



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“VALIDACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF
(WEATHER RESEARCH FORECASTING) PARA CHIMBORAZO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: TERESA IBETH CAMINO CARRASCO

Riobamba – Ecuador

2022



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

**“VALIDACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF
(WEATHER RESEARCH FORECASTING) PARA CHIMBORAZO”**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

AUTORA: TERESA IBETH CAMINO CARRASCO

DIRECTORA: Ing. MARÍA RAFAELA VITERI UZCÁTEGUI MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Teresa Ibeth Camino Carrasco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, TERESA IBETH CAMINO CARRASCO, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 26 de enero de 2022

A handwritten signature in blue ink, enclosed within a blue oval. The signature appears to read "Ibeth Camino Carrasco".

Teresa Ibeth Camino Carrasco

060451687-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; tipo: Proyecto Técnico, “**VALIDACIÓN DEL MODELO METEOROLÓGICO WRF (WEATHER RESEARCH FORECASTING) PARA CHIMBORAZO**”, realizado por la señorita: **TERESA IBETH CAMINO CARRASCO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Edgar Iván Ramos Sevilla, Msc PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2022-08-04
Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, MSc. DIRECTORA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2022-08-04
Ing. Juan Carlos González García Msc. MIEMBRO DE TRIBUNAL		2022-08-04

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedicamos principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta el momento más importante de mi formación profesional. A mi madre, ser el pilar fundamental de mi vida y demostrarme su apoyo incondicional. A mi padre, a pesar de nuestra distancia momentánea, sé que desde el cielo me envía sus bendiciones y aunque nos faltó muchas cosas por vivir juntos, sé que está orgulloso por los buenos valores y principios que me ha inculcado.

A mi hermana Paulina Camino, a quien le quiero mucho como mi segunda madre, por ser mi guía y mi escudo en todo momento, lo logramos hermana querida y vamos por más.

A mi hermano Jhon Fabricio, la pandemia nos dejó huellas muy profundas y nos enseñó a valorar, compartir y amar a nuestros seres queridos. Sin dejar pasar lo importante que fueron mis hermanos Katy, Cesar y Fernanda.

A mis amigos, Miguel, Daya, Anita, que siempre estuvieron del inicio hasta el final, agradecida por su amistad sincera.

Ibeth

AGRADECIMIENTO

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, MSc por su apoyo, ayuda y guía acertada durante la elaboración del presente trabajo.

Ibeth

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1. Planteamiento del problema	2
1.1.1. <i>Enunciado del problema</i>	2
1.2. Justificación	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. <i>General</i>	3
1.3.2. <i>Específicos</i>	3

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS	4
2.1. Antecedentes	4
2.2. Bases teóricas	4
2.2.1. <i>Modelo Numérico</i>	4
2.2.2. <i>Modelo Weather Research and Forecasting</i>	5
2.2.3. <i>Radiosondeo</i>	7
2.2.4. <i>Temperatura atmosférica</i>	7
2.2.5. <i>Dinámica atmosférica</i>	8
2.2.6. <i>Presión atmosférica</i>	9
2.2.7. <i>Radiación solar</i>	10
2.2.8. <i>Radiación atmosférica</i>	11
2.2.9. <i>Temperatura</i>	12
2.2.10. <i>Viento</i>	12
2.2.11. <i>Humedad atmosférica</i>	13
2.2.12. <i>Meteorología y climatología</i>	13

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	15
3.1.	Tipo de investigación	15
3.2.	Diseño de investigación	15
3.3.	Localización del proyecto	16
3.4.	Técnicas de recolección de datos	16
3.4.1.	<i>Datos meteorológicos</i>	16
3.5.	Ubicación de estaciones meteorológicas	18
3.6.	Compilación del Modelo WRF	19
3.7.	Elaboración de mapas temáticos	20
3.8.	Análisis estadístico	21

CAPÍTULO IV

4.	RESULTADOS	24
4.1.	Estaciones meteorológicas	24
4.1.1.	<i>Temperatura</i>	26
4.1.2.	<i>Radiación</i>	31
4.2.	Modelo WRF	35
4.2.1.	<i>Temperatura</i>	35
4.2.2.	<i>Radiación</i>	39
4.3.	Comparativa entre estaciones meteorológicas y el modelo WRF	43
4.3.1.	<i>Comparaciones anuales</i>	44
4.4.	Análisis estadísticos	46
4.4.1.	<i>Temperatura</i>	46
4.4.2.	<i>Radiación</i>	49
4.4.3.	<i>Comparaciones anuales</i>	53

CONCLUSIONES	54
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	56
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3: Estaciones meteorológicas estudiadas	17
Tabla 1-4: Datos meteorológicas de las estaciones.....	25
Tabla 2-4: Datos de radiación de las estaciones.....	25
Tabla 3-4: Prueba de normalidad de temperatura	46
Tabla 4-4: Valores estadísticos de los datos de temperatura.....	48
Tabla 5-4: Análisis Estadístico de error de temperatura	49
Tabla 6-4: Prueba de normalidad de radiación	50
Tabla 7-4: Valores estadísticos de los datos de radiación.....	51
Tabla 8-4: Análisis Estadístico de error de radiación	52
Tabla 9-4: Comparaciones anuales	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Configuración de referencia para el modelo WRF	6
Figura 2-2: Perfil vertical de temperatura en latitudes medias	8
Figura 3-2: Espectro Electromagnético del sol.....	10
Figura 1-3: Provincia de Chimborazo.....	16
Figura 2-3: Ubicación de las estaciones meteorológicas	18
Figura 3-3: Proceso del modelo WRF/WPS	20
Figura 4-3: Malla de intersección de la Provincia de Chimborazo.....	21
Figura 1-4: Mapas de temperatura de cada mes del año 2015 ^a partir de datos del INAMHI	30
Figura 2-4: Mapas de radiación de cada mes del año 2015 ^a partir de datos del INAMHI.....	34
Figura 3-4: Mapas de temperatura de cada mes del año 2015 partir de datos del WRF.....	38
Figura 4-4: Mapas de radiación de cada mes del año 2015 partir de datos del modelo WRF ...	42
Figura 5-4: Mapas de temperatura y radiación de anual partir de datos de INAMHI y modelo WRF	45

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4: Temperatura.....	43
Gráfico 2-4: Radiación.....	44

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN DE WRF

ANEXO B: INTERFAZ POST-PROCESAMIENTO DE DATOS WRF

ANEXO C: OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DEL INAMHI

ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo validar el modelo mesoescalar WRF (Weather Research Forecasting) en la modelación meteorológica de Chimborazo, para lo cual se partió de la información recabada por las estaciones meteorológicas presentes en el área de estudio como medio de comparación de datos, posteriormente se procedió a la descarga y compilación del modelo WRF a través de un servidor virtual; las variables de análisis para ambos casos fueron temperatura (grados Celsius) y Radiación solar (W/m²) con una resolución temporal mensual, a partir de las cuales se aplicaron herramientas de interpolación de datos para dar lugar a representaciones cartográficas de la zona de estudio, considerando para ello una malla de aproximadamente 6805 celdas de dimensiones 1km x 1km, mostrando que los intervalos de temperatura de la provincia varían de 11 a 18 grados Celsius, siendo los meses de junio a septiembre los más calurosos, junto con los niveles de radiación comprendidos entre 130 y 350 W/m² acorde al INAMHI; por su parte el modelo WRF mostró un intervalo de temperatura de 10 a 15 grados Celsius, con niveles de radiación entre 90 y 100 W/m², siendo la zona norte de la provincia la que presenta mayores registros de esta variable a lo largo del año. Finalmente, la información procesada fue sometida a pruebas estadísticas de normalidad, raíz del error medio cuadrático (RMSE), error medio absoluto (MAE) y coeficientes de correlación; mostrando que la diferencia entre las medias de los datos evaluados fue mínima para la variable de temperatura, lo que representa un cercanía de datos entre INAMHI y WRF, aplicable en la zona de interés, situación opuesta en la variable de radiación, pues la diferencia mostrada fue considerable, por ello se recomienda reducir la resolución temporal de los datos del modelo procurando tener una mayor representatividad.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CALIDAD DEL AIRE>, <METEOROLOGÍA>, <MODELACIÓN>, <VALIDACIÓN>, <WEATHER RESEARCH FORECASTING (WRF)>, <INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI)>, <RADIACIÓN>.

LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, o=BANCO
CENTRAL DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION-ECIBCE,
l=QUITO, serialNumber=0000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.03.28 15:28:03 -05'00'



0545-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

The aim of this study was to validate the WRF (Weather Research Forecasting) mesoscale model in the meteorological modeling of Chimborazo, it was necessary to start with the information collected by the meteorological stations which are part of the study area, this information was used to compare data; then, it was necessary to download and compile the WRF model through a virtual server; The analysis variables for both cases were temperature (degrees Celsius) and solar radiation (W/m²) with a monthly temporal resolution, from which data interpolation tools were applied in order to produce cartographic representations of the study area, considering a grid of approximately 6805 cells with a dimension of 1km by 1km, this revealed that the temperature ranges of the province vary from 11 to 18 degrees Celsius, in which the months from June to September are considered the hottest months, together with the radiation levels between 130 and 350 W/m² according to INAMHI; The WRF model showed a temperature range from 10 to 15 degrees Celsius, with radiation levels between 90 and 100 W/m². According to this study, the northern part of the province evidences the highest records of this variable throughout the year. Finally, the processed information was exposed to statistical tests of normality, root mean squared error (RMSE), mean absolute error (MAE) and correlation coefficients; showing that the difference between the mean of the evaluated data was minimal for the temperature variable, which represents a similarity between the data from INAMHI and WRF, and which are appropriate for the area of interest, opposite to the radiation variable, since the difference shown was considerable. Thus, it is recommended to reduce the temporal resolution of the model data seeking to have a greater representation.

Keywords: <TECHONOLGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <AIR QUALITY >, <METEOROLOGY >, <MODELING >, <VALIDATION >, <WEATHER REASEARCH FORECASTING (WRF) >, <INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA (INAMHI) >, <RADIATION >.



Firmado electrónicamente por:
**PAUL ROLANDO
ARMAS PESANTEZ**

INTRODUCCIÓN

Los modelos meteorológicos nos ofrecen oportunidades la precisión de los pronósticos y predicciones son vitales para la toma de medidas de mitigación o corrección, para reducir el impacto de los contaminantes atmosféricos, por lo que es necesario que se lleven a cabo los análisis necesarios utilizando modelos mesoescalares independientes y de acceso gratuito como el WRF. Para su uso se requiere de una buena preparación y entendimiento para entender su funcionamiento. El modelo ofrece una plataforma de pronóstico flexible y eficiente, al tiempo que proporciona los últimos avances en la física y de los métodos numéricos y de asimilación de datos, incluso de su capacidad de permitir el uso de resoluciones espaciales de unos pocos kilómetros, uno de los objetivos del WRF es acelerar los avances en las investigaciones relacionadas con la meteorología operativa a nivel mundial. El modelo brinda la posibilidad de ser utilizado para las simulaciones de variables y fenómenos meteorológicos en cualquier región del planeta.

Este trabajo mostrara el análisis de la comparación con una resolución temporal mensual, de los datos obtenidos con la aplicación de modelos meteorológicos como el INAMHI y WRF (Weather Research and Forecasting), con los valores en tiempo real de las observaciones meteorológicos que conforman la red operativa dentro de la Provincia de Chimborazo para el año 2015, el cual se tomara en cuenta las variables de temperatura °C y radiación solar W/m² procedentes de las estaciones meteorológicas correspondientes a Chimborazo, que serán analizados con la ayuda de modelos estadísticos para la comparación de los datos obtenidos mediante el uso de INAMHI y WRF con las estaciones meteorológicas.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

1.1.1. *Enunciado del problema*

Hoy en día el modelamiento de contaminantes atmosféricos, basándose en simulaciones de los procesos físicos y químicos de estos; requieren un estudio previo del comportamiento meteorológico haciendo de la pronosticación del tiempo una herramienta importante para la comprensión de dichos fenómenos. Según la EPA (Environmental Protection Agency) la predicción de condiciones futuras permitiría evaluar la efectividad de la implementación de programas de regulación a las fuentes puntuales de emisión; la mayoría de los modelos de meteorología son desarrollados para condiciones distintas a las de Ecuador por eso es necesario validar esa información utilizando datos de estaciones automáticas para de esta manera se utilizaría para pronosticar a la escala requerida para el desarrollo de metodologías e investigación de los contaminantes atmosféricos.

El modelo WRF (Weather Research and Forecasting) es un modelo numérico de predicción del tiempo de mesoescala que ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas. Tras su ventaja de ser de código abierto y las diferentes resoluciones para cada zona de estudio, recae la necesidad de determinar la configuración que mejor se adapte a la realidad y la comparación con los datos reales observados por las estaciones hidrometeorológicas con el fin de identificar en qué medida el modelo está representando la evolución y el comportamiento de las variables que afectan el modelamiento de contaminantes atmosféricos.

1.2. Justificación

En la actualidad, el cambio climático y los cambios drásticos del tiempo afectan en similar medida a muchas regiones del país, al parecer atribuido por el calentamiento de la tierra; por lo que es necesario pronosticar oportunamente la ocurrencia de alteraciones meteorológicas. La precisión de los pronósticos y predicciones son vitales para la toma de medidas de mitigación o corrección, para reducir el impacto de los contaminantes atmosféricos, por lo que es necesario que se lleven a cabo los análisis necesarios utilizando modelos mesoescalares independientes y de acceso gratuito como el WRF. Este modelo es una herramienta poderosa y versátil para predecir condiciones meteorológicas, con el cual el Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador ha

venido trabajando en conjunto con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para simular el clima hasta por 3 días.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

- Validar el modelo mesoescalar WRF (Weather Research Forecasting) en la modelación meteorológica de Chimborazo.

1.3.2. Específicos

- Analizar los datos meteorológicos de temperatura y radiación solar generados con WRF para el año 2015.
- Evaluar los datos de temperatura y radiación procedentes de las estaciones meteorológicas correspondientes a Chimborazo.
- Aplicar modelos estadísticos para la comparación de los datos obtenidos mediante el uso de WRF con las estaciones meteorológicas.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Antecedentes

Los modelos meteorológicos nos ofrecen diferentes oportunidades para poder comprender los fenómenos atmosféricos y hacer predicciones sobre los mismos; como no es siempre viable la recolección de la información de manera experimental, la simulación numérica de la meteorología es una herramienta muy útil para generar información verificada.

Por lo que el modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting) se ha convertido en uno de los más utilizados en el mundo durante los últimos años para el pronóstico de campos de variables meteorológicas en una escala regional. Las características principales de este modelo se dan alrededor de su dinámica no hidrostática y de su capacidad de permitir el uso de resoluciones espaciales de unos pocos kilómetros por lo que permite la posibilidad de varias opciones de configuración y de parametrizaciones físicas (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 9).

Este modelo en particular nos permite la obtención de un pronóstico flexible como eficiente, a la vez que nos proporciona los últimos avances en la física como en lo que cabe a los métodos numéricos de asimilación de datos (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 9).

Uno de los objetivos del WRF es acelerar los avances en las investigaciones relacionadas con la meteorología operativa a nivel mundial y nos brinda la posibilidad de ser utilizado para las simulaciones de variables y fenómenos meteorológicos en cualquier región del planeta (Moya y Ortega 2015, p. 135).

En Ecuador los modelos WRF han sido utilizados por el INAMHI desde el 2009, su principal función es asimilar los datos de las estaciones meteorológicas del país para actualizar la información del estado en el que se encuentra la atmósfera, como producto de esta recopilación de datos se obtiene mapas de precipitación y temperatura (Narváez 2012, p. 27).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. *Modelo Numérico*

Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno natural, que es expresado típicamente en manera matemática, lo que permite un mejor entendimiento sobre el estudio en cuestión y cómo es su comportamiento (García 2017, p. 16). Para ello se discretizan las ecuaciones diferenciales en una rejilla cúbica que posee normalmente direcciones x e y en la horizontal y z ó

p en la vertical; estas direcciones son representaciones fiables de la atmósfera (Saavedra Murrugarra 2016, p. 18).

En el caso de la atmósfera y océano, su comportamiento se rige por las diferentes ecuaciones que están directamente asociadas con la dinámica de fluidos y otros procesos físicos de mayor complejidad como es la interacción que ocurre entre la materia y radiación, la microfísica de nubes, etc. Por lo general, estas ecuaciones son expresadas como ecuaciones diferenciales parciales, las que son utilizadas para poder dar una descripción sobre la evolución futura de diversas variables que son relevantes en función de los valores de las distintas variables en el tiempo presente, el modelo matemático en si es una compilación de diferentes ecuaciones que van a la par con los valores de parámetros y condiciones de frontera, estos últimos pueden ser por ejemplo, las características topográficas de la Tierra, la cantidad de energía emitida por el Sol, entre otros factores (García 2017, p. 18).

Cuando hablamos de la atmósfera se debe referir como un fluido y que por tanto son aplicables para su uso las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos como resolución al problema puntual que tiene que ver con la evolución de los fenómenos meteorológicos en la atmósfera terrestre, es decir, presenta una resolución clara y concisa en lo que respecta a la predicción del tiempo (Saavedra Murrugarra 2016, p. 25).

La atmósfera es un sistema muy caótico, por esta razón los datos que son recogidos para el modelamiento numérico y sus respectivos análisis son sensibles a sus condiciones iniciales, es decir que los diversos datos que son recolectados poseen su un cierto grado de error, estos errores iniciales se amplifican mientras se realizan sus pronósticos, por lo que parte del detalle que nos muestra cierto pronóstico decrece con el tiempo y llega un momento específico en el que las predicciones generadas ya no van a ofrecer una visión real de la atmósfera (Mejia y Franklyn Ruíz 2012, p. 31).

2.2.2. *Modelo Weather Research and Forecasting*

El modelo Weather Research and Forecasting o conocido también por sus siglas WRF, es un sistema que se basa en la predicción numérica como en la simulación atmosférica de datos meteorológicos que es utilizado ampliamente para diversos fines como en aplicaciones para la educación, investigaciones; por lo que su diseño fue realizado exclusivamente para poder brindar flexibilidad, es un modelo de última generación de simulación atmosférica en plataformas computacionales (Juncosa Calahorrano 2016, p. 26).

Una de las características principales de este modelo tiene que ver con respecto a su capacidad dinámica no hidrostática y de su habilidad para poder permitir el uso de resoluciones espaciales de unos cuantos kilómetros. También permite al usuario la elección entre diferentes opciones de configuración y de parametrizaciones físicas para la convección (Moya y Ortega 2015, p. 136).

El modelo WRF es un modelo de mesoescala comunitario de última generación cuyo desarrollo se dio en EE.UU; con lo que se refiere a ser un modelo comunitario es que el código de fuente puede ser descargado directamente desde internet de una forma que es totalmente gratuita, esta facilidad en tanto a su obtención permite que esta tecnología que es de mucha utilidad y sofisticación se encuentre al alcance de cualquier usuario que la llegue a necesitar, sin embargo el manejo de este modelo requiere de un entrenamiento y entendimiento adecuado por parte de la persona que lo utilizará (Ñavincopa Muñoz 2018, p. 21).

Desde su desarrollo inicial, actualmente este modelo viene siendo desarrollado y actualizado por diversas entidades como el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Oceanic and Atmospheric Administration / National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP), la NOAA Earth Systems Research Laboratory Global Systems Division (NOAA/ESRL/GSD), el Federal Aviation Administration (FAA), el Mesoscale Microscale Meteorology Division (MMM), el Department of Defense's Air Force Weather Agency (AFWA), así como por científicos universitarios y colaboradores internacionales (García 2017, p. 9).

La configuración de referencia utilizada por el WRF se detalla de en la Figura 1-1:

Opciones físicas y dinámicas	Esquemas físicos de la configuración de referencia WRF3.2
<i>Microfísica (mp_physics)</i>	WRF SM 5-class-scheme, 4
<i>Radiación de onda larga (ra_lw_radiation)</i>	RRTM, 1
<i>Radiación de onda corta (ra_sw_radiation)</i>	Dudhia, 1
<i>Capa superficial (sf_sfclay_physics)</i>	Monin Obukhov, 1 -2 QNSE, 4
<i>Capa terrena (sf_surface_physics)</i>	Noah, 2
<i>Capa Límite Planetaria (bl_pbl_physics)</i>	Yonsei, 1 QNSE, 4
<i>Esquema Convectivo-Cúmulo (cu_physics)</i>	Kain-Fritsch scheme, 1

Figura 1-2: Configuración de referencia para el modelo WRF

Fuente: (Juncosa, 2016).

2.2.3. Radiosondeo

Un sondeo atmosférico consiste en la adquisición en tiempo real de diversas variables meteorológicas que fueron medidas mediante la utilización de diversos sensores que se encuentran a bordo de globos los mismos que pueden alcanzar grandes altitudes (Cazorla y Juncosa 2016, p. 96).

Este procedimiento se lo realiza al utilizar un dispositivo electrónico que posee en su diseño diversos sensores que son implementados para medir diferentes parámetros atmosféricos como son (Yáñez-Morrón et al. 2018, p. 9): Presión atmosférica, temperatura, altitud, velocidad, posición geográfica, humedad relativa, dirección del viento, concentración de ozono, vapor de agua precipitable.

El globo cuando alcanza una altura de unos 30.000 metros aproximadamente, revienta debido a la falta de presión del aire externo a esa gran altura, por lo cual su muestreo tiene su último registro a la altura que se produjo el estallido, los datos que fueron recogidos entonces son enviados por radio a ordenadores sobre la superficie terrestre, cuya utilidad radica en el almacenamiento de todas las variables en tiempo real; los datos que son adquiridos por el equipo en conjunto con la información procedente de otras sondas que son lanzadas en diferentes sitios, sirven para la realización y la configuración de un nuevo mapa en tiempo real de las condiciones atmosféricas presentes (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 20).

