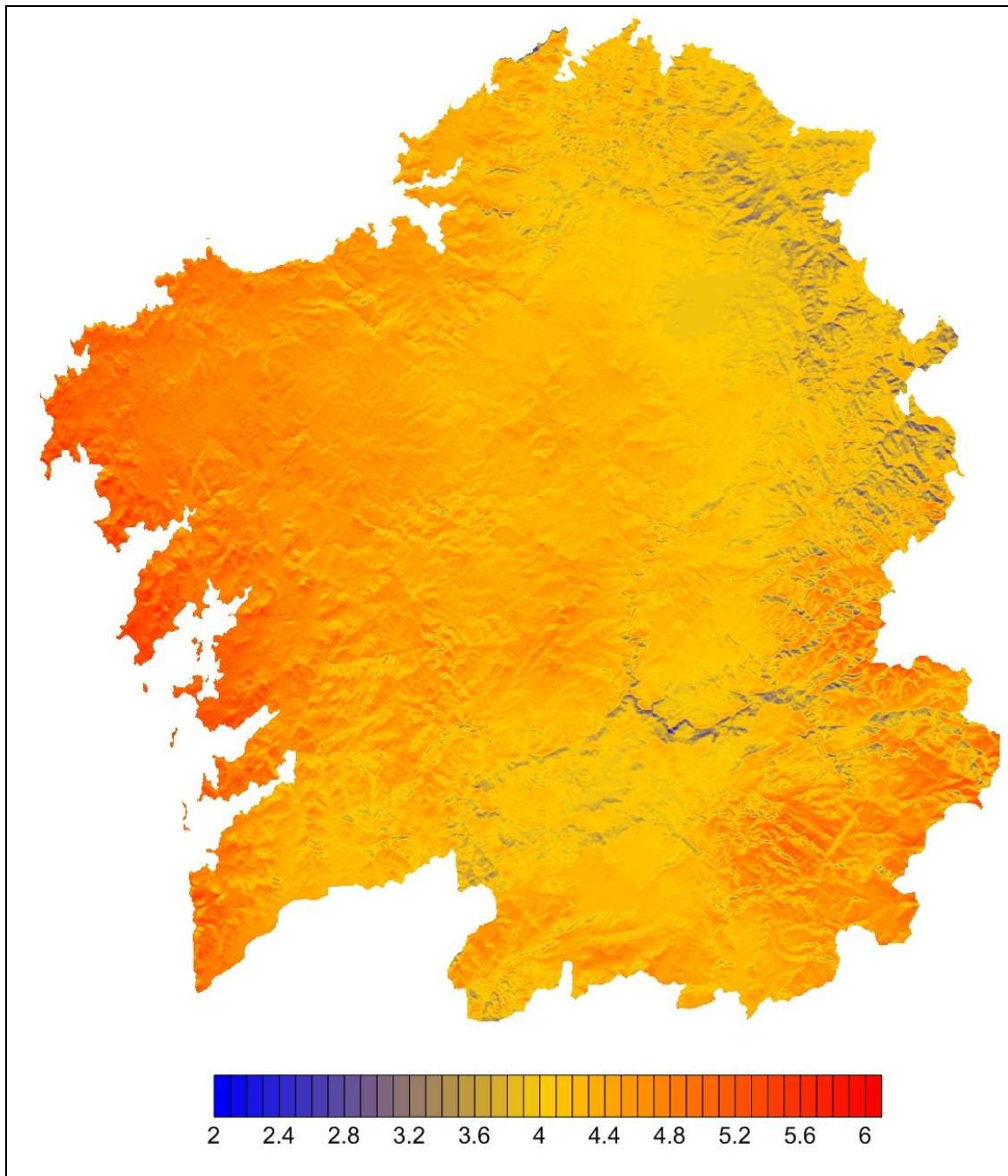


Fig. D-5: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Abril

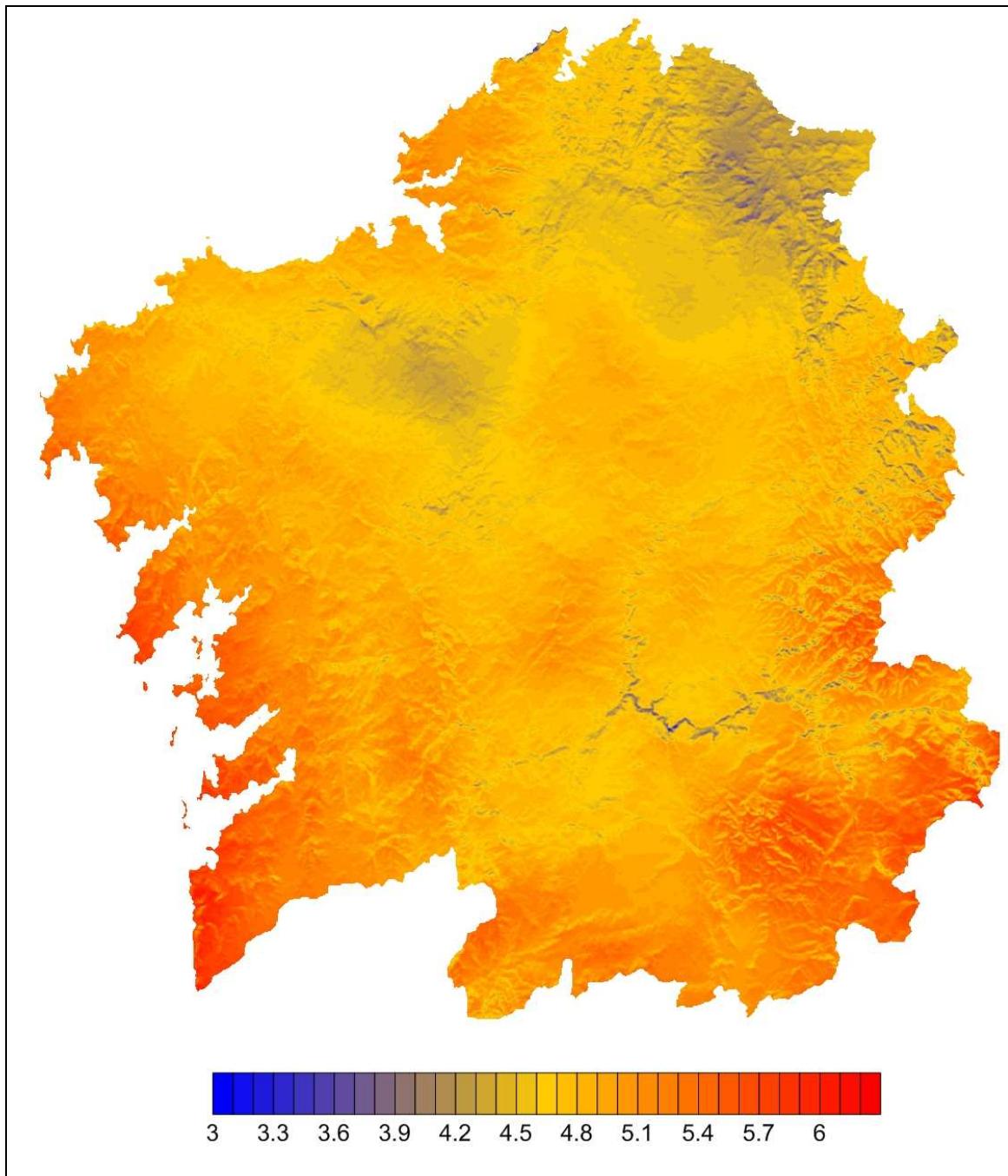


Fig. D-6: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Mayo

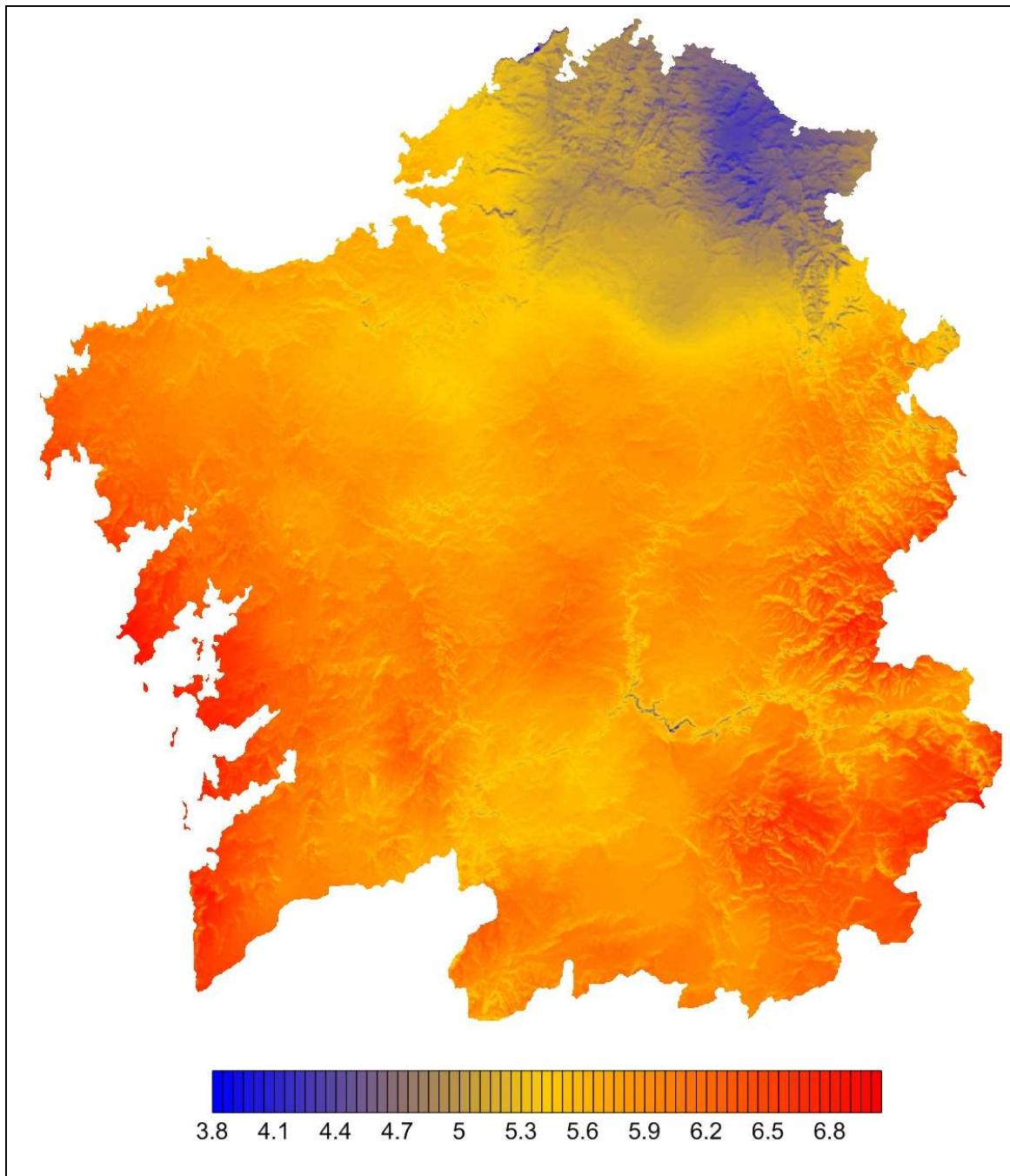


Fig. D-7: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Junio

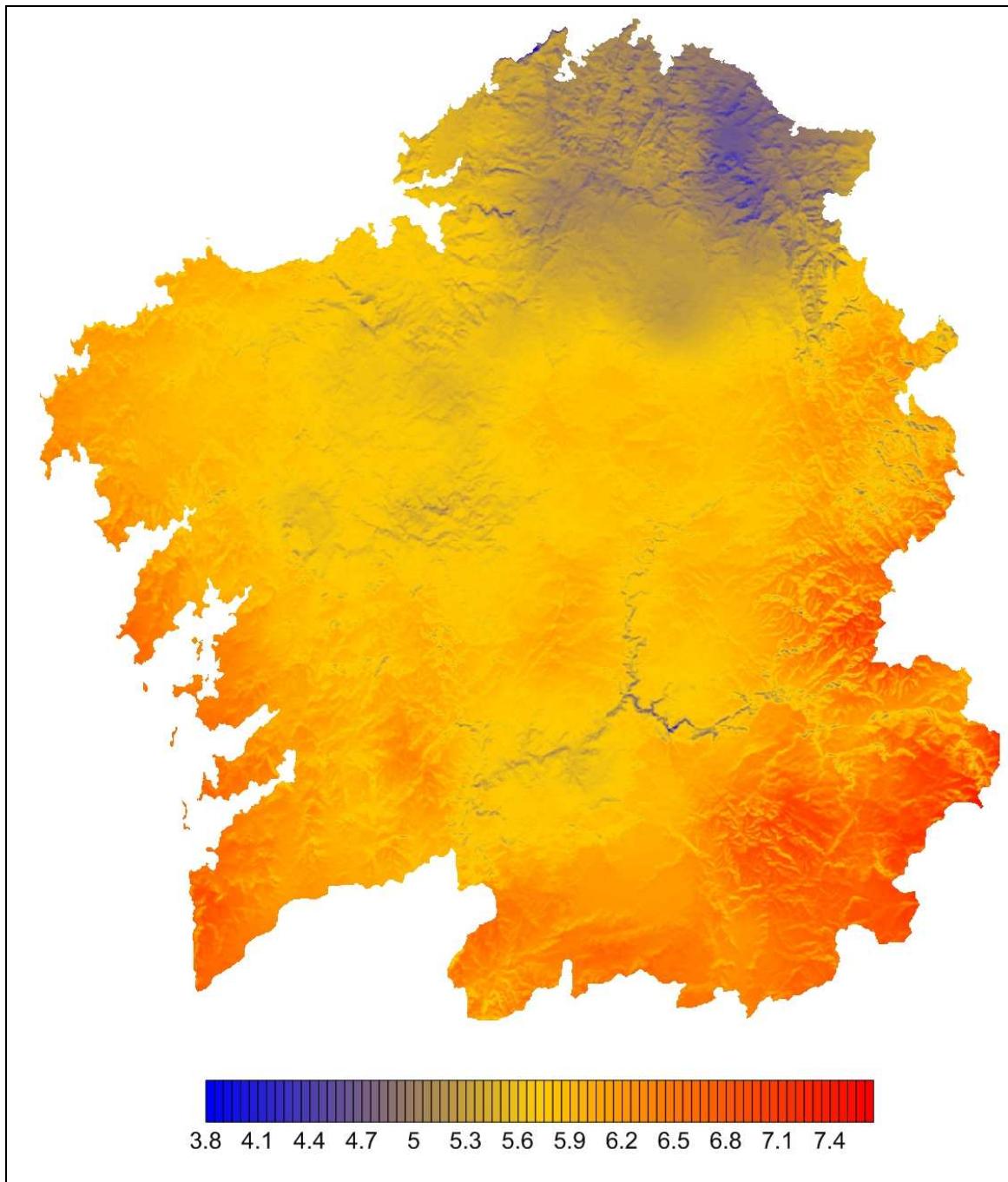


Fig. D-8: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Julio

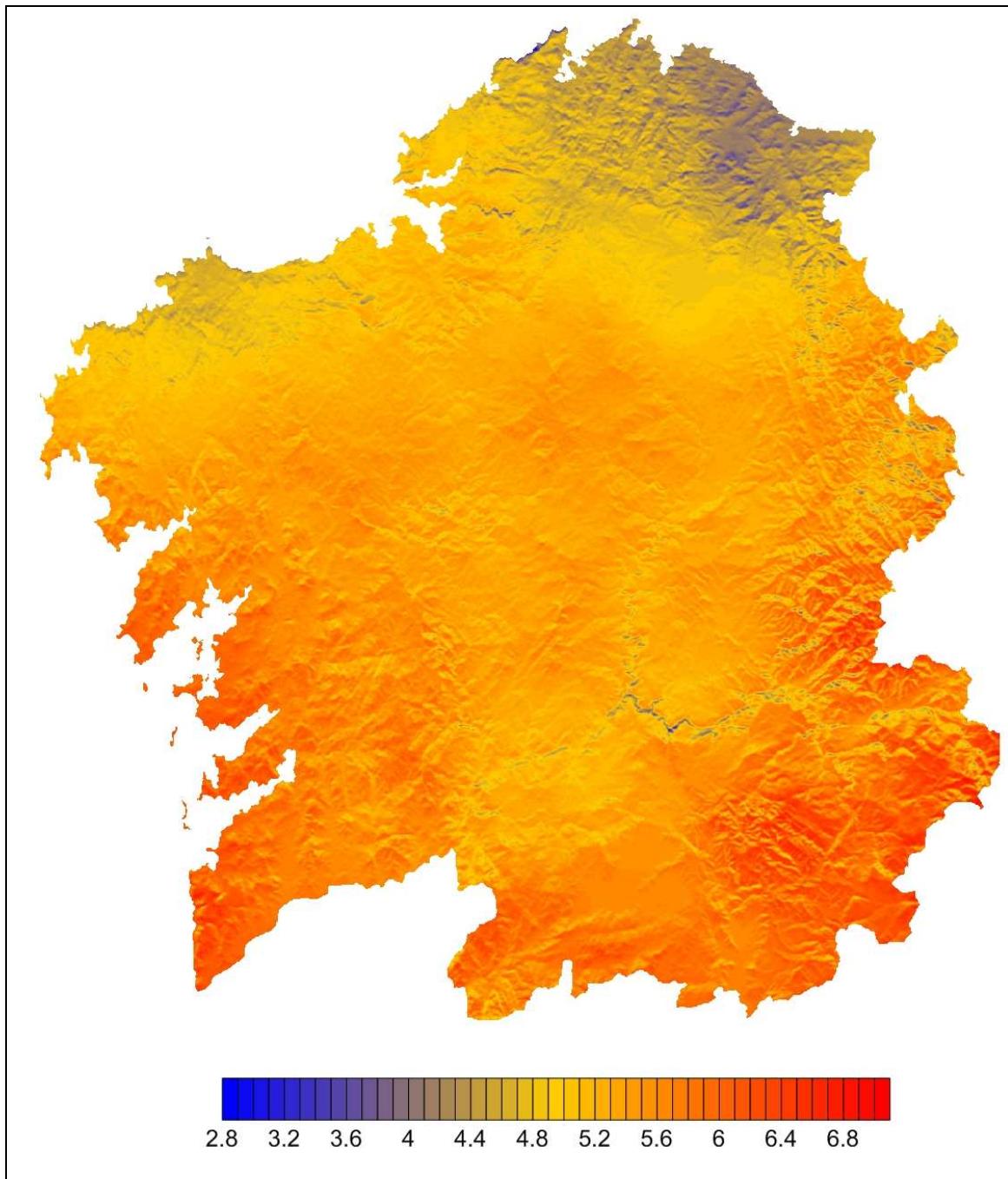


Fig. D-9: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Agosto

