



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MODIFICACIÓN DE LA GEODATABASE
(USO DEL SUELO, ELEVACIÓN) EN EL CLIMA SIMULADO POR WEATHER
RESEARCH AND FORECASTING - WRF PARA LA SABANA DE BOGOTÁ

JOSE EDILBERTO GARZÓN NÚÑEZ

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Postgrados
Bogotá D.C. Colombia
2014

**ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA MODIFICACIÓN DE LA
GEODATABASE (USO DEL SUELO, ELEVACIÓN) EN EL CLIMA
SIMULADO POR WEATHER RESEARCH AND FORECASTING - WRF PARA
LA SABANA DE BOGOTÁ**

JOSE EDILBERTO GARZÓN NÚÑEZ

Tesis presentada como requisito para optar el título de:
Magister en Geomática

Director
Ph D. José Daniel Pabón Caicedo

Línea de investigación:
Geo-información para el uso sostenible de los recursos naturales

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Postgrados
Bogotá D.C. Colombia
2014

**A mi familia por su apoyo incondicional,
Al amor de mi vida,
Para la inspiración de mis sobrinos Laura,
Valentina, Santiago, Ana María, Juliano,
Y los que están por nacer.**

**La juventud por esencia es bella
Oh juventud que eres envidia de la vejez
Oh juventud que no te aprovechan
Oh juventud que mañana no estás y ayer estabas
Bella, bella juventud.**

Autor

AGRADECIMIENTOS

De manera sencilla y sentida quisiera hacer un especial reconocimiento a:

La educación pública de mi país Colombia, y en particular a la Universidad Nacional de Colombia por brindarme la posibilidad de formarme profesional y académicamente y de profundizar en la inquietud de adquirir nuevos conocimientos.

Al profesor José Daniel Pabón, al ciudadano ecuatoriano Ing. Arturo Lomas y a Cristian Arango, estudiantes de la maestría de meteorología, por su ayuda y aportes en la comprensión y entendimiento de los modelos de simulación climática.

A mi amor, Claudia Lizarazo Rengifo, y amigos, Miguel Ángel Gómez Sáenz, Jorge Andrés Jaramillo Acero, William Augusto Barrera Piza y Miguel Ángel Bohórquez por la constante contribución y revisión del documento.

RESUMEN

Los modelos de pronóstico del tiempo se basan en datos de variables meteorológicas provenientes de diferentes fuentes, desde observación o medición directa in situ en superficie hasta los obtenidos por sensores ubicados en tierra, aire o agua y, en las últimas décadas gracias al desarrollo aero-espacial, en satélites. De igual manera, la información sobre las particularidades de la superficie del suelo y de la orografía es un componente importante del cual depende la calidad de las simulaciones y de los pronósticos. Los datos sobre el uso del suelo y la cobertura de la superficie aseguran una apropiada representación de procesos relacionados con el balance de radiación y el ciclo hidrológico local; la representación realística de la orografía permite una mejor simulación de la circulación local que facilita el desarrollo de diferentes fenómenos meteorológicos.

Uno de los modelos meteorológicos ampliamente usado en la actualidad tanto en la investigación en las ciencias atmosféricas y del clima como en el pronóstico operativo del tiempo es el Weather & Research Forecasting (WRF). No obstante su amplio uso, inclusive para pronóstico del tiempo en muy alta resolución espacial, la geodata incorporada en las versiones liberadas, hasta ahora no representa el detalle de la realidad orográfica y de la superficie terrestre para regiones del territorio colombiano. Dada la importancia del modelo para investigación y para aplicaciones prácticas de pronóstico del tiempo operativo en el país, es necesario mejorarlo incorporando información real y detallada de uso del suelo y de la topografía. Esta situación motivó la realización del presente trabajo y señaló el objetivo de mejorar la representación de la orografía y de las características de la superficie terrestre usadas en el modelo WRF, para su aplicación sobre la Sabana de Bogotá. El presente documento sintetiza el procedimiento y los resultados obtenidos en esta empresa.

Después de explorar el componente de geodata (en el módulo de pre-procesamiento) del modelo, se obtuvieron y procesaron apropiadamente los datos en alta resolución espacial provenientes de sensores remotos satelitales; los datos sobre el uso del suelo fueron obtenidos del IDEAM y del IGAC, en tanto que los de elevación del SRTM fueron suministrados por IGAC. Una vez procesados, los datos fueron organizados en formato netCDF e incorporados al módulo especial de geodata del modelo WRF. Paralelamente a este procedimiento se simularon los procesos atmosféricos regionales sin las modificaciones. Una vez disponibles los nuevos datos, se realizaron las siguientes simulaciones: con modificación del uso del suelo, solamente; con modificación de la elevación, únicamente; y, con modificación de los datos. Esto con el fin de evaluar el efecto de cada cambio en las simulaciones de los procesos atmosféricos a través de la comparación de los resultados de estas tres con geodata modificada con la primera simulación sin modificaciones.

Finalmente, se describen los efectos de la mejora de la representación espacial de la orografía y de las características de la superficie en la circulación (vientos), en la presión atmosférica, humedad del aire y precipitación.

Palabras clave: Geodata, modelo WRF, precipitación, Sabana de Bogotá, Temperatura,

ABSTRACT

The weather forecasting models are based on meteorological variables data obtained from several sources such as from direct observation or measurement in situ, with remote sensors located on land, air or water and , in recent decades, emplaced in satellites; also, the information on the features of both the surface and the topography is crucial to guarantee the quality of the simulations and forecasts . Data on land use and surface coverage ensure proper representation of the processes related to the radiation balance and the local hydrological cycle; the realistic representation of the topography allows a better simulation of the local circulation and the development of different weather phenomena.

One of the models broadly used both in meteorological research and inoperative weather forecasting is the Weather Research & Forecasting (WRF) model. Despite its widespread use, the geodata of WRF released versions does not represent the real details of orography and land surface regions of Colombia. Given the importance of the model for research and practical applications of the operative forecasting in the country, it is necessary to improve it by incorporating real and detailed information on land use and topography. This situation motivated the present work and showed the objective of improving the representation of orography and land surface characteristics used in the WRF model, for application on the Sabana de Bogotá. This document summarizes the procedure and the results obtained in this project.

After exploring the geodata component (in the pre –processing module) of the model, high spatial resolution data from satellite remote sensing were obtained and processed properly; data on land use were obtained from IDEAM and IGAC , while the SRTM elevation data were supplied by IGAC. Once processed, the data were organized in netCDF format and incorporated into geodata special module of WRF model. Parallely to this process, simulations of the regional atmospheric processes were simulated with WRF, but without any modifications. With the new data available, the following simulations were performed: modifying the land use change only; changing just

elevation data; and, with changes of land use and elevation data, at the same time. This was done to facilitate the comparison of the results obtained with the modified geodata with the produced with unchanged geodata, in order to evaluate the effects that these changes might produce in the simulated atmospheric processes.

Finally, this document summarizes the effects caused by the improvement of the spatial representation of the topography and the characteristics surfaces on the local circulation (wind), air pressure, air temperature, air humidity and precipitation.

Key words:, Geodata, WRF model, elevation , Sabana de Bogotá, land use.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	I
ABSTRACT	III
TABLA DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	I
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	5
4. MARCO TEORICO	7
5. OBJETIVOS	18
5.1 General	18
5.2 Específicos	18
6. MATERIALES Y MÉTODOS	19
6.1 Área de estudio.	20
6.2 Tipos de archivos de trabajo.	22
6.3 Escenarios de simulación.	26
6.4 Diagrama General.	26
6.5 Datos utilizados.	28
7. ANÁLISIS DE DATOS	35
7.1 Integración datos de elevación al WRF.	35
7.2 Integración de datos usos del suelo/cobertura vegetal al WRF	42

8. RESULTADOS SIMULACIONES WRF	49
8.1 Estimación y correlación de resultados de temperatura - T2	53
8.1.1 Análisis Estadístico	55
8.1.2 Resultados Perfil A	58
8.1.3 Resultados Perfil B	62
8.2 Estimación y correlación de resultados de precipitación - RAINNC	66
8.2.1 Análisis Estadístico	68
8.2.2 Resultados Perfil A	70
8.2.3 Resultados Perfil B	74
8.3 Evaluación de datos	78
9. CONCLUSIONES	80
ANEXOS	82
A. - ANEXOS: E1 modelo WRF	82
B.- ANEXO: Configuración nameliss.wps/namelist.input	89
GLOSARIO DE TERMINOS	92
SIGLAS	93
BIBLIOGRAFÍA	94

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 Fotos satelitales que evidencian el retroceso del hielo entre 1950 y 2006 en el glaciar Conejera, Norte del nevado Santa Isabel. Parque nacional de los nevados Colombia. (Barrera Silva, 2010UN periódico edición impresa 130).....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2 Distribución de los dominios en el modelo WRF</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 Espacialización arreglo matricial tabla 1 para retículas de interpolación(ARW 2008).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4 Retícula horizontal y vertical del WRF (ARW 2008)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5 Traslape de las retículas M,U, y V</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6. Parámetros de configuración geogrid.exe.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7 Uso de suelo urbanos de la ciudad de México de dos fuentes diferentes USGS 1993 y INEGI 2009 Fuente: López 2011.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8 Uso de suelo de la ciudad de Milán -Italia A) Corine Land Cover B) USGS En rojo es Zona urbana Fuente: Demeij 2014</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 Retículas de dominios – Área de trabajo</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 Ejemplo de código MatLab</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 Ejemplo de despliegue archivo *.nc en MatLab Comando ncdisp('geo_em.d01.nc')</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 Ejemplo de módulo Model Builder desarrollado en ArcGIS para crear rutinas lógicas.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 Diagrama de flujo del procedimiento.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14 Región cobertura SRTM 30 metros.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15 Distribución general precipitación en Bogotá (IAvH, IDEAM, IIAP, 2011)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16 Temporalidad de eventos del fenómeno del Niño y la Niña 2004-2006</i>	<i>32</i>
<i>Figura 17 Perfiles de estudio para comparar resultados simulados.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura18 Ubicaciones de estaciones climáticas.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19 Diferencia de elevaciones entre WRF y base datos SRTM Dominio 1</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20 Diferencia de elevación entre WRF y base datos SRTM Dominio 2</i>	<i>37</i>
<i>Figura 21 Diferencia de elevación entre WRF y base datos SRTM Dominio 3</i>	<i>38</i>
<i>Figura 22 Diferencia elevaciones 3D entre WRF y base datos SRTM dominio 3</i>	<i>39</i>
<i>Figura 23 Diferencia de los gradientes entre WRF y base datos SRTM en el eje X.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 24 Diferencia de los gradientes entre WRF y base datos SRTM en el eje Y.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 25 Diferencia de usos del suelo IGAC-MODIS-WRF.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 26 Cuerpos de agua/Máscara de uso IGAC y uso MODIS-WRF Dominio 3</i>	<i>46</i>
<i>Figura 27 Diagrama de matrices de usos del suelo LU_INDEX.....</i>	<i>47</i>

<i>Figura 28 Porcentaje de uso del suelo en cada retícula.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29 Comparación de la elevación del WRF vs SRTM en los perfiles A y B</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30 Tendencia de cambio del uso del suelo (Pérdida o ganancia vegetación) Dominio 3</i>	<i>51</i>
<i>Figura 31 Relación de cambio (RC) del uso MODIS/WRF vs IGAC en los perfiles A y B</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32 Diferencia de temperatura (WRF-SRTM/IGAC) todos los escenarios 2005/04/21 HORA=</i> <i>16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 Col</i>	<i>53</i>
<i>Figura 33 Diferencia de temperatura (WRF-SRTM/IGAC) todos los escenarios 2005/09/29 HORA=</i> <i>16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 COL</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34 Diferencia de cambio de T °C(WRF-SRTM) Vs diferencia de cambio de elevación (WRF-SRTM)</i> <i>.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 35 Diferencia de cambio de T °C(WRF-IGAC)Vs diferencia relación de cambio de uso del suelo</i> <i>(WRF-IGAC).....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 36 Elevación del WRF e IGAC con Temperatura simulada WRF e IGAC perfil A.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 37 Relación de cambio (RC) del uso del suelo MODIS-WRF e IGAC contra Temperatura simulada</i> <i>WRF e IGAC perfil A.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 38 Temperatura WRF contra T°C modificado Elevación y Usos del suelo IGAC perfil A.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 39 Comparación resultados de Temperatura en los 4 escenarios propuestos perfil A.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 40 Elevación del WRF e IGAC comparada con T°C simulada WRF e IGAC perfil B</i>	<i>62</i>
<i>Figura 41 Relación de cambio (RC) del uso del suelo MODIS/WRF e IGAC contra Temperatura simulada</i> <i>WRF e IGAC perfil B.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 42 Temperatura WRF contra T°C modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil B.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 43 Comparación de Temperatura en los 4 escenarios propuestos perfil B</i>	<i>65</i>
<i>Figura 44 Diferencia de precipitación WRF-IGAC todos los escenarios 2005/04/21 HORA= 16:00-18:00</i> <i>UTM 11:00-13:00 COL.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 45 Diferencia de precipitación todos los escenarios 2005/09/29 HORA=16:00-18:00 UTM 11:00-</i> <i>13:00 COL</i>	<i>67</i>
<i>Figura 46 Diferencia de cambio de la precipitación (WRF-IGAC)Vs diferencia relación de elevación</i> <i>(WRF-IGAC).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 47 Diferencia de cambio de precipitación (WRF-IGAC) Vs diferencia relación de cambio de uso</i> <i>del suelo (WRF-IGAC)</i>	<i>69</i>
<i>Figura 48 Elevación WRF e IGAC Vs Precipitación simulada WRF e IGAC perfil A</i>	<i>70</i>
<i>Figura 49 Relación de cambio (RC) del uso del suelo/Precipitación perfil A</i>	<i>71</i>
<i>Figura 50 Precipitación WRF contra precipitación modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil A</i> <i>.....</i>	<i>72</i>