La importancia de los procedimientos que se puede realizar mediante los radiosondeos radica en su aportación al entendimiento de la atmósfera superior y a la retroalimentación de modelos globales y la evaluación de datos provenientes de lecturas satelitales (Cazorla y Juncosa 2016, p. 97)

2.2.4. Temperatura atmosférica

La temperatura es una magnitud que se relaciona con la rapidez en las que se mueven las partículas que están constituyendo la materia, cuando mayor es la agitación que se encuentra presente es mayor la temperatura, por lo que para poder medirla de manera fidedigna se debe tener en cuenta las diferentes propiedades de son inherentes de la materia y que las mismas pueden verse alteradas cuando ésta cambia, como son: el color de un objeto, el volumen de un cuerpo, la resistencia eléctrica de algunos materiales, entre otros (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 26).

Se conoce que la atmósfera puede llegar a medir hasta los 100 km sobre la superficie terrestre, esta medida se la toma teóricamente hasta la última molécula de aire que se encuentra influenciada por el campo gravitacional del planeta, a pesar de enorme tamaño se sabe con certeza que el 99.9% de la masa que posee la atmósfera terrestre se encuentra concentrada en sus primeros 50 km (Cazorla y Juncosa 2016, p. 48).

La capa atmosférica que se encuentra más cercana a la superficie es la tropósfera, la misma cuenta con el 80% de la masa total de la atmósfera y tiene una tasa de enfriamiento adiabático equivalente a $6.5\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$ aproximadamente; es en esta capa donde ocurren la gran mayoría de los fenómenos que son de interés para la meteorología y que influyen directamente a los seres vivos que residen en el planeta, aquí es donde se reúne la mayor parte de oxígeno como el vapor de agua, además se puede observar diversos fenómenos como son las inversiones térmicas, y están representadas por un aumento de la temperatura con la altitud, con lo que inhiben la mezcla vertical (Cazorla y Juncosa 2016, p. 86).

La tropósfera es una región que se caracteriza por su inestabilidad, es aquí en donde la convección natural acelera el transporte de las partículas que la componen, en cambio en la estratósfera ocurre una inversión con respecto a la temperatura por lo que aquí se genera un medio muy estable con respecto al movimiento vertical de las partículas debido a que el aire caliente al ponerse en contacto directo sobre el frío (figura 2-1), forma capas las que impiden el transporte troposfera-estratosfera. Por lo tanto, al atravesar la tropopausa desde la troposfera hasta la estratosfera, se produce un cambio abrupto de las concentraciones de los constituyentes atmosféricos que también influyen en las temperaturas atmosférica (González y Rodríguez 2020, p. 106).

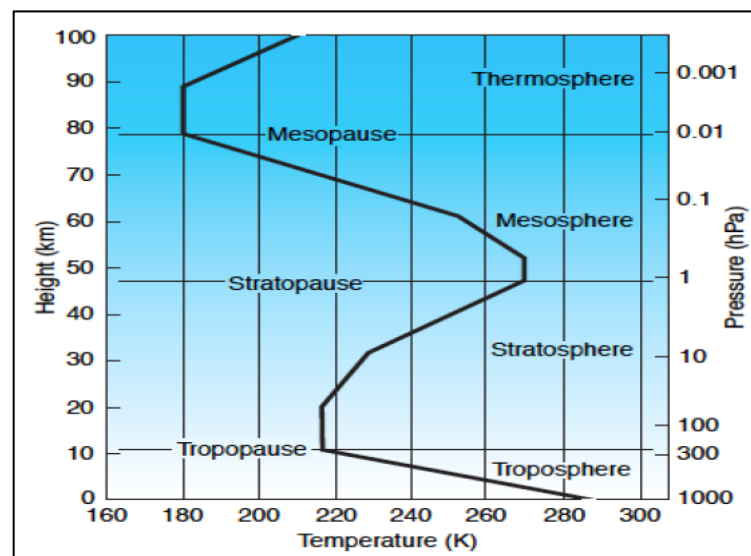


Figura 2-2: Perfil vertical de temperatura en latitudes medias

Fuente: (Juncosa, 2016).

2.2.5. Dinámica atmosférica

Son las diversas clases de fuerzas que ocasionan que las parcelas de aire se puedan acelerar o desacelerar, en otras palabras, estas fuerzas son las causantes de la creación o alteración del viento; existe una estrecha relación entre las fuerzas y el viento a este fenómeno se le conoce con el nombre de dinámica atmosférica. Siguiendo las leyes de Newton, se puede describir a esta

dinámica como el resultado de la presión y la fricción que ejercen en conjunto sobre el plano horizontal, existen además otras fuerzas como la ocasionada por la rotación terrestre o debido al giro del viento alrededor de una curva, estas son llamadas con el nombre de fuerzas aparentes. La fuerza horizontal es considerada como la más importante debido a que lleva a la formación del viento que es el de gradiente de presión (Narváez 2012, p. 27).

Las causas dinámicas que posee la atmósfera se encuentran directamente relacionadas con la rotación de la Tierra y los amplios patrones de circulación. Por ejemplo, a medida que el aire comienza su ascenso constante en el ecuador, se mueve hacia los polos; pero la rotación de nuestro planeta ocasiona que el aire que fluye hacia los polos sea desplazado hacia el este; para cuando el aire se encuentra sobre las regiones subtropicales, comienza una trayectoria de oeste a este, la flexión del flujo de la corriente que se desplaza hacia el polo provoca el impedimento del movimiento hacia el norte y hace que el aire se acumule sobre los subtrópicos, lo que se traduce en una mayor presión atmosférica en ese lugar de la superficie (Shamarock, Klemp y Dudhia 2008, p. 47).

Para el estudio adecuado de la dinámica atmosférica implica el análisis mediante la observación y la aplicación de las bases teóricas acerca de todos los sistemas de movimiento de que son importantes para el estudio de la meteorología, a esta última se le pueden añadir otros fenómenos de interés como tormentas eléctricas, tornados, huracanes, ciclones y circulaciones de escala global. Los estudios en este campo son realizados en vías a la mejora de la predicción del tiempo, el desarrollo de métodos para la predicción de corto plazo las fluctuaciones climáticas y el entendimiento de las diversas consecuencias de las acciones provocadas por el hombre en cuanto a la contaminación medio ambiental (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 86).

2.2.6. *Presión atmosférica*

La presión atmosférica es muy significativa para el estudio de la meteorología debido a que las variaciones de la presión que ocurren dentro de la atmósfera del planeta Tierra, esto causa una circulación continua de los gases que la componen y que por lo tanto posee un importante papel en lo que cabe a la determinación del tiempo como del clima. También se puede mencionar que las diferencias en la presión son capaces de crear los vientos, su movimiento es el que impulsa las corrientes oceánicas y la presión influye directamente en varios de los sistemas de terrestres (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 25).

Depende de muchas variables, en especial de la altitud por lo que a medida que más alto se encuentre, la cantidad de aire por encima nuestro será mucho menor a la normal, lo que hará también que sea menor la presión que éste ejerza sobre un cuerpo ubicado allí (González y Rodríguez 2020, p. 108); pero los cambios en la presión no se relacionan solamente con el cambio en la altitud, las transiciones de presión, por más pequeñas que sean son muy importantes y se encuentran

relacionadas con la intensidad de la insolación, el movimiento general de la circulación, humedad y precipitación local. Las fluctuaciones en la presión en una locación específica significan una variación en el clima, es así que sistemas meteorológicos que son empleados mundialmente pueden clasificarse de acuerdo a su estructura y tendencia al cambio de su presión (Rodríguez y Gerardo 2020, p. 56).

La presión puede ser definida como el cociente entre la acción de una fuerza que ejerce sobre la unidad de superficie, según la ecuación 1-1:

$$P = F/S \quad \text{Ecuación 1-1}$$

El aire que compone a la atmósfera, aunque no se lo pueda notar, tiene un cierto peso y que por tanto este puede ejercer una fuerza sobre todos los cuerpos que yacen en la superficie debido a la acción de la fuerza gravitatoria. La presión atmosférica, es empleada como una unidad de medida en el Sistema Internacional es el Pascal (1 Pascal = 1N/m²) (González y Rodríguez 2020, p. 109).

2.2.7. Radiación solar

La energía emitida por el Sol y que llega a nuestro planeta es lo que se conoce con el nombre de energía radiante o radiación, esta viaja a través del espacio en forma de ondas que poseen una determinada cantidad de energía y en concordancia a lo energéticas que puedan llegar a ser se las puede clasificar en el espectro electromagnético como se aprecia en la figura 3-1. Las ondas que poseen la mayor energía son las correspondientes al rango del ultravioleta, seguidas por la luz visible, infrarroja y así hasta las menos energéticas correspondientes a las ondas de radio (González y Rodríguez 2020, p. 110).

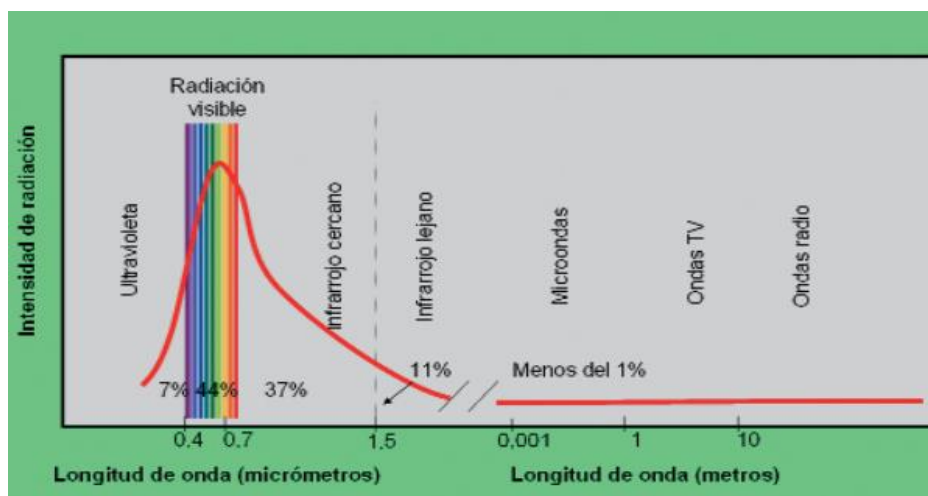


Figura 3-2: Espectro Electromagnético del sol

Fuente: (González y Rodríguez, 2020).

Se producen varios efectos de atenuación de la radiación cuando la radiación atraviesa la atmósfera. Generalmente, son llamados procesos de extinción. Hay dos clases generales de procesos de extinción: absorción y dispersión (siendo la reflexión un caso especial de dispersión). En la atmosférica ocurre un proceso de extinción de la radiación que es denominado absorción, reduce la energía solar disponible y de esta manera se disminuye la radiación que llega a la superficie terrestre. Ciertos componentes que forman parte de la atmósfera tienen la capacidad de absorción de la radiación en un cierto rango espectral. El ozono (O₃) presente en la atmósfera superior absorbe casi en su totalidad la radiación de onda corta (por debajo de 290 nm), en cambio por encima de los 290 nm, la absorción de ozono disminuye, hasta que a 350 nm casi no existe absorción. El vapor de agua se absorbe fuertemente en la parte infrarroja del espectro solar, con bandas de absorción en 1, 1,4 y 1,8 μm, el dióxido de carbono es otro fuerte absorbente de radiación infrarroja; debido a los gases de H₂O y CO₂ el paso de radiación a través de la atmósfera es muy baja en longitudes de onda superiores 2,5 μm. Finalmente, el oxígeno y el nitrógeno absorben la radiación en un amplio rango de longitudes de onda (Mejia y Franklyn Ruíz 2012, p. 43).

2.2.8. Radiación atmosférica

Es definida como el calentamiento atmosférico a causa de los flujos radiativos divergentes y la radiación de onda larga y corta incidente. La radiación de onda larga incluye la radiación infrarroja o termal absorbida y emitida por gases y superficies. El flujo de radiación de onda larga saliente del suelo es determinado por la emisividad de la superficie que a su vez dependen del tipo de uso de suelo, como también de la temperatura del suelo; en tanto la radiación de onda corta incluye longitudes de onda visible y alrededores de su espectro que componen el espectro solar (Narváez 2012, p. 28).

La luz se absorbe a su paso por la atmósfera y al mismo tiempo está sujeta a dispersión, uno de los mecanismos de dispersión de la luz que ocurre en la atmósfera se lo denomina dispersión de Rayleigh, es provocada por las diferentes moléculas que se encuentran flotando en la atmósfera, es especialmente eficaz para la luz de longitud de onda corta (es decir, la luz azul), además los aerosoles y las partículas de polvo contribuyen a la dispersión de la luz incidente conocida como dispersión de Mie (Jiménez 2014, p. 162).

El promedio de la radiación neta global en la parte superior de la atmósfera se da gracias a un estado climático de equilibrio; en presencia de un incremento de una fuerza climática ocurre un desequilibrio entre la energía que es absorbida y la energía que es emitida, y en respuesta el sistema climático reacciona para poder restablecer el equilibrio, una manera de hacerlo es cambiando la temperatura. En tanto la velocidad en la que la tierra reacciona ante la radiación presente en su atmósfera es modulada por su capacidad de almacenamiento energético, por

ejemplo, los océanos son 10 veces más eficiente para almacenar calor que otros componentes de todo el sistema climático, la radiación neta global se debe mantener en todo momento en una magnitud similar al almacenamiento de calor oceánico global (García 2014, p. 63).

2.2.9. Temperatura

Es una de las magnitudes que son de mayor utilidad al momento de poder describir el estado de la atmósfera. Se relaciona con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia, si se mueven muy rápidamente, mayor será su temperatura. Para poder medirla de una manera adecuada se debe hacer uso de instrumentos cuyos componentes se ven alterados cuando las propiedades de la materia cambia al subir o bajar la temperatura como: la resistencia eléctrica de ciertos materiales, el volumen de un cuerpo, el color de un objeto, etc; el instrumento que es usado para su medición es denominado termómetro que fue inventado por Galileo en el año 1593 y consiste en un tubo graduado de vidrio con un líquido en su interior que puede ser, por ejemplo, alcohol o mercurio (González y Rodríguez 2020, p. 111).

La temperatura en la superficie se ve afectada por el calor almacenado, a su vez depende de la radiación solar y de otros mecanismos que median todo el proceso que ocurren en la atmósfera como el grado de evaporación y el escurrimiento superficial, la distribución de calor dentro del sistema climático ocurre en las circulaciones atmosféricas y oceánicas (Moya y Ortega 2015, p. 138). En meteorología se habla de temperaturas máximas y mínimas en otras palabras se refiere a los valores más altos y más bajos que registrados en un periodo de tiempo en una locación determinada (González y Rodríguez 2020, p. 112).

2.2.10. Viento

Es el flujo de aire desde una zona hasta otra que puede ser provocado cuando entre dos puntos se da una cierta diferencia con presión o de temperatura. Cuando entre dos zonas se da un cambio en la presión, el viento se mueve desde la zona de alta presión a la zona de baja presión en este caso se puede decir que se ha producido un gradiente o diferencia de presión (Rodríguez, 2004, p. 9). La diferencia de presión o el gradiente de presión determina la velocidad y la dirección inicial del movimiento del viento, cuando se describe la dirección del viento, se refiere a la dirección de origen del viento (Murcia Ruiz 2010, p. 26).

Cuando ocurre una diferencia térmica, el aire adquiere una temperatura superior a la de su entorno y su volumen tiende a incrementarse y su densidad disminuye. Por efecto de la fuerza de flotación, el aire caliente ascenderá y lugar que deja será ocupado por otras masas de aire que poseen menor temperatura, este movimiento ocasiona el viento (González y Rodríguez 2020, p. 116).

2.2.11. Humedad atmosférica

La cantidad de vapor de agua que se encuentra en la atmósfera posee un papel sumamente importante en lo que respecta a las propiedades de flotabilidad, estabilidad atmosférica y la precipitación convectiva. Cuando aumenta la cantidad de vapor en la atmósfera inferior existe la posibilidad de que se dé un mayor potencial de inestabilidad de las condiciones atmosféricas, por ejemplo, se da una mayor flotabilidad de una parcela de aire desplazada, esto ocurre debido a que la tasa de caída adiabática húmeda ($\sim 4 \text{ K } 1000 \text{ m}^{-1}$) es mucho menor que la tasa de insaturaciones ($\sim 9,8 \text{ K } 1000 \text{ m}^{-1}$) (Yáñez-Morroni et al. 2018, p. 18).

Los cambios que ocurren con respecto al vapor de agua atmosférico amplifican la respuesta del sistema climático a prácticamente todos los forzamientos climáticos, incluidos los cambios antropogénicos y naturales en el CO₂, cambios en la luminosidad solar y cambios en los parámetros orbitales. La retroalimentación de vapor debe ser consistente con el mantenimiento de la humedad relativa en el ambiente por lo que deben permanecer aproximadamente fijas a medida que cambia el clima (Silveira y Carvalho 2021, p. 36).

Las variaciones de la humedad atmosférica se encuentran ligadas directamente al tipo de superficies, por ejemplo los cuerpos de agua ya sea océanos, lagos y ríos, igualmente las selvas y bosques, hacen notar su influencia al inyectar vapor de agua directamente en la atmósfera, pero el área de influencia de cada cuerpo significativo en la superficie con respecto al vapor de agua que genera, dependerá de la dirección y del área que pueda abarcar el viento, y se propagará hasta alcanzar el punto donde pueda ocurrir saturación y ocurra la formación de las nubes. Puede darse el caso de que la atmósfera se encuentre en un estado inestable, esto provocará que burbujas de aire puedan ascender, este proceso es denominado convección, en cambio, cuando la atmósfera se encuentre en un estado estable y también ocurran descensos de aire, la formación de las nubes será muy escasa, a estos procesos se le conoce con el nombre de subsidencia.

El vapor de agua que se encuentra en un estado suspendido tiene la habilidad de cambiar las propiedades térmicas del aire y proporciona un cierto efecto invernadero en la atmósfera, por lo que son comunes las variaciones de temperatura durante el día y por la noche dichas variaciones son más acentuadas en regiones donde la atmósfera es menos húmeda como en desiertos y zonas áridas.

2.2.12. Meteorología y climatología

Ambas son ramas científicas muy importantes en lo que cabe a la comprensión del clima, ambas se encargan del estudio de las diversas leyes que rigen el funcionamiento de los sistemas climáticos así como también de la localización y distribución espacial de las variables del clima y su relación con la vegetación, los cultivos o el hombre: fitoclimatología, agroclimatología y

bioclimatología, son las tres principales ramas. Las dos ciencias se encuentran estrechamente relacionadas y la línea que los separa es muy fina, aunque se puede decir que la predicción del tiempo es el objeto que comparten ambas ciencias (Aragón et al. 2012, p. 91).

La meteorología se ocupa en gran medida del estado de la atmósfera durante un corto período de tiempo y utiliza principios físicos para alcanzar su objetivo. La climatología es el estudio de la atmósfera condiciones durante un período de tiempo más largo, incluye el estudio de diferentes tipos de clima; el cambio dinámico en la atmósfera produce variación y ocasionalmente grandes extremos que deben tratarse tanto a largo como a corto plazo. Como resultado, la climatología puede definirse como el conjunto del tiempo en un lugar sobre un período de tiempo determinado (Mejía y Franklyn Ruíz 2012, p. 26).

En tanto la climatología trata simplemente sobre ensamblaje estadístico de la cuestión climática de en un lugar o para una región en particular, se puede decir que es el estado termodinámico / hidrodinámico que determinan el conjunto de patrones climáticos y sugiere que el clima es limitado por una gama permisible estacional; por ejemplo, la formación de ciclones está muy limitado por las condiciones de temperatura en las que se encuentra la superficie de los océanos (Valencia et al. 2020, p. 646)

La climatología no solo se ocupa del análisis de patrones y estadísticas climáticas (por ejemplo, temperatura, precipitación, humedad atmosférica, circulación atmosférica y perturbaciones) sino también de la variabilidad climática interanual, de las fluctuaciones climáticas decenales a milenarias, cambios a largo plazo en la media y características de variabilidad, extremos climáticos y estacionalidad (Valencia et al. 2020, p. 651).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

El presente estudio se acogió a los tipos de investigación acorde a varios criterios, por tal razón se estableció principalmente una investigación cuantitativa, según el objetivo fue de tipo aplicada, juzgar por el nivel de profundización en el objeto de estudio fue de carácter explicativa, acorde a la manipulación de variables fue de tipología no experimental, conforme al tipo de inferencia se trató de un estudio inductivo y finalmente de acuerdo con el periodo temporal escogido se trató de una investigación longitudinal.

3.2. Diseño de investigación

Se elaboró a partir de los datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y radiación solar (W/m^2) obtenidos de las estaciones meteorológicas del Instituto de Meteorología e Hidrología (INAMHI) cercanas al área de estudio, estas variables de la provincia de Chimborazo a su vez fueron consideradas mediante la utilización del modelo mesoescalar WRF para el año 2015; se procedió consecuentemente a la comparación de dichos datos utilizando diferentes modelos estadísticos para su mejor comprensión.

3.3. Localización del proyecto

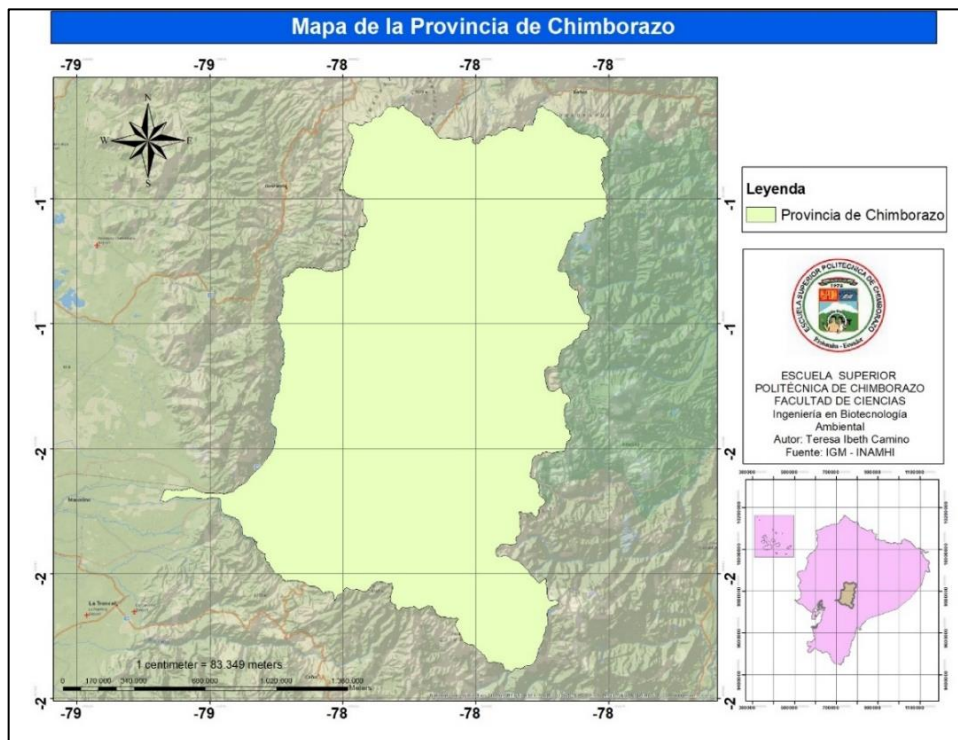


Figura 1-3: Provincia de Chimborazo

Fuente: Instituto Geográfico Militar (IGM, 2021).