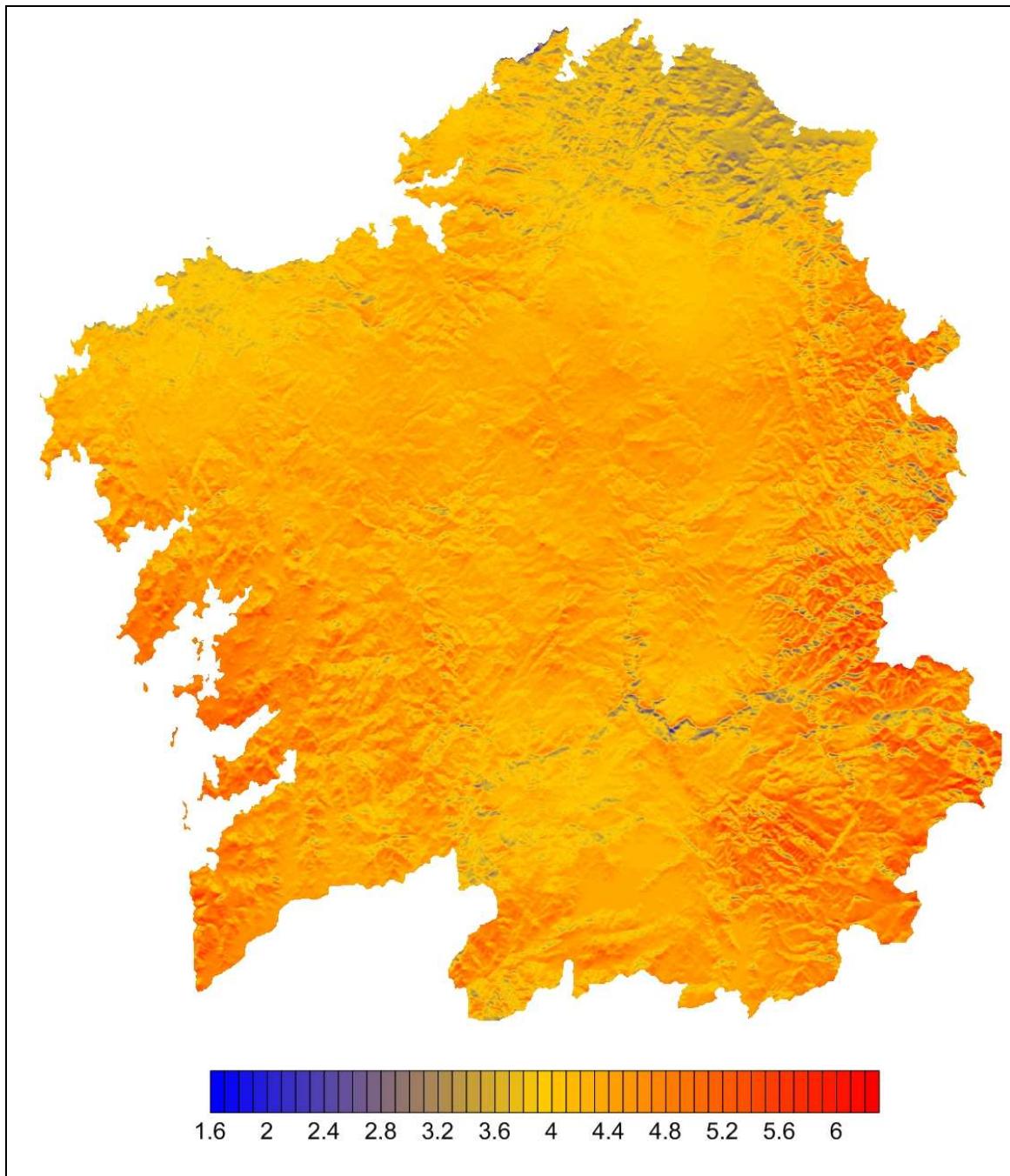


Fig. D-10: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [kWh m⁻² dia⁻¹] – promedio Septiembre

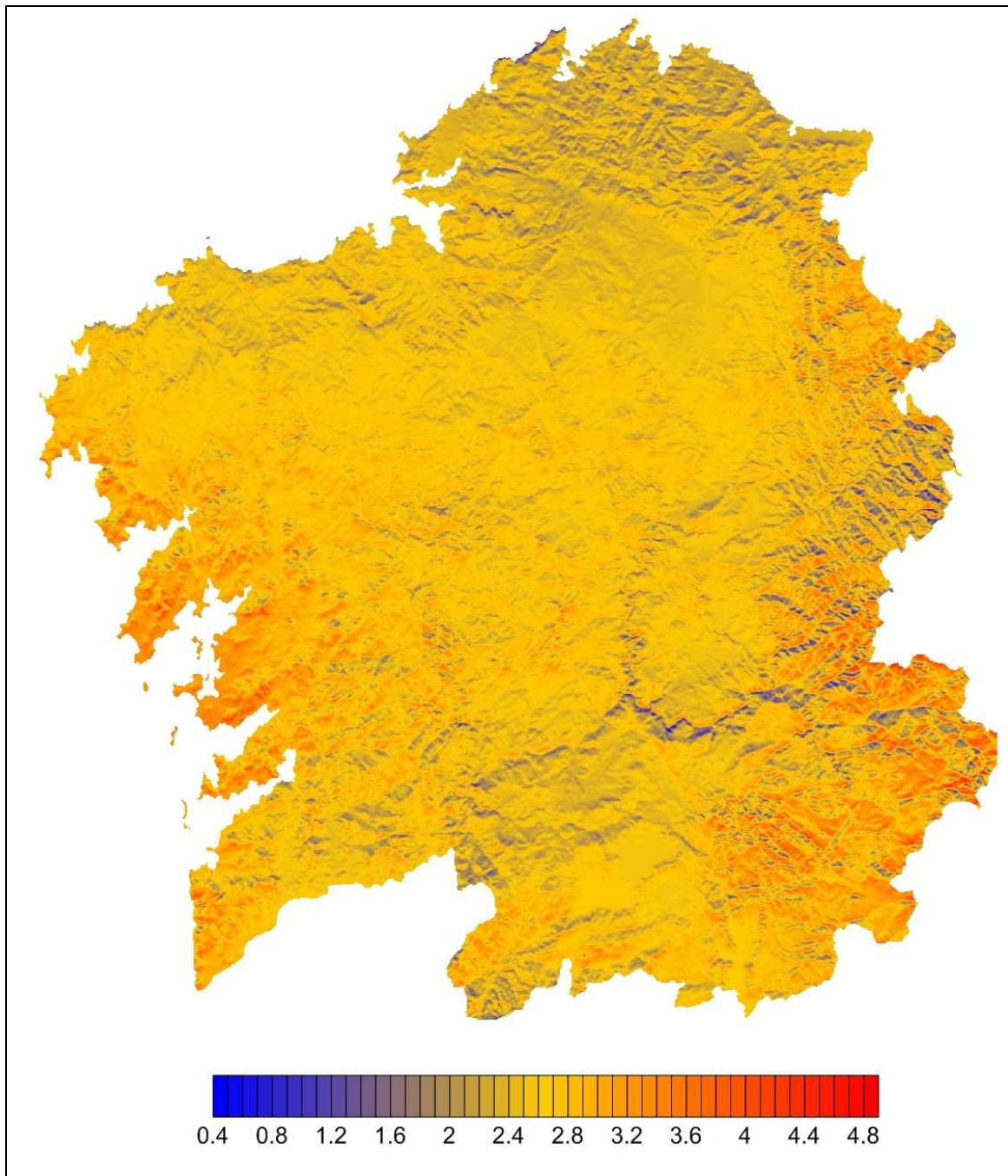


Fig. D-11: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Octubre

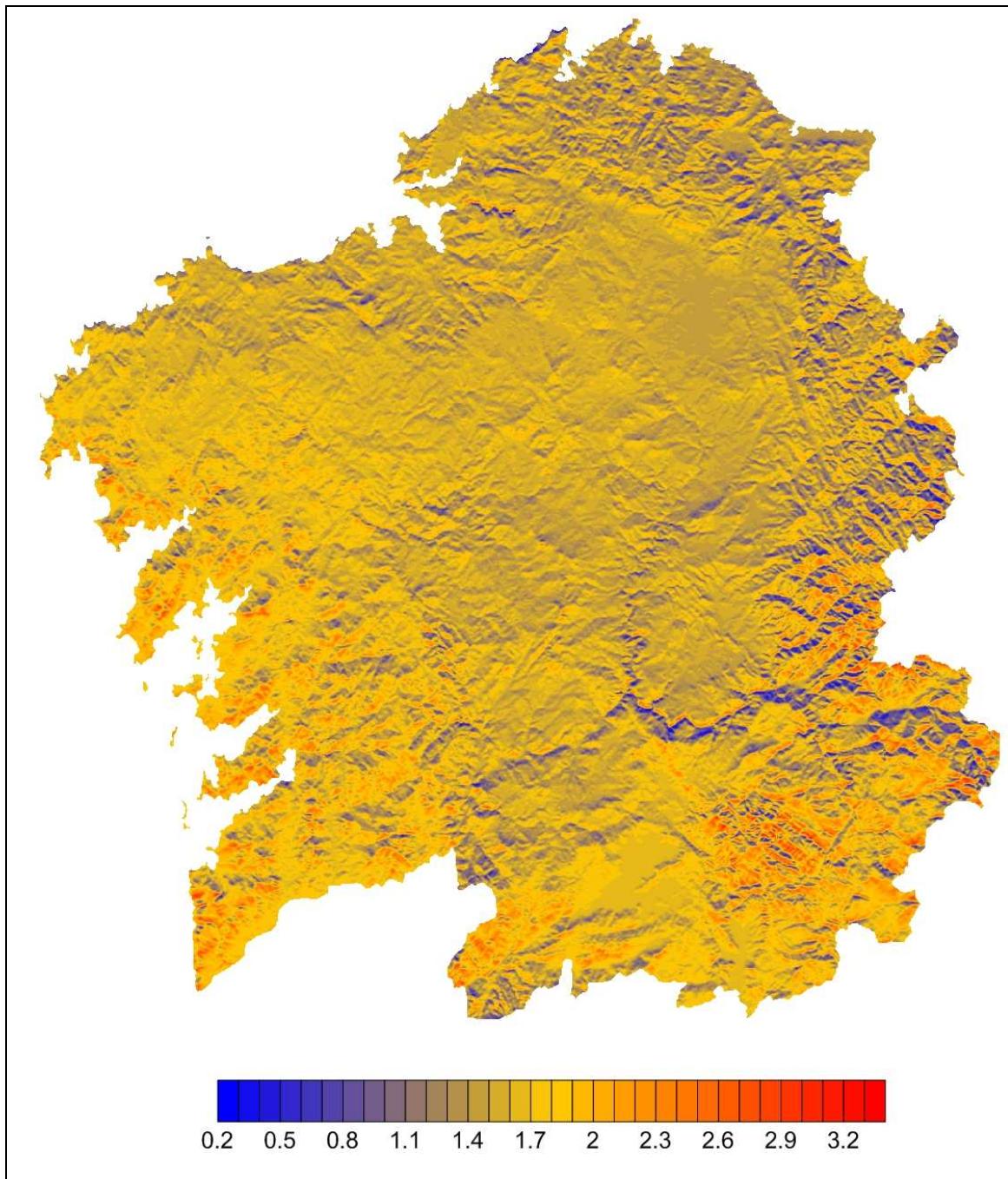


Fig. D-12: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [kWh m⁻² dia⁻¹] – promedio Noviembre

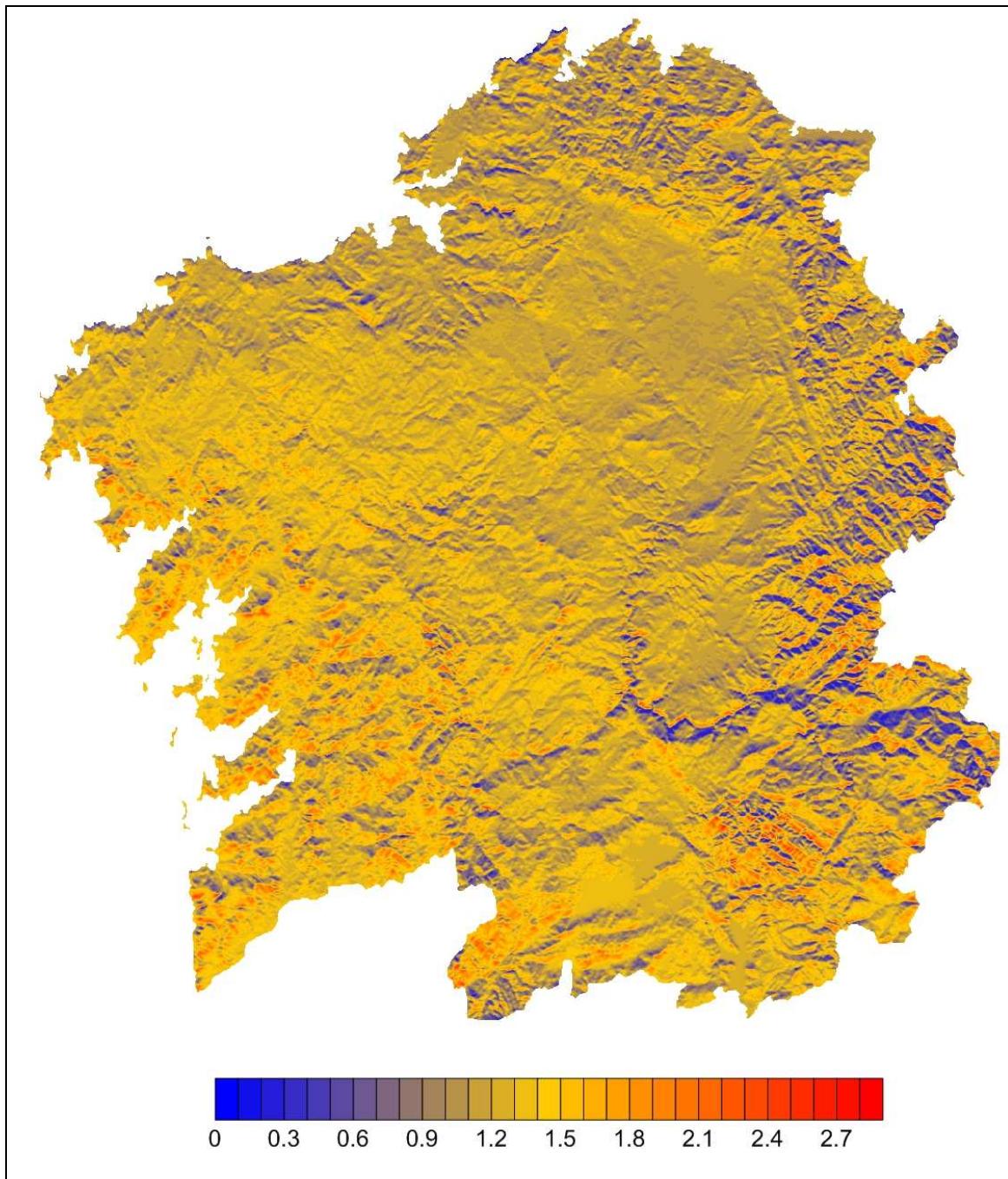


Fig. D-13: Insolación Global diaria sobre Modelo Digital del Terreno [$\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] – promedio Diciembre