<i>Figura 51 Comparación de Precipitación en los 4 escenarios propuestos perfil A</i>	<i>73</i>
<i>Figura 52 Elevación WRF e IGAC Vs Precipitación simulada WRF e IGAC perfil B</i>	<i>74</i>
<i>Figura 53 Relación de cambio (RC) del uso del suelo/Precipitación perfil B</i>	<i>75</i>
<i>Figura 54 Precipitación WRF contra precipitación modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil B</i>	<i>76</i>
<i>Figura 55 Comparación de Precipitación en los 4 escenarios propuestos perfil B</i>	<i>77</i>
<i>Figura 56 Página descarga datos Tropical RainfallMeasuringMission (TRMM)http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services</i>	<i>79</i>
<i>Figura 57 Diagrama del modelo WRF (ARW 2012)</i>	<i>84</i>
<i>Figura 58 Componentes del WPS.....</i>	<i>86</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Variables de elevación a modificar en archivo *.nc</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 2 Arreglo matricial variable elevación en WRF para retículas de interpolación.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3 Variables de usos del suelo a modificar en archivo *.nc.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4 Categorías de uso y cobertura del suelo MODIS-WRF.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5 Formato salida datos .nc.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6 Asimilación tablas IGAC - MODIS-WRF.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 7 Matriz relacional usos del suelo IGAC -MODIS-WRF Dominio 3</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 8 Matriz de la relacion de cambio del usos del suelo IGAC MODIS-WRF Dominio 3.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 9 Datos estaciones automáticas-datos temperatura.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 10 Datos estaciones automáticas-datos precipitación</i>	<i>78</i>

1. INTRODUCCIÓN

Existen múltiples razones por las cuales se desarrolla la modelización y simulación de las condiciones atmosféricas, la más relevante es el pronóstico del tiempo, aunque hay otras como la necesidad de contar con modelos como herramienta de investigación de la dinámica atmosférica y del clima, para generar datos de entrada en modelos de otras áreas del saber en los que es necesaria información meteorológica como condición inicial.

En los modelos atmosféricos un componente importante para la simulación de la dinámica asociada a la capa límite planetario, y por ende de toda la dinámica atmosférica, es la característica de la superficie como el uso del suelo y la elevación. De la representación de estas dos características en los modelos, depende en gran medida la calidad de las simulaciones. De ahí que en la investigación, en las aplicaciones de pronóstico del tiempo o en el uso en otras áreas, es necesario incorporar una representación del uso del suelo y de la elevación lo más cercana a lo real.

Un modelo de amplio uso para investigaciones y para diferentes aplicaciones es el Weather & Research Forecasting (ver descripción del modelo en Anexo 1). En efecto, este modelo es utilizado en Colombia por diferentes grupos de investigación en estudios de dinámica atmosférica (Programa de Posgrado de meteorología), en aplicaciones sobre calidad del aire (grupo de Calidad de aire de ingeniería química), en la variabilidad y cambio climático (“grupo tiempo, clima y sociedad”) y en los pronósticos del tiempo (IDEAM, Fuerza Aérea Colombiana, Dirección Marítima y Portuaria), entre otros. También se utiliza por empresas privadas para diversos pronósticos. Dado este amplio uso, los resultados del modelo tienen una gran trascendencia para los procesos relativos a la vida nacional como en aspectos de la producción y reducción de desastres. A manera de ejemplo, se puede señalar la importancia que tienen los pronósticos para la Sabana de Bogotá, que concentra más de un 1/4 de la población colombiana y en la que se producen el 29.3 % del PIB del país (DANE 2012).

Esta importancia señala la necesidad de explorar cómo el modelo tiene representado el uso del suelo y la elevación del país, mejorar esta representación con bases de datos propias de Colombia que por ser un país andino cuenta con sus peculiaridades tanto en la topografía como en la cobertura vegetal y explorar el efecto de los cambios de estas características en las variables de salida como son la temperatura y precipitación.

La necesidad señalada arriba motivó el desarrollo del presente trabajo, cuyo objeto es la incorporación de datos de entrada propios en el modelo WRF para que produzca información más confiable tanto en la predicción climática como en la generación de datos de entrada para diferentes modelos de simulación como por ejemplo en dispersión de contaminantes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Por qué es importante tener en cuenta el uso del suelo y elevación en los modelos climáticos?

Las imágenes satelitales permiten obtener diferentes tipos de información de la superficie terrestre, en donde se encuentra la posibilidad de diferenciar distintas coberturas/ usos del suelo.

En la figura 1 se muestra a manera de ejemplo la variabilidad de la cobertura del suelo en dos épocas diferentes y como esta nueva cobertura (Capa de hielo) afecta las condiciones climáticas como es en el caso del deshielo de los glaciares y su incidencia en el cambio climático global.



Figura 1 Fotos satelitales que evidencian el retroceso del hielo entre 1950 y 2006 en el glaciar Conejera, Norte del nevado Santa Isabel. Parque nacional de los nevados Colombia. (Barrera Silva, 2010UN periódico edición impresa 130)

El uso del suelo determina características de la superficie terrestre como la humedad de la capa superficial del suelo, la regulación del balance de radiación del sistema superficie-atmósfera, los flujos de masa (Vapor de agua o CO₂) y energía

(Calor) entre este sistema y la rugosidad que controla la energía cinética de la atmósfera, principalmente (Velocidad del Viento).

La afectación del sistema climático, a través de la cobertura y uso del suelo, se resume en dos grandes categorías: procesos biogeoquímicos, que incluyen las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂ y CH₄, y procesos biofísicos tales como la modificación del albedo de la superficie del suelo (Pabón & al., 2010).

Todos estos parámetros del uso de suelo son tenidos en cuenta en las diferentes ecuaciones, como por ejemplo las de balance de energía que constituyen el modelo WRF. Por ello es necesario tener los datos más cercanos a la realidad para que los resultados de las simulaciones sean más acordes con los datos esperados.

En el modelamiento atmosférico y climático es necesario considerar el papel que la cobertura de la superficie juega en el balance de radiación que controla los diversos procesos de interacción superficie-atmósfera, como también sucede con las condiciones topográficas de diferentes zonas del país que son propias de la cordillera de los Andes.

En Colombia se ejecuta el modelo WRF sin la modificación de los datos estáticos como los son los usos y elevación, tan solo se configuran las parametrizaciones de las ecuaciones que se usan en meteorología esto se observa al revisar diferente literatura colombiana como (Rincon 2012), (Aristizabal 2010), (Uribe 2012) y consultar las instituciones gubernamentales encargadas de monitorear estos fenómenos como es el IDEAM.

Es necesario integrar información del uso de suelo y topografía propios de Colombia al modelo WRF para mejorar los datos de salida de este, ya que las investigaciones que se están desarrollando en el país están orientadas a la parametrización de las ecuaciones físicas de la atmósfera y no trabajan con las variables estáticas del modelo como lo son la elevación y usos del suelo.

3. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El modelo WRF fue desarrollado en el año 2000 (MICHALAKES 2001) es un modelo que permite hacer investigación y predicción en datos meteorológicos. Este modelo ha sido desarrollado por diferentes grupos de investigación en los Estados Unidos. Su primera versión fue lanzada con el propósito de reemplazar al modelo MM5 (The Fifth-Generation NCAR / PennState Mesoscale Model) y de obtener mejores predicciones meteorológicas a mesoescala. Su administración está a cargo de la UCAR (University Corporation for Atmospheric Research) y la NCAR (National Center for Atmospheric Research). (NCAR 2010).

Es de libre acceso y para obtenerlo sólo se requiere hacer un registro en su página web: <http://www.wrf-model.org/development/development.php>.

Este modelo está catalogado de meso-escala de última generación, el cual realiza predicción numérica del tiempo y está diseñado para servir como herramienta de investigación atmosférica. Este cuenta con núcleos dinámicos múltiples, un sistema de asimilación de datos con variación en 3 dimensiones (3DVAR) y un estructurado software que tiene en cuenta el paralelismo computacional y la expansibilidad del sistema WRF. Este es adecuado para un amplio espectro de aplicaciones a través de escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros, además es de dominio público y está disponible para toda la comunidad gratuitamente.

En el ámbito colombiano, en el último decenio en particular, se ha generado un “boom” en cuanto a la utilización de modelos meteorológicos y climáticos para diversos propósitos. No obstante, en la mayor parte de los estudios con modelos se utiliza la información o configuración que viene por defecto por parte de las entidades desarrolladoras de los modelos, y no se repara en el hecho de que esa información, difiere de la realidad regional y local donde se aplica estos modelos.

El modelo WRF tiene un amplio uso en diferentes instituciones y soporta procesos importantes de la actividad socioeconómica nacional y la vigilancia y alerta de

fenómenos extremos, así como la calidad del conocimiento generado por grupos de investigación y consultores privados.

A nivel nacional, la entidad encargada de realizar la investigación y apoyo al Ministerio del Medio Ambiente y al Gobierno Nacional en las temáticas ambientales (donde se incluyen la vigilancia y pronóstico de los comportamientos atmosféricos), es el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, cuya misión es generar información y conocimiento para asesorar la toma de decisiones sobre el uso sostenible de los recursos, mediante moldeamientos o pronósticos que alerten sobre condiciones que puedan generar desastres.(IAvH et al, 2011)

En la Universidad Nacional de Colombia varios grupos de investigación trabajan con el modelo WRF en varias temáticas, se destaca el grupo de investigación de calidad de aire de la Facultad de Ingeniería con registro en Colciencias, una línea de investigación está relacionada con la implementación de modelos de distribución de contaminantes en la cual sus datos de entrada son parámetros climáticos que influyen la dispersión de contaminantes.

Como se anotó, en el caso de los pronósticos existen aún desaciertos que pueden estar relacionados con la información de Estados Unidos y que utilizan estos modelos. Es necesario mejorar las bases de entrada del modelo para optimizar los resultados de salida y generar la posibilidad de realizar diferentes escenarios de uso del suelo. Con esto se logra fortalecer la capacidad tecnológica nacional para producir información meteorológica más acertada a partir del modelo WRF.

4. MARCO TEORICO

Los modelos meteorológicos son una herramienta para el pronóstico del estado del tiempo y representan un acercamiento a la realidad de lo que se espera del estado físico de la atmósfera en el futuro cercano. Los modelos pueden estar subestimando, sobrestimando o representando someramente las condiciones de las variables meteorológicas, inclusive de tiempo presente en sus condiciones iniciales.

Los fenómenos atmosféricos se caracterizan por una gran variedad de escalas espaciales y temporales. En meteorología, la escala espacial oscila entre el orden milimétrico y el tamaño de la tierra en la dirección horizontal y el total de la atmósfera en la dirección vertical. En lo concerniente a la escala temporal, el rango varía desde los segundos hasta varios meses o años. Estas escalas se clasifican generalmente en tres amplias categorías denominadas: microescala, mesoescala y macroescala, a veces, se usan términos tales como local, regional y global para caracterizar las escalas atmosféricas y los fenómenos asociados a ellos.