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

El proyecto se realizó en la provincia de Chimborazo (Figura 4), ubicada en el distrito central de Sierra Ecuador, al norte de la provincia de Tungurahua, al sur de Cañar, Oeste con Bolívar y Guayas, al este con Morona Santiago, Chimborazo, tiene una región cercana a 6.500 km² y una localidad. de 509.351 residentes, es la novena provincia de Ecuador más poblada (GADPCH 2020, pp. 6-10). La capital de la provincia es la ciudad de Riobamba, una de las ubicaciones más importantes del país, la misma se localiza en el centro-norte, a una altura de 2.750 msnm. Se identifica por adquirir una diversidad climática, a los 4.600 msnm es de tipo glacial, en la altura de 3.000 a 4000 msnm es paramo y bajo los 2000 msnm es una temperatura mesotérmico seco, en la zona costera es un clima húmedo y semi húmedo con temperaturas de 13°C (Aguirre, Ojeda, & Eguiguren, 2010, p. 9).

3.4. Técnicas de recolección de datos

3.4.1. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos que sirvieron como punto de partida para el presente estudio, fueron obtenidos a partir de las estaciones hidro-meteorológicas de la Red de Estaciones del INAMHI,

descritas en la tabla 1-2, distribuidas a lo largo del territorio de la provincia y sectores aledaños; así también se contempló la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) para la adquisición de dichas variables, considerando principalmente temperatura (°C) y radiación solar (W/m²). En ambos casos se trabajó con una resolución temporal mensual.

Tabla 1-3: Estaciones meteorológicas estudiadas

Estación	Tipología	Código
ESPOCH	Meteorológica	M1036
Guaslán	Hidrológica	M0133
Shiry XII	Meteorológica	M1130
Río Cebadas - Yapisan	Hidrológica	H5015
Cebadas AJ Guamote	Hidrológica	H0790
Chunchi	Hidrológica	H0375
Laguacoto	Meteorológica	M1107
Baños de Agua Santa	Meteorológica	HGPT-MT-06

Fuente: (INAMHI, 2020).

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

3.5. Ubicación de estaciones meteorológicas

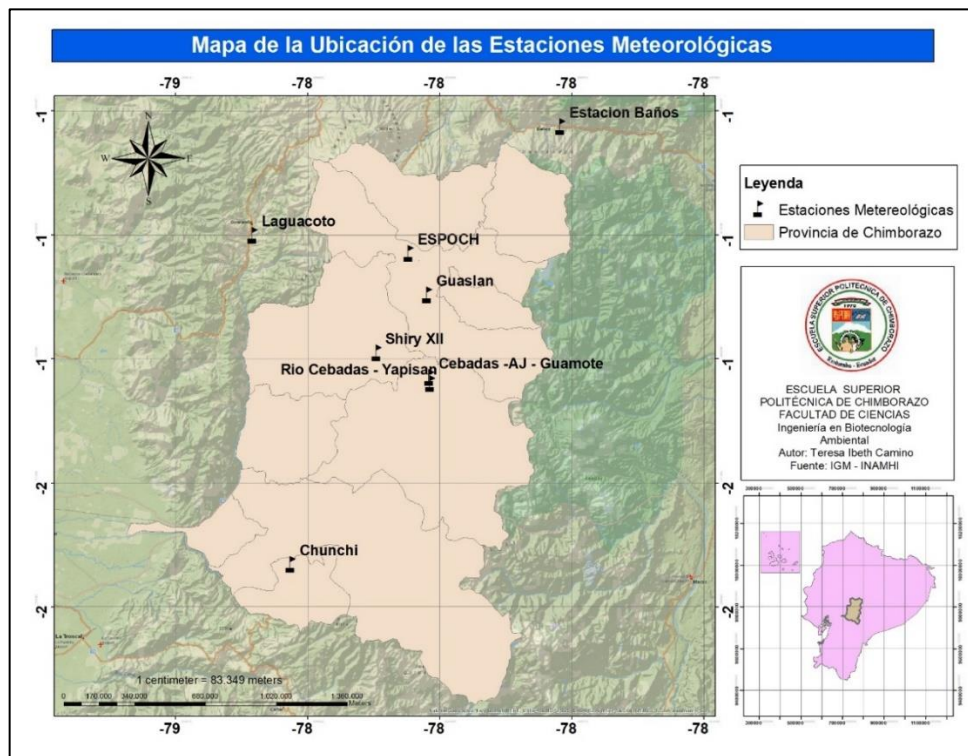


Figura 2-3: Ubicación de las estaciones meteorológicas

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Las estaciones meteorológicas e hidrológicas seleccionadas fueron aquellas que se encontraban en estado operativo, dentro del área de interés y zonas aledañas. Las estaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) y Guaslán se encuentran en el cantón Riobamba, esta última en el límite con el cantón Chambo, mientras que las estaciones Cebadas AJ Guamote y Río Cebadas Yapisan, se sitúan dentro del cantón Guamote, a su vez la estación Shiry XII se ubica en la parte oriental del cantón Colta, la estación Chunchi se encuentra instalada en el cantón del mismo nombre. Finalmente, para una mayor representatividad de los datos obtenidos, fueron necesaria la adición de estaciones cercanas a la zona de interés, fue así que se consideraron a las estaciones Laguacoto y Baños ubicadas en el Cantón Guaranda (Cotopaxi) y Baños de Agua Santa (Tungurahua) respectivamente, tal como lo muestra la figura 2-2.

3.6. Compilación del Modelo WRF

La compilación se realizó acorde a lo descrito por (Shamarock, Klemp y Dudhia, 2008, p. 34) partiendo de la descarga del modelo y sus ficheros a un servidor determinado, a partir de ello se fueron creando los directorios necesarios para el correcto funcionamiento del modelo a través de GFortran, siendo este un compilador del lenguaje FORTRAN, además de los compiladores GCC y CPP este permitió la construcción de librerías específicas llamadas Build_WRF y TESTS, las cuales funcionaron como prerrequisito para albergar la instalación de WRF y WPS, posteriormente fue de específicas llamadas Build_WRF y TESTS, tales como: NetCDF, MPICH, ZLIB, LIBPNG y JASPER sobre las cuales se sustenta el modelo, éstas a su vez fueron alojadas en la librería BUILD_WRF siendo estas instaladas con similares compiladores de WRF y WPS, una vez concluido esto fue relevante ejecutar un test de compatibilidad de librerías para así determinar su direccionamiento, esto se consiguió luego de que la máquina virtual de destino pudiese elaborar archivos de salida en formato FORTRAN y ser estos ejecutados y albergados en la librería TESTS, esto se confirmó aplicando el archivo de prueba de una de las librerías y constatando su compilación en NetCDF, construyendo ejecutables con las variables de entorno propias del modelo. Luego de verificar que todas las librerías hayan sido compatibles y direccionadas con éxito, se llevó a cabo la compilación del modelo WRF 3.8 a partir de su código fuente y su extensión de post procesamiento WPS, para ello se debió escoger una opción de ejecución de entre tres alternativas de paralelos (smpar, dmpar y dmsm), siendo selecciona el paralelo dmpar dado sus antecedentes como la opción que menor riesgo de errores acarrea; la correcta ejecución del modelo WRF se confirmó a partir de la apertura de los ejecutables albergados en los directorias antes descritos.

De manera similar que lo ocurrido con WRF, se inició la compilación de WPS, siendo ésta a partir de la ejecución de WRF, la cual permitió visualizar opciones de ejecución mediante compiladores en serie y paralelo, siendo seleccionada los relacionados a UNGRIB, puesto que permiten la variabilidad de datos; la correcta instalación de WPS se confirmó al obtener tres ejecutables en una de las librerías, siendo su tamaño diferente de cero. Finalmente se configuró el archivo de entrada del modelo donde se describieron las variables a descargar, escogiendo las variables relacionadas a temperatura y radiación solar como prioridad, a una escala temporal mensual y un dominio de 4km x 4km relacionado esto con la superficie del Ecuador. La figura 3-2 resume el proceso de compilación.



Figura 3-3: Proceso del modelo WRF/WPS

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

El post procesamiento de los datos, se completó a través de la extensión ARW-Post contenida y compilada dentro de las librerías de WRF, siendo este apartado de utilidad para la correcta visualización e interpretación de los datos.

Para la determinación de la radiación solar mediante el mencionado modelo, fue necesario aplicar lo estipulado por (Zhao 2010), quien considera todos los flujos de ondas de radiación que inciden en la corteza terrestre para obtener datos los más cercanos a la realidad posibles, de acuerdo a la ecuación 1-2

$$R_n = S_{in} + S_{out} + L_{in} + L_{out} \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Donde:

R_n = Radiación neta sobre la superficie terrestre (W/m²)

S_{in} = Radiación de onda corta descendente (W/m²)

S_{out} = Radiación de onda corta ascendente (W/m²)

L_{in} = Radiación de onda larga descendente (W/m²)

L_{out} = Radiación de onda larga ascendente (W/m²)

3.7. Elaboración de mapas temáticos

La información procedente de las estaciones meteorológicas de la provincia de Chimborazo (radiación y temperatura), así como los datos que serán obtenidos mediante la aplicación del modelo mesoescalar WRF, sirvieron para desarrollar una representación geoespacial en la que se mostraron las diferentes variables meteorológicas en forma de mapas anuales y mensuales para el año de interés esta investigación. Es para ello que se utilizó el software ArcMap 10.5, en el cual se trabajaron de manera similar los datos obtenidos tanto de las estaciones como de WRF, iniciando con una interpolación de los datos obtenidos, acorde a la ubicación de las estaciones y puntos generados en WRF, para toda la extensión de la Provincia de Chimborazo, a través de la herramienta Kriging, posteriormente la información generada se intersecó con una malla

compuesta por 6 805 celdas de dimensiones 1km x 1km, siendo estas suficientes para cubrir toda el área de interés de estudio como se muestra en la figura 4-2.

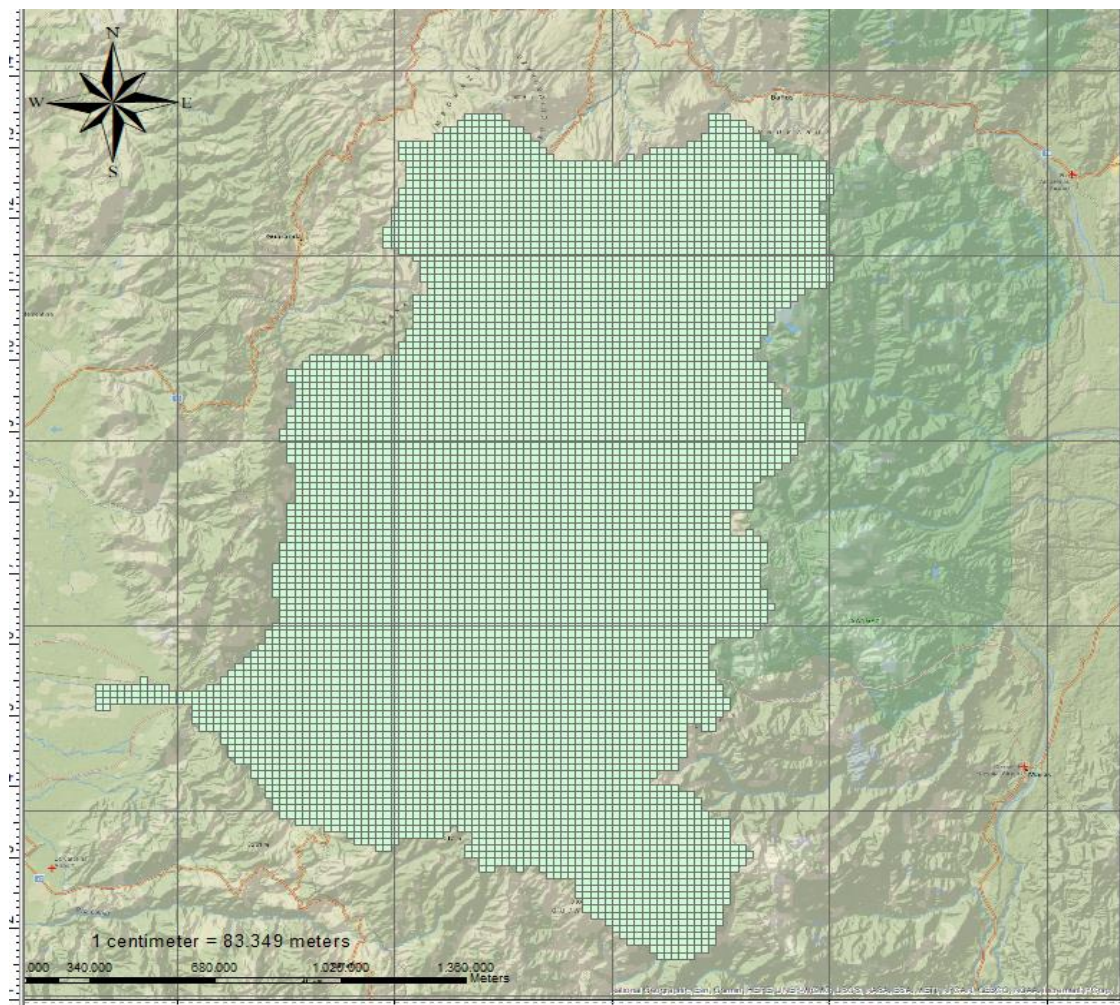


Figura 4-3: Malla de intersección de la Provincia de Chimborazo

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

3.8. Análisis estadístico

Con los resultados de temperatura y radiación obtenidos de las estaciones y al haber aplicado la modelación WRF para los datos meteorológicos de la provincia de Chimborazo se procedió a realizar su respectivo análisis comparativo de medias mensuales entre ambas fuentes de datos, utilizando para ello inicialmente la prueba estadística Kolmogorov – Smirnov con la finalidad de verificar la normalidad de los datos, para después aplicar pruebas estadísticas no paramétrica al buscando de esa manera disponer si los datos resultantes de cada una de las fuentes es aplicable a las condiciones reales de la Provincia de Chimborazo.

Para la validación estadística del método se ejecutó una estimación de la raíz del error cuadrático medio (RSME) como herramienta para la estimación del grado de exactitud de WRF (Aragón et al. 2012, p. 37), a través de la ecuación 2-2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{Ecuación 2-2.}$$

Donde:

$RMSE$ = Raíz del error cuadrático medio

P_i = valor estimado o pronosticado

O_i = valor observado

N = tamaño total de la muestra

Para complementar el análisis estadístico, se realizaron evaluaciones del error absoluto medio (MAE) (ecuación 3-2), complementado con la determinación del sesgo (ecuación 4-2) y el coeficiente de radiación (ecuación 4-2), parámetros que permitieron valorar la confiabilidad de la aplicación del modelo (Ñavincopa 2018, p. 57).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_i - Y_i|}{N} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde:

MAE = Error Absoluto Medio

X_i = serie de valores pronosticados

Y_i = serie de valores observados

$$Sesgo = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (z_{ji} - ref_i)}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

Donde:

Z_{ji} = medición j de la parte i

ref_i = valor de referencia de la parte i

n_i = muestra

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_i - f_m) \cdot (O_n - O_m)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (f_i - f)^2 \cdot (O_n - O)^2}} \quad \text{Ecuación 5-2}$$

Donde:

f_i = pronóstico

O_n = observación

f_m = promedio de pronósticos

O_m = promedio de observaciones

N = total de datos

r = Coeficiente de Correlación

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Estaciones meteorológicas

En la tabla 1-3 se detallan los valores de temperatura (°C) registradas mensualmente por la red de estaciones hidro – meteorológicas del INAMHI, se puede observar que la temperatura más alta registrada fue en la Estación Baños de Agua, teniendo valores que oscilan entre los 16 y 19°C, siendo el mes de noviembre el mes más caluroso de todos con 19,4°C. En cambio, la estación Shiry XII ubicada en el cantón Colta, registró la temperatura promedio más baja en el año 2015, siendo esta de 12,74 °C, el mes más frío fue septiembre con una temperatura de 10,3°C.

Es notorio que las estaciones que se encuentran dentro del perfil de la Provincia de Chimborazo obtuvieron los valores de temperaturas más bajos en comparación con las demás, fluctuando entre valores de 12 a 15 °C, siendo estos valores hasta 2 grados inferiores a las estaciones de Bolívar y Tungurahua. Estos datos concuerdan con los determinados por el Instituto Geográfico Militar (IGM y SENPLADES 2013, p. 27) en donde determinan la temperatura promedio de la Provincia de Chimborazo en 13.5° C, señalando además una temperatura ligeramente inferior a las determinadas en la provincia de Bolívar y Tungurahua.

Tabla 1-4: Datos meteorológicas de las estaciones

Mes	Estaciones – (Temperatura °C)							
	ESPOCH	Guaslán	Shiry XII	Río Cebadas - Yapisan	Cebadas AJ Guamote	Chunchi	Laguacoto	Baños de Agua Santa
Enero	14,88	14,77	12,26	13,56	14,19	13,35	16,36	17,15
Febrero	15,88	15,82	11,03	14,66	15,02	12,77	17,47	16,30
Marzo	15,46	14,93	14,30	14,30	14,50	13,16	17,01	17,98
Abril	14,93	15,03	10,93	13,57	15,25	13,45	16,42	18,35
Mayo	15,04	14,64	13,23	13,11	15,29	14,14	16,54	17,20
Junio	14,30	14,51	12,01	12,22	14,29	14,62	15,74	16,87
Julio	14,34	13,09	13,58	12,44	13,88	15,34	15,77	16,98
Agosto	14,49	13,47	13,61	12,57	14,24	15,28	15,94	17,42
Septiembre	14,60	13,84	10,30	12,76	13,70	15,83	16,06	16,93
Octubre	15,81	15,09	14,35	13,70	14,54	14,90	17,39	16,70
Noviembre	15,58	13,36	13,61	14,17	13,64	13,74	17,14	19,40
Diciembre	15,54	21,29	13,65	13,32	12,98	14,75	17,09	17,86
En el mPROMEDIO	15,07	14,99	12,74	13,36	14,29	14,28	16,58	17,43

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Por otra parte, en la tabla 2-3 se establecen los valores de radiación (W/m^2) registrados por las estaciones, los valores más altos en promedio se evidencian en la ESPOCH, con alrededor de $230,3 (W/m^2)$, siendo el mes de septiembre el que mayor radiación registró en esta estación, en contraste, en Laguacoto se manifestaron los datos promedio de radiación más bajos con $130,4 W/m^2$. En general, en julio en la estación de Río Cebadas – Yapisan se presenta la radiación más alta con $347,7 W/m^2$, mientras el valor mínimo registrado fue en junio en la estación Laguacoto con $118,1 W/m^2$

Tabla 2-4: Datos de radiación de las estaciones

Mes	Estaciones (Radiación W/m^2)							
	ESPOCH	Guaslán	Shiry XII	Río Cebadas - Yapisan	Cebadas AJ Guamote	Chunchi	Laguacoto	Baños de Agua Santa
Enero	215,6	138,2	177,4	181,1	203,4	175,8	135,5	138,2
Febrero	241,9	140,9	192,2	227,3	233,3	188,3	138,2	140,9
Marzo	197,3	141,5	211,3	182,7	184,2	121,9	139,1	141,5

Abril	242,4	134,7	185,2	183,3	196,7	170,7	131,7	134,7
Mayo	219,1	124,9	178,6	179,6	191,6	123,0	122,2	124,9
Junio	228,1	120,8	194,5	233,2	219,5	127,4	118,1	120,8
Julio	224,6	121,2	155,7	347,7	210,2	118,6	118,7	121,2
Agosto	239,1	127,8	144,7	230,3	263,3	151,2	125,0	127,8
Septiembre	255,4	137,4	189,8	221,2	270,6	131,5	136,0	137,4
Octubre	236,7	138,4	170,1	190,8	200,1	133,5	136,9	138,4
Noviembre	220,0	135,8	178,2	192,3	202,1	141,2	131,9	135,8
Diciembre	243,1	134,1	192,6	208,2	247,4	139,2	131,3	134,1
PROMEDIO	230,3	133,0	180,9	214,8	218,5	143,5	130,4	133,0