Anexo E

Mapas climáticos de Índice de Claridad

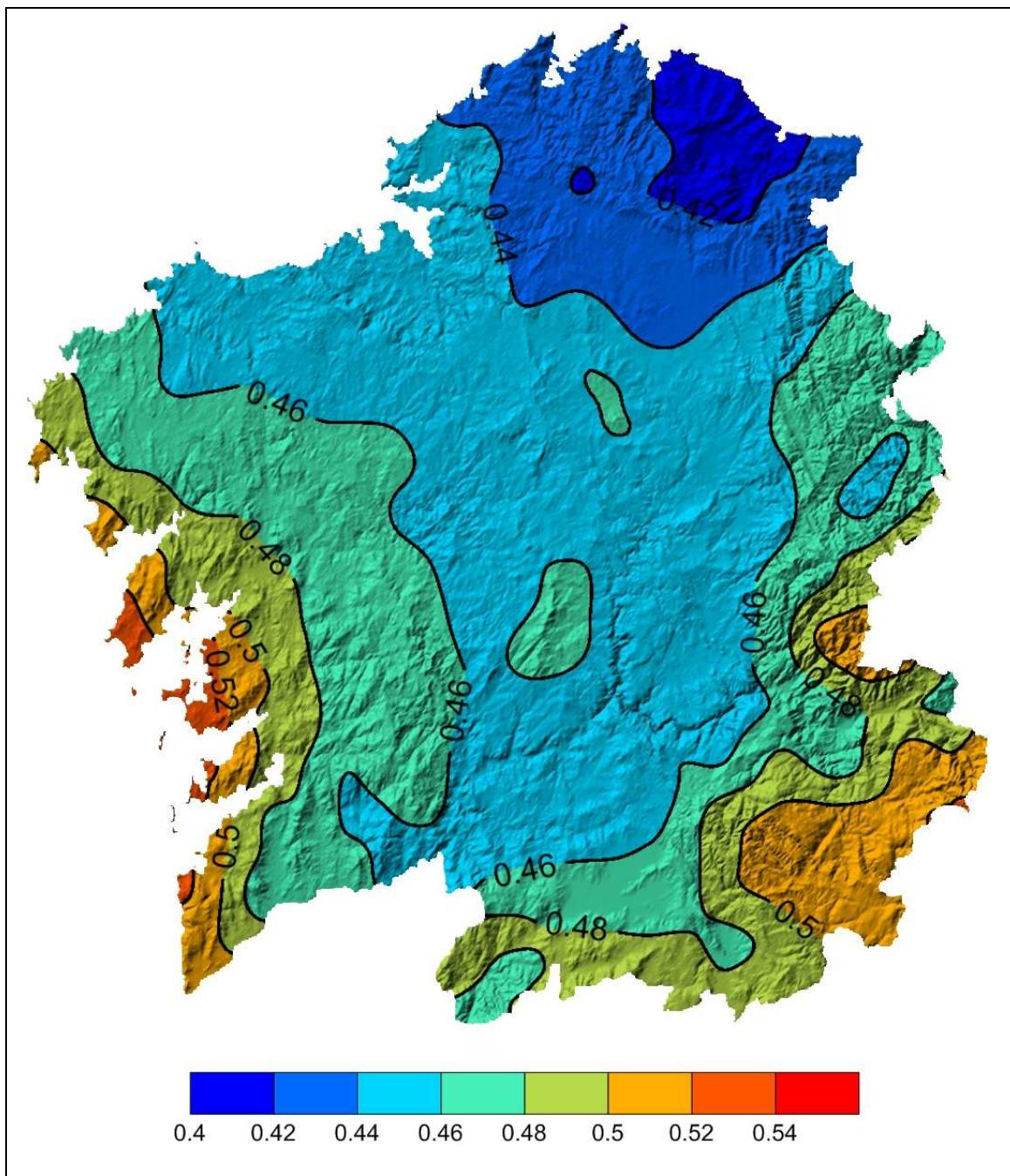


Fig. E-1: Índice de Claridad – promedio Anual

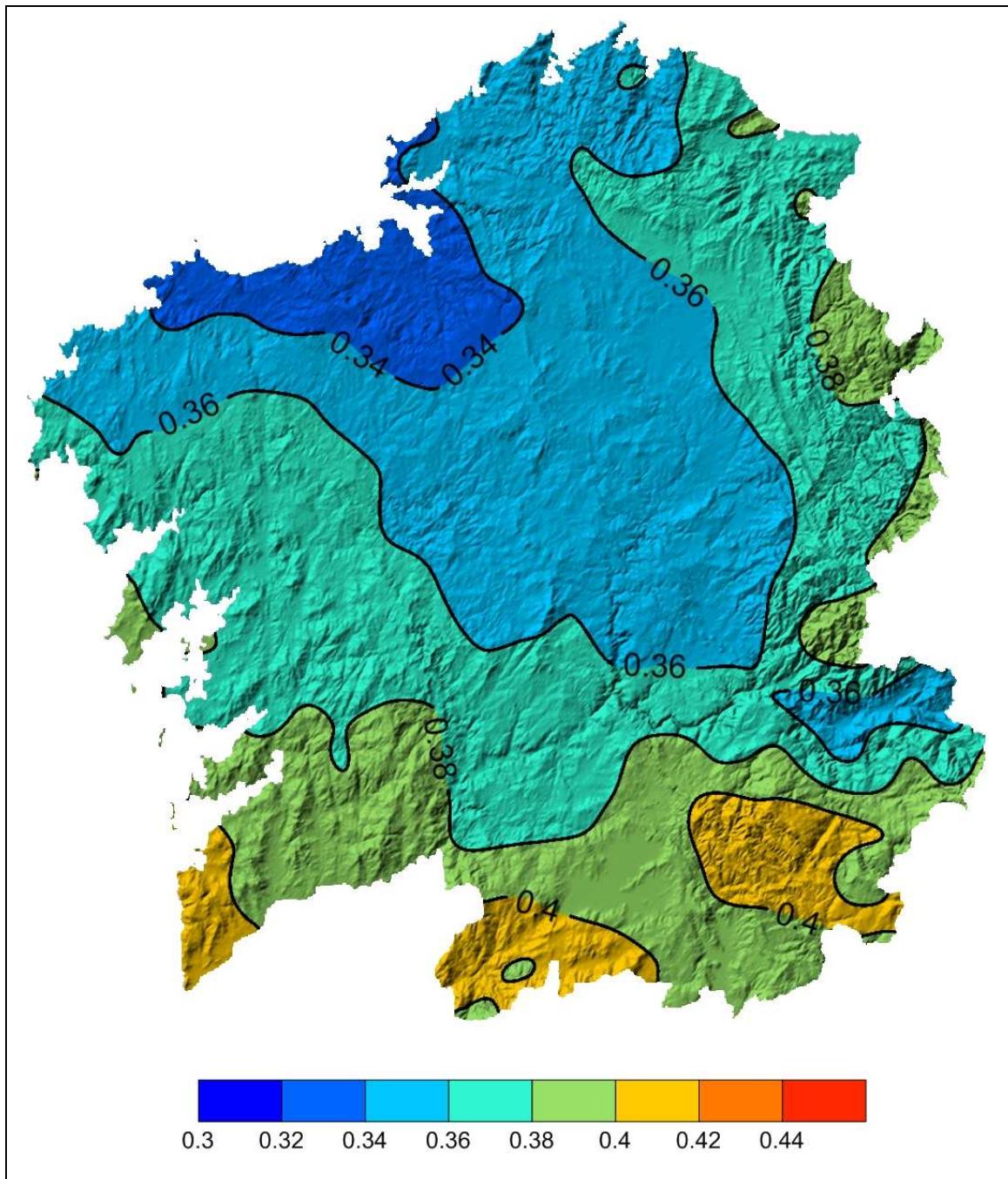


Fig. E-2: Índice de Claridad – promedio Enero

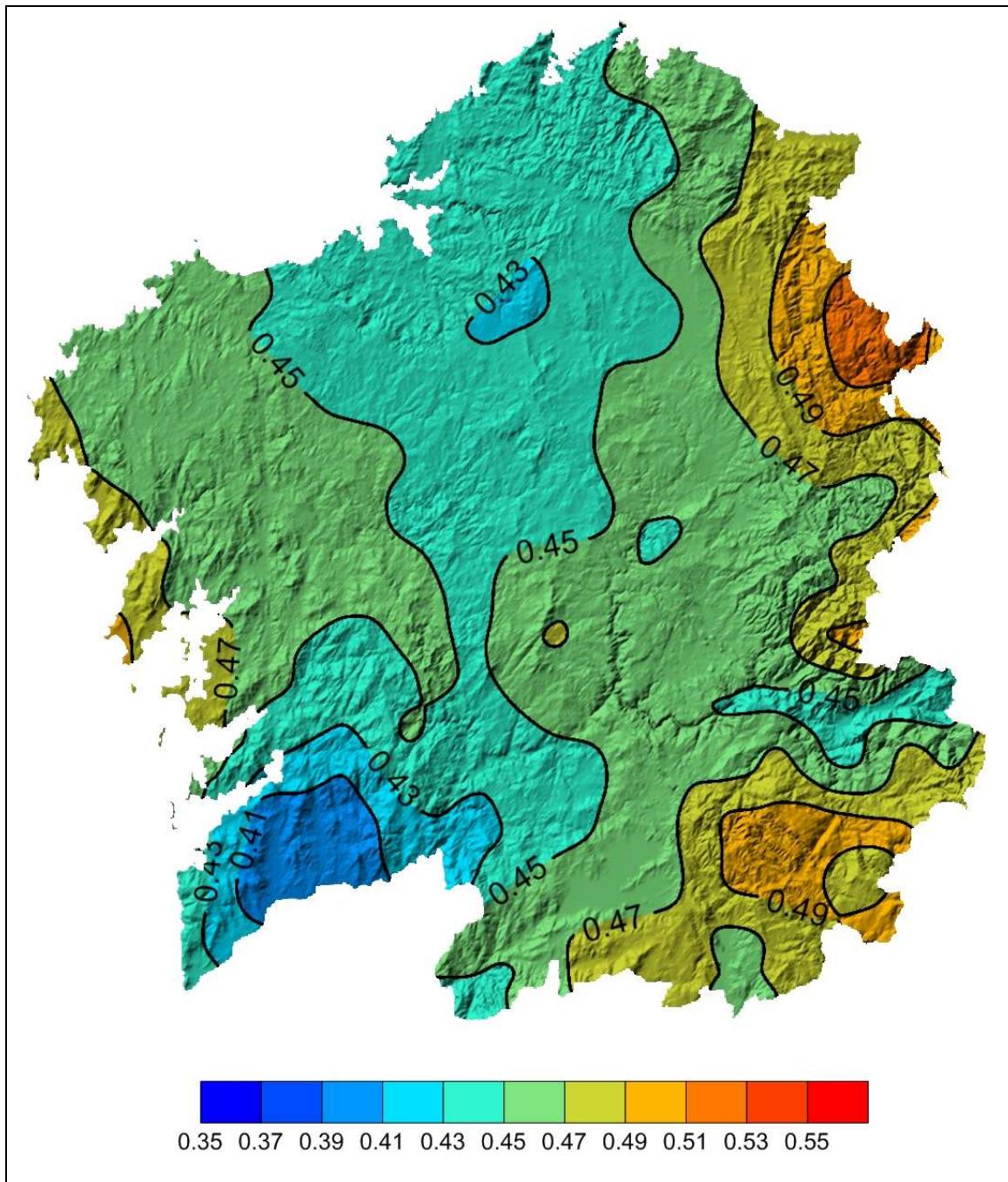


Fig. E-3: Índice de Claridad – promedio Febrero

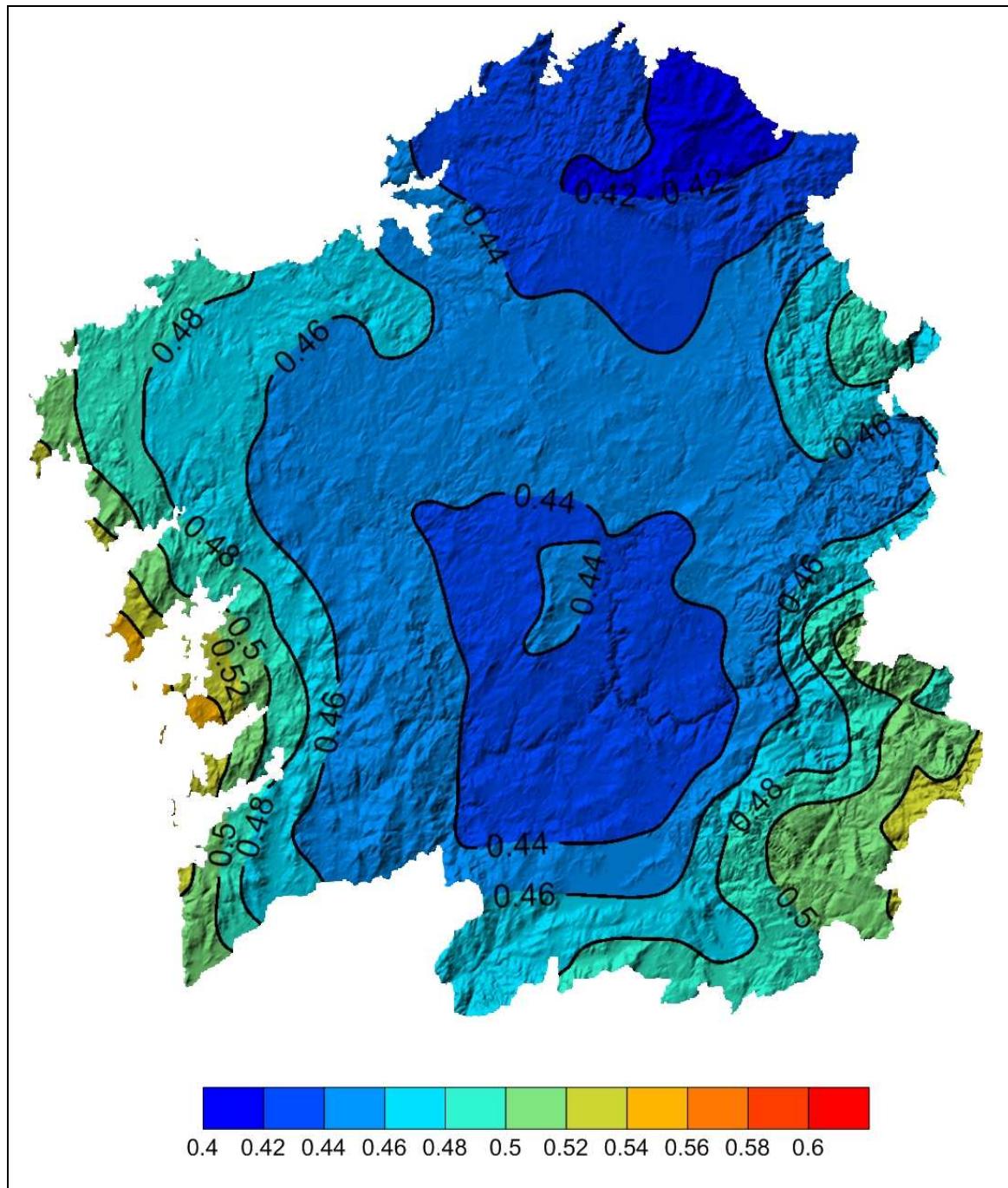


Fig. E-4: Índice de Claridad – promedio Marzo

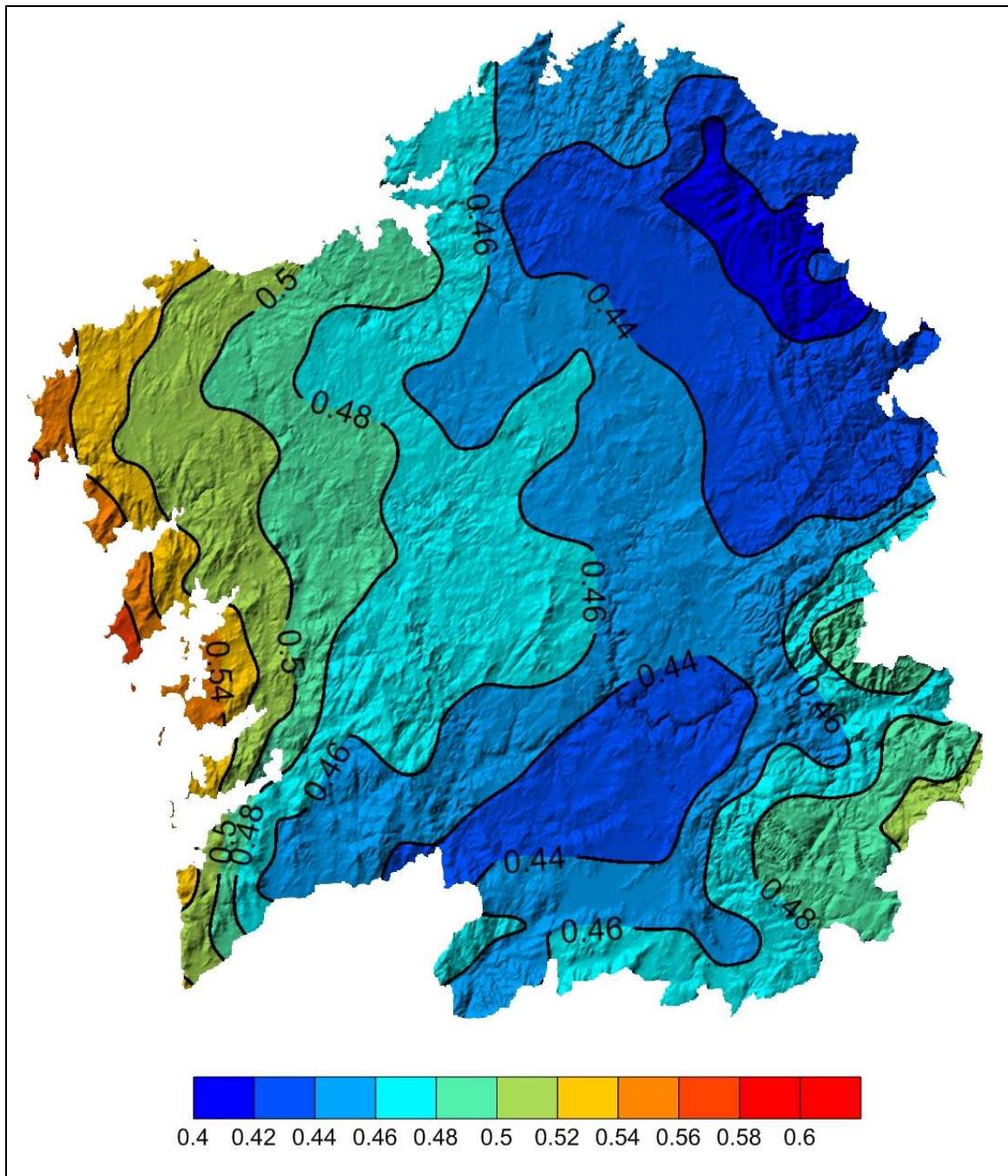


Fig. E-5: Índice de Claridad – promedio Abril

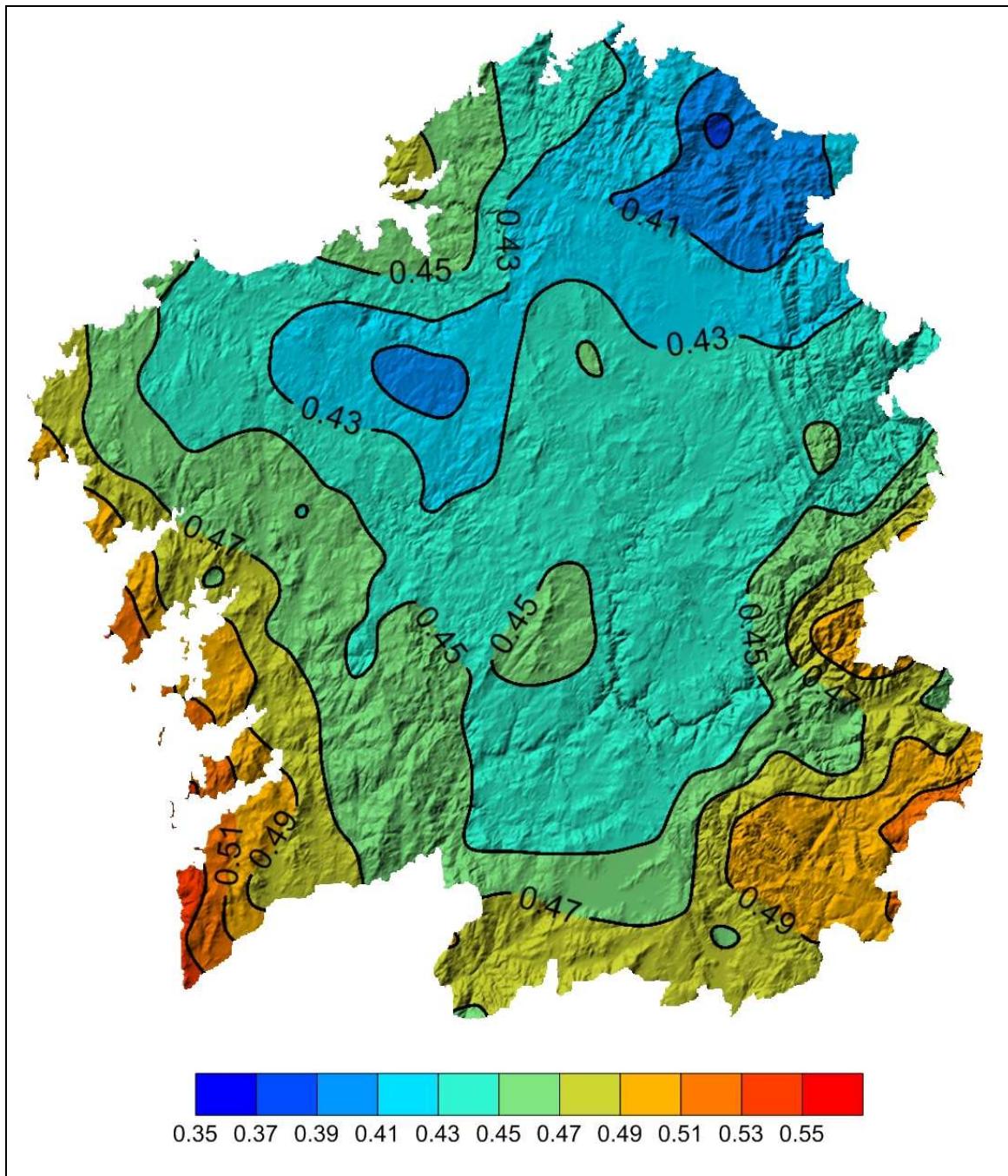


Fig. E-6: Índice de Claridad – promedio Mayo

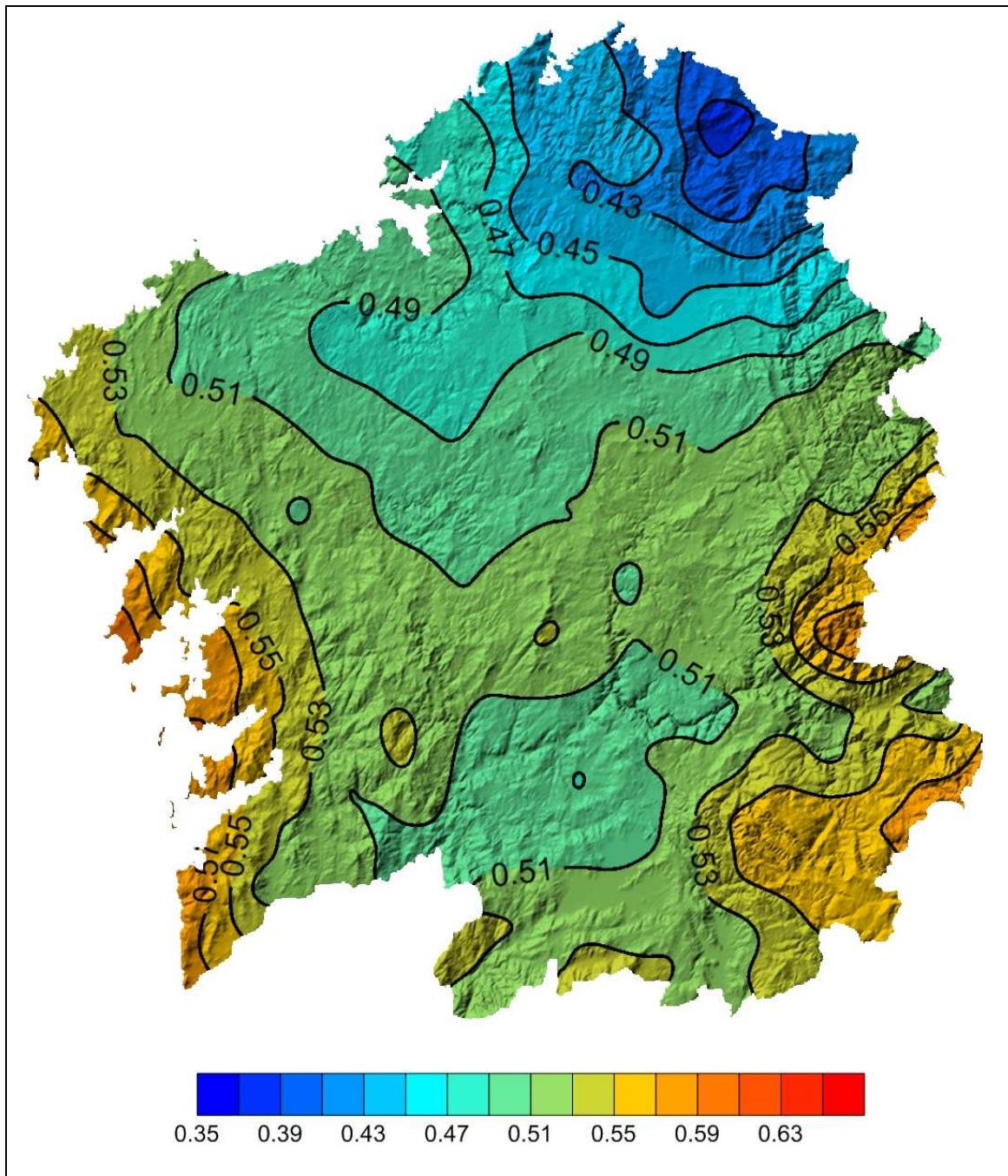


Fig. E-7: Índice de Claridad – promedio Junio

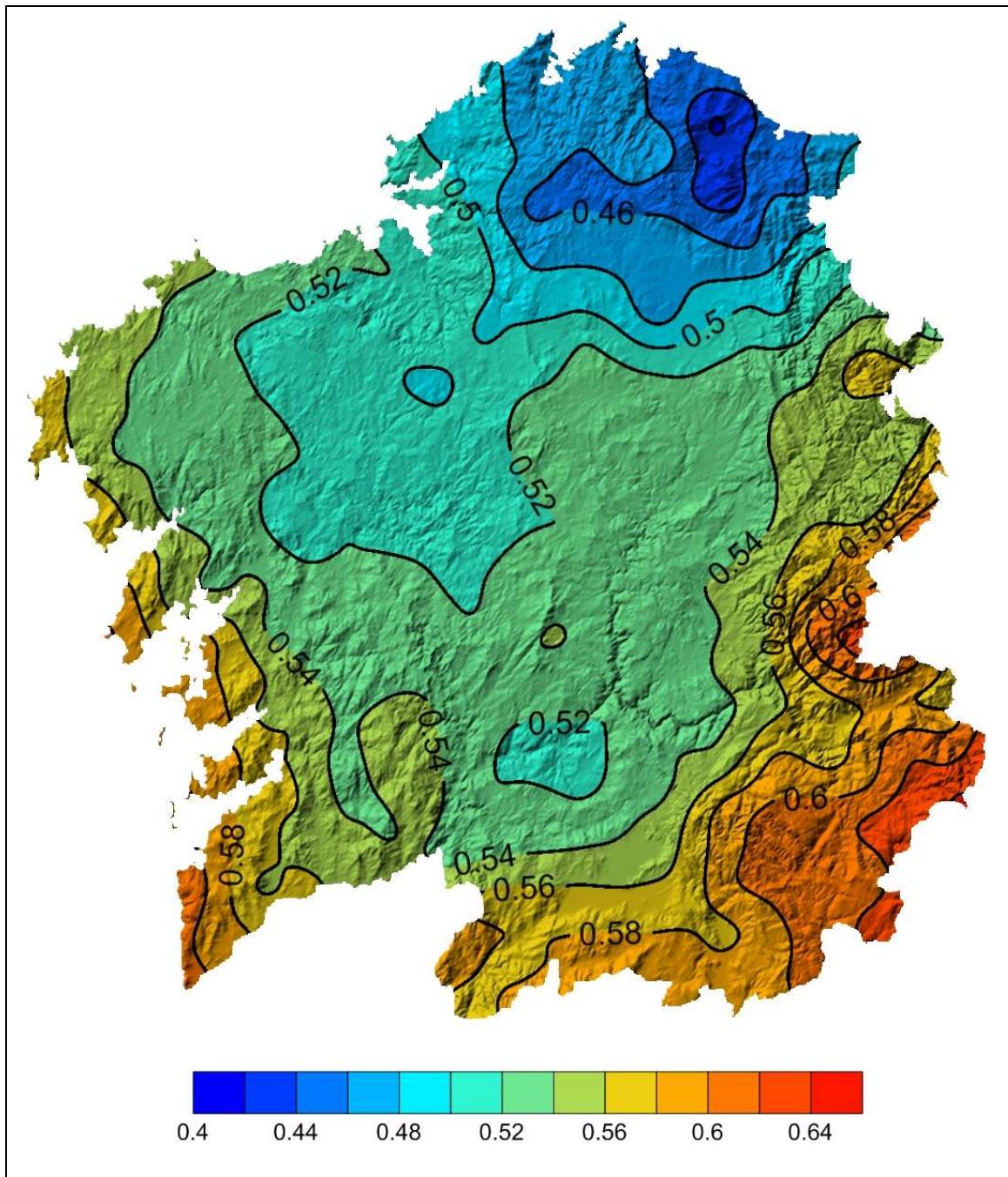


Fig. E-8: Índice de Claridad – promedio Julio

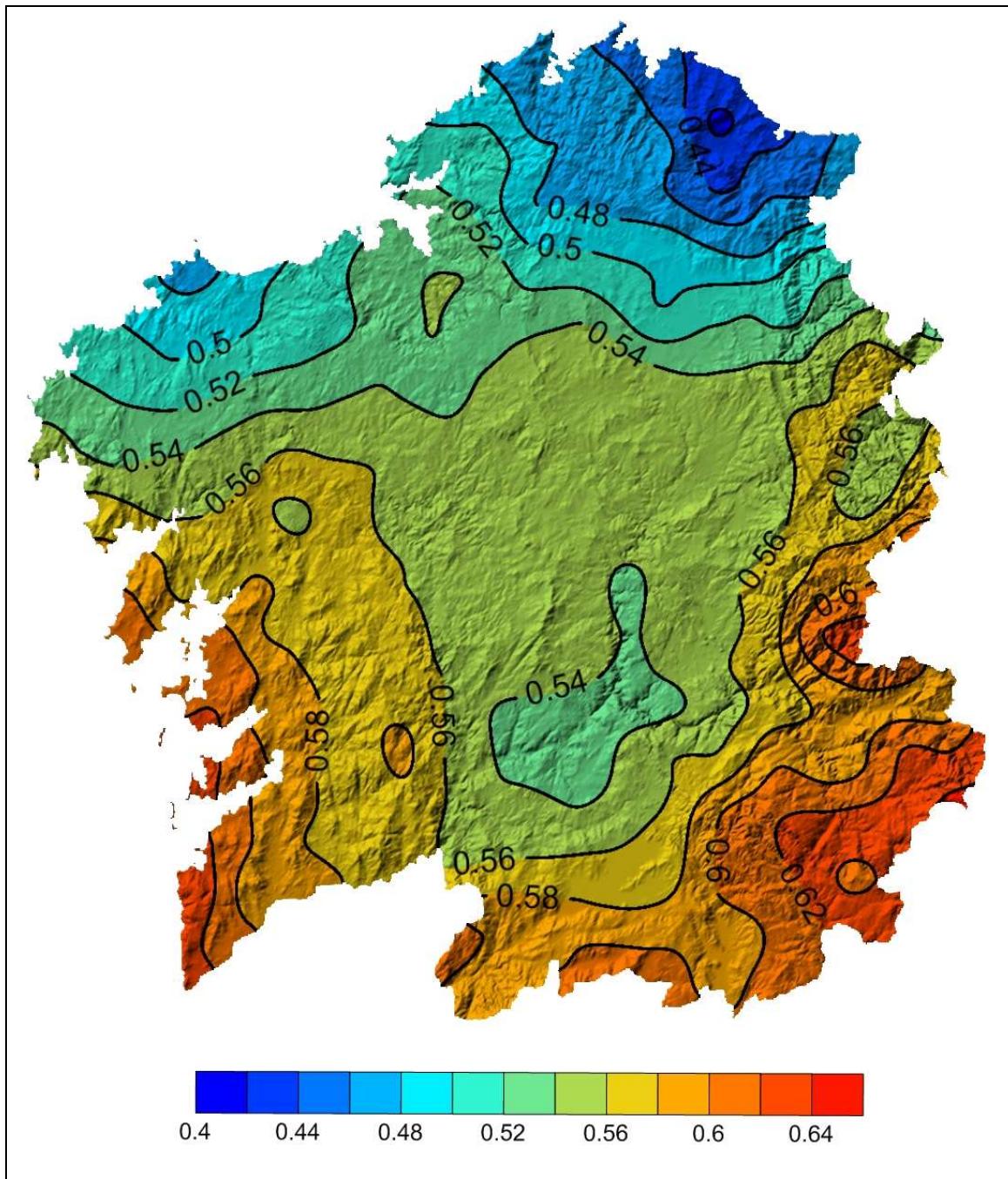