Un modelo de mesoescala es un modelo numérico de predicción del tiempo, que trata de simular la atmosfera en una escala espacial y temporal la cual espacialmente oscila en los centenares de kilómetros y temporalmente de horas a días. Por ser un modelo numérico de la atmosfera tiene su fundamento en la dinámica atmosférica, la cual se basa de la mecánica y termodinámica de fluidos (Uribe, 2012).

Los modelos que se usan en el país en la entidad encargada del pronóstico del clima IDEAM son WRF (Weather Research and Forecasting) el MM5 (Mesoscale and Microscale V5) y por último el GFS (Global Forecast System) que es un modelo de baja resolución espacial de la NOAA (Ruiz, 2009)

Este modelo (WRF) realiza cambios de escala en la modelización de tiempo atmosférico y clima, partiendo de una escala global (Dominios) a otras escalas locales las cuales están anidadas.

El anidamiento del WRF y del MM5 nos permite realizar cambios de diferentes escalas y para ello se debe cumplir con la condición que los dominios internos estén totalmente contenidos en los otros dominios, es un error que los dominios se traslapen (PSU, 2005) como se puede apreciar en la figura 2 con el dominio 4.

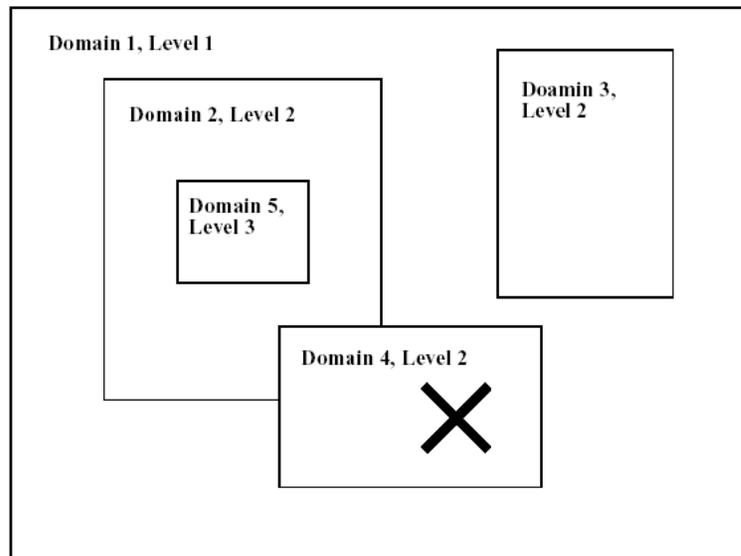


Figura 2 Distribución de los dominios en el modelo WRF

Algunas de las ventajas que tiene el modelo WRF para realizar las simulaciones

- Permite que los procesos de escala fina resueltos en los dominios anidados afecten el flujo de escala sinóptica, es decir, afecten al dominio grueso.
- Debido a que las soluciones en el dominio principal (Dominio 1) toman poco tiempo computacional y recurso de memoria RAM, las condiciones del modelo se pueden ubicar alejadas del centro del dominio de simulación de la zona de estudio, es por esto la influencia de los errores de las condiciones de frontera dentro del área de interés se reducen.
- El uso de estas condiciones de frontera dentro de un modelo con las mismas bases físicas y dinámicas reducen la influencia de errores asociados con datos más antiguos. Por esto, las capacidades de anidamiento del WRF han permitido que datos con alta resolución sean corridos sobre áreas limitadas, de esta forma, los campos meteorológicos generados por WRF se usan para alimentar modelos de calidad de aire. (Rincón, 2012)

Dado que se pretende utilizar el modelo WRF para clima simulado (y en el modo climático para simulación del clima nacional), en la elaboración de escenarios de cambio climático, así como también para la generación de datos para alimentar otros modelos, como lo son los de calidad de aire; es necesario incorporar información sobre el uso del suelo y altimetría adecuada en la zona de estudio ya que actualmente se usan las variables estáticas que vienen por defecto en los pronósticos que se realizan en las entidades gubernamentales encargadas del estudio del clima como el IDEAM.

En la atmósfera existen cientos de procesos y características que no son resueltas por los modelos, ya que suceden en escalas inferiores a la de la configuración de este o no pueden ser simuladas explícitamente mediante las ecuaciones propias del mismo. A pesar que el modelo no puede resolver estos procesos es clave tenerlos en cuenta ya que estos logran incidir en las variables de salida del modelo y de esta manera alterar la circulación atmosférica. En este caso dichos procesos han de ser calculados a través de alguna señal que pueda ser observada mediante los parámetros calculados por el modelo en los puntos de retículas, esta acción recibe el nombre de "parametrizar".

Entre los procesos más importantes que deben ser parametrizados para realizar las simulaciones se encuentran:

Radiación solar incidente, dispersión por aerosoles y moléculas, absorción atmosférica, reflexión y absorción por las nubes, emisión de radiación de onda larga desde la superficie terrestre, condensación, turbulencia, reflexión y absorción en la superficie terrestre, nieve, agua en el suelo/deshielo, cobertura de agua, hielo o nieve, topografía, evaporación, vegetación, propiedades del suelo, lluvia, rugosidad de la superficie, flujo de calor sensible, convección profunda, emisión de radiación de onda larga desde las nubes, capa límite planetaria.

Cada uno de los procesos anteriores posee uno o más esquemas de parametrización y es deber del usuario de los diferentes modelos escoger que tipo de parametrización debe ser aplicada en sus simulaciones.

Las variables que tienen en cuenta los parámetros de elevación y que se modificaron, son las siguientes: HGT_M, HGT_V, HGT_U, datos de elevación interpolado en la retículas M, V, U en metros y SLPX, SLPY, que son componentes del gradiente de elevación se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1 Variables de elevación a modificar en archivo *.nc

HGT_M	Topographic height on the mass grid points
HGT_U	Topographic height on the U grid points
HGT_V	Topographic height on the V grid points
SLPX	Sub-gridscale mean topographic slope in x-direction df/dx
SLPY	Sub-gridscale mean topographic slope in y-direction df/dy

Fuente: Elaboración propia, modificado de los manuales del modelo WRF, Versión 3.3

El manejo de la variable de elevación en el modelo WRF tiene unas condiciones específicas como son las retículas de interpolación, las cuales son escalonadas (Staggeredgrid) y Gradientes en dirección X y Y. En la tabla 2 se muestran estas retículas con su arreglo matricial y en la figura 3 la posición de los arreglos.

Tabla 2 Arreglo matricial variable elevación en WRF para retículas de interpolación

Arrayindex	Staggering	Corner
1	Mass	Lower-left
2		Upper-left
3		Upper-right
4		Lower-right
5	U	Lower-left
6		Upper-left
7		Upper-right
8		Lower-right
9	V	Lower-left
10		Upper-left
11		Upper-right
12		Lower-right
13	Unstaggered	Lower-left
14		Upper-left
15		Upper-right
16		Lower-right

Fuentes: ARW Description of the Advanced Research WRF Version 3 Chapter 3 2008

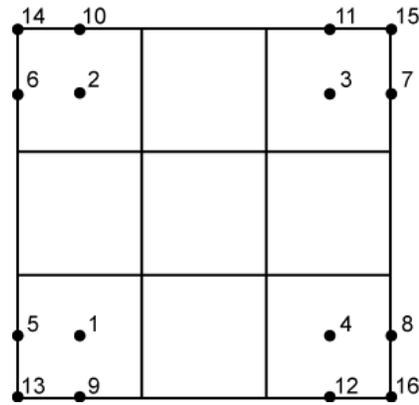


Figura 3 Espacialización arreglo matricial tabla 1 para retículas de interpolación (ARW 2008)

Los puntos Mass son los puntos que se generan con las coordenadas definidas en el “*namelist*”, los puntos U son los componentes en la coordenada X y los V son los del componente en la coordenada Y, en la figura 4 se muestran la retículas horizontales y verticales

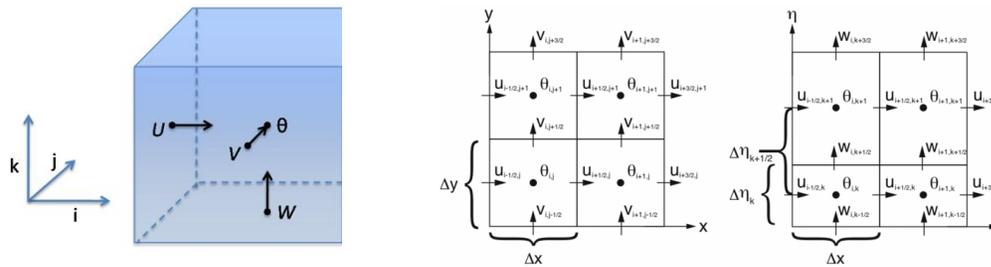


Figura 4 Retícula horizontal y vertical del WRF (ARW 2008)

Estas retículas se generan con las parametrizaciones que se han configurado en el archivo *namelis.wps* que se ejecuta con el programa *geogrid.exe*. Las retículas se traslapan para poder realizar los cálculos en los bordes de los dominios ver figura 5.

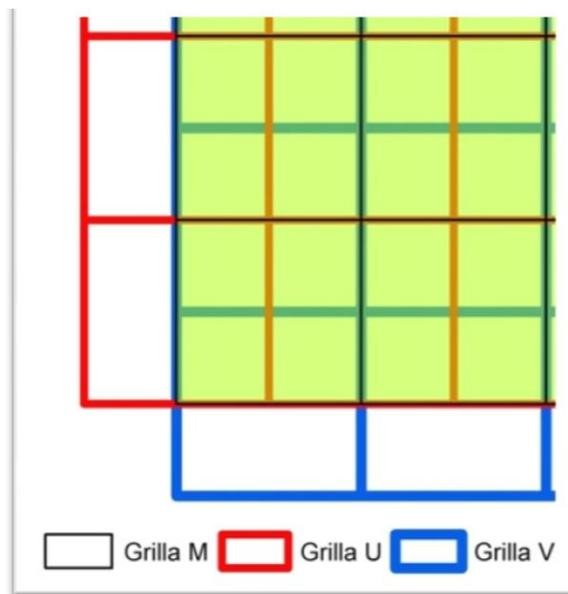


Figura 5 Traslape de las retículas M,U, y V

Los gradientes que se generan en dirección X y Y son la variación que se tiene en estas direcciones con respecto a la altitud (Z). En un entorno inmediato, se puede escribir como:

$$Z = a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y$$

De esta expresión se pueden despejar estos coeficientes de la variable Z con respecto a X y Y.

$$a_{10} = dZ/dX; \quad a_{01} = dZ/dY;$$

Por lo tanto estos coeficientes representan la tasa de cambio de la Z respecto a los ejes X y Y.

Los datos de uso del suelo tienen dos formas de ser cargados en el modelo, la primera forma es usando la clasificación de la United States Geological Survey– USGS, la cual usa el sensor AVHRR con una clasificación de 24 categorías; y la otra el Instrumento Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer- MODIS (NASA 2004) con 20 categorías. Estas clasificaciones están basadas con las coberturas del suelo establecidas por la USGS en los Estados Unidos de América.

Para este trabajo se escogen las cobertura/uso del suelo del MODIS, dado que son las que cuentan con más resolución espacial, 0.250 Km (visible e infrarrojo), en comparación con el del USGS que cuenta con una resolución espacial de 1.1 Km. En cuanto a la resolución espectral, el MODIS presenta 36 canales en comparación con el AVHRR que tiene 6 canales (<http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=54075>). En el modelo WRF el número de categorías que se usan para el MODIS (20) y el USGC (24) son diferentes y las que más se asemejan a la clasificación del IGAC es MODIS (Barona 2006), además la información del MODIS es más reciente en comparación con el USGS. El MODIS también representa mejor las zonas urbanas que en nuestro caso tiene gran influencia porque la investigación se desarrolla en la sabana de Bogotá que es una gran urbe. (Pabón 2011).

El manejo de la variable uso del suelo en el modelo WRF tiene unas condiciones específicas. Las que tienen en cuenta los parámetros de elevación y se modifican son las siguientes: LANDUSEF, LU_INDEX, LANDMASK ver tabla 3.

La primera variable contiene los usos del suelo expresados en matrices de porcentaje de cada categoría, la segunda con el máximo valor del uso del suelo en la retícula respectiva y la última el enmascaramiento que se realiza con la capa agua.