Realizado por: Camino, Teresa. 2021

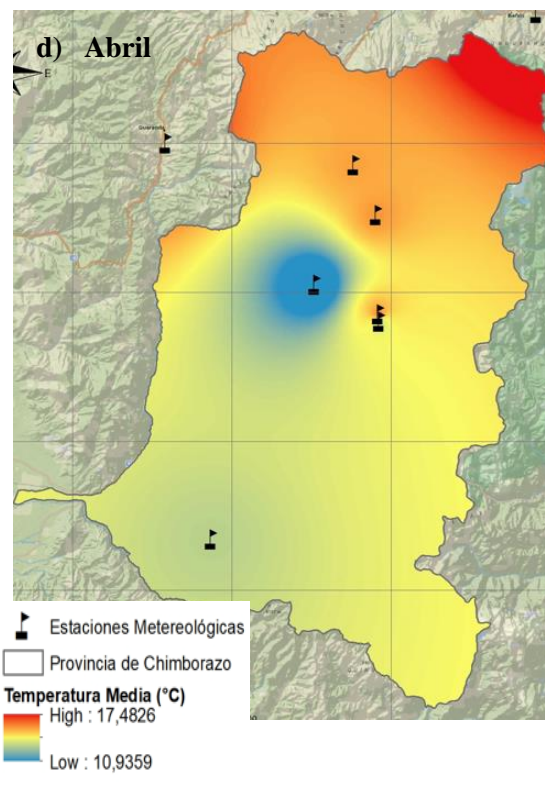
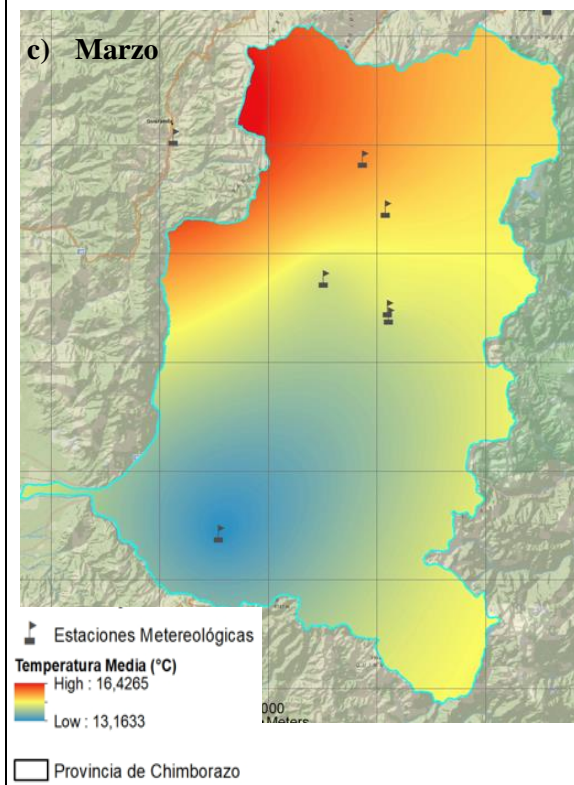
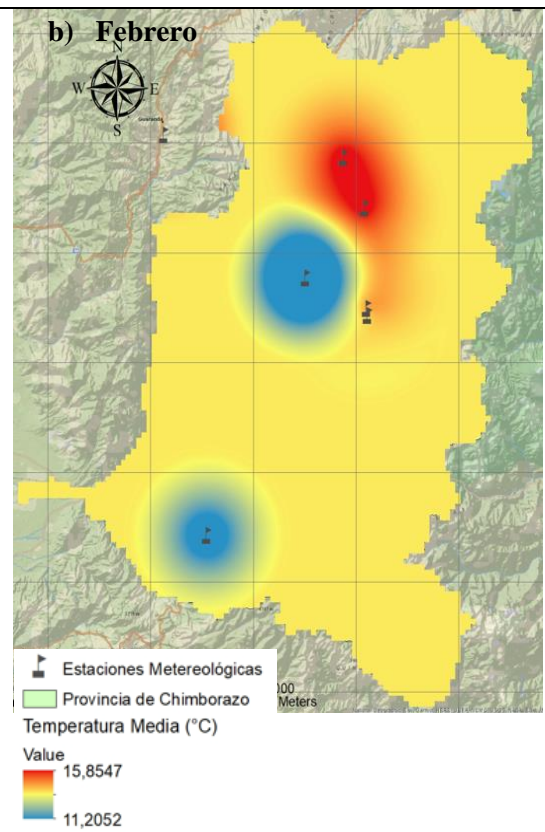
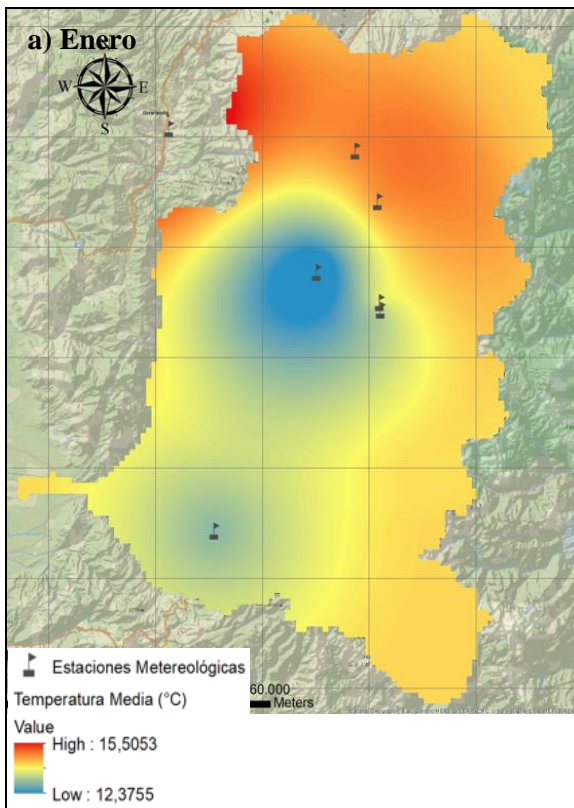
4.1.1. Temperatura

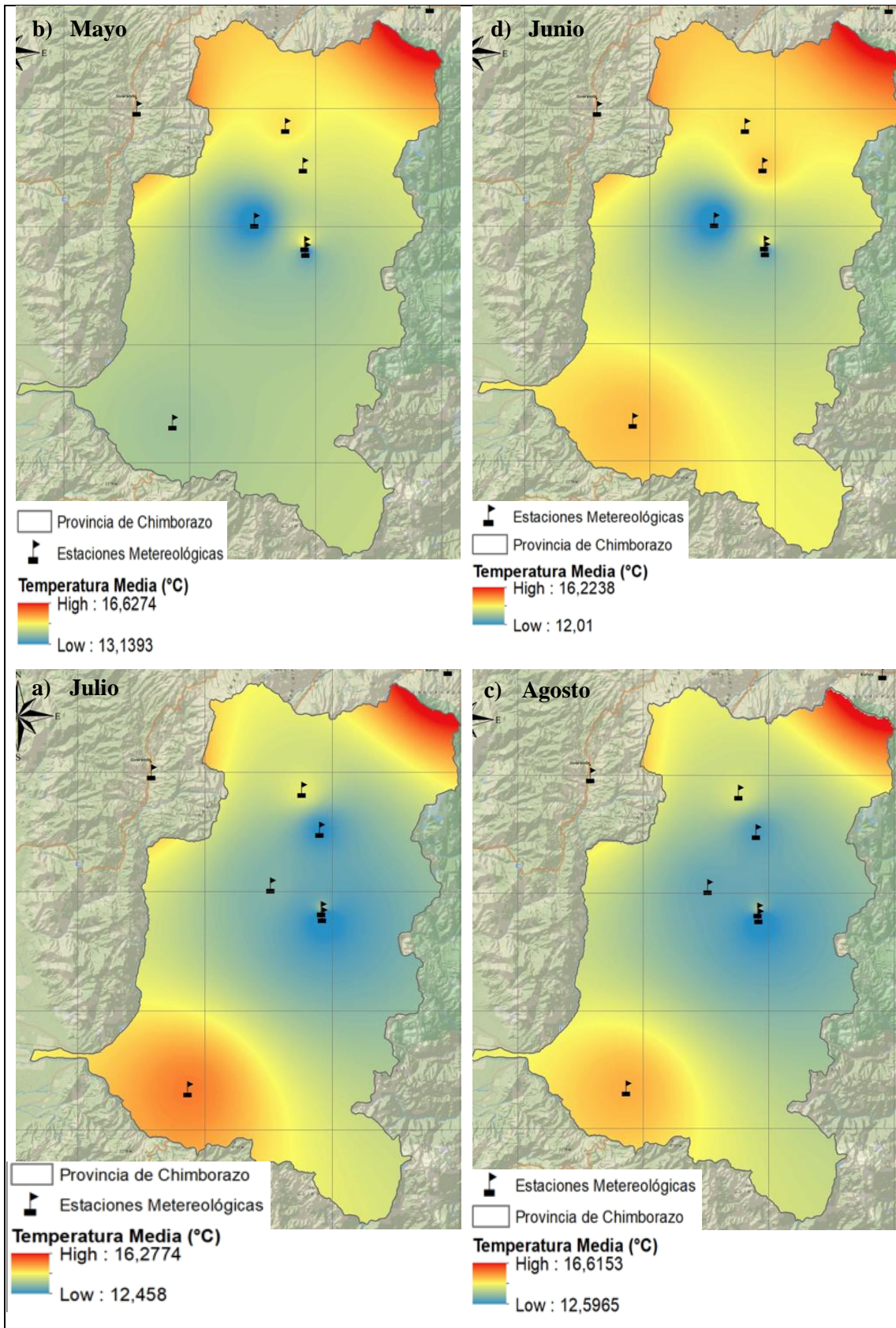
A partir de los datos descritos en la tabla 1-3 y tabla 2-3 , se elaboró el material cartográfico para toda la provincia de Chimborazo, los cuales se resumen en la figura 1-3 estos mostraron que para el mes de enero se representa de manera muy notoria que la parte norte de la provincia donde se encuentran los cantones de Guano y Penipe se registraron los valores más altos de temperatura, fluctuando entre los 14 y 15 °C ; a su vez Riobamba, Chambo, Guamote y Colta fueron los que denotan las temperaturas más bajas, siendo el cantón Colta el que sobresalió en este aspecto por registrar valores desde los 10°C. Los cantones al sur de Chimborazo como Alausí, Chunchi y Pallatanga mantuvieron una temperatura entre 12 y 13 °C al inicio del año.

En el mes de febrero las tendencias del mes anterior cambiaron, dado que las mayor temperatura se situó en los límites del Cantón Riobamba con Penipe y Guano, con valores tope de 15 °C, así también las estaciones ubicadas en el cantón Colta y Chunchi mostraron ser las zonas más frías para este período, siendo este valor cercano a los 11°C, en el resto de los territorios de la provincia la temperatura se mantuvo en la parte central del intervalo generado, siendo este valor aproximadamente 12,5 °C. En los meses de marzo a agosto, se notó claramente una similitud en la representación cromática de los mapas temáticos, indicando que los extremos norte y sur de la provincia exhibieron los registros de temperatura más alto acorde al rango generado, siendo esta fluctuante entre los 15 y 16 °C y disminuyendo estos valores a medida que se acercan al centro del área de estudio, mostrando una clara zona de transición en su trayecto. Los valores más fríos se mantuvieron registrando en el cantón Colta y zonas aledañas. En los meses finales del año, la temperatura en gran proporción de la provincia descendió, puestos que las zonas de bajas temperaturas cubrieron aproximadamente el 80% de la provincia, siendo el valor obtenido de 12,7°C.

Estas temperaturas generadas a lo largo del año se contrastaron con lo determinado por los cantones de la provincia, así por ejemplo, el (Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Guano, 2019,

p. 6) a través de su Plan de Ordenamiento Territorial (PDOT), sostuvo que la temperatura media en el año 2015 se mantuvo entre los 13 y 14 °C, pudiendo llegar a temperaturas máximas cercanas a los 20 °C. Por su parte, el cantón Penipe (G.A.D. Penipe 2019, pp. 9-25) en su PDOT destacó que su temperatura promedio fue de 13,5°C, denotando también valores máximos y mínimos de 20 °C y 10 °C, respectivamente. Completando este análisis, se consideró los valores de temperatura descritos por el Gobierno Provincial de Chimborazo (GADPCH, 2020, p. 45), donde se señala que la temperatura más baja la mantienen los cantones Colta y Guamate, especialmente en meses de invierno.





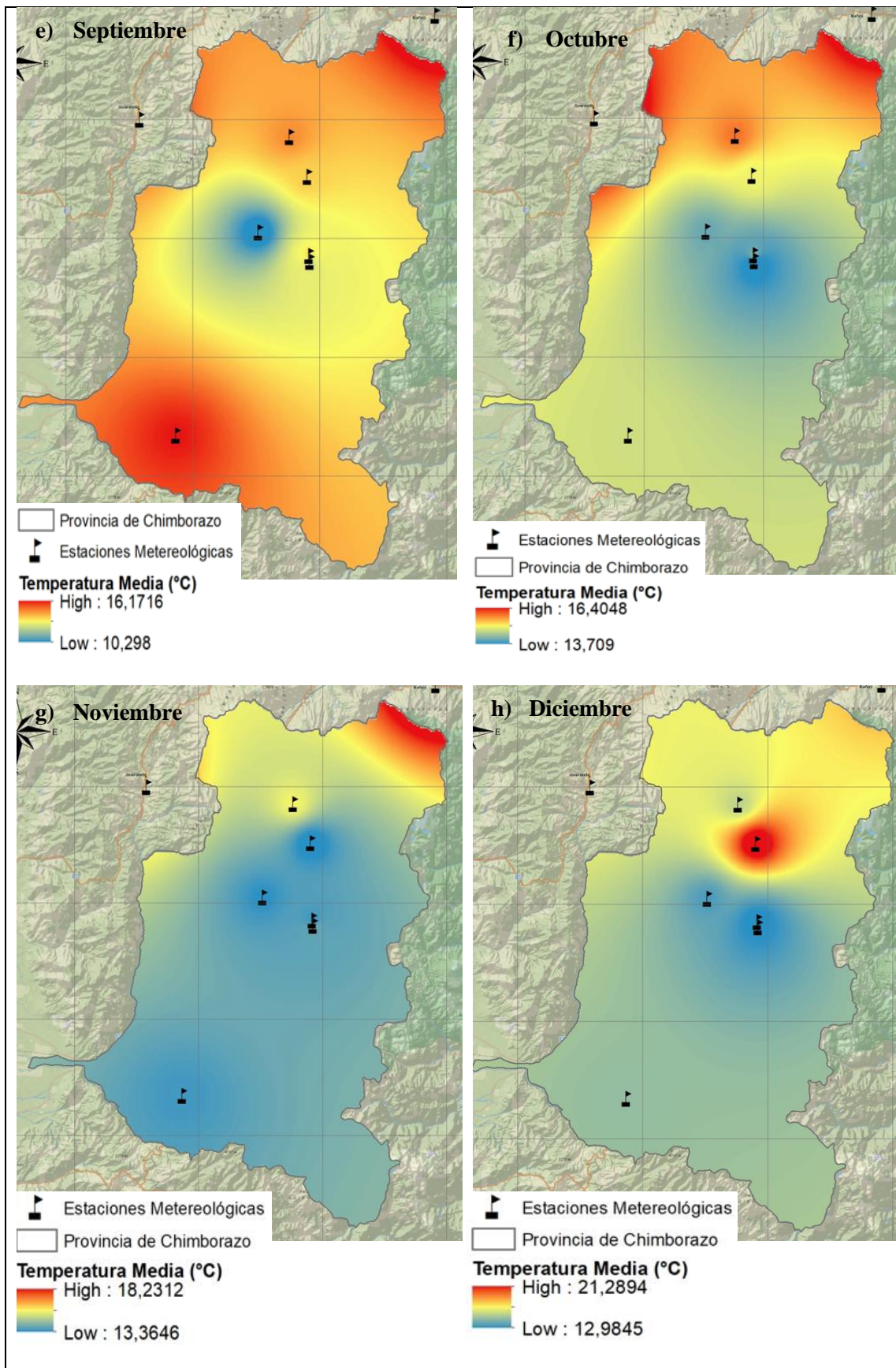


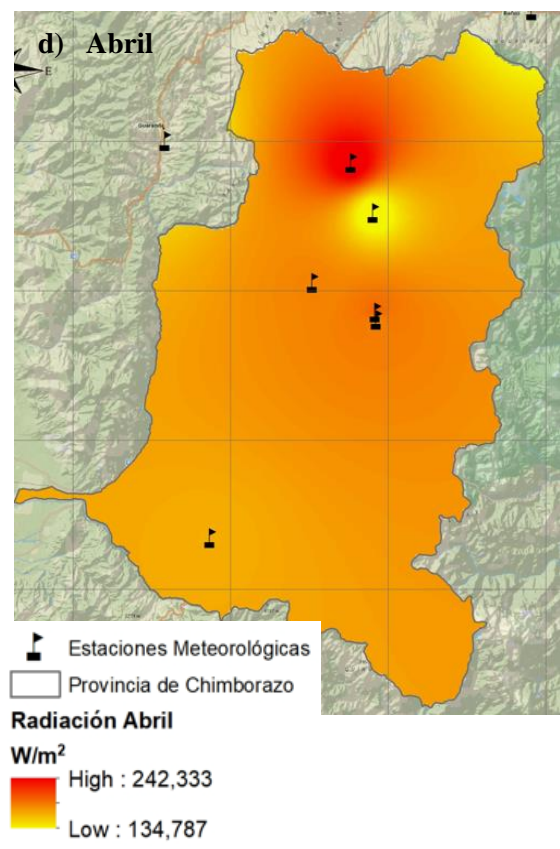
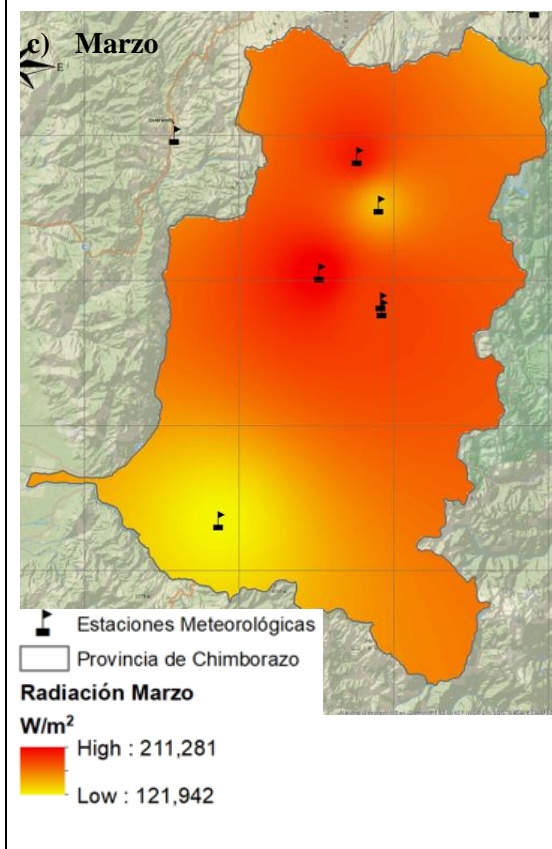
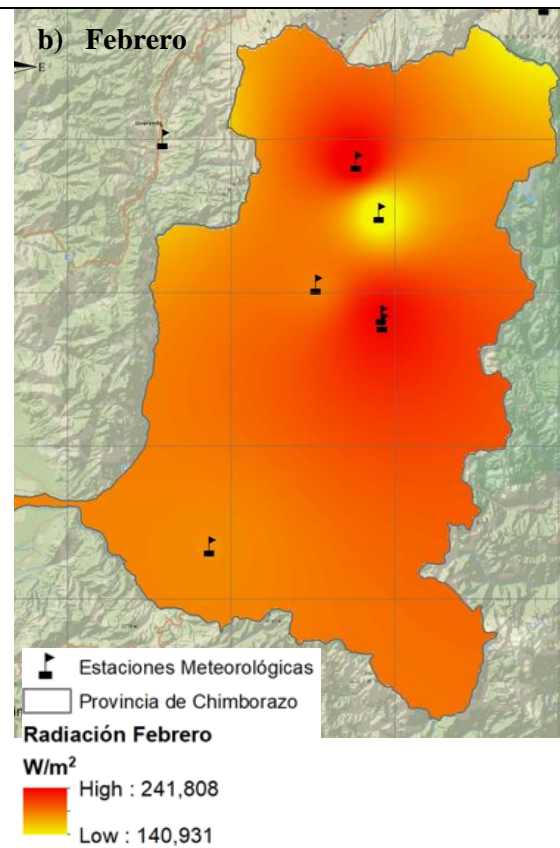
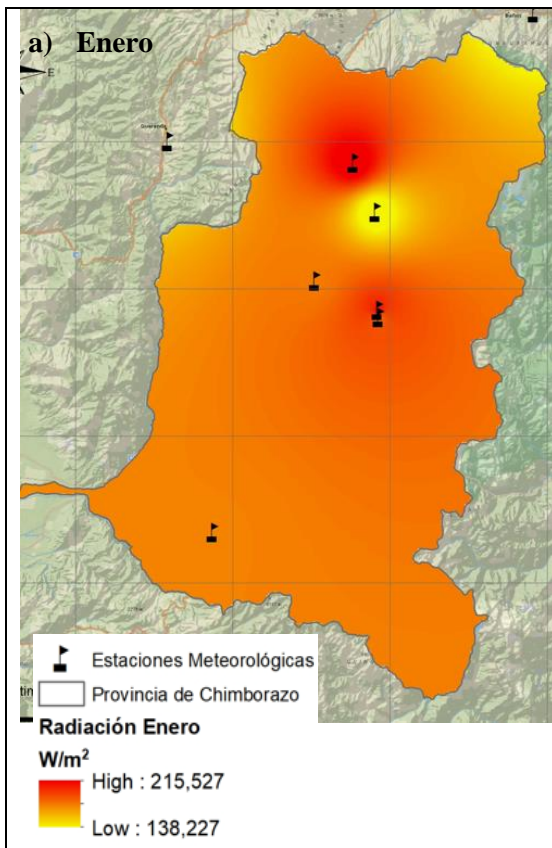
Figura 1-4: Mapas de temperatura de cada mes del año 2015^a partir de datos del INAMHI