Fig. E-9: Índice de Claridad – promedio Agosto

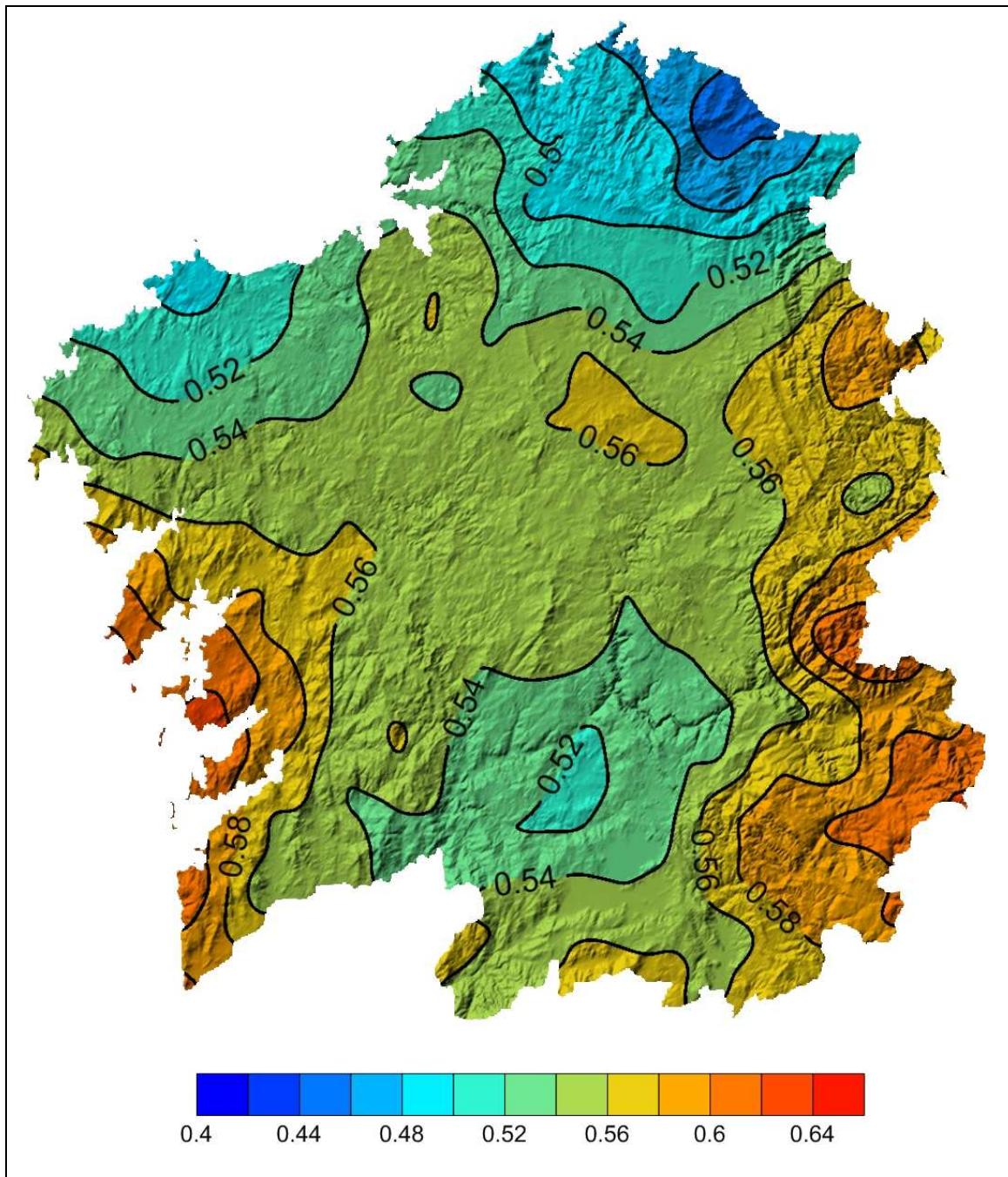


Fig. E-10: Índice de Claridad – promedio Septiembre

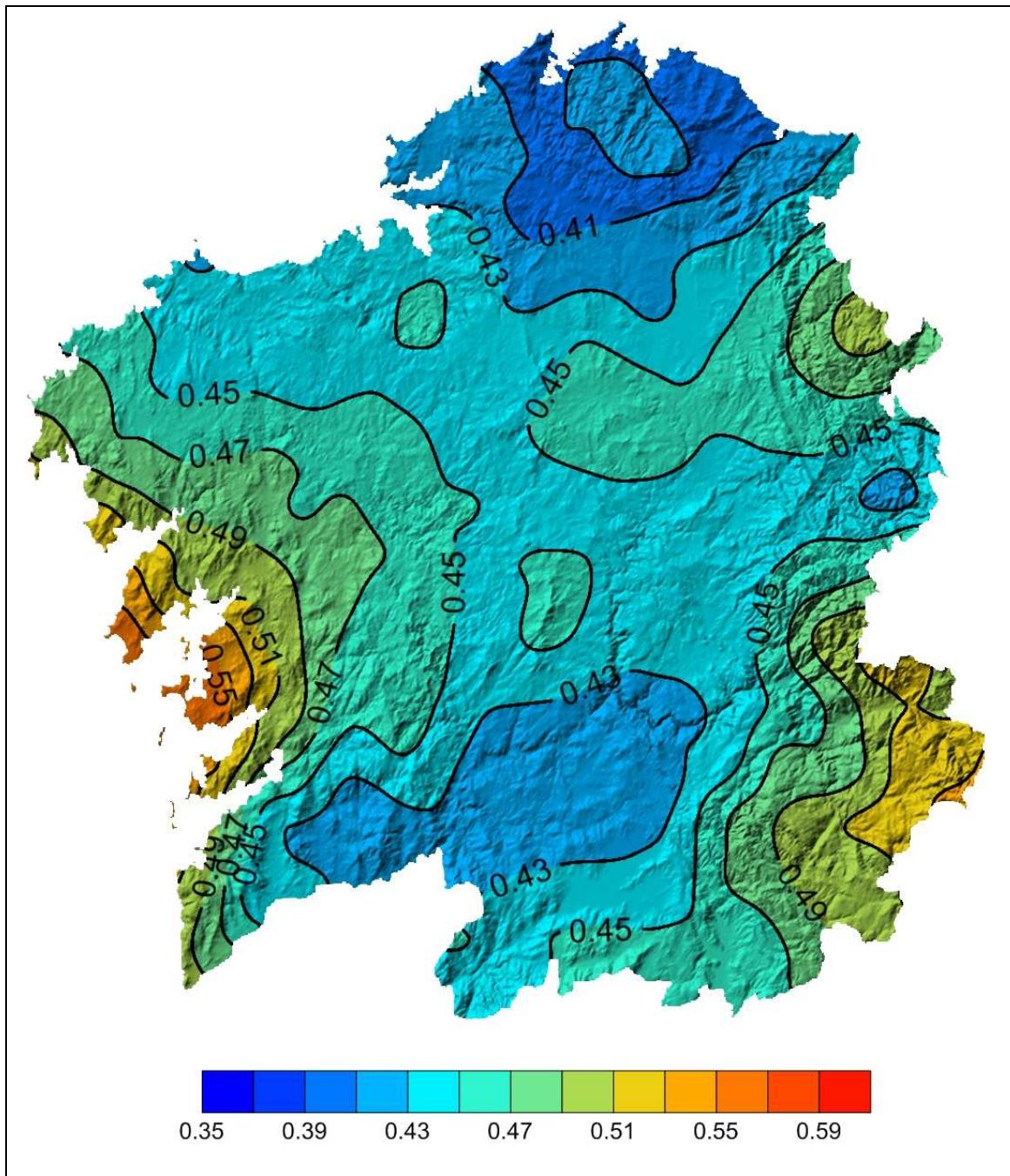


Fig. E-11: Índice de Claridad – promedio Octubre

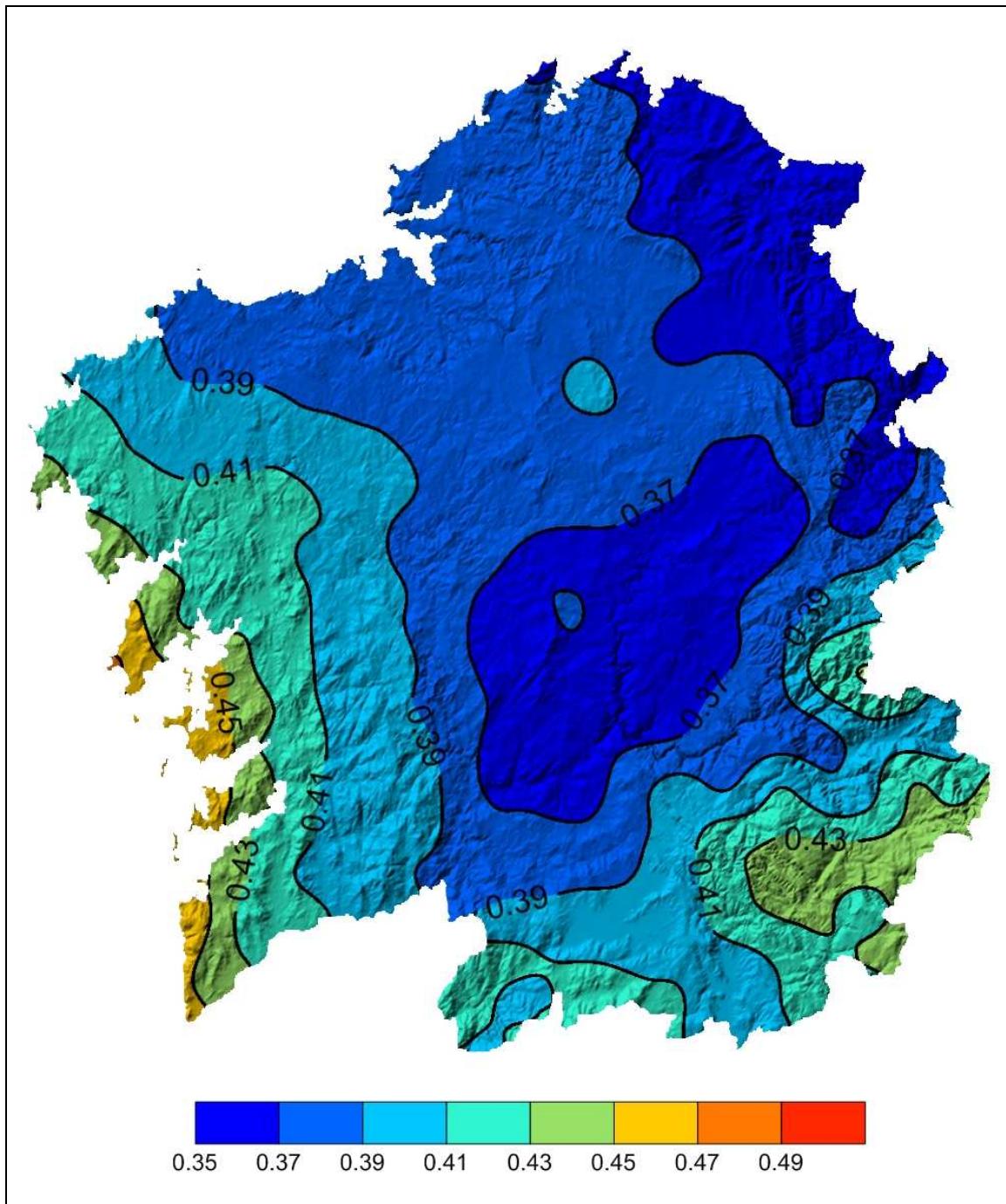


Fig. E-12: Índice de Claridad – promedio Noviembre

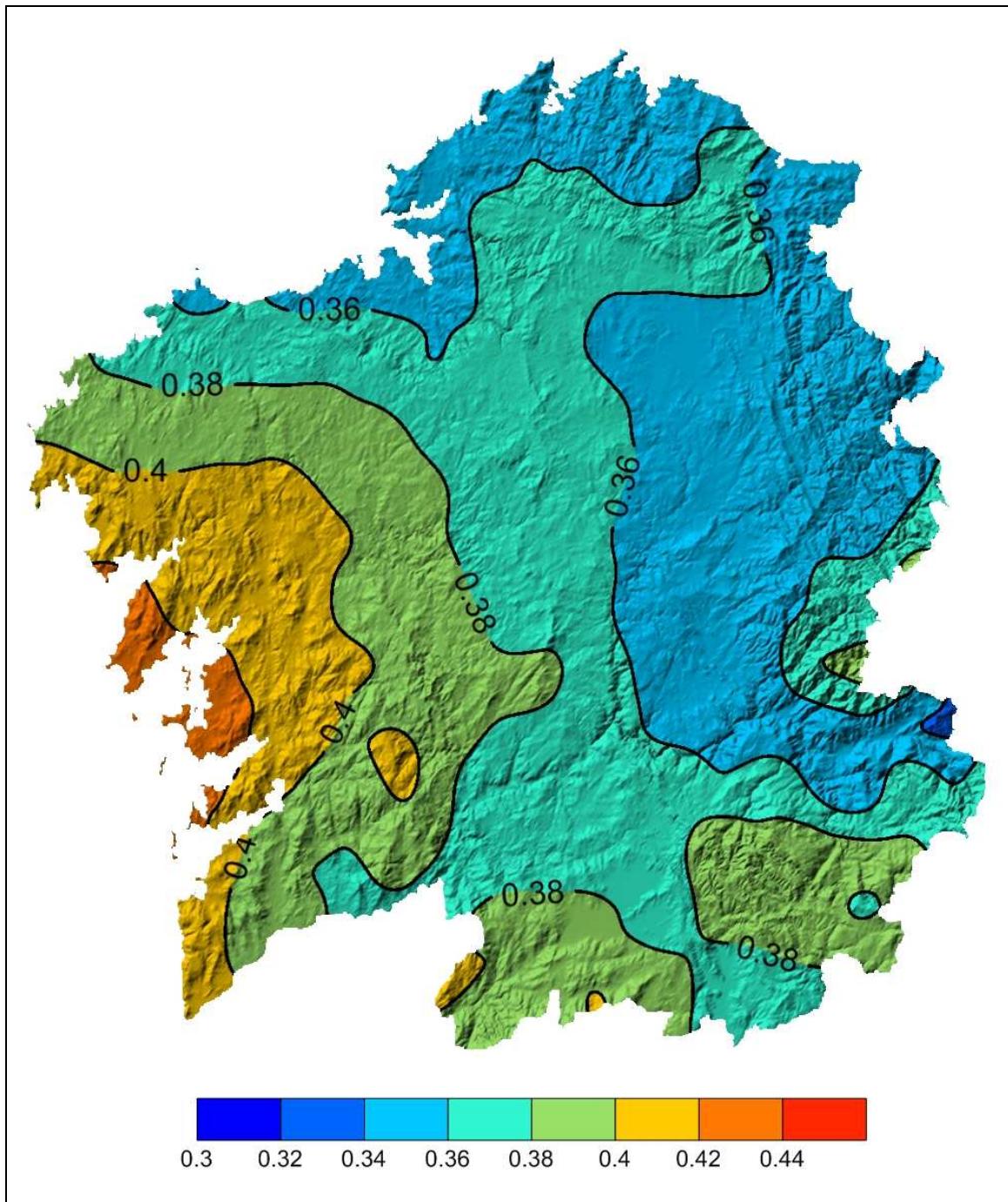


Fig. E-13: Índice de Claridad – promedio Diciembre

Anexo F

Mapas de Fracción de Cubierta de Nubes

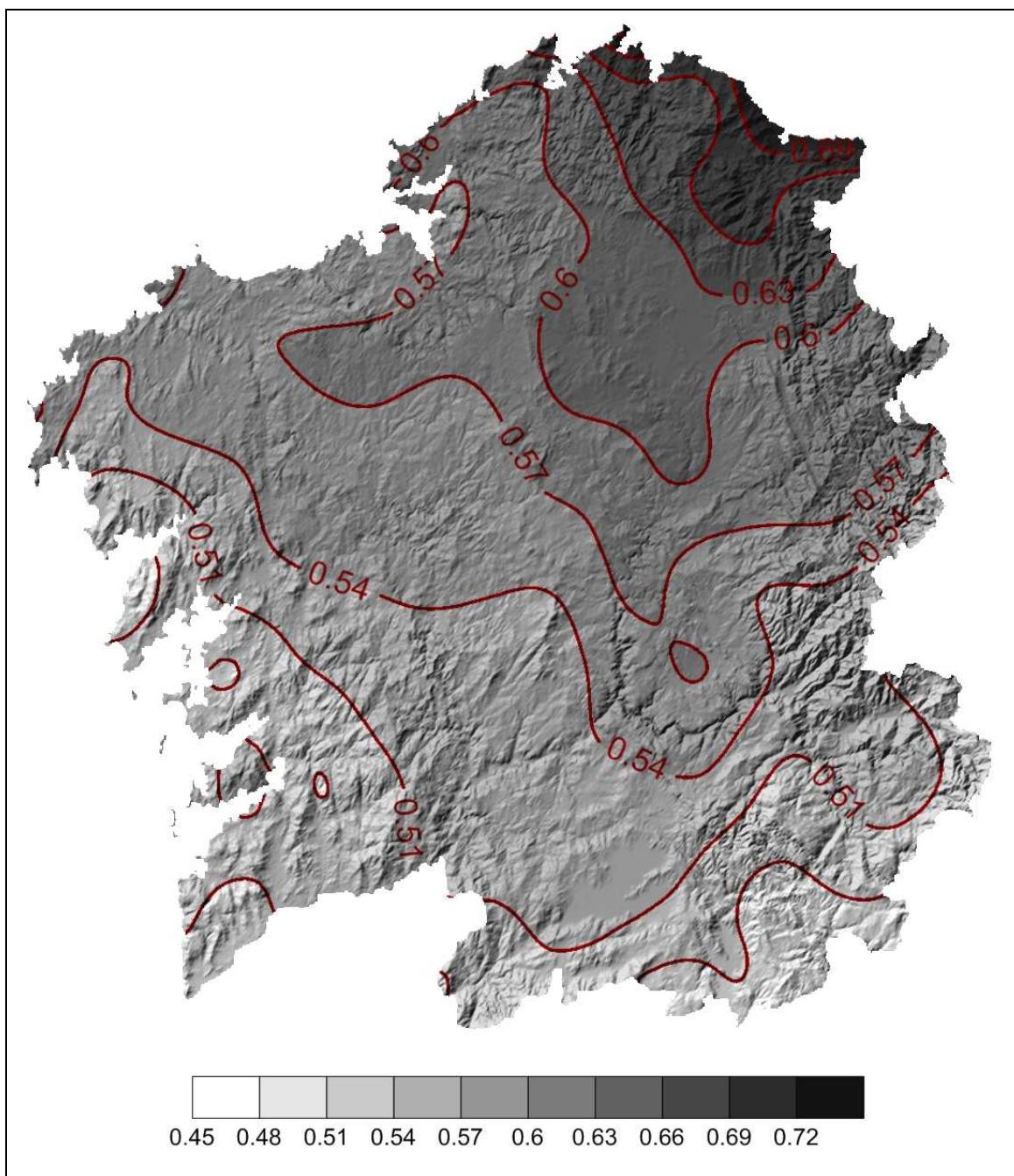


Fig. F-1: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Anual

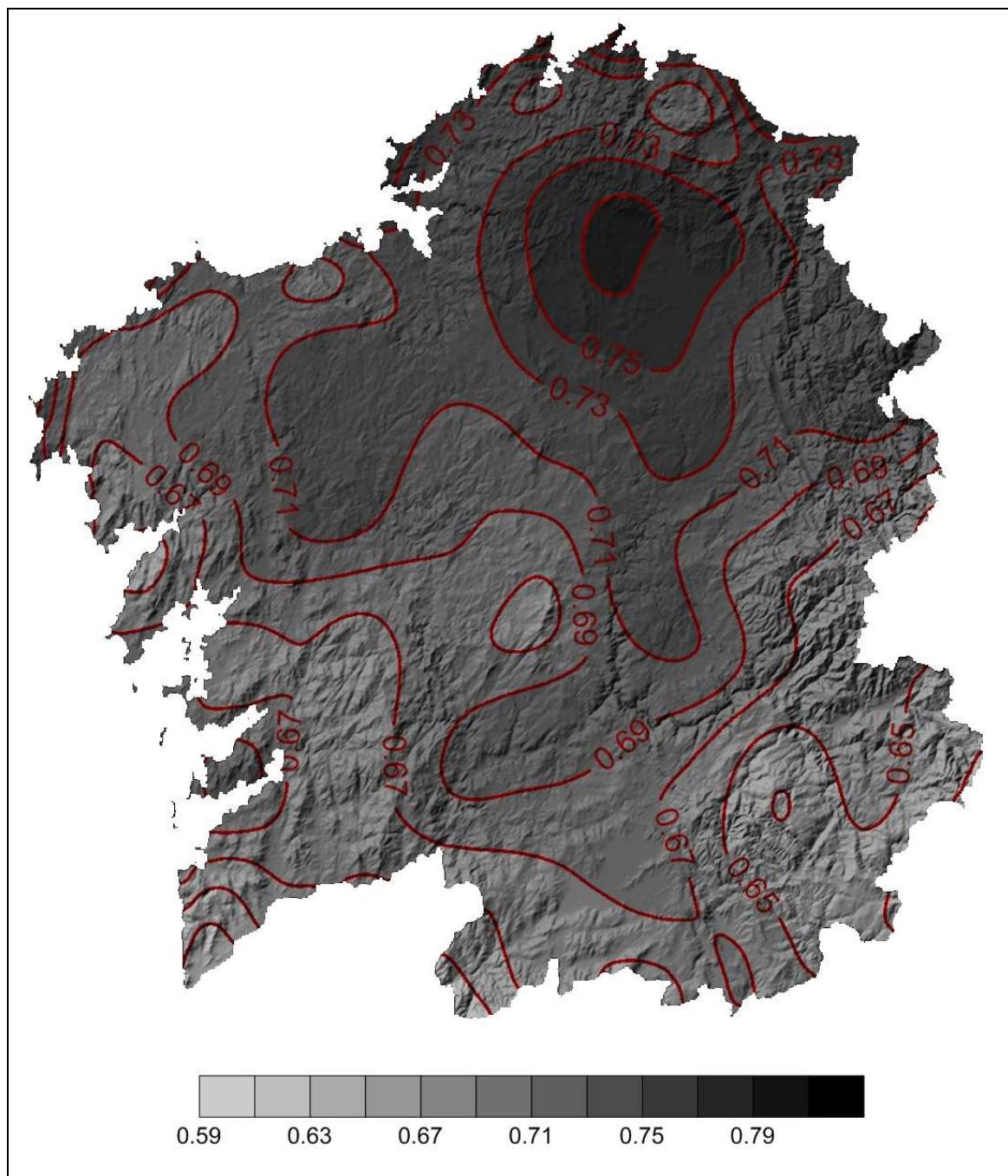


Fig. F-2: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Enero

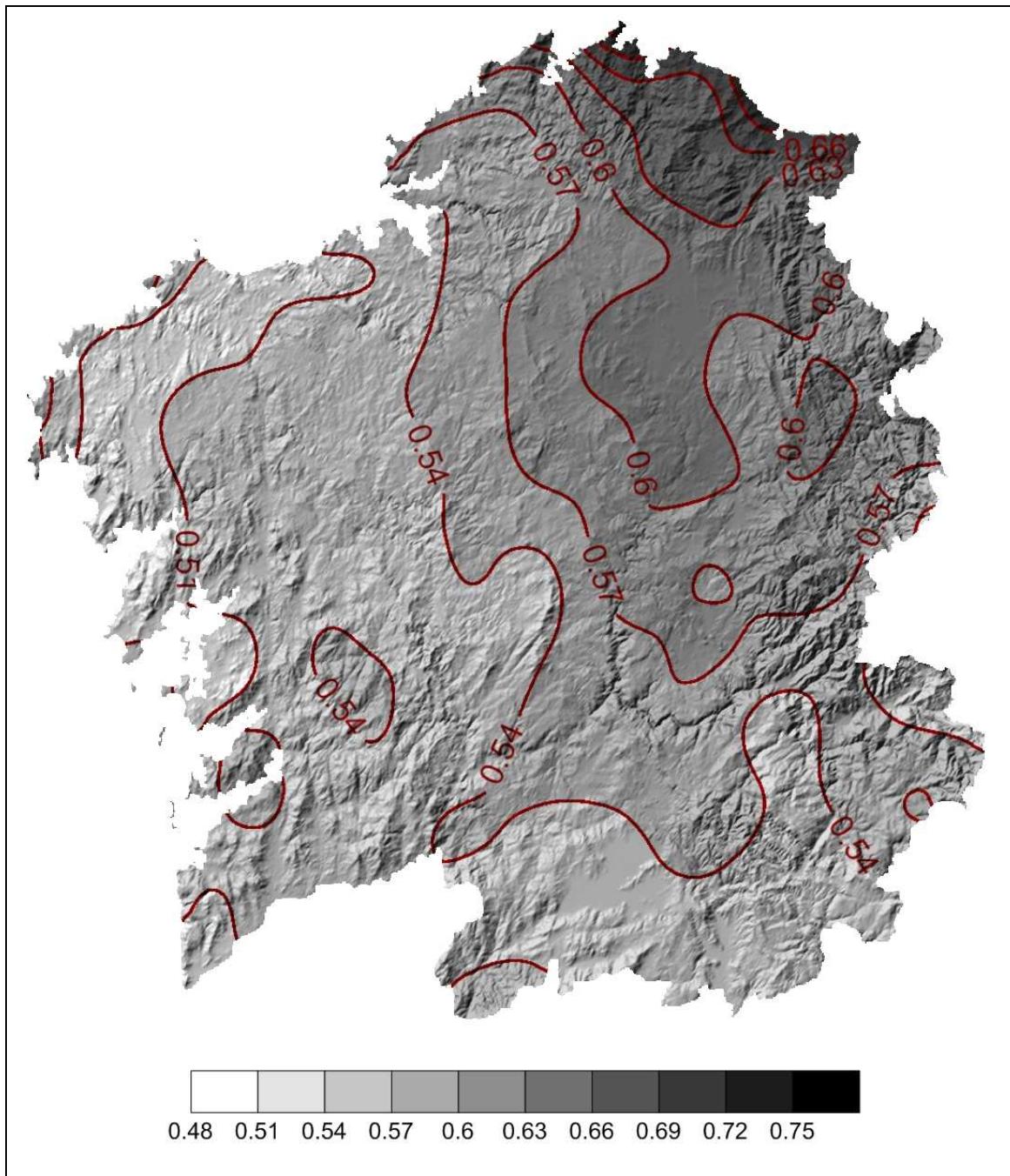


Fig. F-3: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Febrero