Tabla 3 Variables de usos del suelo a modificar en archivo *.nc

LANDUSEF	Proporción uso del suelo por cada celda matriz por uso
LU_INDEX	USO del suelo más representativo de la celda
LANDMASK	Máscara de uso del suelo (Cuerpos de agua)

Fuente: Elaboración propia

En el WRF se pueden escoger dos tipos de bases de usos: los del USGS y los del MODIS. En la investigación se decidió trabajar con la base del MODIS ya que los datos son más actualizados y el sensor tiene mejor resolución espectral. En la tabla 4 se muestra la clasificación usada por el MODIS-WRF.

Tabla 4 Categorías de uso y cobertura del suelo MODIS-WRF

IGBP-Modified MODIS 20-category Land Use Categories		
Land Use Category	Land Use Description	Descripción uso del suelo
1	EvergreenNeedleleafForest	Bosques *Coníferas (siempre verdes)
2	EvergreenBroadleafForest	Bosque **Latifoliado (siempre verdes)
3	DeciduousNeedleleafForest	Bosques Coníferas (pierden hojas)
4	DeciduousBroadleafForest	Bosque Latifoliado (pierden hojas)
5	MixedForests	Bosques Mixtos
6	ClosedShrublands	Matorrales Cerrados
7	Open Shrublands	Matorrales Abiertos
8	WoodySavannas	SabanasLeñosas
9	Savannas	Sabanas
10	Grasslands	Pastizales
11	PermanentWetlands	Humedales Permanentes
12	Croplands	Tierra Cultivo
13	Urban and Built-Up	Zona Urbana
14	Cropland/Natural VegetationMosaic	Cultivos /mosaicovegetación natural
15	Snow and Ice	Hielo y Nieve
16	Barren orSparselyVegetated	Estéril o Baja vegetación
17	Water	Agua
18	Wooded Tundra	Tundra Arbolada
19	Mixed Tundra	Mezcla de Tundra
20	Barren Tundra	Tundra Estéril

*Coníferas: pinos, **Latifoliado: hojas anchas

Fuente: Elaboración propia

La parametrización de los datos para definir las retículas como el tipo de base de uso del suelo, la base de topografía, y las relaciones de los dominios se configuran en un archivo de texto plano y se ejecuta el programa “geogrid.exe” en la figura 6 se muestra esta parametrización.

```
&geogrid
parent_id      = 1, 1, 2,
parent_grid_ratio = 1, 3,      3,
i_parent_start  = 1, 8, 27,
j_parent_start  = 1, 9, 28,
s_we           = 1, 1,      1,
e_we           = 45, 85, 97,
s_sn           = 1, 1,      1,
e_sn           = 45, 85, 97,
geog_data_res='modis_30s+10m','modis_30s+2m','modis_30s+30s',
dx = 9000,
dy = 9000,
map_proj = 'mercator',
```

```
ref_lat = 4.6,  
ref_lon = -74.00,  
truelat1 = 4.6,  
geog_data_path = '/home/jose/programa/datogeo'
```

Figura 6. Parámetros de configuración geogrid.exe

En muchos estudios de simulaciones con WRF realizados alrededor del mundo toman las bases de datos que vienen por defecto con el modelo como son casos en el Perú (Gonzales 2014) en Chile (Illanes, 2010) Colombia (Uribe, 2012), Italia (Gsella, 2014), China (Jingbiao 2014) y muchos otros. Las investigaciones están orientadas a la parametrización de las diferentes ecuaciones de la dinámica atmosférica.

Se encuentran diferentes trabajos en la asimilación de varias fuentes de uso del suelo para modelos de mesoescala, ya sea para el WRF o para el MM5, donde la resolución de la información de uso mejora notablemente, puesto que se obtienen de investigaciones locales y no las bases mundiales que son más generalizadas (Casellas, 2005).

En el estudio realizado por (Jeong et al 2010) hace referencia a otros autores como "*Kim (2009) donde informa que una mejor resolución afectó los resultados del modelo WRF en los terrenos accidentados y zonas de rejilla fina. Jeong y Kim (2009) indicaron que la mejora de la cobertura de la tierra provocó un cambio de temperatura en amplias zonas del interior y una región cerca del mar, y las zonas estrechas a lo largo de la línea costera*" estos son trabajos realizados en la península surcoreana.

También se presentan estudios donde simulan cambios o ubicaciones de estructuras como es en el caso del estudio de la simulación de un parque eólico en donde cambian los usos y las condiciones geofísicas para simular las turbinas (Marcelo 2009).

También es necesario modificar la elevación y así lograr mejorar la resolución espacial de los datos de entrada, en este caso se usara el modelo SRTM cuya resolución es de 30 metros para toda Colombia.

Cuando se quieren mejorar las simulaciones en micro-meteorología es necesario tener información más precisa tanto en elevación como las variaciones menos generalizadas de uso del suelo (Xiaohang 2011).

Cuando las condiciones de terreno son muy complejas se puede mejorar la resolución espacial de la elevación en el modelo WRF incorporando información mucho más detallada como es en el caso de Mendoza – Argentina.

En la figura 7 se aprecian las diferencias en los usos del suelo, el color rojo indica la parte urbana de ciudad de México de la base del WRF fuente USGS y el color azul la base del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, en los resultados de temperatura se identifica la variación en temperatura que puede oscilar entre 0.2 grados hasta los 5 grados centígrados este es el caso del crecimiento de la ciudad de México y su área metropolitana (López, 2011).

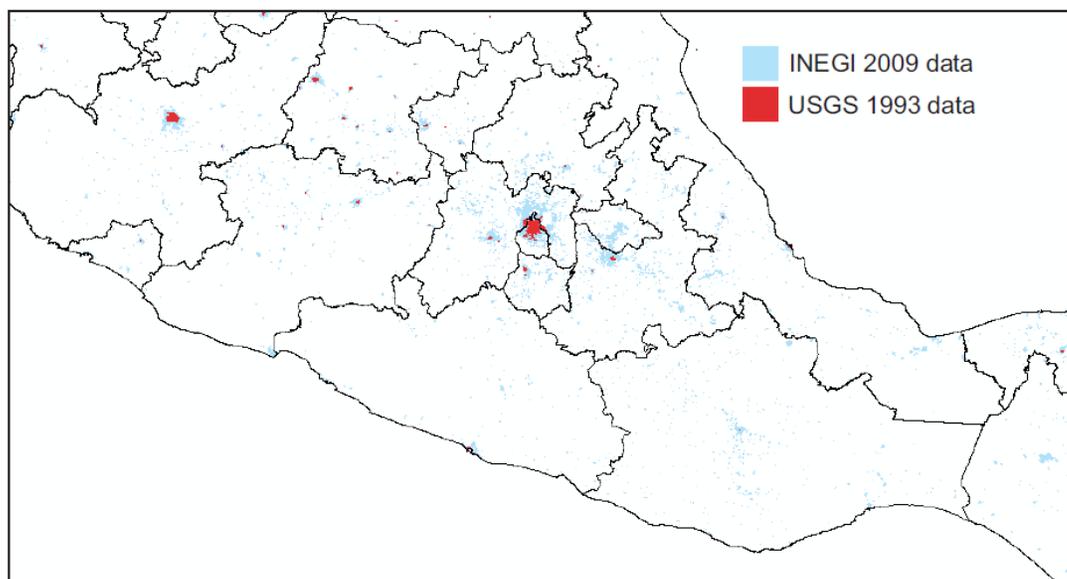


Figura 7 Uso de suelo urbano de la ciudad de México de dos fuentes diferentes USGS 1993 y INEGI 2009 Fuente: López 2011

En el estudio realizado por (Demeij, 2014) se muestra el impacto del uso del suelo urbano en los resultados de la simulación y como las bases descargadas por defecto varían con las fuentes locales. En la figura 8 en la parte superior (A) están las bases del Corine Land Cover y en el (B) las del USGS, aunque en el estudio también

modifican altura con datos del SRTM no se aprecian grandes modificaciones porque la superficie es muy plana y no presenta una topografía con grandes accidentes geográficos. Este cambio en la mejora de la resolución espacial mejora los datos de salida en temperatura y precipitación.

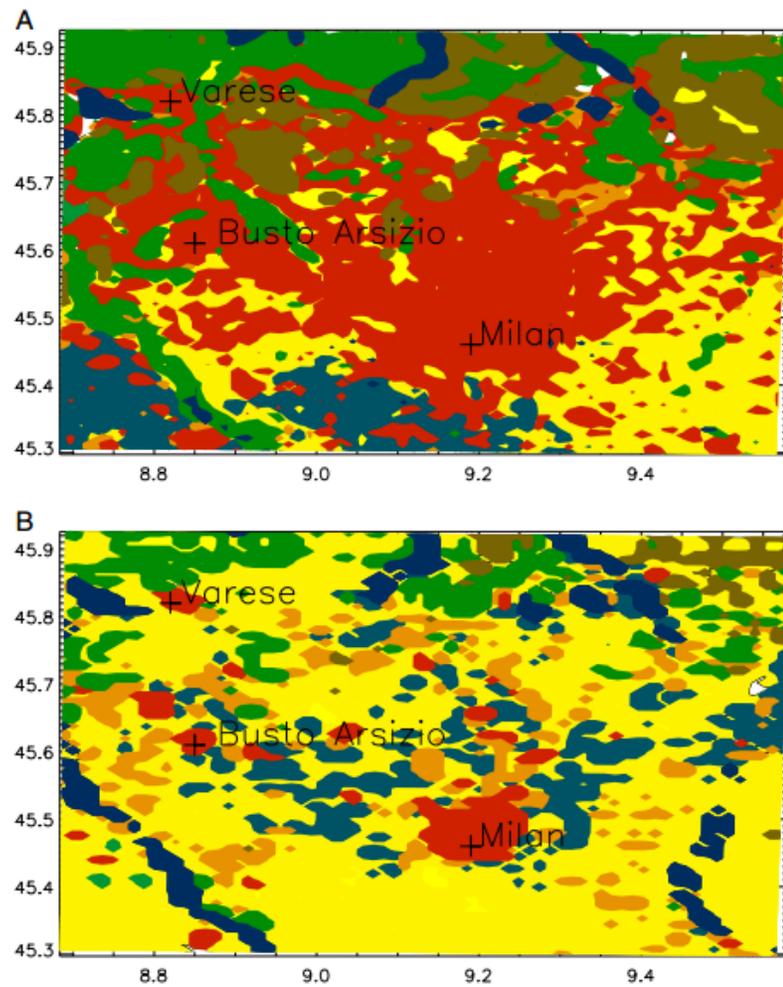


Figura 8 Uso de suelo de la ciudad de Milán -Italia A) Corine Land Cover B) USGS En rojo es Zona urbana Fuente: Demeij 2014

5. OBJETIVOS

5.1 General

- a) Analizar las variaciones producidas en el clima simulado por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting) para la Sabana de Bogotá al modificar las variables estáticas de la Geo-Database uso del suelo/cobertura vegetal y elevación.

5.2 Específicos

- a) Integrar la altimetría y usos del suelo/cobertura vegetal de la sabana de Bogotá con la clasificación usada por el modelo WRF.
- b) Estimar datos climáticos con el modelo WRF para la sabana de Bogotá en cuatro (4) escenarios.
- c) Determinar las correlaciones espaciales de los resultados de la modelación climática de las variables de temperatura y precipitación con los cambios de uso del suelo y altimetría.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación se ha aplicado el método científico deductivo, a partir del planteamiento de un procedimiento en el que se explica la forma para modificar los datos de entrada estáticos (Usos del suelo/Elevación) del modelo WRF, para posteriormente evaluar su impacto en la variables de salida pronosticadas de temperatura T2 y precipitación RAINNC.

En este sentido, como insumos básicos para la aplicación del procedimiento que aquí se describe, se requiere conocer el funcionamiento de los modelos de simulación y pronósticos que se ejecutan a través del software WRF, además de las habilidades y capacidades necesarias para el manejo del programa SIG (Sistema de Información Geográfica) y programación.

La versión usada del WRF en la investigación, es la 3.3 lanzada en abril del 2011. Para su ejecución se utilizó un computador TOSHIBA, Core i7 con 8 Gb de RAM, donde para cada escenario se demoró 3 días, los tiempos de la ejecución del modelo se pueden disminuir cuando se utiliza más capacidad de hardware(Figueroa 2012).

Por otra parte, los principales aspectos metodológicos, se pueden resumir en lo siguiente:

En principio, ha sido necesario recopilar los fundamentos teóricos del funcionamiento del software WRF a fin de contar con la capacidad técnica y lógica para utilizarlo en forma más provechosa y productiva.

Del mismo modo, también ha sido necesario contar con el apoyo y acompañamiento constante del grupo de investigación de calidad de aire de la Universidad Nacional de Colombia, adscrito al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la misma, así como con la colaboración de docentes y estudiantes de la Maestría de Meteorología de la Universidad Nacional de Colombia.