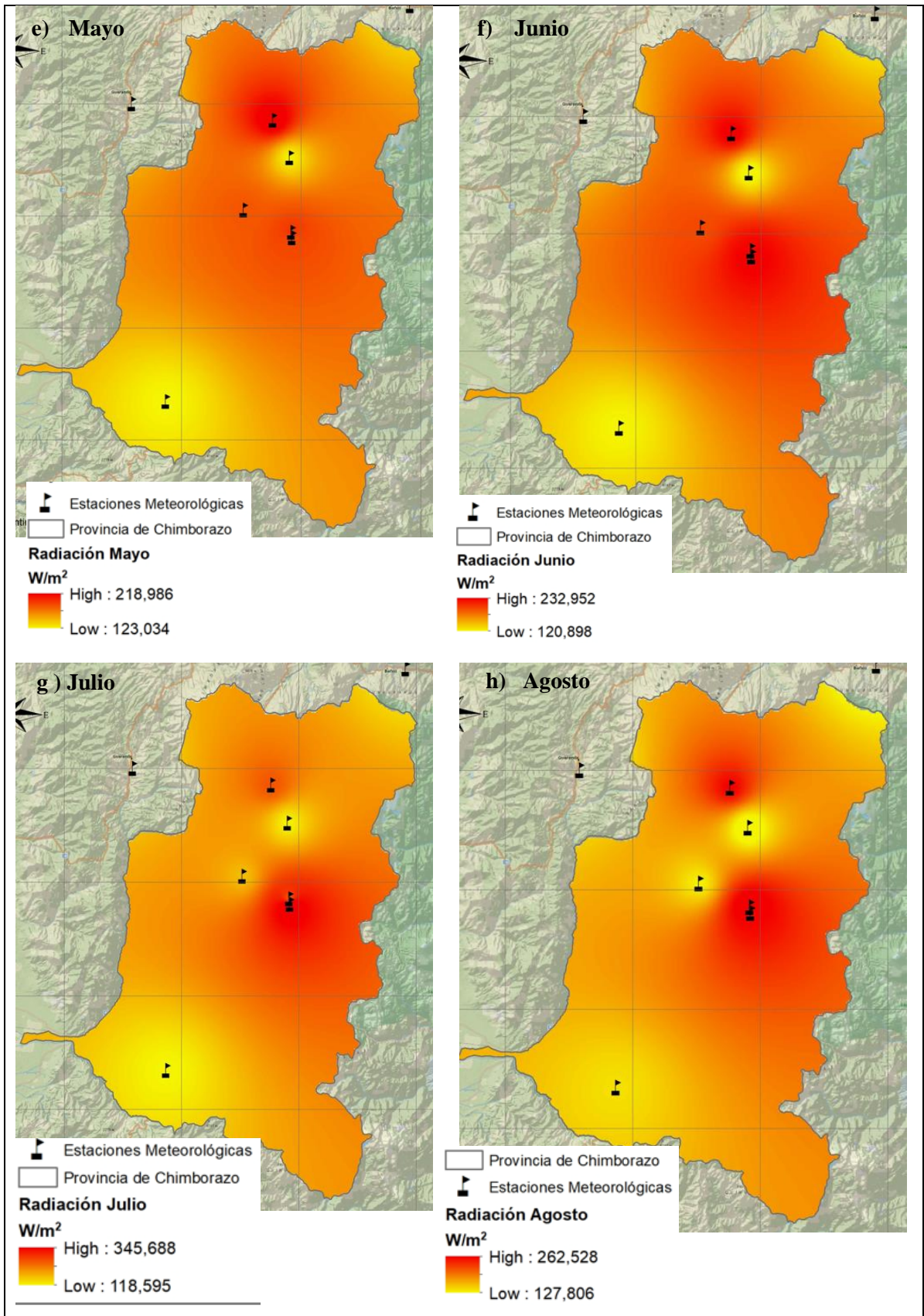
Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

4.1.2. Radiación

Los datos de radiación obtenidos de las estaciones hidro-meteorológicas sirvieron como información base para la generación de mapas temáticos como los que se muestran en la figura 2-3, donde se representó la cantidad de radiación registrada en cada uno de los meses del 2015 en toda la superficie de la Provincia de Chimborazo. A manera de descripción general, se puede apreciar que en el mes de enero esta variable meteorológica osciló entre 138 y 215 W/m², siendo notorio s los elevados niveles de radiación en el cantón guano, puesto que le color denota mayor intensidad en dicha zona, en la gran mayoría de territorio de Chimborazo la radiación se mantuvo en valores cercanos a los 180 W/m². El mes de febrero denotó un similar comportamiento persistiendo los mayores niveles de radiación en los cantones de Guano y Chambo con un valor máximo de 241,8 W/m². En abril, se apreció una disminución de esta variable, puesto que los niveles cromáticos en su representación se atenuaron a comparación con los meses anteriores, los valores registrados estuvieron en un rango entre 242,3 y 134,8 W/m². En los meses restantes el comportamiento radiactivo fue similar, manteniéndose altos niveles en la parte norte y centro de la provincia, mientras que los valores más bajos se manifestaron en Riobamba y la parte sur de la provincia donde se sitúan cantones como Chunchi, Alausí y Cumandá, con valores ligeramente superiores a los 131 W/m².

Esta información fue comparada con datos relevantes levantados a escala nacional por el Consejo de Electricidad (CONELEC, 2009. p. 12) puesto que en su informe, recopilaron alrededor de 20 años de evolución de los niveles radiactivos del territorio nacional, tenido una clara tendencia en sus resultados, los cuales señalaron que la radiación solar en el área de estudio tuvo un comportamiento ascendente a los largo del tiempo, siendo el incremento en los meses de junio a septiembre el más importante generado, posterior a estos mese los niveles radiactivos decayeron hasta finalizar el año, siendo este fenómeno bastante similar a lo determinado en el presente estudio.





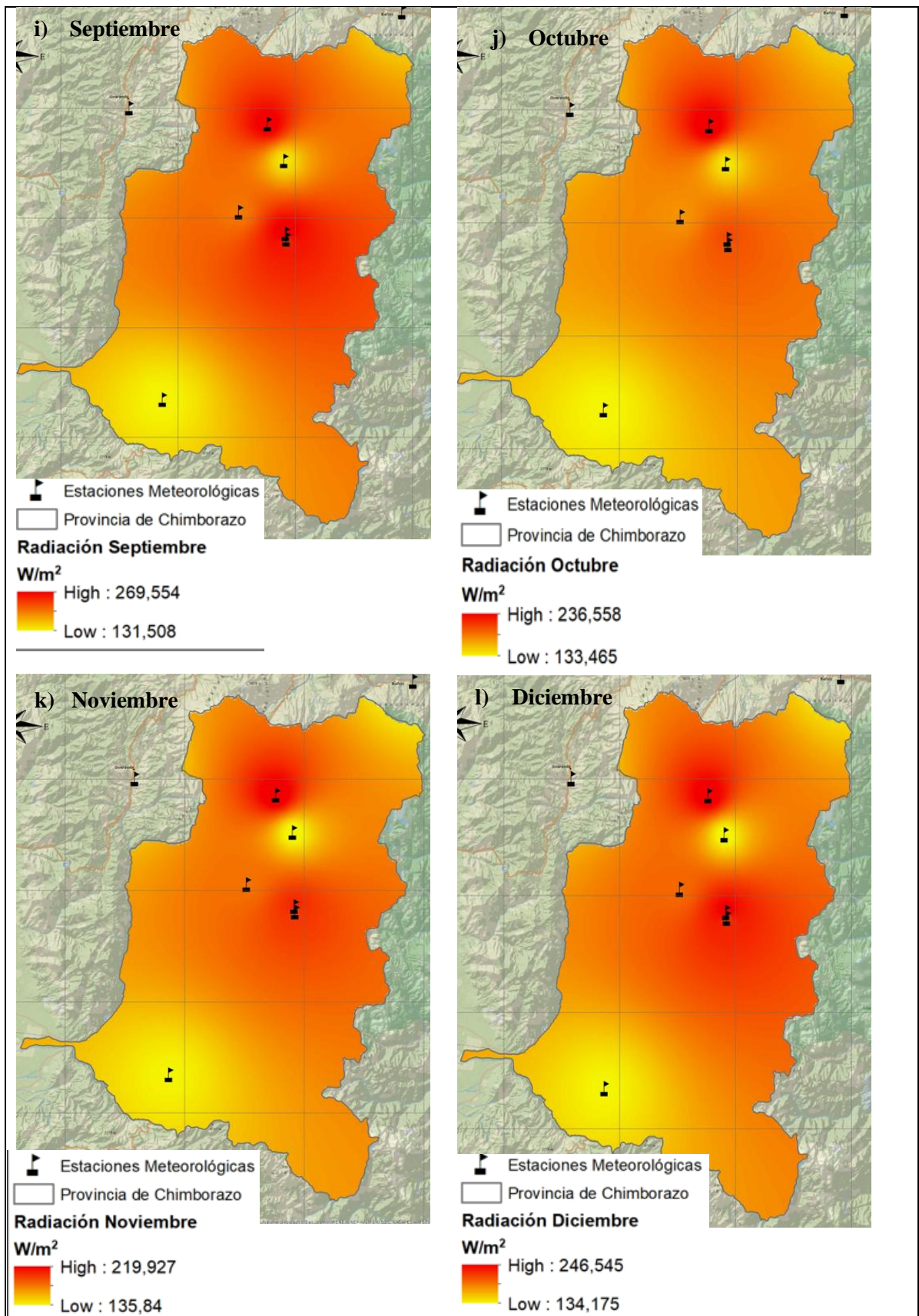


Figura 2-4: Mapas de radiación de cada mes del año 2015^a partir de datos del INAMHI

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

4.2. Modelo WRF

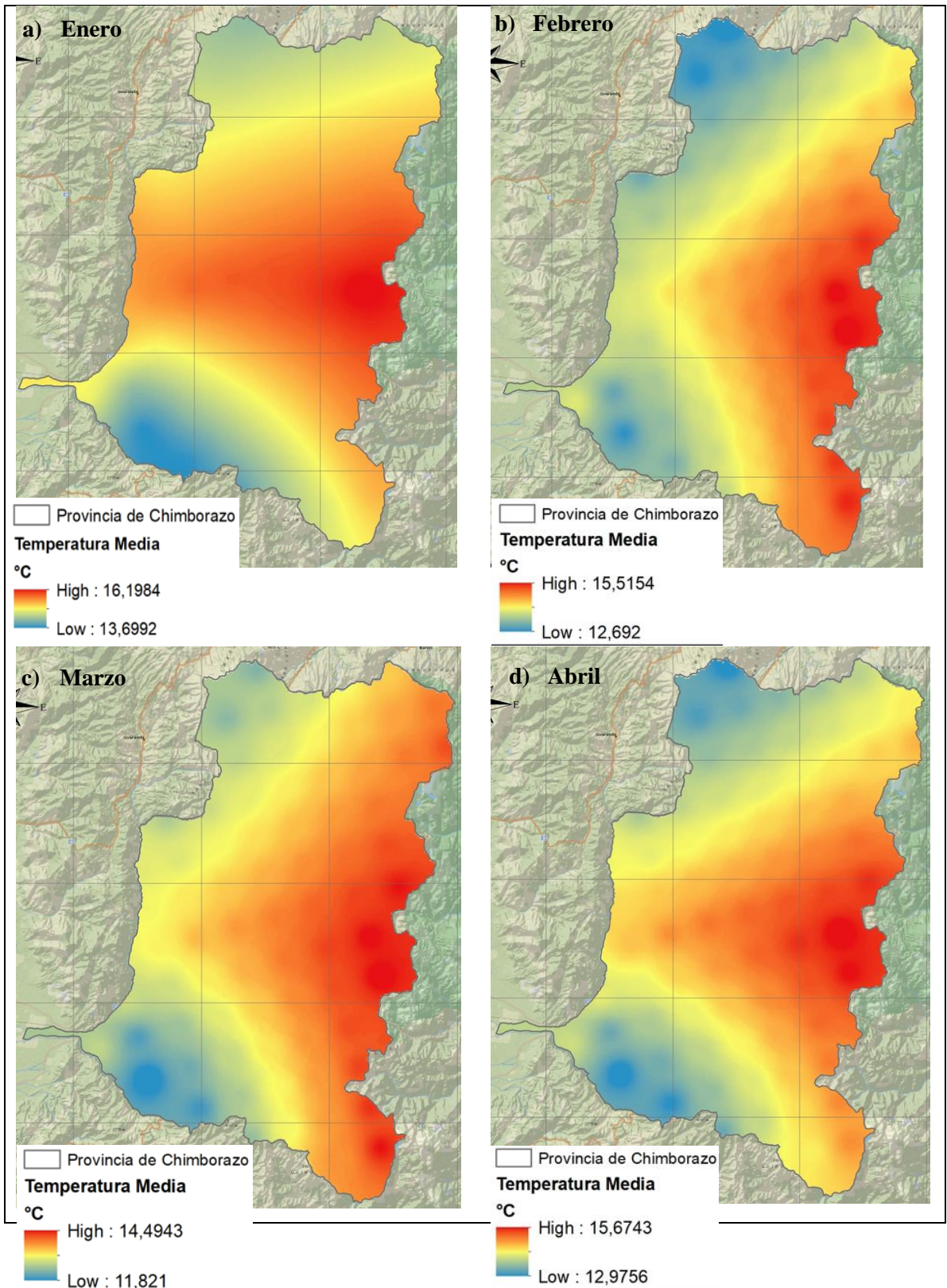
4.2.1. Temperatura

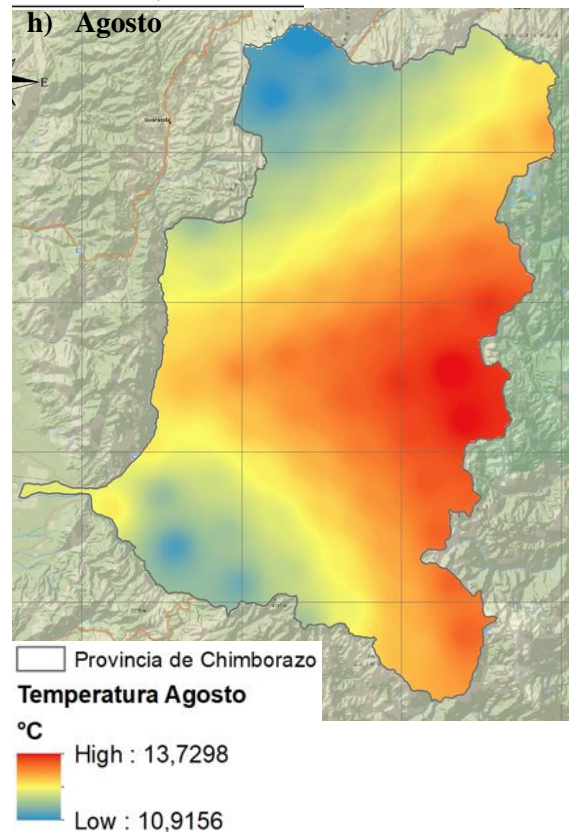
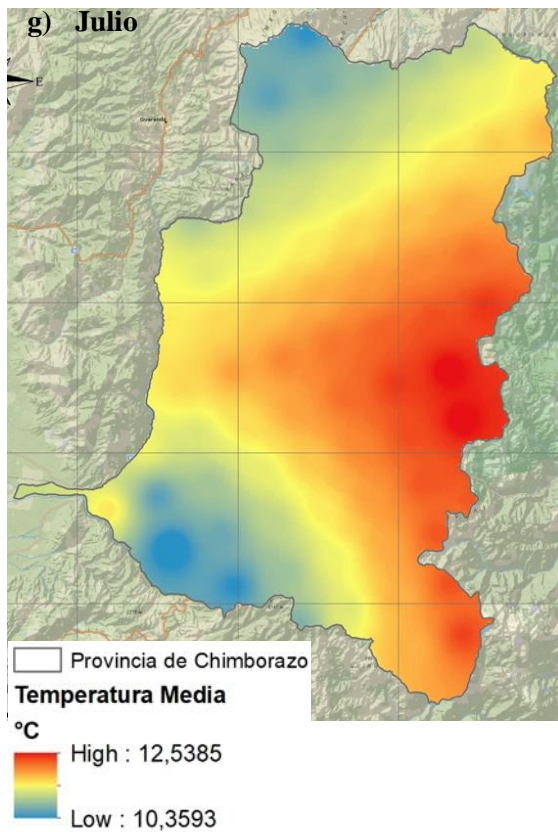
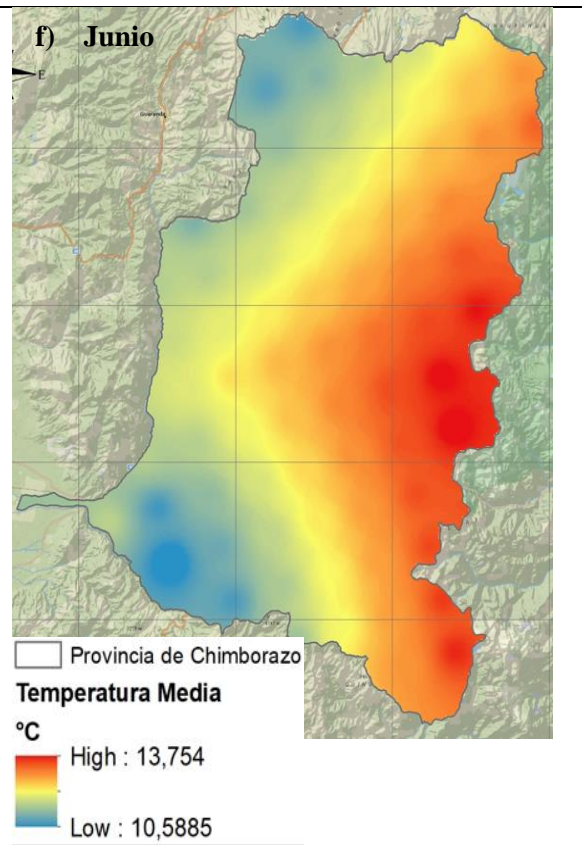
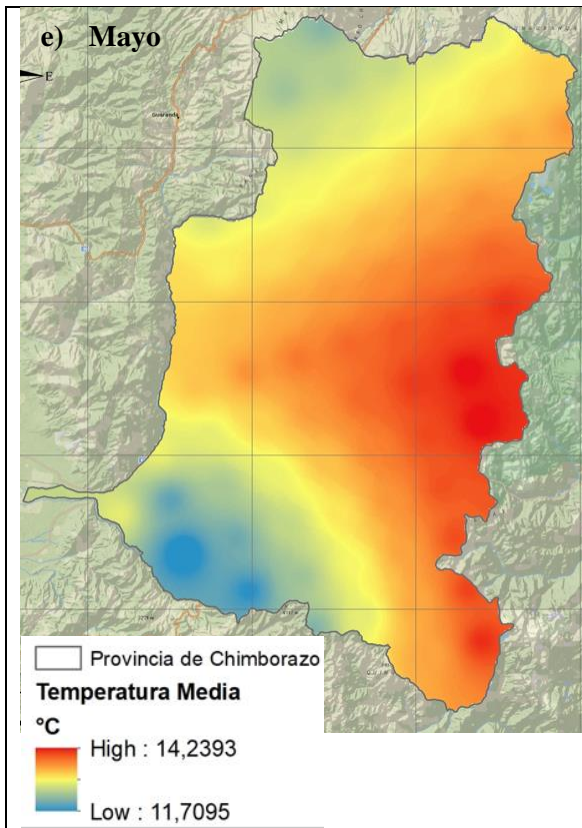
Los datos de temperatura obtenidos luego de la compilación y post procesamiento el modelo WRF fueron el punto de partida para la creación de mapas temáticos mensuales para el año 2015 como se muestran en la figura 3-3. en el mes de enero se observa una elevada temperatura al este de la provincia, disminuyendo su intensidad a medida que se acerca al extremo occidental de la provincia, el intervalo de temperatura se encuentra entre 16,2 y 13,7 °C, la zona más fría se destaca en la parte sur de la provincia, específicamente en el cantón Chunchi, el resto del territorio mantuvo una temperatura media en el rango antes descrito. En el mes de febrero ocurre un fenómeno similar, la zona oriental de la provincia denota una mayor temperatura acorde a la escala cromática representada en el mapa, pero se deferenencia una disminución en esta variable en la zona norte de Chimborazo, específicamente en el Cantón Guano, en este mes los valores mínimos registrados fueron de 12, 7°C aproximadamente.

En los meses siguientes, el comportamiento de esta variable ambiental mantuvo una similitud en su comportamiento, mostrando que los lugares más calurosos de la provincia se encuentran en el extremo oriental, disminuyendo a medida que atraviesa al extremo occidental, los cantones como Penipe, Chambo y parte de Guamote son los que se encuentran en esa área. A su vez, Guano y Chunchi mostraron la temperatura promedio mensual más baja, oscilando esta entre los 10,6 y 12,5°C.

En comparación con los mapas temáticos obtenidos a partir de la Red de Estaciones Meteorológicas, los cantones del norte y sur de la provincia guardan relación al registrar los valores más bajos en sus respectivos intervalos de temperatura, sin embargo, la notoria capa más cálida ubicada al este de la provincia en los mapas obtenidos a partir de los datos de WRF, difieren con los anteriores puesto que en estos sitios la coloración indica zonas frías. Un aspecto para considerar es que los intervalos de temperatura entre las dos fuentes de información varían, puesto que acorde al INAMHI los datos se muestran entre 11 y 20°C, mientras que el modelo WRF considera rangos más reducidos, estando estos entre 10 y 16°C.

Los intervalos de temperatura descritos al pasar los meses en la provincia de Chimborazo fueron comprados con la base de datos del (GADPCH, 2020, p. 8) al igual que los datos de temperatura obtenidos por las estaciones del INAMHI, mostrando similitud en las temperaturas medias, máximas y mínimas generadas, no obstante, existió una diferencia notoria en Cumandá, puesto que el modelo WRF muestra valores muy por debajo de los descrito por el GADPCH, puesto que esta última institución muestra que la temperatura media en dicho cantón es cercana a los 20 °C.