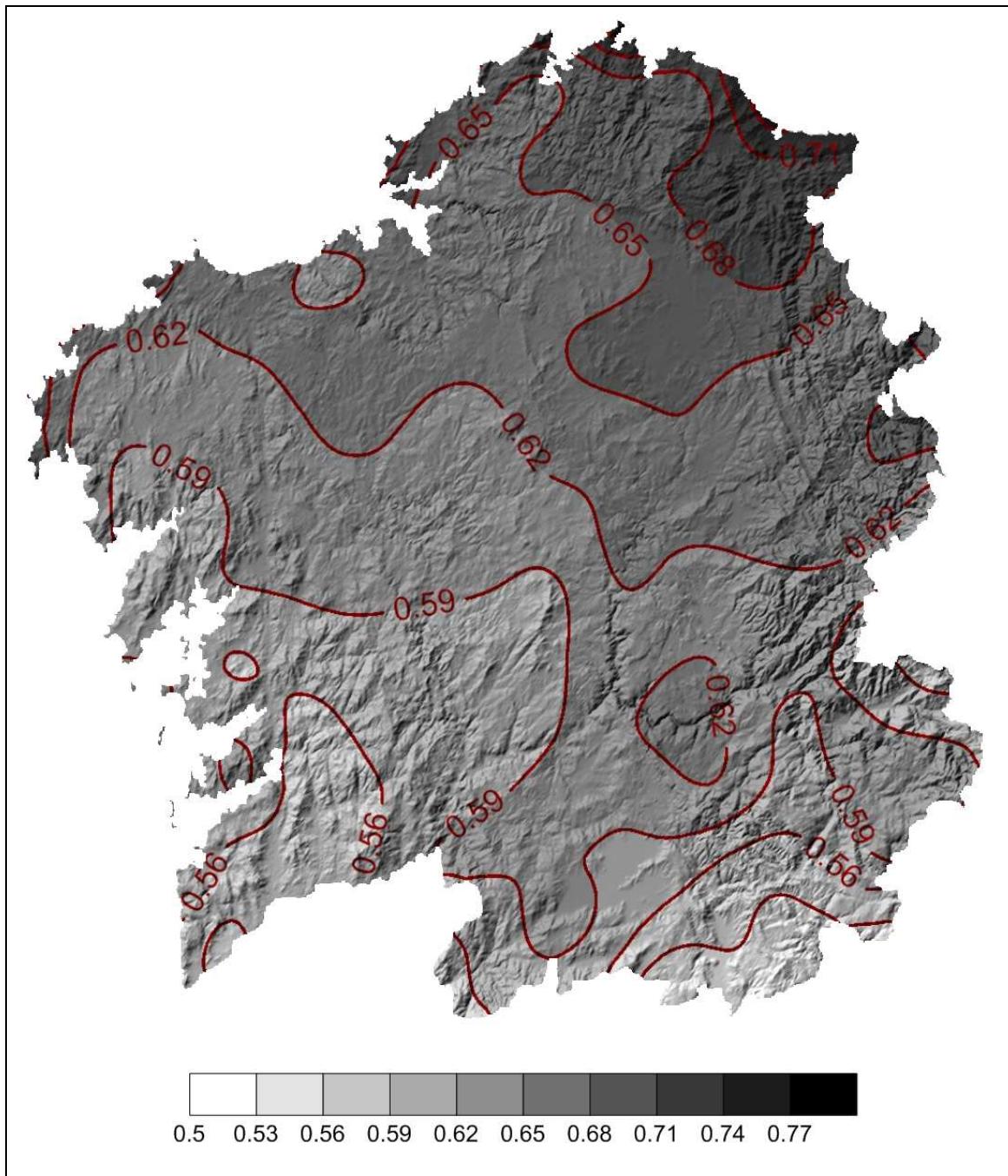


Fig. F-4: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Marzo

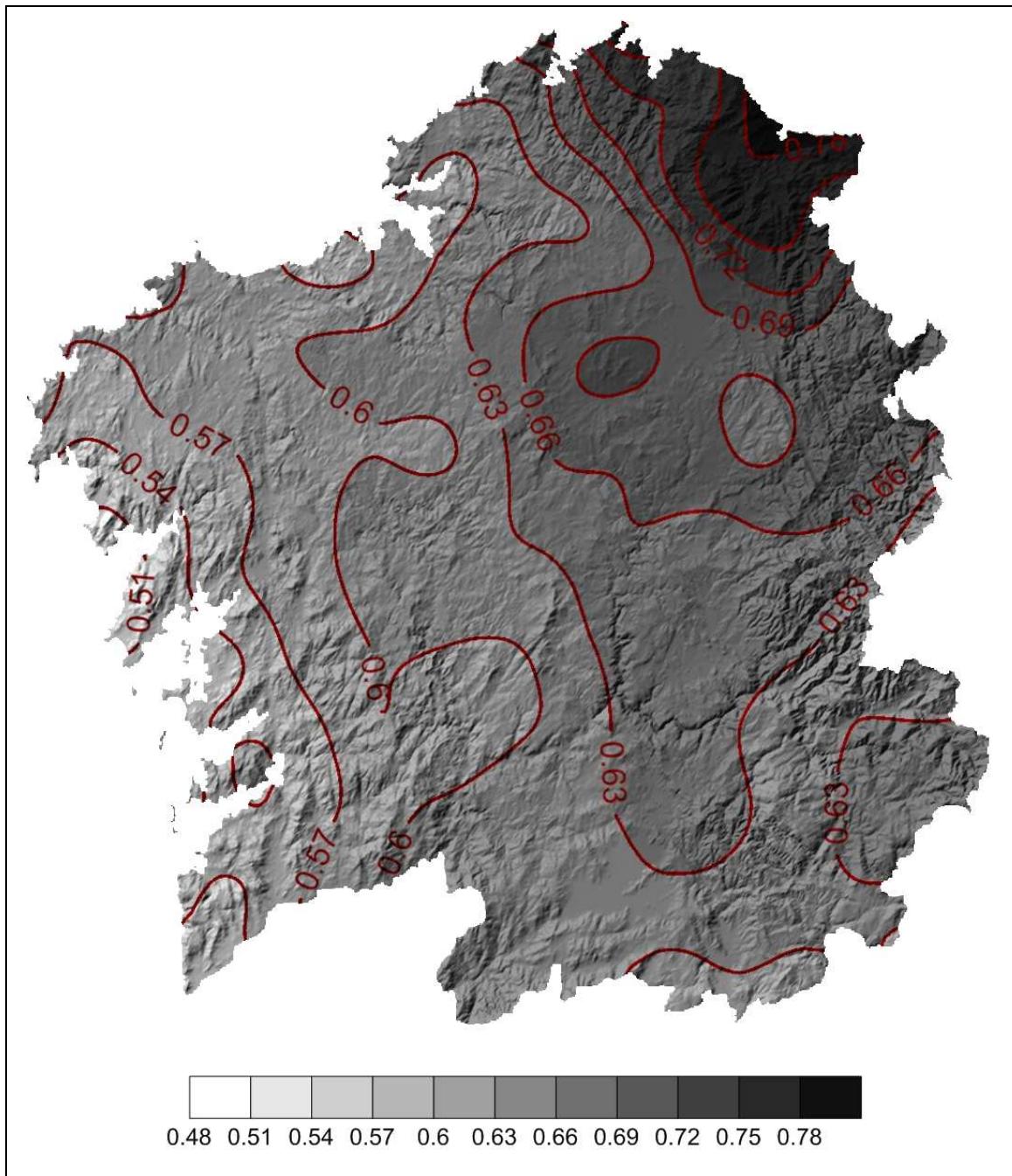


Fig. F-5: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Abril

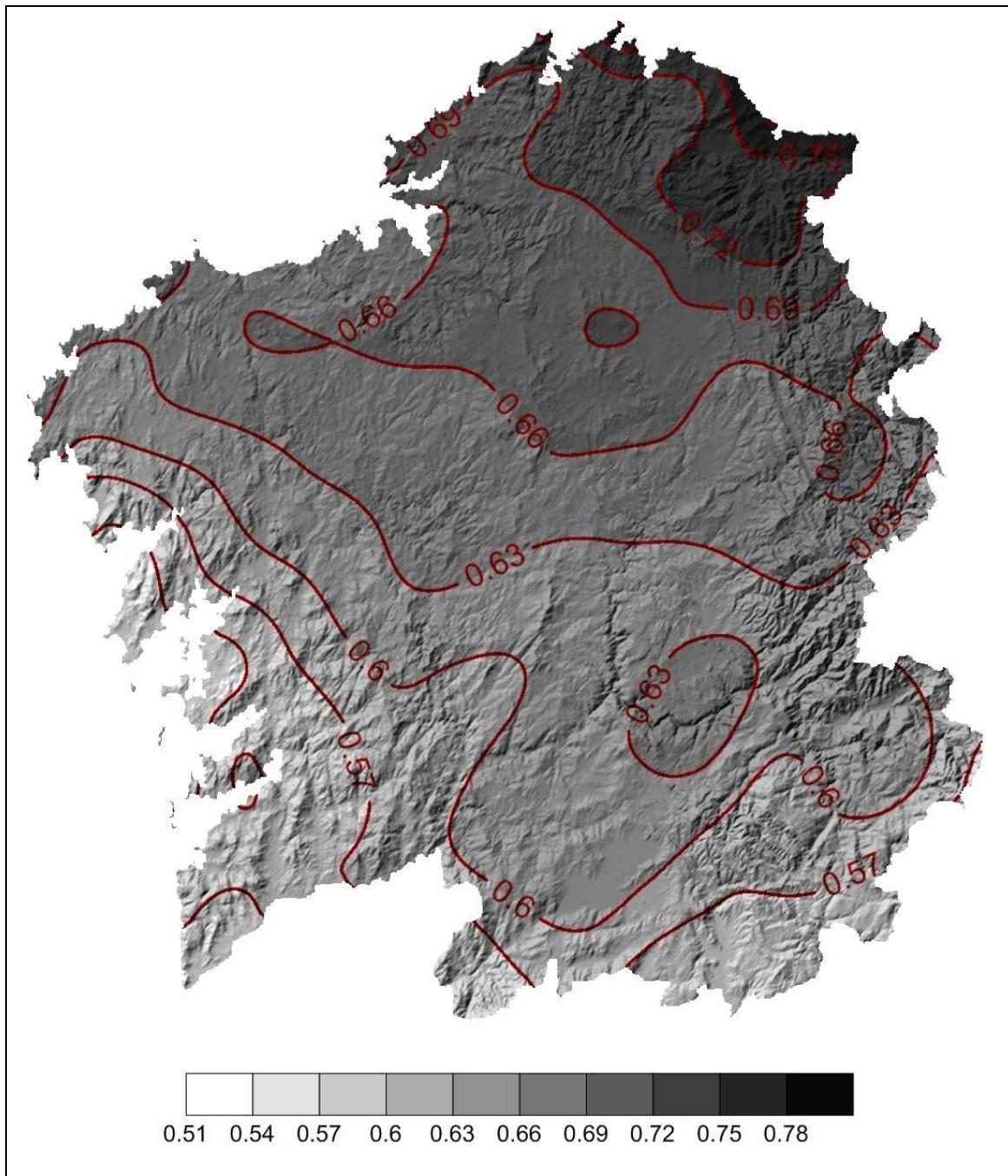


Fig. F-6: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Mayo

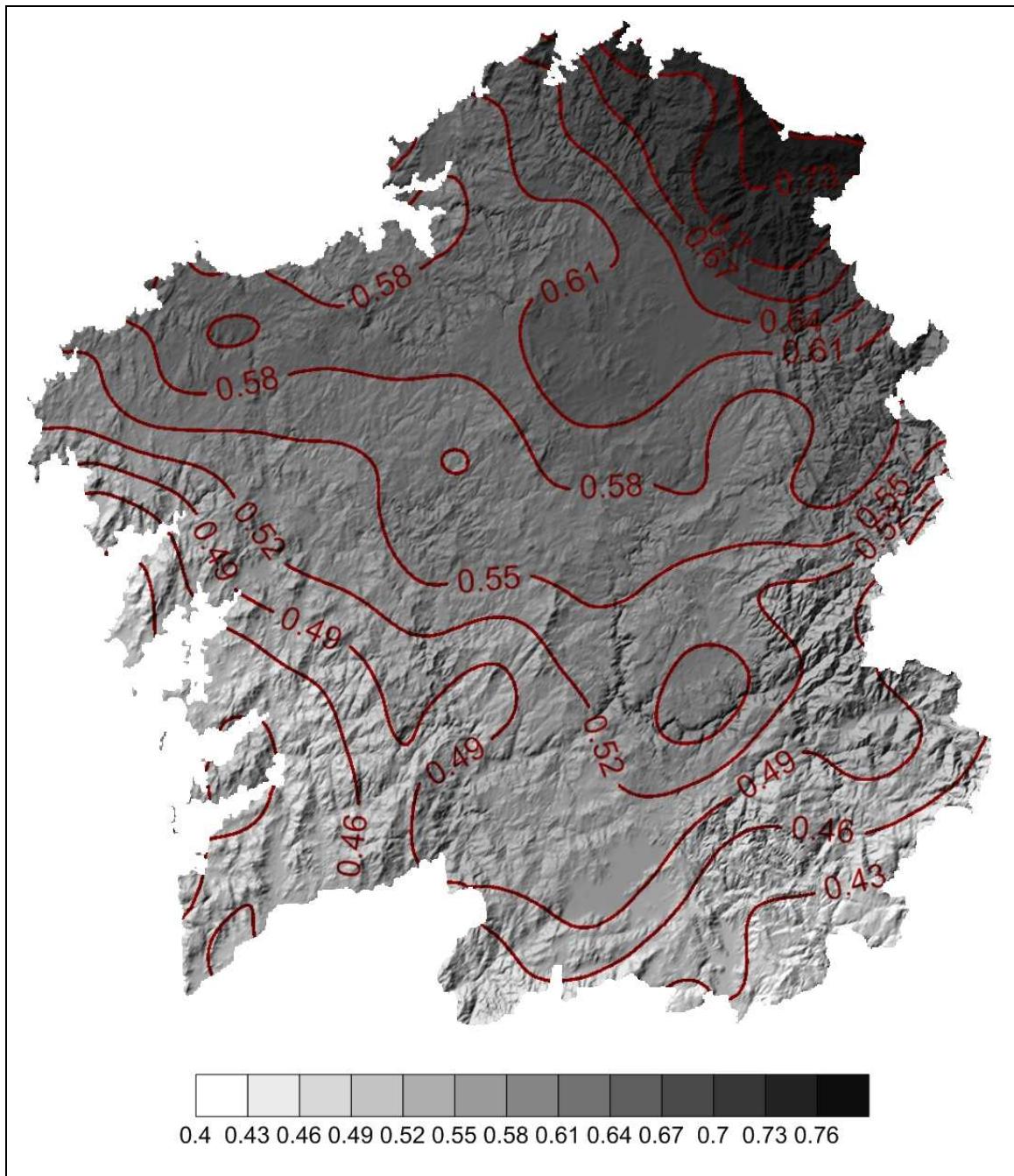


Fig. F-7: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Junio

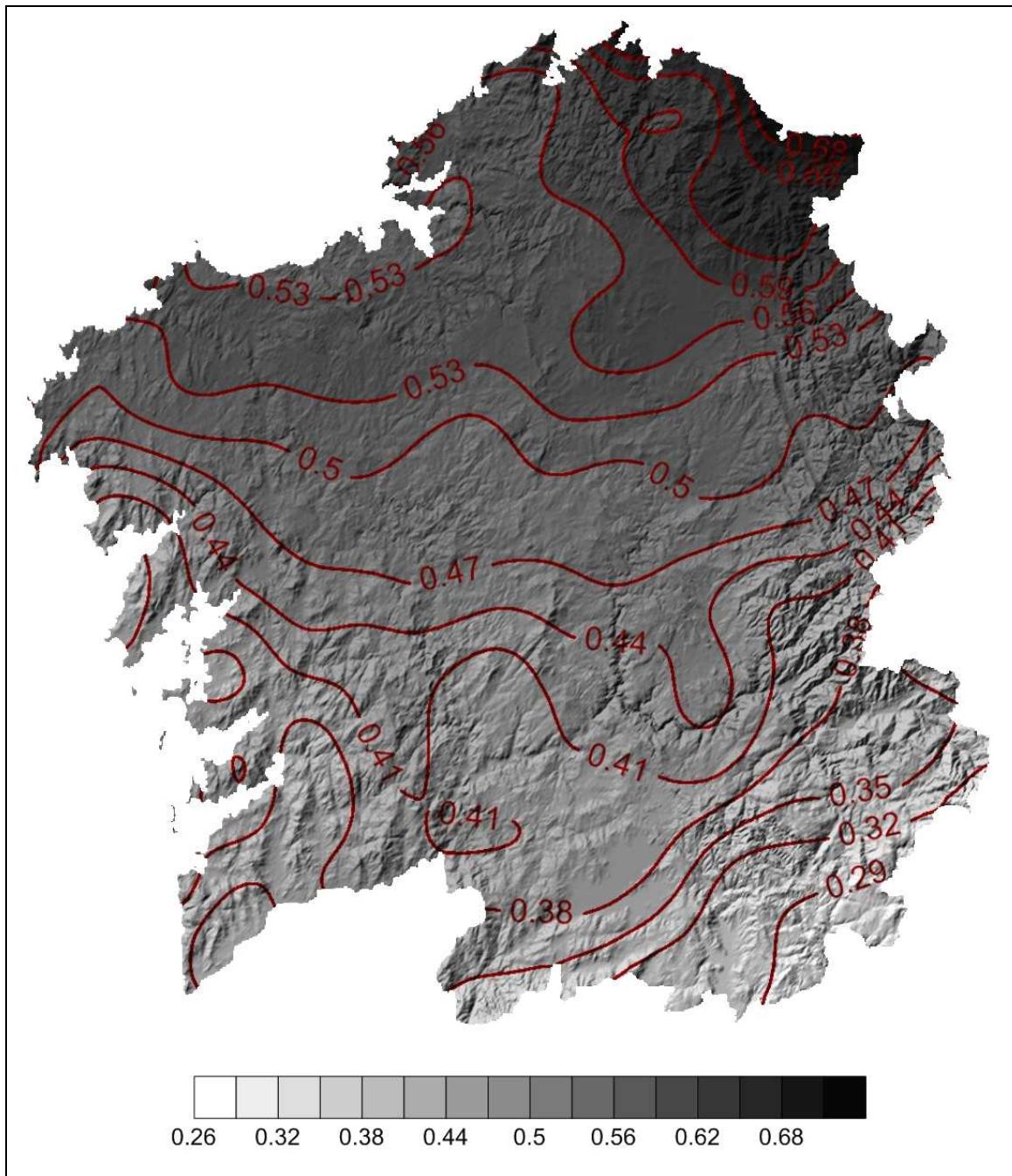


Fig. F-8: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Julio

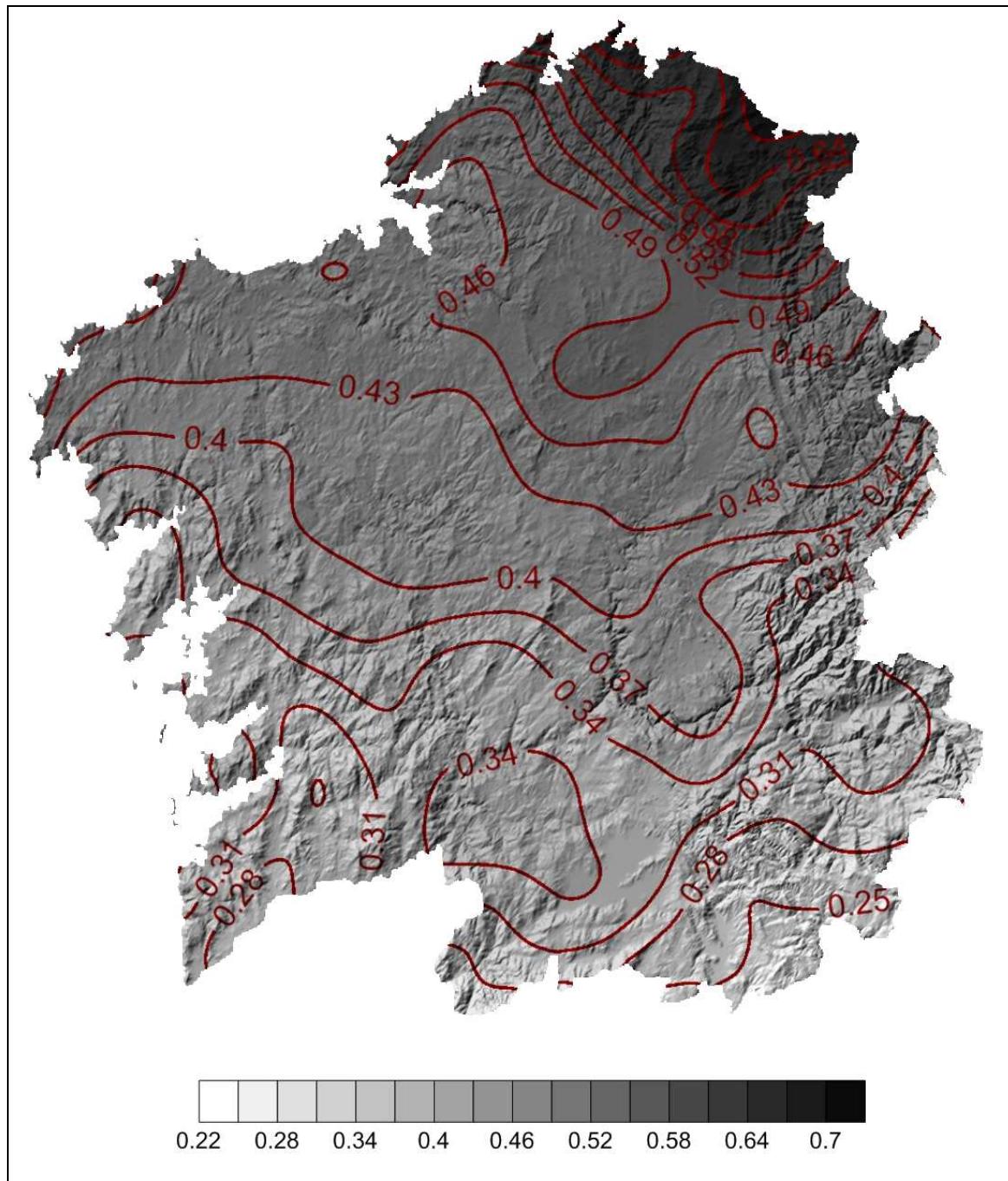


Fig. F-9: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Agosto

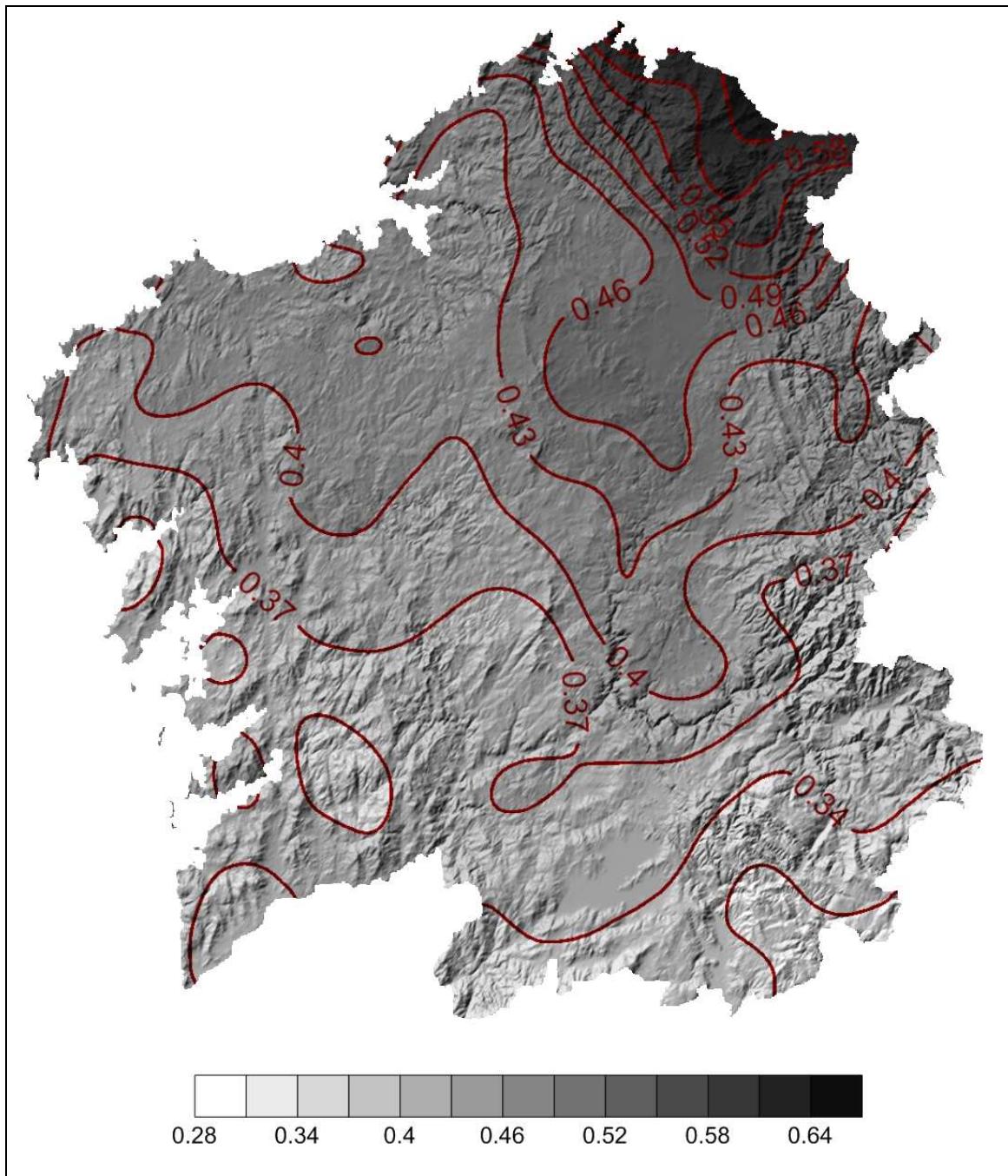


Fig. F-10: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Septiembre

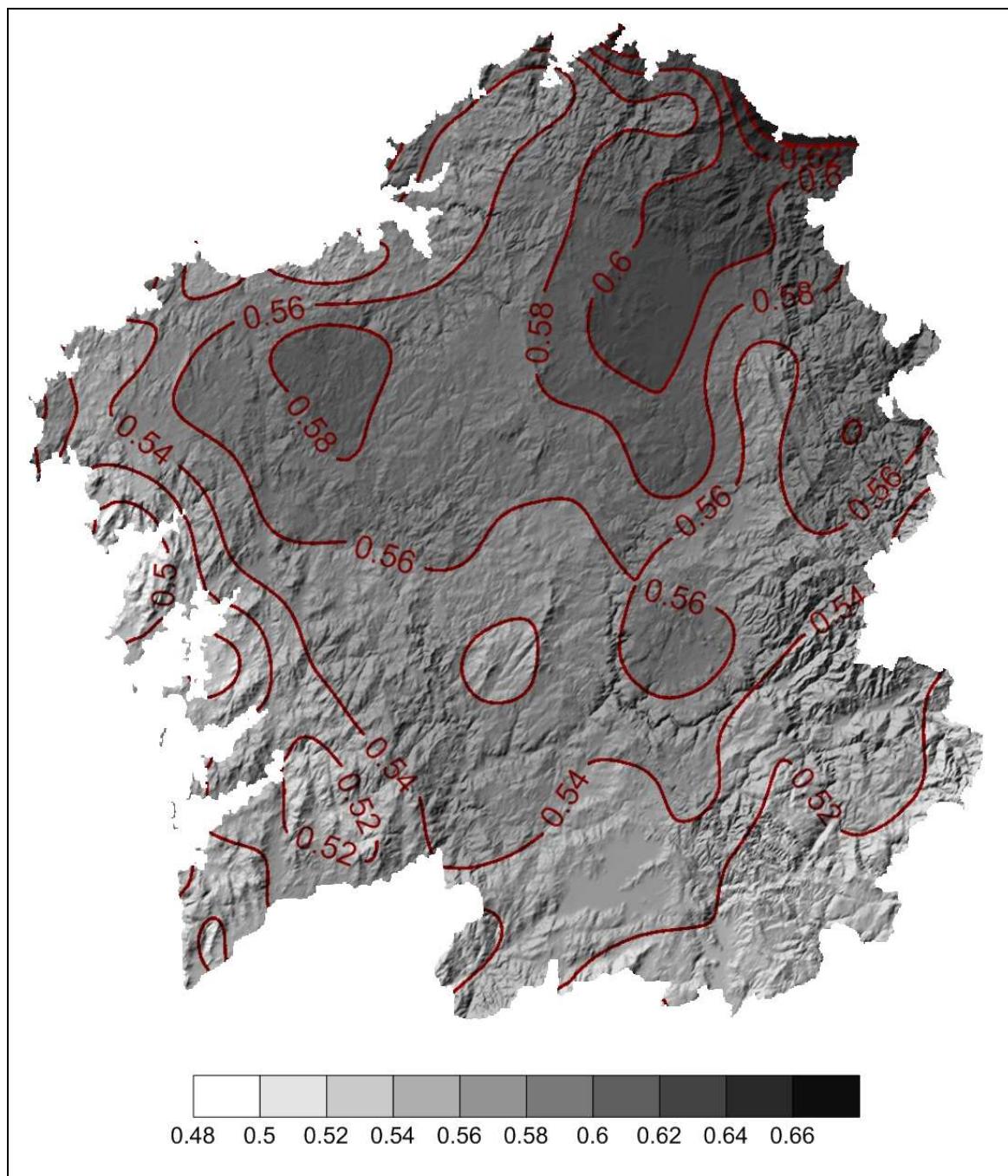