Respecto de la obtención de bases de datos, debe precisarse que estas son necesarias para poder ejecutar el modelo, por lo tanto, en el desarrollo de esta investigación, las bases de datos iniciales de las condiciones locales de Colombia para la región de la sabana de Bogotá, han sido remplazadas por las bases de datos con información más precisa y real, que son administradas y recopiladas por entidades oficiales como el IGAC y el IDEAM.

6.1 Área de estudio.

La investigación se desarrolló en la parte central del territorio Colombiano específicamente en las cordilleras central y oriental, el valle interandino del río de La Magdalena y el pie de monte llanero, donde se ubica la zona llamada sabana de Bogotá, toda vez que, el área de intervención y simulación permite y posibilita la selección de diferentes características topográficas y condiciones económicas como zonas urbanas, cultivos y bosques, que se ven reflejadas en los diferentes tipo de usos del suelo.

En lo que se refiere a la definición de la retícula de estudio donde se desarrollará la investigación, se aclara que esta se compone de tres dominios anidados: el primer dominio con una longitud de 396 Km, el segundo de 252 Km y el tercero 96 Km; todos concentrados como punto central en la ciudad de Bogotá ver figura 9.

De esta manera, la retícula de estudio analizada genera una superficie de 156.816 Km² para el primer dominio, 65.025 Km² para el segundo dominio y 9.216 Km² para el tercer dominio. Estos dominios se pueden apreciar de manera más explícita en la figura 9.

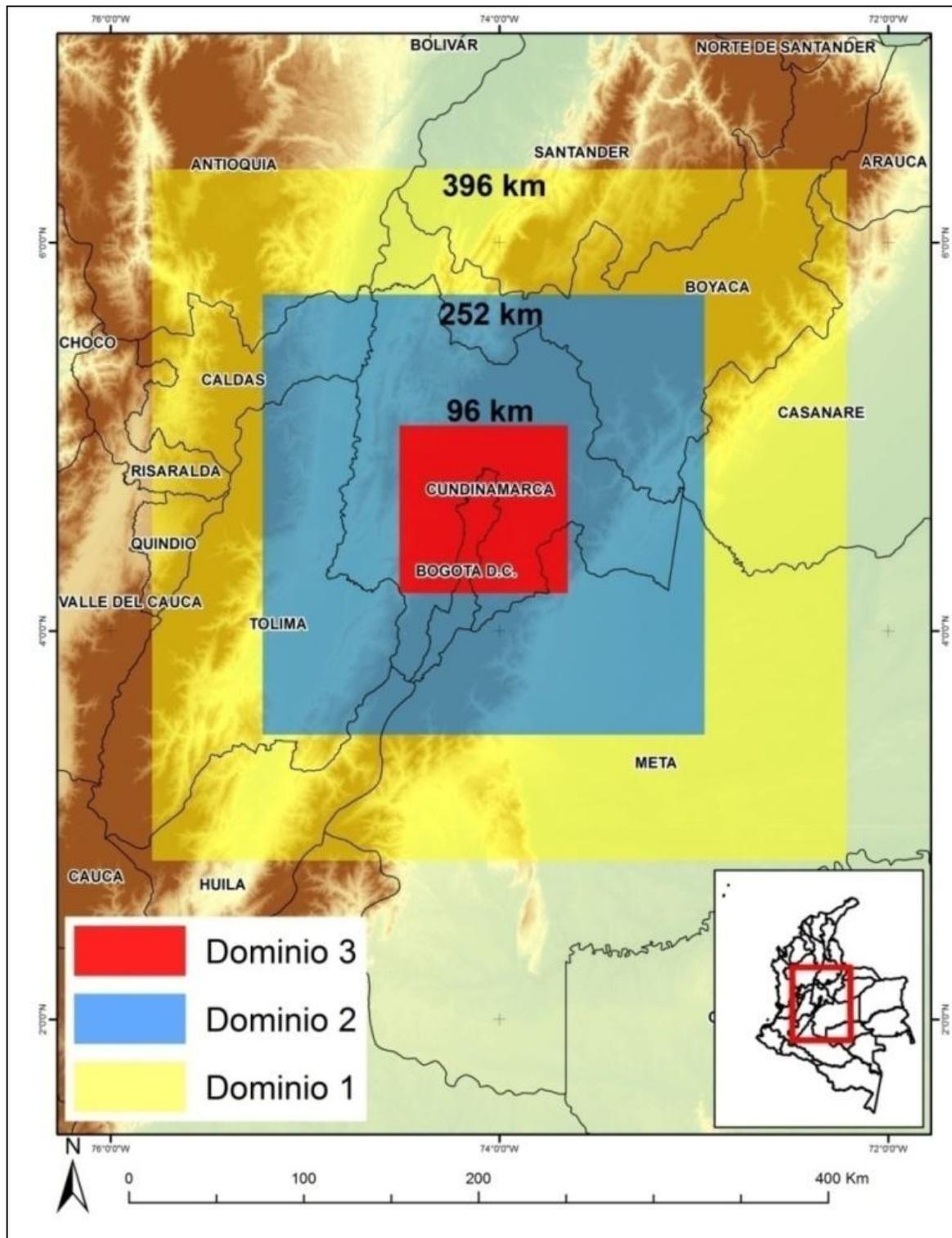


Figura 9 Retículas de dominios – Área de trabajo

Ahora bien, una vez definidos los aspectos sustanciales (Definición del software, y delimitación de la retícula de estudio), se usarán diferentes valores de retícula para ejecutar el modelo WRF. El primer dominio será de 9 Km, el segundo dominio de 3 Km y el tercero de 1 Km; los cuales se harán en múltiplo de tres para poder tener relación espacial entre las retículas (ARW 2012).

6.2 Tipos de archivos de trabajo.

Al ejecutar el modelo WRF, se realizaron algunas pruebas de verificación tales como la lectura de los archivos modificados por parte del programa, la salida coherente de los valores de las variables de estudio, para posteriormente ejecutarlo incorporando las diferentes fuentes modificadas; y la evaluación de los resultados a partir de un ejercicio de simulación de modelos y representación de diferencias encontradas.

Los archivos NetCDF (*.nc) están contruidos en forma de múltiples matrices en donde cada matriz representa una variable. Por ejemplo para el caso de las categorías de uso, cada una de estas están representadas por matrices individuales, lo cual nos obliga a construir matrices para cada categoría de uso del suelo.

Para poder modificar estos tipos de archivos sin errores, es necesario modelarlos con el software *MATrixLABoratory*–MatLab, ya que este software permite leer y sobrescribir archivos *.nc. Para poder realizar estas modificaciones se escriben rutinas por medio de códigos y de esta manera ejecutar las operaciones. Estos códigos son de extensión *.m. Un ejemplo de estos códigos se muestra en la figura 10.

```

Editor - C:\copia\maestria\tesis_maestria_meteoro\modelo\general_datos.m
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
- 10 + + 11 x
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 %REVISAR CUAL DOMINIO Y CUAL GRILLA SE TRABAJAN
3 %YA SEA M, O, V,
4 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
5 %CARGO DATOS DEL NETCDF
6 Dlat=ncread('geo_em.d01.nc','XLAT_V');
7 Dlog=ncread('geo_em.d01.nc','XLONG_V');
8 Dhgt=ncread('geo_em.d01.nc','HGT_V');
9 [f,c]=size(Dlat); % tamaño de grilla
10 Maxlat=max(max(Dlat)); %maximo en latitud
11 Minlat=min(min(Dlat)); %minimo en latitud
12 Maxlog=max(max(Dlog)); %maximo en longitud
13 Minlog=min(min(Dlog)); %minimo en longitud
14
15 %GENERAL COORDENADAS
16 %LATITUD
17 P_latI=(Dlat(1,2)-Dlat(1,1));
18 I_lat=Minlat-P_latI/2;
19 P_lat=P_latI;
20 V_lat=[];
21 for n=1:1:c-1
22     V_lat=[V_lat I_lat];
23     P_lat=(Dlat(1,n+1)-Dlat(1,n));
24     I_lat=I_lat+P_lat;
25 end
26 V_lat(1,c)=I_lat; %para formular la ultima coordenar
27 V_lat(1,c+1)=I_lat+P_lat;
28 V_lat;
29 x=Dlog(1,1)-((Dlog(2,1)-Dlog(1,1))/2);%encontrar la longitud para min LOG
30 for n=1:1:c+1
31     V_lat(2,n)=x;
32 end
33 for n=1:1:c
34     V_lat(5,n)=Dlog(1,n);
35 end
36 %complemento 2 fila de latitud
37 p=1;
38 for n=c+2:1:2*c+2
39     V_lat(1,n)=V_lat(1,p);
40     p=p+1;
41 end
42 x=Dlog(f,1)+((Dlog(f,1)-Dlog(f-1,1))/2);%encontrar la longitud para max L
43 for n=c+2:1:2*c+2

```

Figura 10 Ejemplo de código MatLab

Para ejecutar el modelo WRF se modifican los archivos NetCDF (*.nc) resultado del pre-procesamiento WPS tanto para la variable de elevación como para la del uso del suelo.

Cuando se ejecuta el programa geogrid.exe se genera un archivo de salida por cada dominio; geo_em.d01.nc, geo_em.d02.nc, geo_em.d03.nc. La codificación del nombre del archivo de salida se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Formato salida datos .nc

geo	Prefijo datos geográfico
d01	El domino al cual pertenece
.nc	Extensión NetCDF

Fuente: Elaboración propia.

Para desplegar los atributos que tienen los archivos podemos usar varios programas en nuestro caso el software MatLab en su versión 2012, este ya incluye el modulo incorporado para leer y escribir archivo *.nc con el comando "ncdisp" ver figura 11.

```

MATLAB R2012a
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Folder: E:\tesis\altura_usos
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> ncdisp('geo_em.d01.nc')
Source:
      E:\tesis\altura_usos\geo_em.d01.nc
Format:
      64bit
Global Attributes:
      TITLE = 'OUTPUT FROM GEOGRID V3.2.1'
      SIMULATION_START_DATE = '0000-00-00_00:00:00'
      WEST-EAST_GRID_DIMENSION = 65
      SOUTH-NORTH_GRID_DIMENSION = 65
      BOTTOM-TOP_GRID_DIMENSION = 0
      WEST-EAST_PATCH_START_UNSTAG = 1
      WEST-EAST_PATCH_END_UNSTAG = 64
      WEST-EAST_PATCH_START_STAG = 1
      WEST-EAST_PATCH_END_STAG = 65
      SOUTH-NORTH_PATCH_START_UNSTAG = 1
      SOUTH-NORTH_PATCH_END_UNSTAG = 64
      SOUTH-NORTH_PATCH_START_STAG = 1
      SOUTH-NORTH_PATCH_END_STAG = 65
      GRIDTYPE = 'C'
      DX = 9e+02
      DY = 9e+03
      DYN_OPT = 2
      CEN_LAT = 9.6
      CEN_LON = -74
      TRUCLAT1 = 9.6
      TRUCLAT2 = 1e+20
      HORD_CEN_LAT = 9.6
      STARD_LON = 1e+20
  
```

Figura 11 Ejemplo de despliegue archivo *.nc en MatLab Comando ncdisp('geo_em.d01.nc')

Se generaron más de 1500 líneas de código para ejecutar rutinas y poder extraer información de los archivos NetCDF, creando matrices que pudieran ser leídas en el Software ArcGIS, con los módulos desarrollados con la herramienta Model Builder. Se

realizaron 14 modelos cuyo resultado fue automatizar el proceso, cambiando el uso del suelo y elevación a cualquier dominio (no solamente los dominios de esta investigación).

En cuanto al desarrollo de los aplicativos en un Sistema de Información Geográfica SIG, el cual integra, almacena, edita, analiza, comparte y muestra la información geográficamente referenciada, se realizan las diferentes operaciones espaciales de esta investigación. Estos sistemas son muy utilizados en la espacialización de diferentes variables, incluidas las climáticas (Boshell et al 2011).

Por lo tanto, en este trabajo se usa el SIG ArcGIS, con sus diferentes funciones de análisis, este Software utiliza los archivos *.shp con los cuales se puede trabajar en una geodatabase *.mdb o *.gdb. en este software se programan rutinas con su módulo "Model Builder". En la figura 12 se aprecia un esquema de este módulo. Estos módulos se realizan con el fin de integrar la información del SRTM y las coberturas del uso del suelo con la información que arroja el pre-procesamiento del WRF y de esta manera automatizar los procesos.