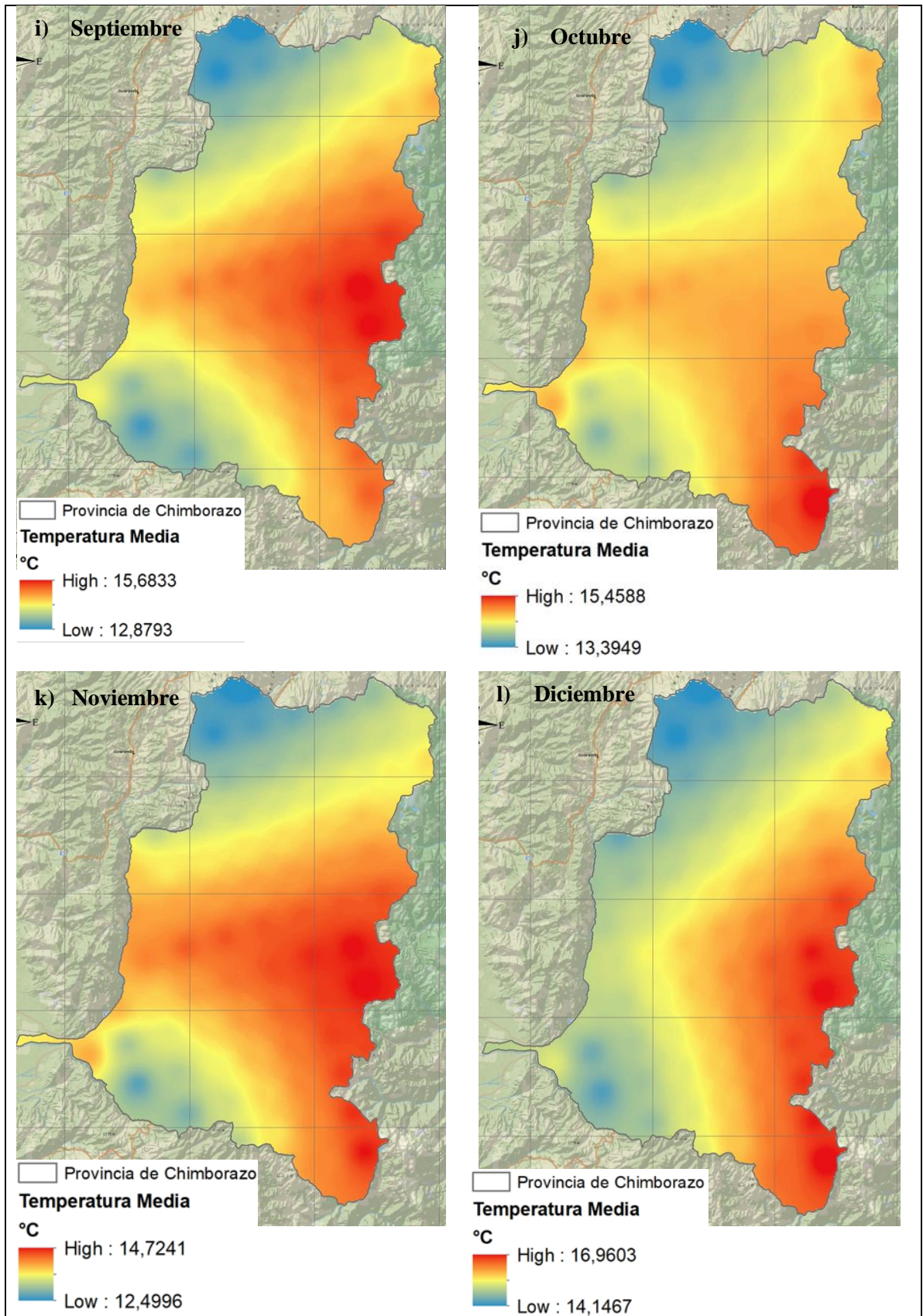


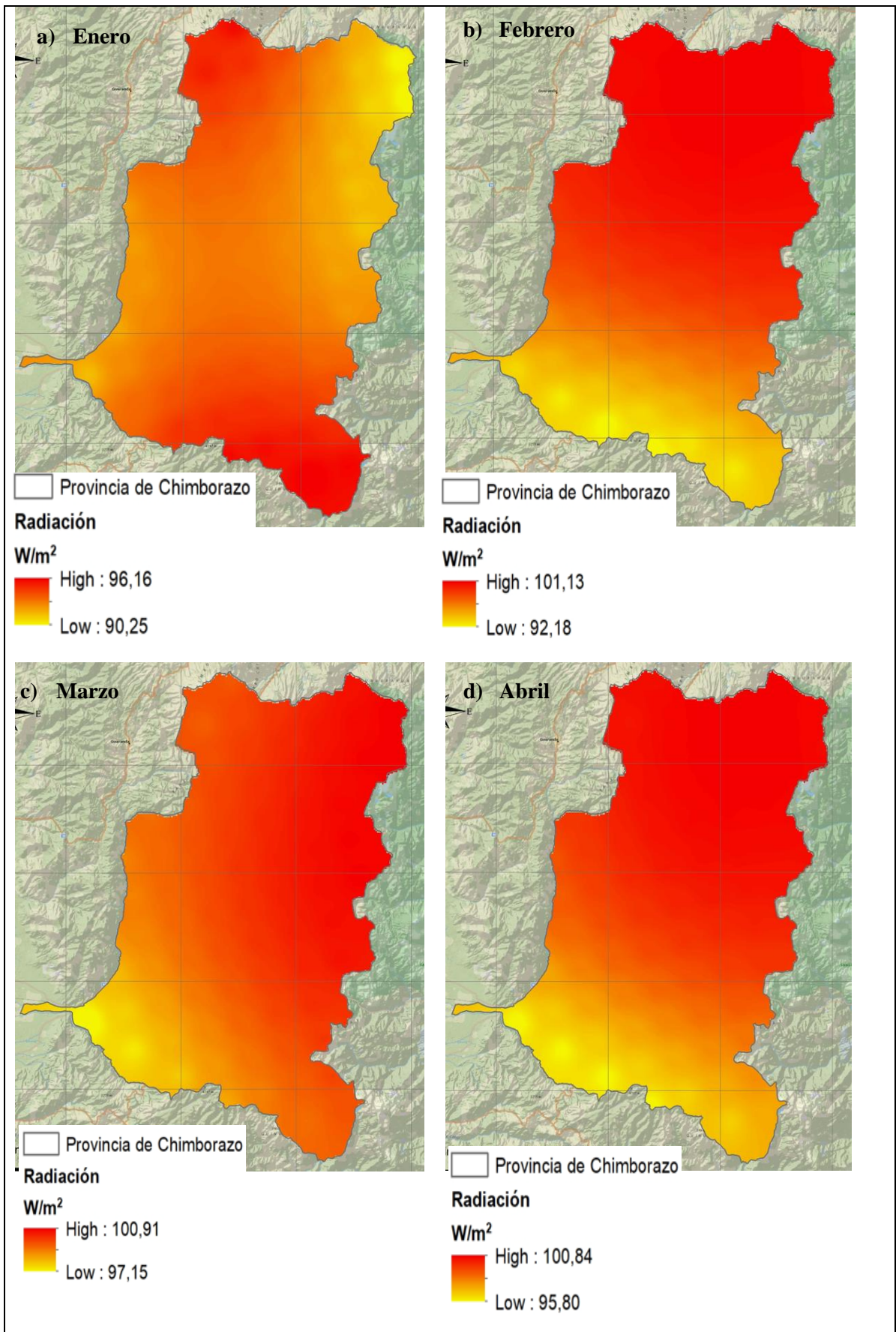
Figura 3-4: Mapas de temperatura de cada mes del año 2015 partir de datos del WRF

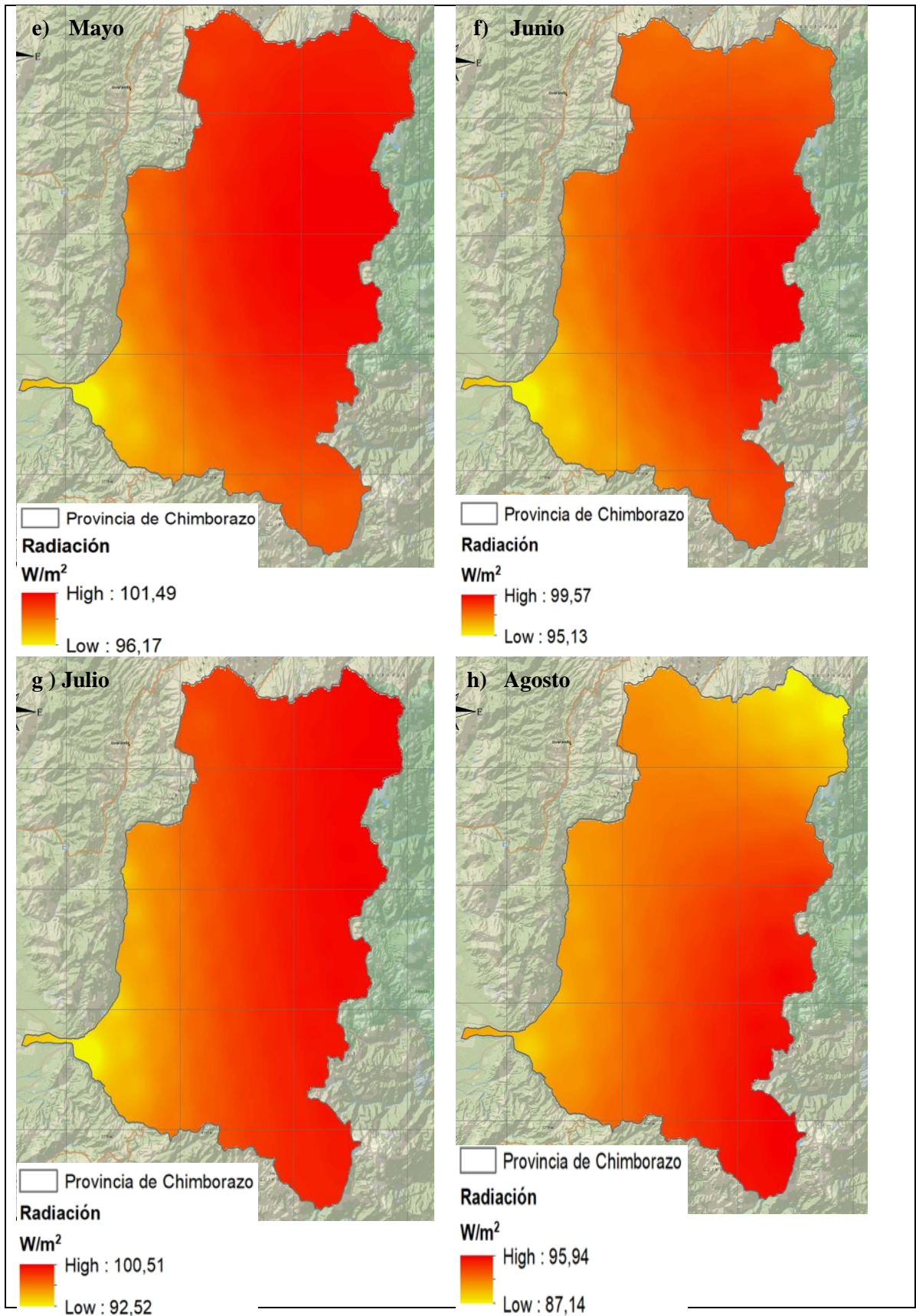
Realizado por: Camino, Teresa. 2021

4.2.2. Radiación

En cuanto a la radiación, los datos obtenidos a través del modelo WRF manifiestan una escala de colores más uniforme en todo el territorio de la provincia, tal como se aprecia en la figura 4-3. En el mes de enero la zona que más expuesta a la radiación solar fue la parte norte del cantón Guano, así como el extremo sur de la provincia en el cantón Chunchi, con valores de hasta $96,16 \text{ W/m}^2$, cantones como Cumandá ubicados en la parte sur occidental de la provincia se mantienen con una radiación media, de aproximadamente 93 W/m^2 , este valor semejante se extiende por todo el centro del área de interés, sin embargo en el extremo nororiental los valores disminuyen, siendo cercanos a $90,25 \text{ W/m}^2$. En los meses siguientes se aprecia que la mayor radiación solar se concentró en la parte norte de la provincia, en contraste con la zona inferiores del área de estudio, específicamente de los cantones Chunchi y Alausí, en donde los datos registrados fueron los más bajos; los intervalos fueron variados entre los 90 y 102 W/m^2 . En los meses de mayo a junio, se observa un leve cambio a comparación con los meses pasados, puesto que para este período temporal los menores niveles de radiación se divisaron en la zona sur occidental de la provincia, cerca del cantón Cumandá, existiendo un incremento en la zona sur oriental, los demás cantones y zonas de la provincia mantuvieron la tendencia descrita en los meses pasados.

No obstante, la representación cartográfica obtenida a partir de las estaciones del INAMHI denotan clara divergencia con los representados del modelo WRF, puesto que las zonas de alta y baja radiación son puntuales, muy cercanas a las estaciones de Chunchi, Riobamba (ESPOCH) y Colta (Shiry XXI). Así también, los rangos de radiación representados difieren ampliamente, dado que oscilan entre 130 y 240 W/m^2 para el caso de las estaciones y entre 90 y 101 W/m^2 para los mapas elaborados a partir del modelo WRF.





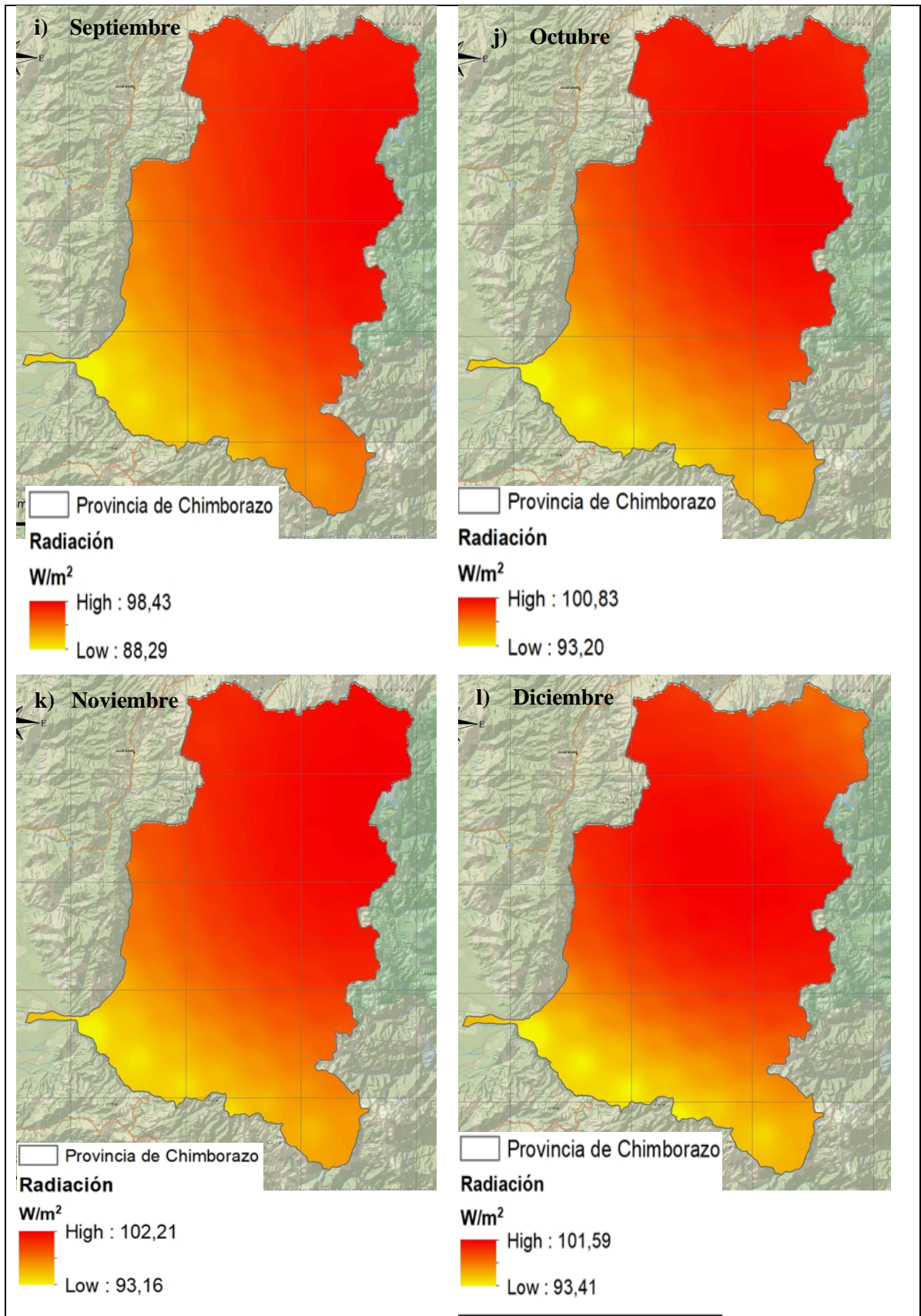


Figura 4-4: Mapas de radiación de cada mes del año 2015 partir de datos del modelo WRF

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

4.3. Comparativa entre estaciones meteorológicas y el modelo WRF

Se realizó una comparativa de la media mensual de los datos de temperatura obtenidos en las estaciones y la información recabada a partir de la compilación de WRF como se muestra en la figura 5-3, en dicha gráfica se puede observar que en los primeros meses del año se tiene una similitud en las medias de las dos fuentes de información, fluctuando entre los 13 y 15 °C, es de notoriedad una caída en la representación de los datos de WRF entre los meses de abril a septiembre, teniendo un valor mínimo en julio de aproximadamente 11,5 °C, es aquí en donde gráficamente se aprecia la separación entre las dos curvas analizadas, puesto que a partir del mes de agosto hasta diciembre nuevamente estas adquieren comportamientos similares, experimentando ambas caídas y ascenso de igual proporción y escala temporal.

De acuerdo con (Saavedra 2016, p. 46) menciona que los valores del modelo en relación a temperatura puede mantenerse de manera muy cercana a los datos observados o recabados en campo, sin embargo es posible que el modelo WRF puede producir subestimaciones o sobreestimaciones con respecto al valor observado, debido a que no se consideran factores de corrección en el cálculo del modelo. Esto concuerda con lo señalado por (Ñavincopa 2018, p.78) quien también atribuye las subestimaciones de temperatura por parte de WRF por no considerar variables externas en su modelamiento.

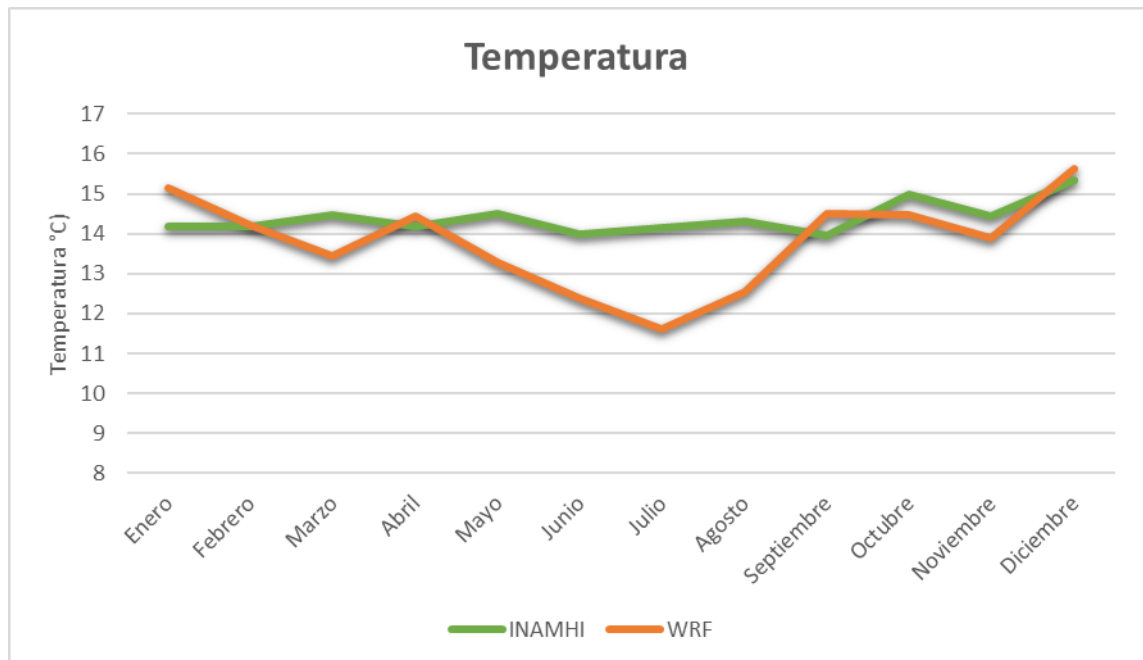


Gráfico 1-4: Temperatura

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

En la figura 6-3 en cambio se representa las curvas referentes a las medias mensuales de radiación de ambas fuentes de información (Estaciones INAMHI y WRF), en esta se puede apreciar una

amplia diferencia entre los dos segmentos, puesto que existe aproximadamente una separación de 50 W/m^2 , es relevante mencionar también que la curva relacionada a los datos WRF mantiene un trazado constante, con mínimas o casi nulas fluctuaciones entre meses mintiéndose uniforme en valores cercanos a 100 W/m^2 , sin embargo el trazado del segmento de las información generada a partir de las estaciones muestra varios ascensos y descensos al pasar de los meses, siendo el pico más alto en el mes de febrero con $196,5 \text{ W/m}^2$, para luego mostrar una disminución en el mes de mayo, a partir del cual, experimentó un constante asenso hasta el mes de diciembre rondando en valores desde 161 W/m^2 hasta 189 W/m^2 aproximadamente, con un claro descenso en las medidas entre los meses de septiembre y octubre. Estos resultados fueron contrastados con los estudiados por (Zhao, 2010, p. 16) quien manifestó que a pesar de asociar varios componentes de la radiación solar para su modelación, tales como radiaciones de onda corta y larga de flujo ascendente y descendente, se pueden incurrir en subestimaciones o sobre estimaciones puesto que aún deben ser consideradas más variables ambientales como topografía, condiciones de nubosidad y altitud de terreno; algo con lo que también concuerda (Saavedra 2016, p.70-80).