Fig. F-11: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Octubre

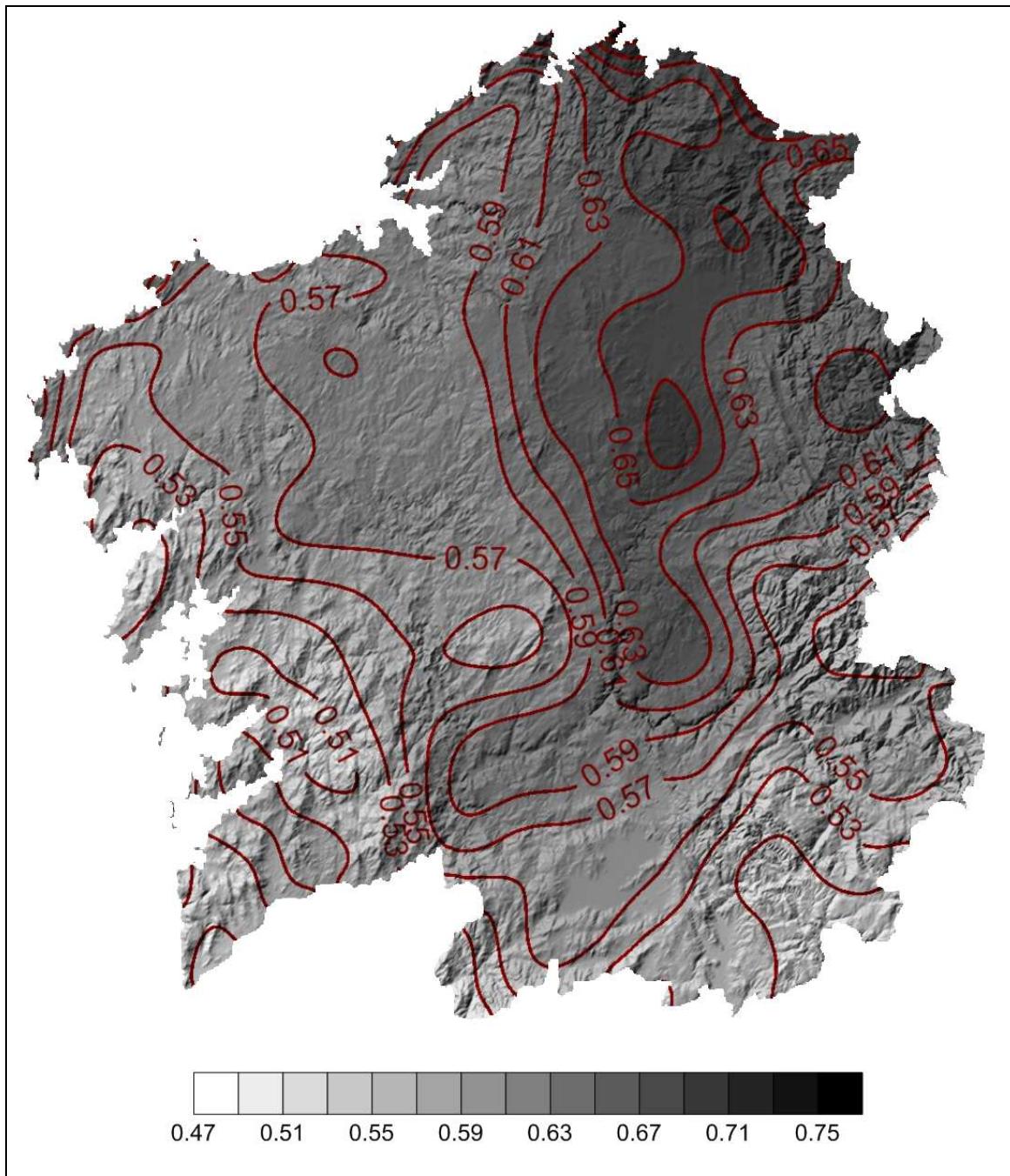


Fig. F-12: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Noviembre

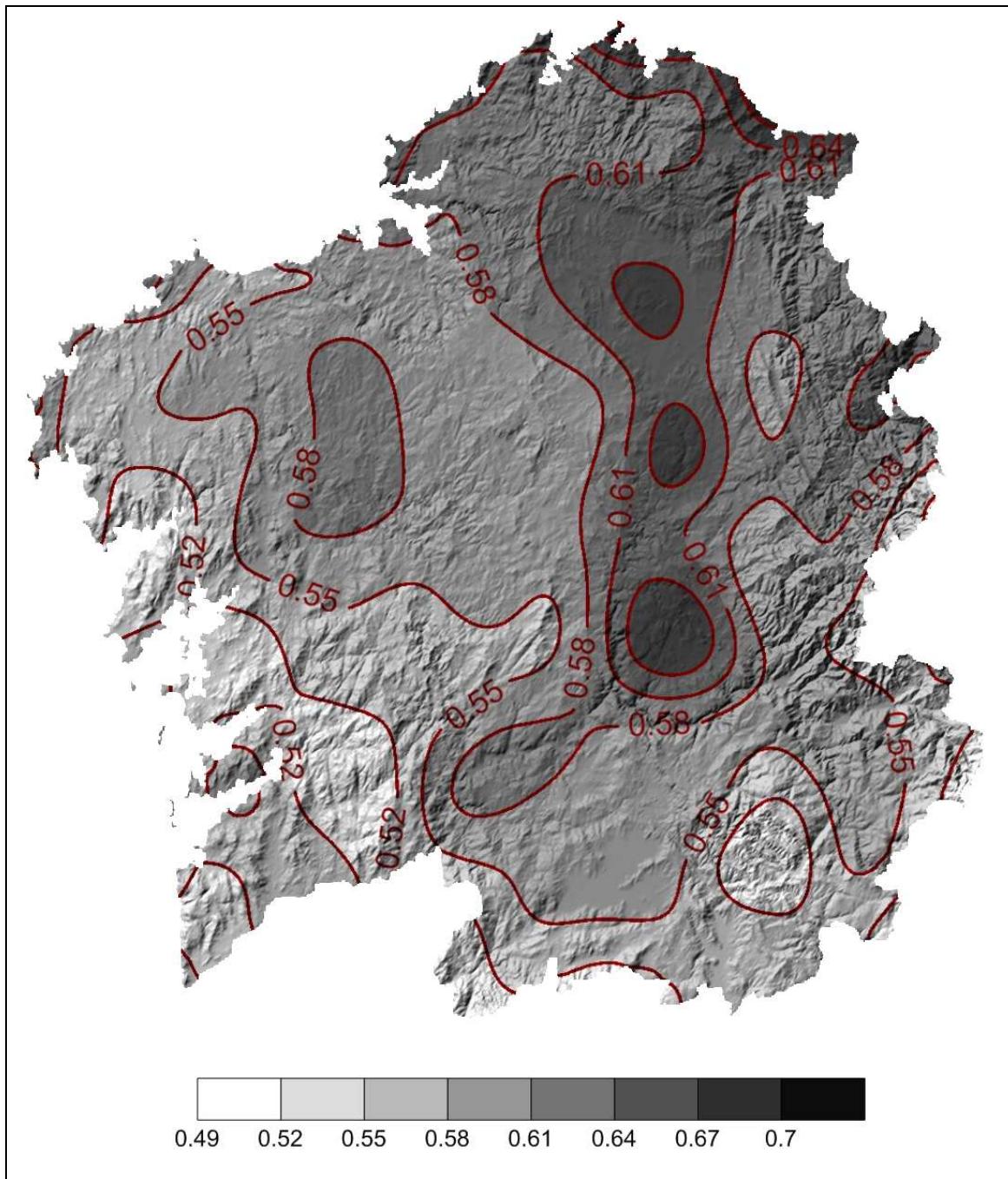


Fig. F-13: Fracción de Cubierta de Nubes – promedio Diciembre

Glosario

Albedo: fracción de radiación reflejada por una superficie.

Factor de turbidez de Linke: relación entre el coeficiente de extinción de la atmósfera real y el coeficiente de extinción molecular de aire puro y seco.

Hora de sol: tiempo acumulado durante el cual un área determinada recibe radiación solar directa superior a 120 W m^{-2}

Irradiación: cantidad de energía que es recibida por unidad de superficie en un determinado intervalo de tiempo. Se mide en $\text{Wh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ o en $\text{J m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Si la fuente de la radiación es el Sol, se habla entonces de **Insolación**

Irradiancia: energía procedente de radiación electromagnética incidente por unidad de tiempo y de superficie. Se mide en W m^{-2}

Índice de claridad: fracción de radiación solar extraterrestre que alcanza la superficie de la Tierra

Modelo de transferencia radiativa: modelo matemático que estima la transferencia de la energía desde el Sol a la Tierra.

Piranómetro: aparato diseñado para medir la irradiancia. Según su respuesta y precisión, puede ser de primera o de segunda clase.

Radiación: proceso físico en el que la energía emitida por un cuerpo se propaga a través de un medio (o del vacío)

Radiación solar difusa: fracción de radiación procedente del sol que alcanza el suelo tras haber interactuado con las partículas que componen la atmósfera

Radiación solar directa: fracción de radiación procedente del sol que alcanza el suelo sin interactuar con la atmósfera

Radiación solar global: suma de la radiación directa y de la radiación difusa

Satélite geoestacionario: satélite que sigue una órbita geoestacionaria, o sea que sigue una órbita con excentricidad nula y con el mismo periodo rotacional de la Tierra. Este tipo de satélite observan siempre la misma zona del planeta desde una altitud de 36000 km aproximadamente.

Satélite polar: satélite que sigue una órbita que pasa encima de los polos de la Tierra con una inclinación de la órbita cercana a los 90 grados. Un satélite en órbita polar pasa sobre cada punto del planeta mientras éste gira sobre su eje.



XUNTA
DE GALICIA