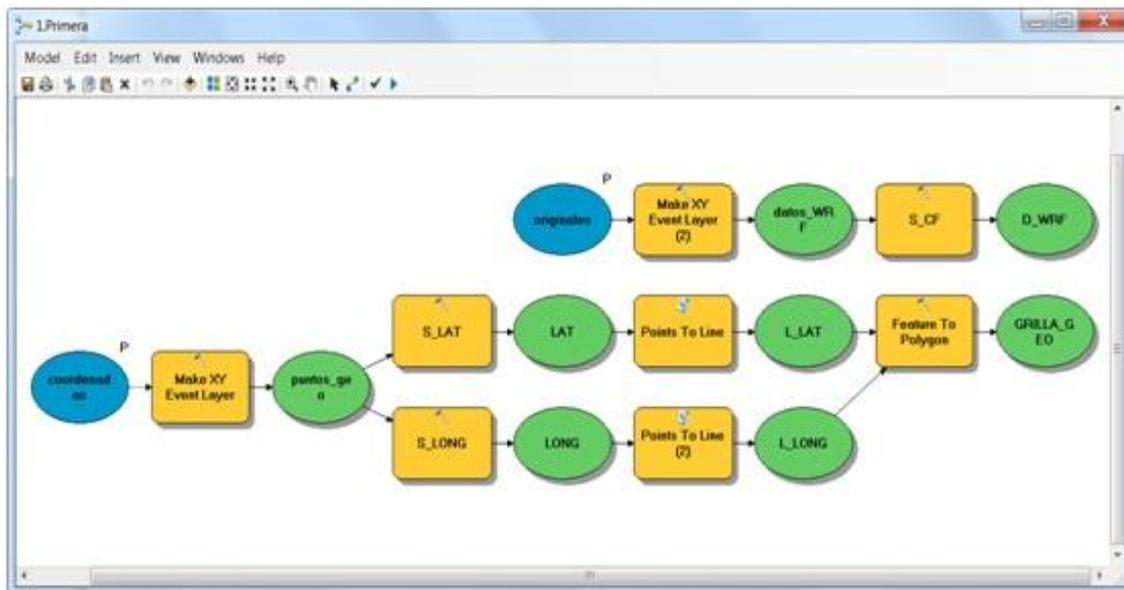


Figura 12 Ejemplo de modulo Model Builder desarrollado en ArcGIS para crear rutinas lógicas.

No obstante, debe señalarse que el WRF, necesita para su manipulación contar con buenos equipos de cómputo de buena capacidad tanto en RAM como en

procesadores puesto que realiza millones de iteraciones en los cálculos atmosféricos (Ruiz Murcia 2009). Para la investigación se utilizó un equipo TOSHIBA Corei7 con 8 Gb en RAM con el cual se pudo hacer bien la manipulación de los archivos y ejecutar los procesos.

6.3 Escenarios de simulación.

Con los datos modificados se ejecuta el modelo en cuatro (4) escenarios diferentes sin modificar la configuración de los parámetros climáticos, solo se modifican las variables estáticas, que como ya se ha dicho, en nuestro caso son: El uso del suelo y la elevación:

- i) El modelo con los valores de elevación y uso del suelo que se descargan de las bases estadounidenses.
- ii) Se varían los datos de elevación SRTM y se dejan los datos del uso del suelo sin modificar.
- iii) Se varían los datos del uso del suelo IGAC y se dejan los datos de elevación sin modificar.
- iv) Se cambian los datos de elevación SRTM y uso del suelo IGAC.

6.4 Diagrama General.

Para lograr los objetivos de la investigación se interactúa con diferentes software en diferentes momentos, los archivos generados a partir de módulo de WPS del WRF son modificados en Matlab, luego en ArcGIS y se cargan nuevamente en el WRF con ayuda de MatLab.

En la figura 13 se muestra el diagrama del flujo empleado en el trabajo, este consta de dos partes: la primera es la modificación de los datos de elevación y la segunda los procesos en la modificación de los datos del uso del suelo.

La información utilizada es la generada en la etapa de pre-proceso, con la cual se genera un archivo *.nc; de este archivo se extraen las coordenadas de las retículas, los datos de elevación y los usos del suelo para los 3 dominios.

Con los datos de las coordenadas se reconstruyen las retículas en ArcGIS (*.shp) para poder relacionar espacialmente los datos de elevación locales extraídos del SRTM y los datos del uso del suelo suministrados por el IGAC.

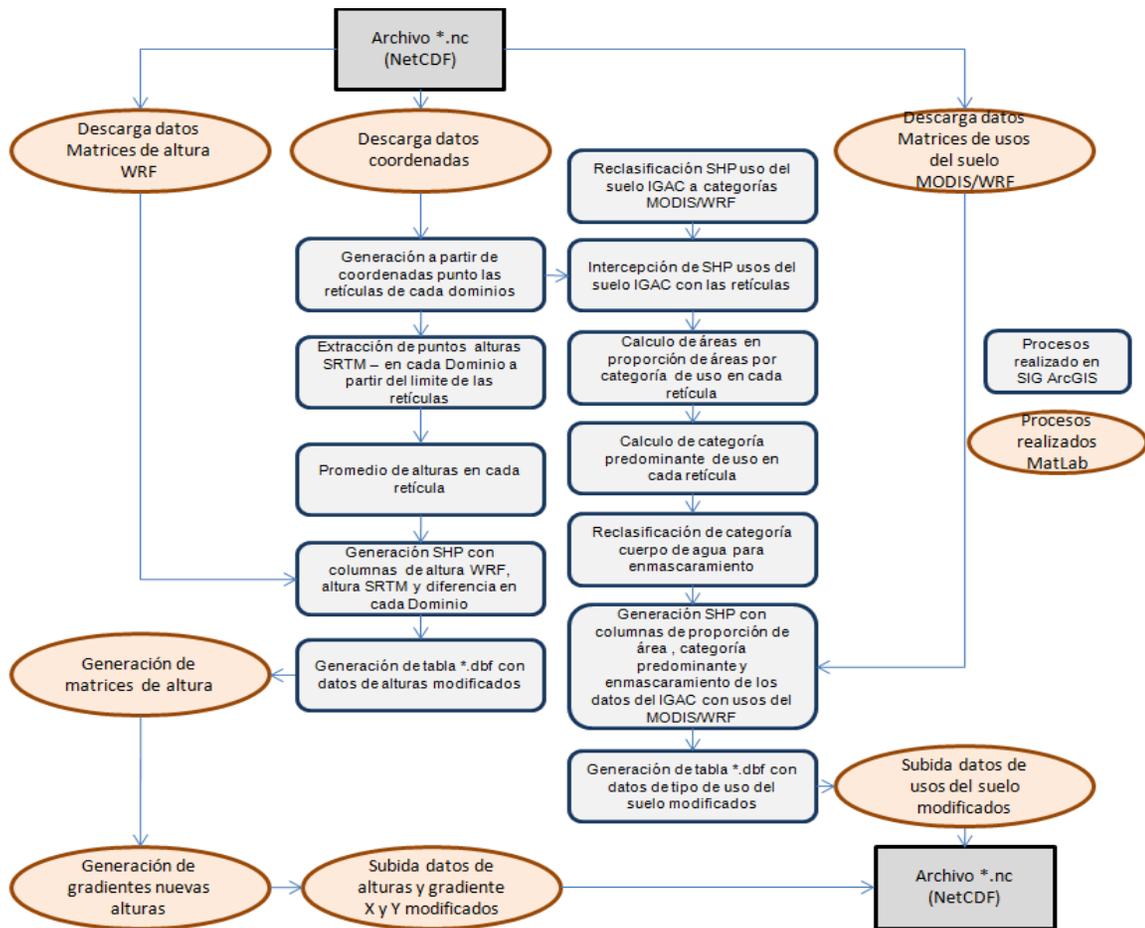


Figura 13 Diagrama de flujo del procedimiento

En el caso de las variables de elevación, al unir las retículas generadas con los datos de elevación y los datos del SRTM, en cada retícula quedan muchos puntos de altura. En este caso se realiza un promedio de altura para generar un solo valor de altura por retícula y luego se compara con los provenientes del archivo *.nc.

En los .shp se genera una nueva columna, en la cual se calcula la diferencia entre las alturas que se descargan por defecto y las alturas suministradas por el SRTM. Como resultado se obtienen las diferencias de altura de las dos bases. Estos nuevos datos generados se exportan en una tabla .dbf la cual es subida en forma de matriz en MatLab y se realiza el cálculo del gradiente en X y Y, finalmente se cargan estos nuevos datos nuevamente a .nc

Para la modificación de usos del suelo se toman nuevamente las retículas generadas con las coordenadas y se hace una unión con los usos del suelo IGAC para poder determinar cuáles son los usos del suelo que están en cada retícula y se re-calculan las áreas a cada una de ellas para determinar la proporción de cada tipo de uso del suelo en cada retícula.

Otra matriz que está relacionada con el uso del suelo es la del uso de mayor predominio en cada retícula, para esta se realiza el cálculo de la categoría con más área en cada retícula y se genera una tabla *.dbf que posteriormente es subida al *.nc

Por último se realiza la matriz de enmascaramiento que consiste en la categoría de cuerpos de agua puesto que las ecuaciones que usa el WRF consideran si hay presencia de cuerpos de agua para sus cálculos ya que son diferentes cuando hay presencia de suelo, para no generar errores. Igual que los datos anteriores se genera una tabla de *.dbf, con el MatLab se suben los datos modificados al *.nc

6.5 Datos utilizados.

En cuanto a la variable de elevación es una de las más importantes, cuando se realizan modelos climáticos puesto que las condiciones del terreno hacen que se produzcan condiciones meteorológicas y climáticas locales que influyen en condiciones climáticas generales. Los datos de elevación se pueden obtener de diferentes formas, desde levantamientos topográficos en tierras, hasta la utilización de sensores desde el espacio.

En la investigación se toman los datos capturados por la misión Shutter Radar Topography Mission - (SRTM) de la NASA, cuyo resultado es un modelo digital de elevación DEM de todo el mundo hecho en febrero del 2000 con una resolución de 1 segundo de arco que equivale aproximadamente a 30 metros para USA y 3 segundos de arco para el resto del mundo (Farr 2006). Para Colombia en un convenio que realizó el IGAC se logró la resolución de 30 metros el cual se utilizó en la investigación. En la figura 14 se muestra la cobertura del SRTM

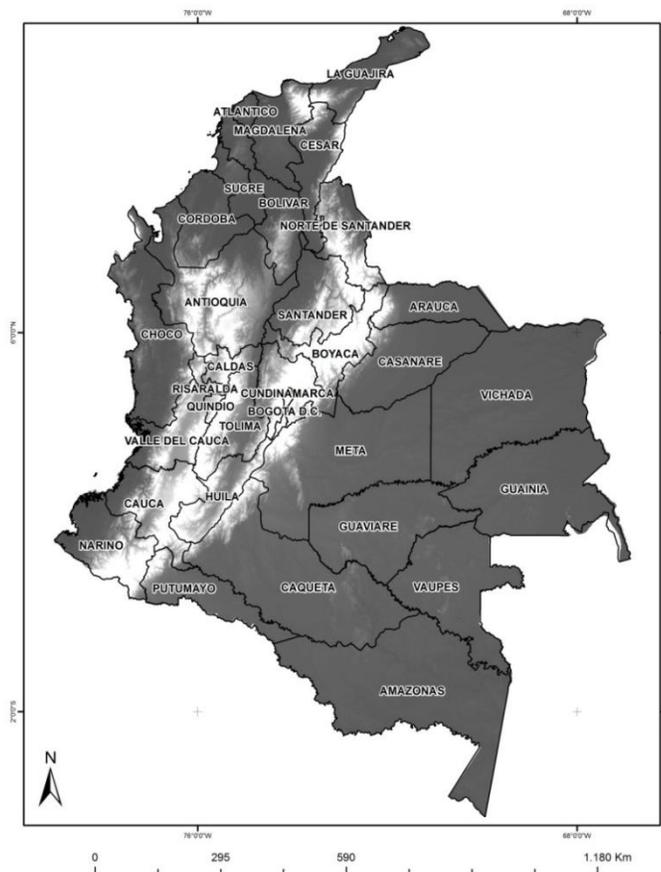


Figura 14 Región cobertura SRTM 30 metros

La información de usos del suelo tomada para realizar las modificaciones en el WRF fue los usos del suelo para toda Colombia, generados en el proyecto de "coberturas de la tierra, Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala

1:100.000 (IDEAM 2010). Estos usos fueron asimilados con las categorías del MODIS (20 Categorías) para correr el modelo WRF en época de verano.