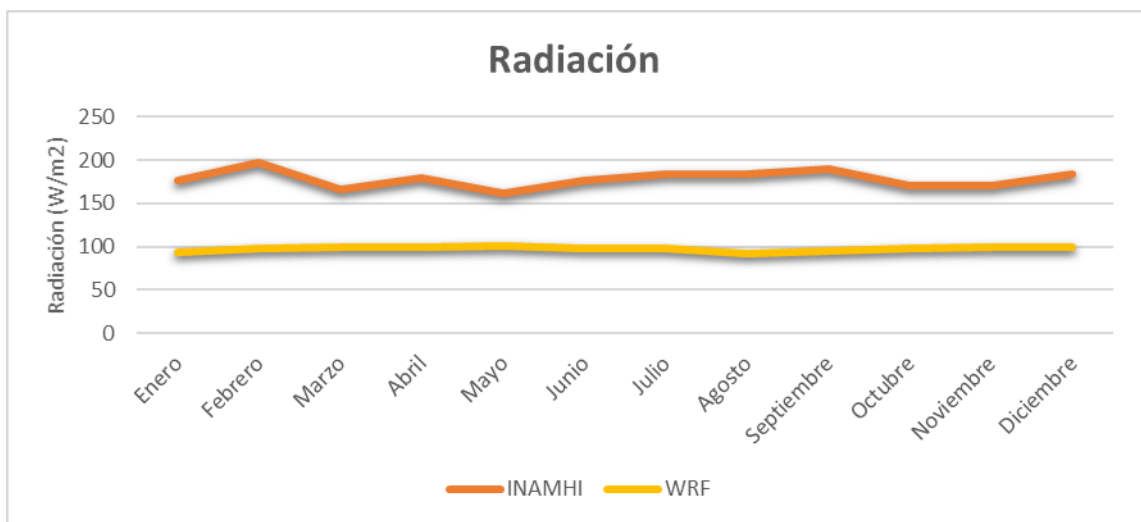


Gráfico 2-4: Radiación

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

4.3.1. Comparaciones anuales

Fue necesaria realizar una comparación entre la temperatura y radiación solar anuales de cada una de las fuentes planteadas, como se muestra en figura 7-3, en donde se aprecia diferencia en la cromática de cada una de las variables observadas, resaltando las variaciones antes descritas. En el caso de temperatura, acorde al INAMHI la temperatura mayor se encuentra en el norte de la provincia, mientras que en WRF al oriente, con intervalos muy similares. En cuanto a radiación,

los intervalos son diferentes, variando de $229 \text{ W/m}^2 - 133 \text{ W/m}^2$ (INAMHI) a $99 \text{ W/m}^2 - 93 \text{ W/m}^2$ (WRF), teniendo como puntos en común una menor radiación al sur de Chimborazo.

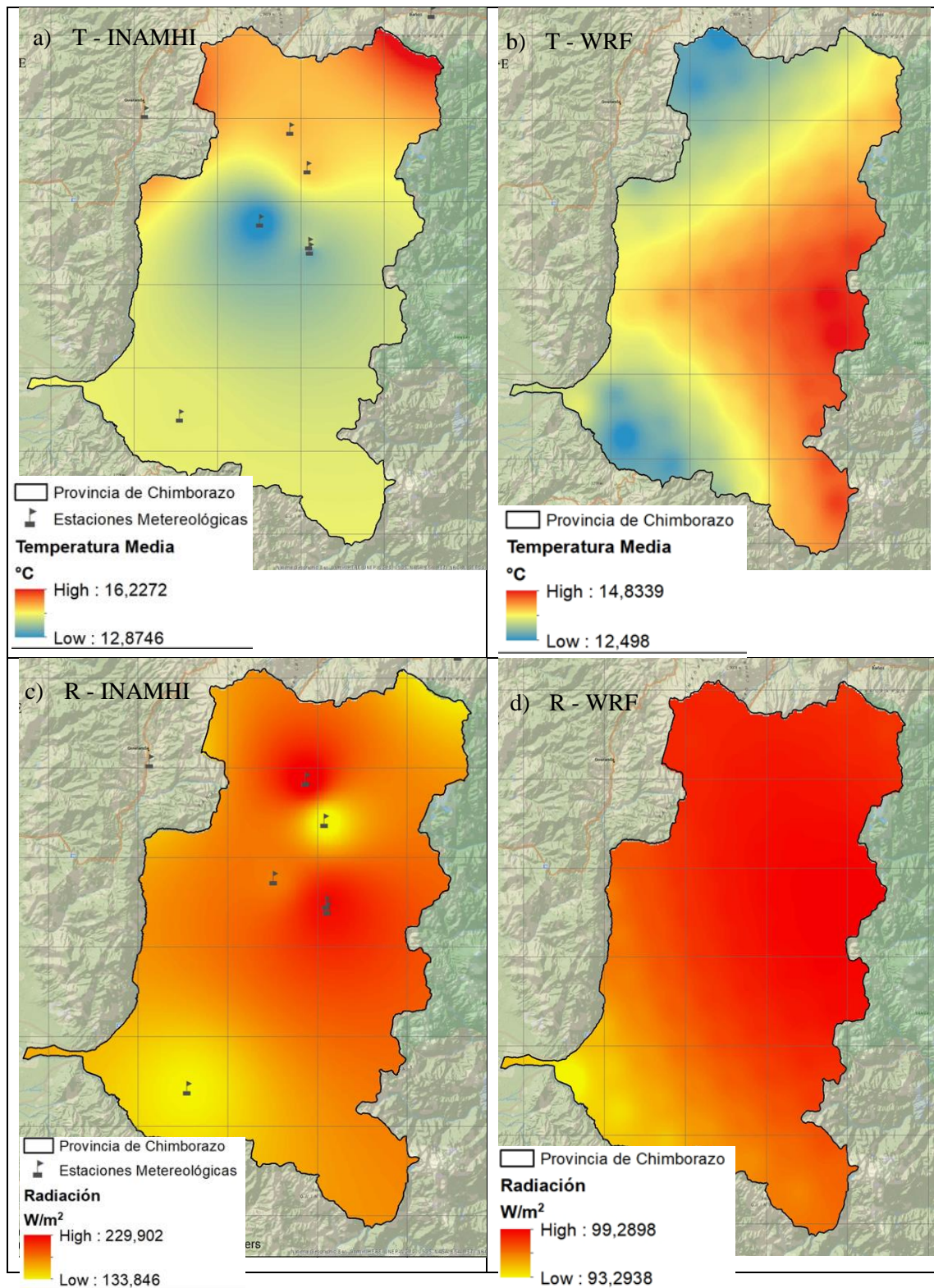


Figura 5-4: Mapas de temperatura y radiación de anual partir de datos de INAMHI y modelo WRF

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

4.4. Análisis estadísticos

4.4.1. Temperatura

Con la finalidad de establecer si los datos de temperatura y radiación obtenidos de dos tipos diferentes de fuentes son semejantes unos con otros, se realizaron varias pruebas estadísticas, entre ellas se partió con la prueba de Kolmogorov – Smirnov para verificar la normalidad de los datos, esta prueba se representa en la tabla 3-3, en la cual se compararon los datos de temperatura obtenidos de las estaciones hidro – meteorológicas y WRF de cada uno de los meses, mostrando en ella la población total evaluada que hace referencia a la cantidad de celdas en la malla descrita en metodología. Bajo dichos criterios y con la suficiente evidencia estadística se puede afirmar con un 95% de confianza que los datos obtenidos de WRF para los meses de enero, abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre no sigue una distribución normal de datos, puesto que el estadístico de prueba en estos casos es inferior al p-valor de 0,05. En los demás meses y fuentes de información se puede aseverar que los datos cumplen con una distribución normal.

Tabla 3-4: Prueba de normalidad de temperatura

Mes	Fuente	N	Parámetro Normales		Máximas diferencias extremas			E. de Prueba	Sig. Asintótica
			Media	Des. Estándar	Absoluto	Positivo	Negativo		
enero	INAMH I	6806	14,172	0,508	0,068	0,038	-0,068	0,068	,000c
	WRF	6806	15,135	0,556	0,035	0,03	-0,035	0,035	,000c
Febrero	INAMH I	6806	14,172	0,508	0,068	0,038	-0,068	0,068	,000c
	WRF	6806	14,200	0,641	0,056	0,049	-0,056	0,056	,000c
Marzo	INAMH I	6806	14,478	0,935	0,093	0,057	-0,093	0,093	,000c
	WRF	6806	13,453	0,566	0,061	0,039	-0,061	0,061	,000c
Abril	INAMH I	6806	14,168	0,791	0,12	0,12	-0,115	0,12	,000c
	WRF	6806	14,427	0,583	0,027	0,027	-0,025	0,027	,000c
Mayo	INAMH I	6806	14,496	0,470	0,196	0,196	-0,126	0,196	,000c
	WRF	6806	13,279	0,506	0,036	0,032	-0,036	0,036	,000c
Junio	INAMH I	6806	13,977	0,571	0,064	0,064	-0,026	0,064	,000c
	WRF	6806	12,369	0,708	0,062	0,047	-0,062	0,062	,000c

Julio	INAMH								
	I	6806	14,159	0,587	0,05	0,05	-0,038	0,05	,000c
Agosto	WRF	6806	11,611	0,460	0,032	0,026	-0,032	0,032	,000c
	INAMH								
Agosto	I	6806	14,320	0,554	0,047	0,047	-0,047	0,047	,000c
	WRF	6806	12,551	0,589	0,033	0,028	-0,033	0,033	,000c
Septiembre	INAMH								
	I	6806	13,954	0,917	0,049	0,036	-0,049	0,049	,000c
Octubre	WRF	6806	14,504	0,593	0,036	0,028	-0,036	0,036	,000c
	INAMH								
Octubre	I	6806	14,973	0,446	0,173	0,173	-0,06	0,173	,000c
	WRF	6806	14,484	0,354	0,074	0,043	-0,074	0,074	,000c
Noviembre	INAMH								
	I	6806	14,445	0,735	0,238	0,238	-0,152	0,238	,000c
Diciembre	WRF	6806	13,879	0,489	0,074	0,046	-0,074	0,074	,000c
	INAMH								
Diciembre	I	6806	15,349	1,129	0,208	0,208	-0,072	0,208	,000c
	WRF	6806	15,623	0,642	0,06	0,059	-0,06	0,06	,000c

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Una vez analizada la normalidad de los datos se procedió a realizar una determinación de la media, desviación estándar y desviación del error promedio como parámetros estadísticos preliminares para las demás pruebas planteadas, como se representa en la tabla 4-3. La cual demuestra que los valores de desviación entre las fuentes de datos están por debajo de 1, a excepción de los datos de diciembre que muestran valores de 1,12, además es observable que las medias entre INAMHI y WRF se mantienen muy cercanas entre sí, a excepción del mes de julio donde se aprecia la diferencia entre medias de aproximadamente 2,5 °C.

Tabla 4-4: Valores estadísticos de los datos de temperatura

Estadísticas de grupo					
Mes	Fuente	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
ENERO	INAMHI	6806	14,1716	0,50828	0,00616
	WRF	6806	15,1354	0,55552	0,00673
FEBRERO	INAMHI	6806	14,1716	0,50828	0,00616
	WRF	6806	14,2004	0,64113	0,00777
MARZO	INAMHI	6806	14,4782	0,93521	0,01134
	WRF	6806	13,4526	0,56600	0,00686
ABRIL	INAMHI	6806	14,1678	0,79148	0,00959
	WRF	6806	14,4265	0,58335	0,00707
MAYO	INAMHI	6806	14,4960	0,47000	0,00570
	WRF	6806	13,2792	0,50589	0,00613
JUNIO	INAMHI	6806	13,9774	0,57128	0,00692
	WRF	6806	12,3686	0,70754	0,00858
JULIO	INAMHI	6806	14,1592	0,58662	0,00711
	WRF	6806	11,6115	0,46014	0,00558
AGOSTO	INAMHI	6806	14,3198	0,55448	0,00672
	WRF	6806	12,5513	0,58882	0,00714
SEPTIEMBRE	INAMHI	6806	13,9544	0,91682	0,01111
	WRF	6806	14,5040	0,59277	0,00719
OCTUBRE	INAMHI	6806	14,9730	0,44588	0,00540
	WRF	6806	14,4845	0,35352	0,00429
NOVIEMBRE	INAMHI	6806	14,4455	0,73504	0,00891
	WRF	6806	13,8793	0,48872	0,00592
DICIEMBRE	INAMHI	6806	15,3492	1,12948	0,01369
	WRF	6806	15,6225	0,64178	0,00778

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

En vista que la totalidad de los datos no presentaron una distribución normal se debió aplicar pruebas estadísticas en las que se compararon las variables meteorológicas de las estaciones y WRF, la evaluación resultante se muestra en la tabla 5-3, así de esta manera se logró identificar que los valores de sesgo fluctúan entre -1 y 1 °C, no existe una amplia diferencia en este intervalos, a su vez acorde a los analizado a través del RMSE y MAE el mes de abril es el que presenta el mayor error generado con 14,4 °C, siendo ampliamente superior a los restantes en los que estos valores oscilan entre 0, 5 y 2 °C, así también en estos parámetros la tendencia describe valores cercanos a 1 °C en los dos primeros meses, experimentando un incremento en Marzo puesto que registra valores de 1, 49 y 1,07 °C respectivamente, excluyendo a abril, los meses de junio a septiembre registraron valores moderadamente elevados de error calculado, para la parte final del año estos valores se reduzcan y se mantengan por debajo de 1,2°C. En cuanto al

coeficiente de correlación entre estaciones – WRF, la información registrada marcó valores negativos, siendo la menor relación en el mes de julio con un valor de -0,716.

Tabla 5-4: Análisis Estadístico de error de temperatura

	Sesgo °C	RMSE °C	MAE °C	T
Enero	-0,9638	1,2574	1,0236	-0,151
Febrero	-0,0288	0,8400	0,6788	-0,055
Marzo	1,0256	1,4861	1,0788	0,036
Abril	-0,2587	14,4383	14,4286	-0,140
Mayo	1,2168	1,4352	1,2195	-0,215
Junio	1,6088	1,9380	1,6249	-0,422
Julio	2,5477	2,7263	2,5480	-0,716
Agosto	1,7685	2,0479	1,7703	-0,631
Septiembre	-0,5496	1,4536	1,2317	-0,570
Octubre	0,4885	0,8702	0,6391	-0,618
Noviembre	0,5662	1,2072	0,7680	-0,498
Diciembre	-0,2733	1,2072	0,7680	-0,390

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Los valores estadísticos resultantes fueron relacionados con el análisis realizado por (Aragón et al. 2012, p. 9), quien demuestra que las pruebas de raíz del error cuadrático medio, error medio absoluto y correlación son las más adecuadas para la validación del modelo WRF, puesto que representan de manera verás el grado de alejamiento de los datos de las diversas fuentes, así pues menciona que los valores más cercanos a 0 constituyen una similitud así perfecta. Esto concuerda con (Murcia-Ruiz, 2010, p. 23) que relaciona los valores RMSE y MAE con la valides de modelos meteorológicos, indicando que en relación a la temperatura se obtienen valores muy cercanos a cero en la escala del error.

4.4.2. Radiación

Al igual que el tratamiento efectuado para los datos de temperatura, se ejecutaron pueba de normalidad para radiación mediante el test de Kolmogorov – Smirnov, como se representa en la tabla 6-3, donde se compararon la información recabada de las dos fuentes bajo estudio, resaltando que con la suficiente evidencia estadística se puede afirmar con un 95% de confianza que los datos tanto de las estaciones del INAMHI como del modelo WRF para todos los meses del año siguen una distribución normal, puesto que el estadístico de prueba es superior al p-valor de 0,05, más sin embargo, acorde a lo señalado por (Ñavincopa, 2018, p. 18) y (Aragón et al. 2012, p. 23)

se efectuaron pruebas similar a la variable temperatura, determinando parámetros estadísticos de desviaciones, rango de errores y correlación, como se muestra en la tabla 7-3 y tabla 8-3

Tabla 6-4: Prueba de normalidad de radiación

Mes	N	Parámetro Normales		Máximas diferencias extremas			E. de Prueba	Sig. Asintótica
		Media	Des. Estándar	Absoluto	Positivo	Negativo		
Enero	13612	135,18	42,09	0,323	0,323	-0,236	0,323	,000c
Febrero	13612	147,54	49,83	0,324	0,324	-0,219	0,324	,000c
Marzo	13612	133,10	35,43	0,318	0,318	-0,155	0,318	,000c
Abril	13612	139,11	40,57	0,327	0,327	-0,238	0,327	,000c
Mayo	13612	130,92	32,70	0,316	0,316	-0,147	0,316	,000c
Junio	13612	137,42	42,11	0,316	0,316	-0,158	0,316	,000c
Julio	13612	141,31	48,37	0,3	0,3	-0,159	0,3	,000c
Agosto	13612	137,74	47,66	0,31	0,31	-0,144	0,31	,000c
Septiembre	13612	142,46	50,33	0,309	0,309	-0,142	0,309	,000c
Octubre	13612	134,67	37,95	0,314	0,314	-0,141	0,314	,000c
Noviembre	13612	135,31	37,15	0,313	0,313	-0,149	0,313	,000c
Diciembre	13612	141,62	44,77	0,314	0,314	-0,141	0,314	,000c

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Tabla 7-4: Valores estadísticos de los datos de radiación

Mes	FUENTE	N	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio
Enero	INAMHI	6806	176,871	8,079	0,098
	WRF	6806	93,489	1,069	0,013
Febrero	INAMHI	6806	196,520	12,762	0,155
	WRF	6806	98,570	2,522	0,031
Marzo	INAMHI	6806	166,453	16,892	0,205
	WRF	6806	99,744	0,779	0,009
Abril	INAMHI	6806	178,954	10,728	0,130
	WRF	6806	99,271	1,474	0,018
Mayo	INAMHI	6806	161,519	16,264	0,197
	WRF	6806	100,325	0,995	0,012
Junio	INAMHI	6806	176,597	21,806	0,264
	WRF	6806	98,247	0,812	0,010
Julio	INAMHI	6806	184,125	31,779	0,385
	WRF	6806	98,489	1,642	0,020
Agosto	INAMHI	6806	183,194	20,150	0,244
	WRF	6806	92,278	1,941	0,024
Septiembre	INAMHI	6806	189,700	24,458	0,296
	WRF	6806	95,223	2,360	0,029
Octubre	INAMHI	6806	170,790	16,363	0,198
	WRF	6806	98,551	1,987	0,024
Noviembre	INAMHI	6806	171,155	13,573	0,165
	WRF	6806	99,459	2,389	0,029
Diciembre	INAMHI	6806	184,114	19,806	0,240
	WRF	6806	99,131	2,120	0,026

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

Las desviaciones mostradas en la tabla 7-3 son bastante elevadas entre los datos de las fuentes, llegando incluso a ser cercanas a un valor de 20. Por su parte la desviación error promedio también tiene datos que van desde 0,02 hasta 0,2 aproximadamente.

Tabla 8-4: Análisis Estadístico de error de radiación

	Sesgo W/m²	RMSE W/m²	MAE W/m²	r
Enero	83,381	83,758	83,394	0,202
Febrero	97,950	98,792	97,964	0,056
Marzo	66,709	68,687	66,719	0,687
Abril	79,683	80,359	79,695	0,285
Mayo	61,208	63,171	61,217	0,708
Junio	78,350	81,167	78,362	0,755
Julio	85,636	91,048	85,648	0,538
Agosto	90,916	92,946	90,929	0,468
Septiembre	94,477	97,183	94,491	0,736
Octubre	72,240	73,758	72,250	0,769
Noviembre	71,696	72,712	71,707	0,666
Diciembre	84,983	86,926	84,995	0,746

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

En la tabla 8-3 se visualizan los parámetros estadísticos analizados mensualmente para la validación del método WRF para radiación, siendo febrero el que presenta los valores más sobresalientes con 97,95 W/m², 98,79W/m² y 97,96 W/m² para sesgo, RMSE y MAE respectivamente, en contraste el mes con los valores inferiores obtenidos fue mayo con 61,2 W/m², 63,17 W/m² y 66,71 W/m² para los parámetros antes descritos.

Los coeficientes de correlación son todos positivos, siendo el de menor valor el obtenido en febrero con 0,056 mientras que el mayor nivel de correlación es octubre con 0,769. Según lo señalado por (Jiménez 2014, p.23) se pueden incurrir en errores de estimación por parte del modelo WRF a nivel de radiación, puesto que los valores se ven afectados por una desestimación de variables, como la ubicación de las estaciones meteorológicas siendo la altura uno de los factores diferenciadores. Así también, (Saavedra, 2016, p. 48) menciona que existe una mayor recurrencia en elevados valores de RSME y MAE en la variable de radiación, de acuerdo a (Yáñez-Morrón et al. 2018, p. 63) esto ocurre en modelaciones de intervalos amplios de tiempo, puesto que al reducir considerablemente la resolución temporal, sea a 1h o 6h, estos errores disminuyen en s probabilidad de ocurrencia, puesto que amplía la estimación de las condiciones atmosféricas relacionadas a los niveles de radiación. Por su parte, (Murcia Ruiz, 2010, p. 22) menciona que a pesar de que no existan valores estandarizados o límites de RSME y MSE, lo que se busca en las comparaciones es que los datos de error sean lo más cercanos a cero para establecer una correcta fiabilidad entre los datos observados y pronosticados. Dentro de este análisis (Peck, Olsen y Devore,

2012, p. 71), menciona que una correlación fuerte entre variables ocurre cuando esta está más cercana a 1 o -1, dependiendo del nivel de interacción.

4.4.3. Comparaciones anuales

Se realizó así también un análisis de las celdas específicas en donde se intersecaron las estaciones meteorológicas con cada una de las mallas resultantes de las variables temperatura y radiación, tanto de los datos obtenidos del INAMHI y de WRF, considerando los valores obtenidos en los promedios anuales, como se muestra en la tabla 9-3. En la cual se puede notar, que los errores generados en la variable temperatura, son mínimos, así como también el sesgo generado con cifras desde 0.03°C hasta un máximo de 2,42 °C, mientras que, por parte de radiación, los valores de error son bastante elevados ya que se encuentran en un rango desde 34 a 131.3 W/m² en el caso del MAE y entre 1162,1 a 17261,4 W/m² en el error RMSE.