Los datos de las variables estáticas de elevación y usos del suelo que usa por defecto el WRF son descargados de las bases estadounidenses en la página <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/>, estos datos son modificados para los diferentes escenarios de la siguiente forma: Se modifican primero los datos de elevación del SRTM y se dejan los datos del uso del suelo sin modificar; se corre la simulación, luego se varían los datos del uso del suelo IGAC y se dejan los datos de elevación sin modificar, finalmente se cambian los datos de elevación SRTM y uso del suelo IGAC.

Con las variaciones de los datos de entrada estáticos se comparan los resultados entre sí: La primera ejecución del modelo (i) con la segunda (ii), la primera (i) contra la tercera (iii) y la primera (i) contra la cuarta (iv), las variables de salida que se comparan son temperatura a dos metros (T2) y lluvia (RAINNC).

Es importante advertir que se escogen estas dos variables (Temperatura a dos metros y lluvia), porque son las variables más representativas en climatología, dado su impacto directo sobre la población y el desarrollo de las actividades humanas, aunado al hecho de que la temperatura está ligada con la elevación del suelo, y que la lluvia es un fenómeno que afecta directamente a la población rural en la rotación, aprovechamiento y productividad de los cultivos.

Con los resultados de los diferentes escenarios se toman decisiones respecto a la modificación de la GEODATABASE y su impacto en las modelaciones.

La temporalidad seleccionada para la simulación del modelo considera que en Colombia se tienen diferentes periodos de precipitación dependiendo de la zona del territorio. En este caso el régimen es bimodal en la precipitación, con máximos en abril y octubre y mínimos en enero y julio. En la figura 15 se puede apreciar la distribución de la precipitación en la estación del aeropuerto el Dorado.

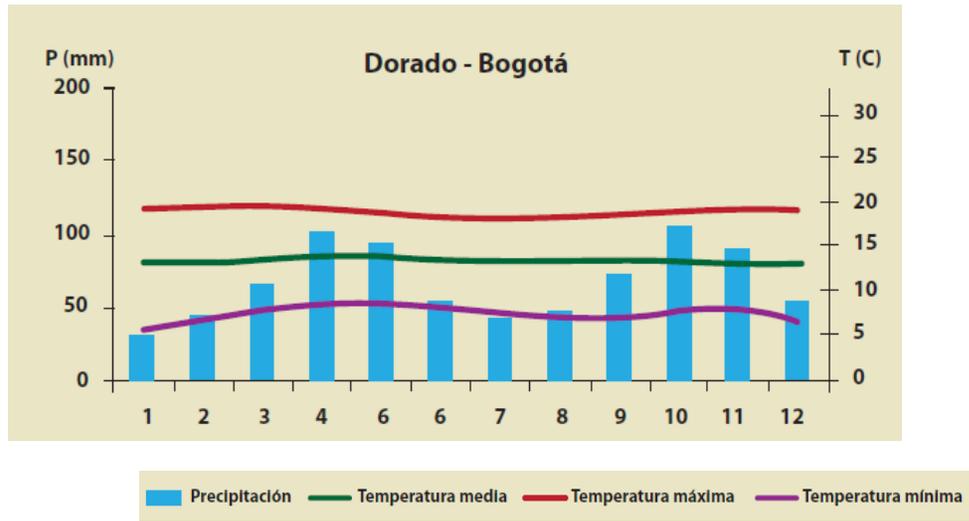


Figura 15 Distribución general precipitación en Bogotá (IAvH, IDEAM, IIAP, 2011)

Para ello, se toman fechas de los meses que presentan mayor precipitación, puesto que esta es una variable en el estudio, se toman los siguientes días para la simulación: 2005/04/20 Hora 00:00 al 2005/04/22 Hora 00:00 UTM. El modelo en hora de Colombia es del día 19 de abril del 2005 a las 7:00 p.m. hasta el día 21 de abril del 2005 a las 7:00 p.m.

La segunda fecha de ejecución del modelo se hace en los días 2005/09/28 Hora 00:00 al 2005/09/30 Hora 00:00 UTM. Esto quiere decir que se ejecuta el modelo en hora de Colombia el día 28 de septiembre del 2005 a las 7:00 PM hasta el día 30 de septiembre del 2005 a las 7:00 p.m.

Estas fechas se definen, usando el criterio de la fecha de los datos del uso del suelo que fueron procesados en su gran mayoría con imágenes satelitales de los años 2001/2002, por lo cual la fecha escogida para realizar la ejecución del modelo no podría estar muy lejana de estos años, ya que esto implicaría una variación significativa en los usos del suelo.

Se escogió esta fecha puesto que no se presentan los fenómenos del Niño y la Niña, lo cual modificaría los resultados por ser eventos atípicos como se muestra en la figura 16.

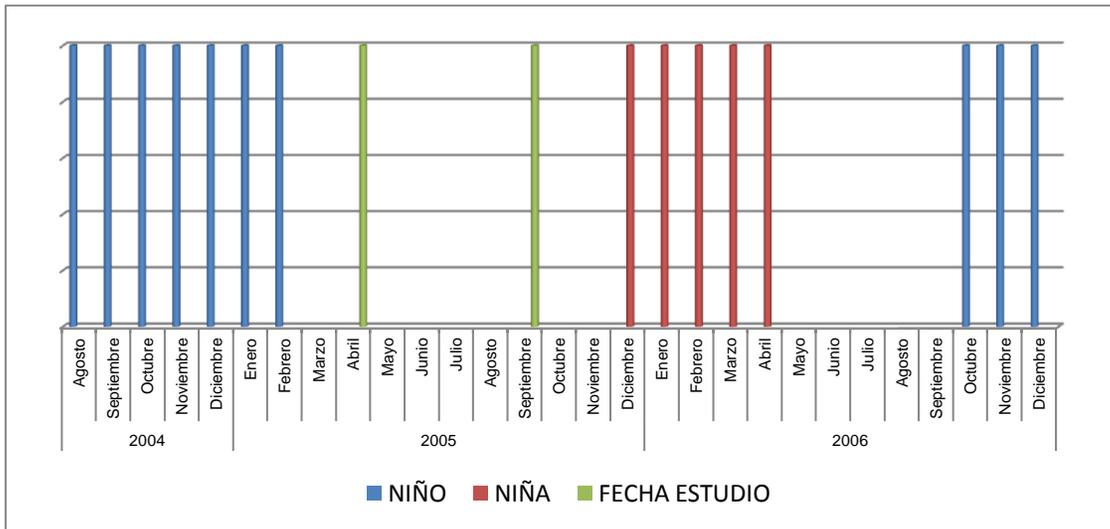


Figura 16 Temporalidad de eventos del fenómeno del Niño y la Niña 2004-2006

Para el análisis de resultados se evaluaron los datos del dominio 3 el cual es de mayor resolución espacial (1Km) puesto que el dominio 1 y 2 sirve para determinar las condiciones de frontera para los resultados internos en el dominio de interés.

El software SIG permite realizar los diferentes cruces de información espacial en donde se comparan los datos obtenidos en el modelo WRF simulados con datos no modificados versus los modificados en los 4 escenarios planteados. Para poder comparar los resultados de las simulaciones, se analizaron perfiles sobre el territorio para así identificar las variaciones de los diferentes resultados. Para esto se trazaron dos perfiles, el perfil A en dirección occidente a oriente para analizar los datos que están en el Valle del río Magdalena pasando por la Sabana de Bogotá y hacia el pie de monte llanero; y el perfil B con dirección Sur-Occidente –Nor-Oriente, pasando por el Valle del río Bogotá que es la zona de estudio y la que presenta más variabilidad en términos de altitud, en la figura 17 se puede ver la posición de los perfiles en el dominio 3.

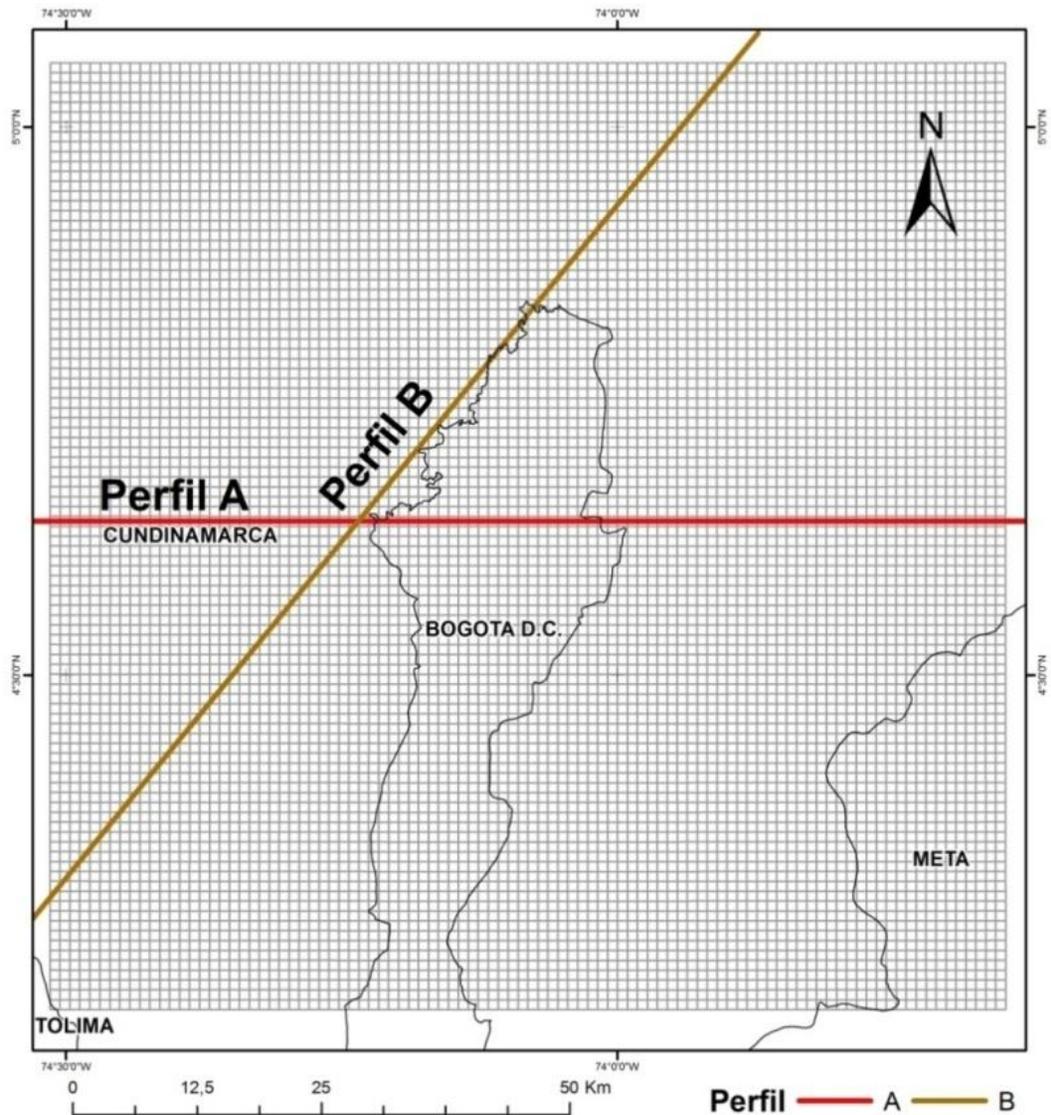


Figura 17 Perfiles de estudio para comparar resultados simulados

Para realizar la comprobación de los resultados con datos reales se tomaron datos de estaciones climáticas automáticas de la red del IDEAM de un total de 17 estaciones estudiadas, se realizó la comparación con 4 por falta de datos en las fechas de simulación. En la figura 18 se aprecian las estaciones climáticas que se tienen para el control de datos puesto que son las que tienen sensores de temperatura y precipitación.