Tabla 9-4: Comparaciones anuales

ESTACION	CELD A	TEMPERATURA(°C)					RADIACIÓN (W/m)				
		INAMH I	WR F	Sesg o	RMS E	MA E	INAMH I	WR F	Sesgo	RMSE	MA E
ESPOCH	5560	14,98	13,4 3	1,56	2,42	1,56	230,18	98,8 0	131,3 8	17261,4	131, 3
Guaslán	5122	14,89	13,7 8	1,11	1,23	1,11	133,06	98,9 7	34,09	1162,1	34,0 9
Shiry XII	4287	12,87	13,9 1	-1,04	1,07	1,04	180,96	98,7 0	82,26	6766,7	82,2 6
Cebadas AJ Guamote	3954	14,10	14,2 6	-0,16	0,03	0,16	217,83	99,0 5	118,7 8	14108,7	118, 7
Río Cebadas - Yapisan	3826	13,41	14,3 5	-0,94	0,89	0,94	215,18	99,0 5	116,1 3	13486,2	116, 1
Chunchi	1154	14,33	12,9 8	1,35	1,83	1,35	143,57	95,4 0	48,17	2320,3	48,1 7

Realizado por: Camino, Teresa. 2021.

CONCLUSIONES

- Los datos meteorológicos de temperatura y radiación fueron exitosamente compilados y generados para el año 2015 a partir del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) con una resolución temporal mensual, siendo usados en la interpolación de dichas variables ambientales en toda la provincia de Chimborazo. Los valores de temperatura obtenidos se plasmaron en una representación cartográfica de la zona, pudiendo denotarse en ellos su evolución a nivel temporal, guardando una tendencia similar a lo largo del año de estudio, siendo la zona oriental de la Provincia de Chimborazo la de mayores niveles de temperatura rondando los 16°C, disminuyendo a medida que se acercaba al extremo occidental, reportando una temperatura mínima de 11°C. La radiación por su parte, mostro intervalos variables a lo largo del año, manifestando que el rango inferior del intervalo calculado presenta mayores fluctuaciones que el rango superior, puesto que se este último se mantenía cercano a los 100 W/m², mientras que los mínimos variaban desde 88 a 96 W/m². La zona de mayor incidencia de radiación en todo el año 2015 fue la parte centro norte.
- Los valores de temperatura y radiación obtenidos a través de las estaciones hidrometeorológicas de la Red de Estaciones Activas del INAMHI fueron ampliamente útiles en la elaboración de material cartográfico e interpolación de dichas variables a toda el área de estudio, mostrando que los meses de mayor temperatura promedio fueron de junio a agosto, mientras que los meses de enero, febrero, diciembre y noviembre del año mostraron las temperaturas más bajas, a su vez se identificó que los rangos máximos del intervalo de temperatura fueron bastante cambiantes, puesto que adquirirían valores de 16°C a 21 °C, por su parte los rangos mínimos estuvieron entre los 10 °C y 12 °C. La información recabada por las estaciones meteorológicas permitió también la interpolación radiación solar, mostrando que los valores de esta variable meteorológica contaban con un intervalo de 130 W/m² hasta 345,7 W/m² la más elevada, siendo esta última registrada en el mes de julio, que junto con los meses de junio a agosto presentan valores de radiación elevados con respecto a los demás meses del año.
- El análisis estadístico para la comparación de los datos meteorológicos provenientes de fuentes como las estaciones INAMHI y WRF fue en base a errores medios (sesgo, RMSE y MAE) y un coeficiente de correlación, demostrando que en el caso de temperatura existe valores de error muy cercanos a cero entre las variables evaluadas, permitiendo así presumir que la diferencia entre las medias de los datos evaluados es mínima para esta variable, demostrando así amplia cercanía de datos entre INAMHI y WRF, esto a pesar de que no cuentan con correlaciones fuertes, siendo el mes de junio el de la correlación más fuerte con un valor de 0,7. Por otra parte, los valores de radiación mostraron elevados valores de error medio RMSE y MAE, a pesar de que cuentan con coeficientes de correlación

medianamente fuertes, por lo que se considera que estas variables cuentan con diferencia en las medias empleadas.

- Una vez realizado un análisis anual, llevado a cabo específicamente en las celdas que intersecan a las estaciones meteorológicas y las mallas generadas en WRF, se puede presumir que la aplicabilidad del modelo a escala real en cuanto a la Temperatura es viable, puesto que los valores de error generados se encuentran en valores cercanos a 0, siendo 2,4°C la cifra más elevada en estos parámetros. Contrasta ampliamente con la variable radiación, puesto que se podría aseverar que, en el caso de esta variable, su aplicabilidad se ve limitada por la elevada recurrencia de errores.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda disminuir la resolución temporal de la compilación de datos del modelo WRF, puesto que así se podría evaluar si el intervalo de espaciamiento temporal incide en la validación de las variables.
- Ampliar el periodo temporal analizado de uno a tres años de cálculo, para considerar mayor representatividad de datos junto con las estaciones seleccionadas. Es recomendable aplicar factores de corrección de topografía, nubosidad, altura de estaciones y otras condiciones ambientales en el modelo WRF, para así poder disminuir la interacción de las variables intervinientes en el modelamiento.
- Se recomienda seleccionar estaciones meteorológicas que cuenten con un sistema estandarizado de medición de las variables ambientales para eliminar errores de origen de medición.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, A. & LEÓN, J. Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2015, 5(1).

ARAGÓN, G.; et al. Validación Del Modelo De Pronóstico Numérico Wrf Para Su Uso Operativo En La Universidad Nacional De Colombia. *Foreign Affairs*, 2012, 91(5), pp. 1689-1699. ISSN 00157120.

CAZORLA, M. & JUNCOSA, J. Evaluación del modelo WRF (weather research and forecasting) entre la superficie y 30 km sobre Quito casos de estudio entre abril y septiembre de 2015. [en línea], 2016, pp. 96. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5187>.

CONELEC. Atlas Solar del ecuador. *Conelec*, 2009, pp. 1-51.

G.A.D. PENIPE. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Penipe. *Plan De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial*, 2019, pp. 254.

GADPCH Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Provincia de Chimborazo 2019-2023. *Prefectura de Chimborazo*, 2020, pp. 390-391.

GARCÍA, M.J. Validación de la capacidad del modelo wrf «weather research and forecasting» para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. 2014.

GARCÍA, M.J. Validación de la capacidad del modelo wrf «weather research and forecasting» para pronosticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia. 2017.

GOBIERNO AUTÓNOMO DECENTRALIZADO DEL CANTÓN GUANO Actualización del Plan de Desarrollo y ordenamiento Territorial del Cantón Guano., 2019, no. 593, pp. 6-10.

GONZÁLEZ, V.H. & RODRÍGUEZ, M.A. Un modelo para evaluar la validación matemática., 2020, 18(3), pp. 103-124.

IGM & SENPLADES, *Historical Contexts and General Policies*. 2013

INSTITUTO GEOGRÁFICO MILITAR. Descargas Geoportal - IGM. 2021.

JIMÉNEZ. Validación de la capacidad de modelo WRF «Weather Research and forecasting» para pronósticar lluvia intensa, usando el método orientado a objetos y tablas de contingencia (tesis de maestría), 2014, pp. 162.

JUNCOSA CALAHORRANO, J.F. Evaluación del modelo WRF (weather research and forecasting) entre la superficie y 30 km sobre Quito casos de estudio entre abril y septiembre de 2015. [en línea], 2016, [Consulta: 19 julio 2021]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5187>.

MEJIA, S.H. & FRANKLYN RUÍZ, J.M. validacion de los pronosticos de precipitación con los modelos gfs, mm5, wrf, cmm5 y cwrf sobre el territorio colombiano,2012.

MOYA, A. & ORTEGA, J. Aplicación del modelo meteorológico WRF para el pronóstico de precipitaciones en período lluvioso de Cuba, 2014. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2015, 05(01), pp. 135-145. ISSN 22255141. DOI 10.18259/acs.2015021.

MURCIA RUIZ, J.F. Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución. *Ideam*,2010, no. 5, pp. 1-91.

NARVÁEZ, R.P. Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF). *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías* [en línea], 2012, 4(2), pp. 27-35. [Consulta: 19 julio 2021]. ISSN 2528-7788. DOI 10.18272/ACI.V4I2.110. Disponible en: <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/110>.

ÑAVINCOPA MUÑOZ, V.M. Validación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) al simular temperaturas en zonas altoandinas de Puno y Arequipa. *Universidad Nacional Agraria La Molina* [en línea], 2018, [Consulta: 12 agosto 2021]. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3211>.

ÑAVINCOPA, V.M. Validacion del Modelo Weather Research and Forecasting (WRF) al simular Temperaturas en Zonas Altoandinas de Puno y Arequipa. , 2018, pp. 118.

PECK, R., OLSEN, C. & DEVORE, J.L. *Introduction to Statistics and Data Analysis*. Third. Boston, USA: Cengage Learning. 2012.

RODRÍGUEZ, L. & GERARDO, A. *Aplicación de regionalización dinámica con el modelo atmosférico WRF en la generación de escenarios climáticos regionales para Perú* [en línea]. 2020, ISBN 0000000247078. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/15686>.

SAAVEDRA MURRUGARRA, Y.M. Validación del modelo WRF en el Valle de Cajamarca, Región Cajamarca, Perú. [en línea], 2016, [Consulta: 12 agosto 2021]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139925>.

SAAVEDRA, Y. *Validación Del Modelo Wrf En El Valle De Cajamarca, Región Cajamarca, Perú*. 2016: Universidad Santiago de Chile.

SHAMAROCK, W.; et al. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. 2008. No. NCAR/TN-475+STR.

SILVEIRA, W. & CARVALHO, V. Avaliação das Condições Meteorológicas Simuladas pelo Modelo WRF na Região Metropolitana do Rio de Janeiro em Dias Com Altas Concentrações de Poluentes. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2021, 36(2), pp. 317-325. ISSN 0102-7786. DOI 10.1590/0102-77863620067.

VALENCIA, V.; et al. Modeling urban background air pollution in Quito, Ecuador. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(4), pp. 646-666. ISSN 1309-1042. DOI 10.1016/J.APR.2019.12.014.

YÁÑEZ MORRONI, G.; et al. Using the Weather Research and Forecasting (WRF) model for precipitation forecasting in an Andean region with complex topography. *Atmosphere*, 2018, 9(8). ISSN 20734433. DOI 10.3390/atmos9080304.

ZHAO, W. Study of the Radiation and Energy Balances Reproduced by WRF Using 10-year (2001-2010): Observations at Cabauw Wanjun Zhao Study of the Radiation and Energy Balances Reproduced by WRF Using 10-year (2001-2010) Observations at Cabauw MSc thesis Meteorol. 2020

ANEXOS

ANEXO A: INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN DE WRF

```
root@dgx-node-0-0:/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS
login as: rafaela.viteri
Authenticating with public key "rsa-key-20170516"
Passphrase for key "rsa-key-20170516":
Welcome to NVIDIA DGX Server Version 5.0.5 (GNU/Linux 5.4.0-74-generic x86_64)

CEDIA
AI-ML-HPC

Bienvenido al cluster de RedCEDIA, un recurso de HPC para la comunidad académica,
alojado por www.cedia.edu.ec

-----Documentación útil-----
| manejador de colas:
| https://slurm.schedmd.com/
| Términos y condiciones de uso:
| https://www.cedia.edu.ec/es/servicios/tecnologia/infraestructura/cluster-para-hpc/terminos-y-condiciones-hpc-cedia
| Como trabajar en un nodo del HPC:
| https://www.cedia.edu.ec/es/servicios/tecnologia/infraestructura/cluster-para-hpc/como-trabajar-en-un-nodo-hpc-cedia
-----

contacto para soporte técnico: noc@cedia.org.ec 07h00 - 23h00 Lunes - Domingo
telefono: (+593) 74079900 ext 1

Last login: Tue Sep 21 10:44:07 2021 from 204.199.157.204
rafaela.viteri@dgx-node-0-0:~$ enroot start --mount /home/rafaela.viteri --root --rw micudapersonal
root@dgx-node-0-0:~# cd home/
root@dgx-node-0-0:/home# cd rafaela.viteri/
root@dgx-node-0-0:/home/rafaela.viteri# cd Build_WRF/
root@dgx-node-0-0:/home/rafaela.viteri/Build_WRF# cd WPS
root@dgx-node-0-0:/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS# nano namelist.wps
```

Entrada al servidor que alberga al WRF

Fuente: Camino, Ibeth (2021)

```
GNU nano 4.8 namelist.wps
##### IMPORTANT NOTE #####
! The default datasets used to produce the HGT_M, GREENFRAC,
! and LU_INDEX/LANDUSEF fields have changed in WPS v3.8. The HGT_M field
! is now interpolated from 30-arc-second USGS GMTED2010, the GREENFRAC
! field is interpolated from MODIS FPAR, and the LU_INDEX/LANDUSEF fields
! are interpolated from 21-class MODIS.
!
! To match the output given by the default namelist.wps in WPS v3.7.1,
! the following setting for geog_data_res may be used:
!
! geog_data_res = 'gtopo_10m+usgs_10m+nasda_greenfrac+10m','gtopo_2m+usgs_2m+nasda_greenfrac+2m',
!
##### IMPORTANT NOTE #####
!
geog_data_res = '10m', '5m', '2m',
dx = 90000,
dy = 90000,
map_proj = 'lambert',
ref_lat = -3.12207,
ref_lon = -78.37596,
truelat1 = -6.0,
truelat2 = -80.0,
##### IMPORTANT NOTE #####
!
! Read 54 lines
```

Configuración de los datos previo a su descarga.

Fuente: Camino, Ibeth (2021)

ANEXO B: INTERFAZ POST-PORCESAMIENTO DE DATOS WRF

```
root@dgx-node-0-0: /home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS
AI-ML-HPC

Bienvenido al cluster de RedCEDIA, un recurso de HPC para la comunidad académica,
alojado por www.cedia.edu.ec

-----documentación útil-----
| manejador de colas:
| https://slurm.schedmd.com/
| Términos y condiciones de uso:
| https://www.cedia.edu.ec/es/servicios/tecnologia/infraestructura/cluster-para-hpc/terminos-y-condiciones-hpc-cedia
| Como trabajar en un nodo del HPC:
| https://www.cedia.edu.ec/es/servicios/tecnologia/infraestructura/cluster-para-hpc/como-trabajar-en-un-nodo-hpc-cedia
-----

contacto para soporte técnico: noc@cedia.org.ec 07h00 - 23h00 Lunes - Domingo
telefono: (+593) 74079300 ext 1

Last login: Tue Sep 21 10:44:07 2021 from 204.199.157.204
rafaela.viteri@dgx-node-0-0:~$ enroot start --mount /home/rafaela.viteri --root --rw micudapersonal
root@dgx-node-0-0:~$ cd /home/
root@dgx-node-0-0:~/home$ cd rafaela.viteri/
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri$ cd Build_WRF/
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF$ cd WPS
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ nano namelist.wps
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ nano namelist.wps
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ nano namelist.wps
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ./geogrid.exe>log.geogrid
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ./link_grib.csh

Please provide some GRIB data to link
usage: ./link_grib.csh path_to_grib_data/grib_data_root

root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ./link_grib.csh /home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ln -sf ungrrib/Variable_Tables/Vtable.GFS Vtable
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ./ungrrib.exe
```

Ejecución de comandos de post-procesamiento

Fuente: Camino, Ibeth (2021)

```
root@dgx-node-0-0: /home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$ ./metgrid.exe>log.metgrid
root@dgx-node-0-0:~/home/rafaela.viteri/Build_WRF/WPS$
```

Interfaz de descarga de archivos en formato Metem

Fuente: Camino, Ibeth (2021)

ANEXO C: OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DEL INAMHI

Quito, 21 de Julio de 2020

Oficio

Doctor

Vicente David Vásquez Granda

Director Ejecutivo

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

En su despacho.-

De mis consideraciones

Yo, **MARÍA RAFAELA VITERI UZCÁTEGUI**, solicito de la manera más comedida, autorice a quién corresponda facilitar los datos:

diarios (...) mensuales (...) horarios (X)

De los parámetros (**TEMPERATURA, VELOCIDAD DE VIENTO, HUMEDAD RELATIVA**) de la/s estación/es: (**M0258, M5151, M1107, M1036, H0790, H5015, H0340, H0375, M5139, M5138, H0471, M5092, M5138, H5033**), correspondiente al Ecuador Período: **2015,2016,2017**.

Información que será aplicada en la elaboración de:

Estudio de Investigación: *"Aplicación del modelo mesoescalar WRF (Weather Research Forecasting) en la modelización meteorológica de Chimborazo"*

El suscrito se compromete a entregar un ejemplar del documento final sin costo al INAMHI.

Observaciones: En el caso de existir observaciones especificar las mismas. (ADICIONAL, COLOCAR LOS DATOS DEL ESTUDIANTE QUE REQUIERE LA INFORMACIÓN: NOMBRES, CÉDULA, TELÉFONO CELULAR, CORREO ELECTRÓNICO)

Con sentimientos de consideración y estima.

Atentamente,



Ing. Rafaela Viteri Uzcátegui

Firma

María Rafaela Viteri Uzcátegui

Nombres y apellidos completos

Presidente del Comité de Bioética Espoch

Cargo

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA /
Teléfono(s): 3971100
Documento No.: INAMHI-DAF-2020-0367-EX
Fecha: 2020-07-21 14:44:03 GMT -05
Recibido por: Samuel Ricardo Narvaez Cordero
Para verificar el estado de su documento ingrese a:
<https://www.gestiondocumental.gob.ec>
con el usuario: 0603357682

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Nombre del plantel o institución de educación superior

0603357682
Número de cédula

0992511239
Teléfono celular

rafaelaviteri@gmail.com

Correo electrónico

DATOS ESTUDIANTE:

Teresa Ibeth Camino Carrasco
Nombres y apellidos completos

0604516872
Número de cédula

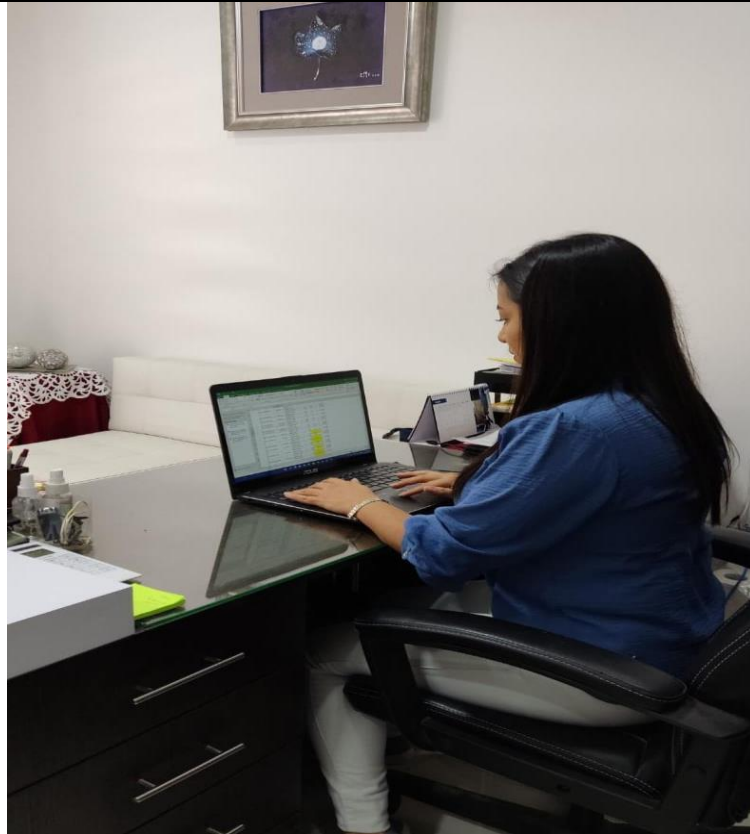
0999929303
Teléfono celular

ibecamino@gmail.com

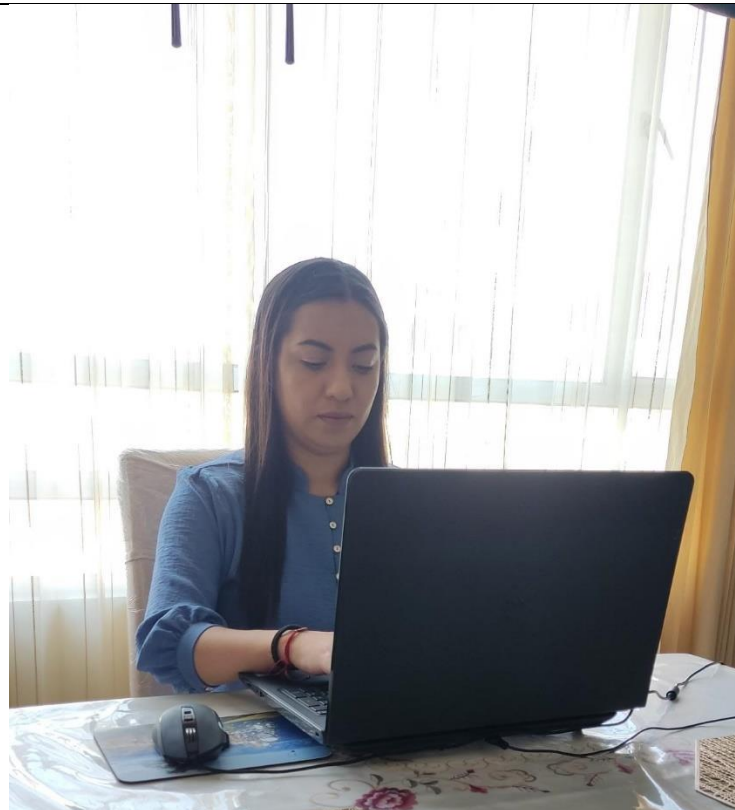
Correo electrónico

Oficio de solicitud de información.

ANEXO D: REGISTRO FOTOGRÁFICO



a) Proceso de depuración de datos



b) Uso de equipos informáticos para la validación.