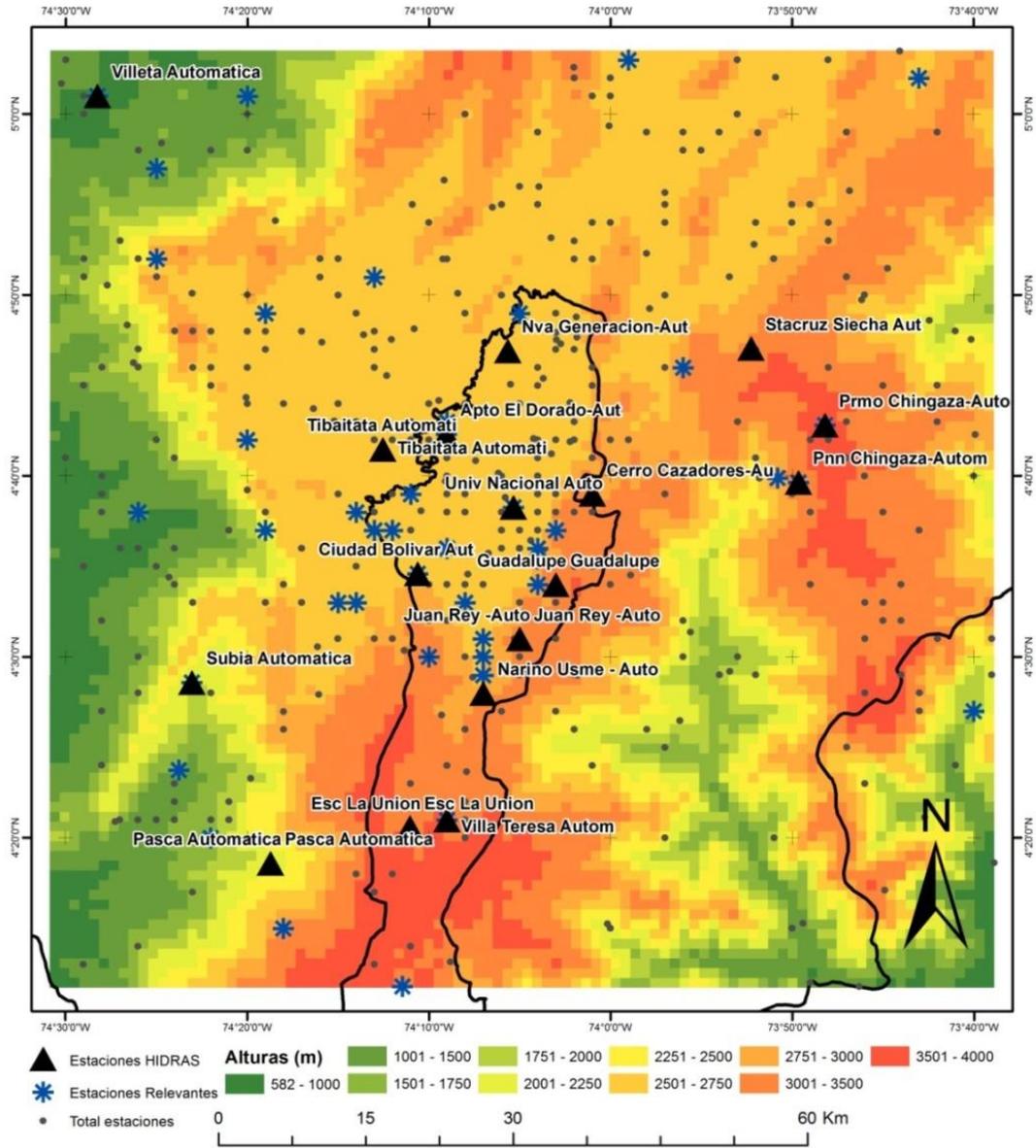


Figura18 Ubicaciones de estaciones climáticas

7. ANÁLISIS DE DATOS

Los datos que vienen por defecto en el WRF se comparan con la información de elevación del SRTM y los usos del suelo/cobertura vegetal del IGAC, estas diferencias son analizadas para poder encontrar las relaciones espaciales con la temperatura y precipitación.

7.1 Integración datos de elevación al WRF.

Al ejecutar los diferentes códigos de Matlab y ArcGis se obtuvieron los resultados en términos de elevación que muestra la figura 19. Los tonos azules del mapa (imagen inferior) significan que los datos de elevación que se descargan de la base estadounidense (Datos por defecto cuando se descarga el WRF) están subestimados, esto quiere decir que los datos presentan menor valor con respecto a la base del SRTM, los cuales son de mayor confiabilidad ya que se tomaron con sensores de mayor resolución. Se aprecia esta diferencia no solo en las cimas de las montañas de la cordillera central sino también en zonas de los valles interandinos como en el del Río Magdalena que sirve como límite del departamento de Tolima con los departamentos del Caldas y Quindío.

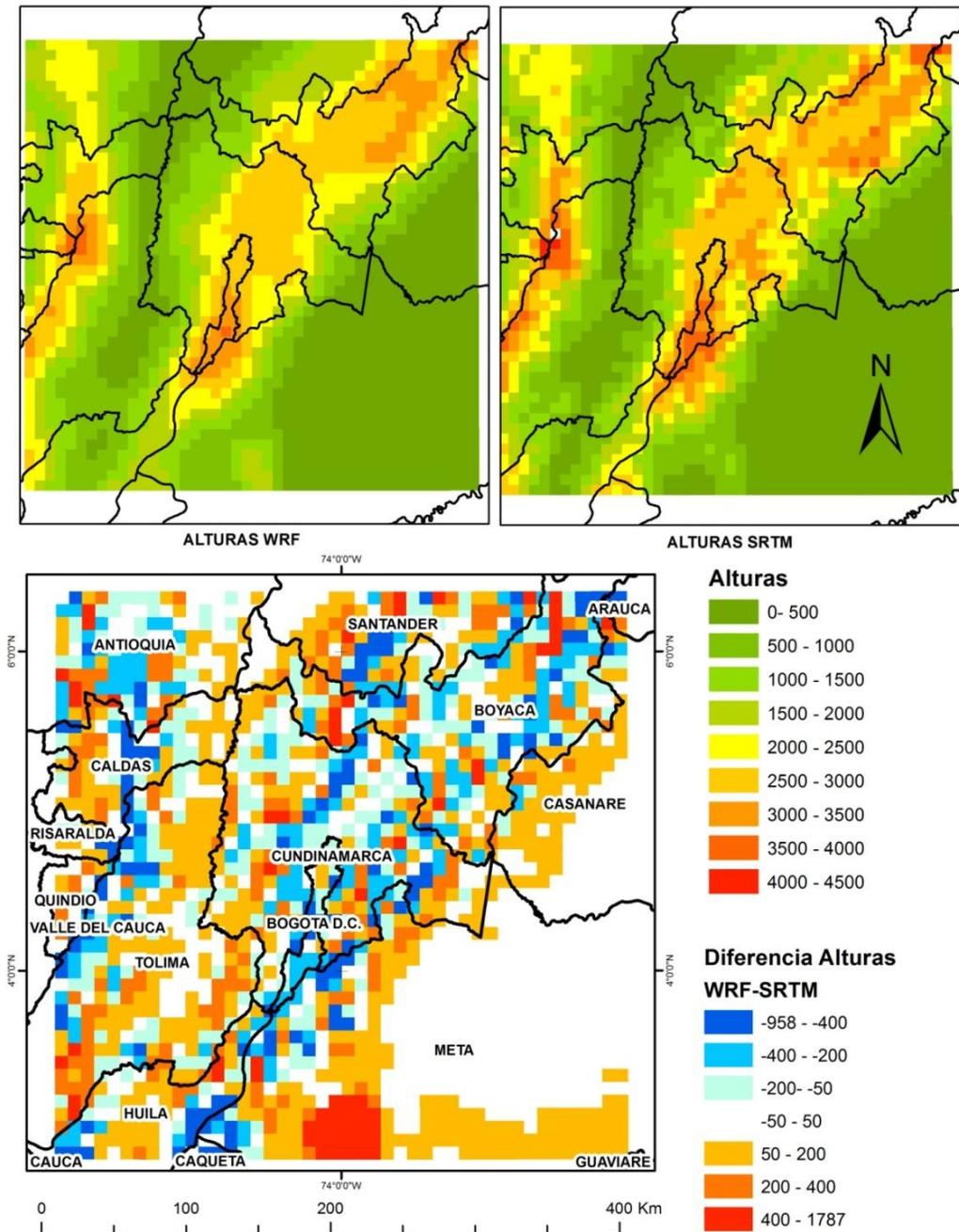


Figura 19 Diferencia de elevaciones entre WRF y base datos SRTM Dominio 1

En el mapa de diferencias se empieza a apreciar una mancha azul en el centro, que corresponde con el río Bogotá como aparece en la figura 20; igual que en la parte sur del mapa que corresponde con el páramo del Sumapaz, zona montañosa que supera los 4000 metros sobre el nivel del mar.

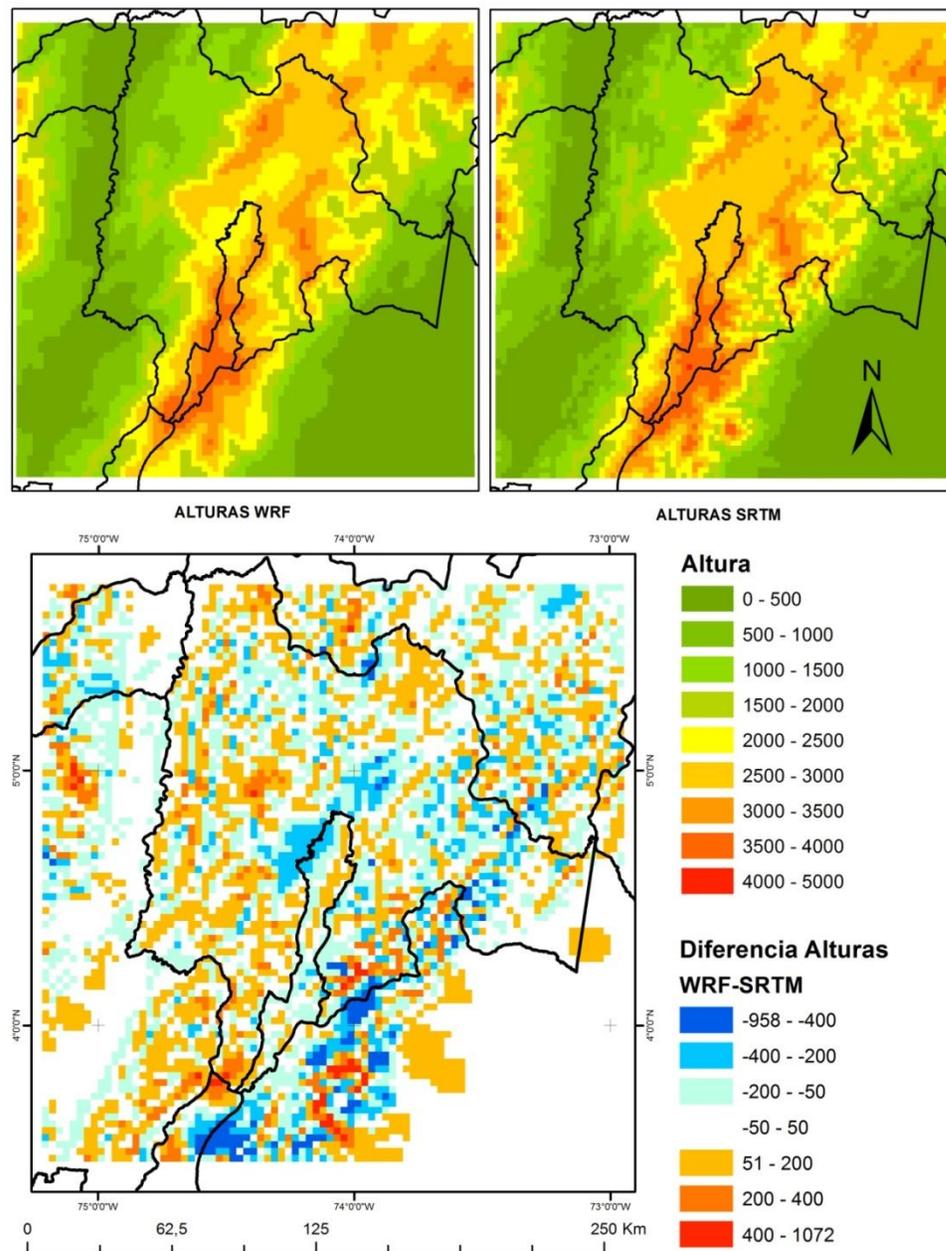


Figura 20 Diferencia de elevación entre WRF y base datos SRTM Dominio 2

En el dominio 3 figura 21 se nota con mayor resolución que los datos de la bases estadounidenses están sobreestimando el valle del rio Bogotá con una diferencia de más de 200 metros, por lo cual los cálculos que arroja el modelo se verán influenciados fuertemente por esta nueva condición de elevación.

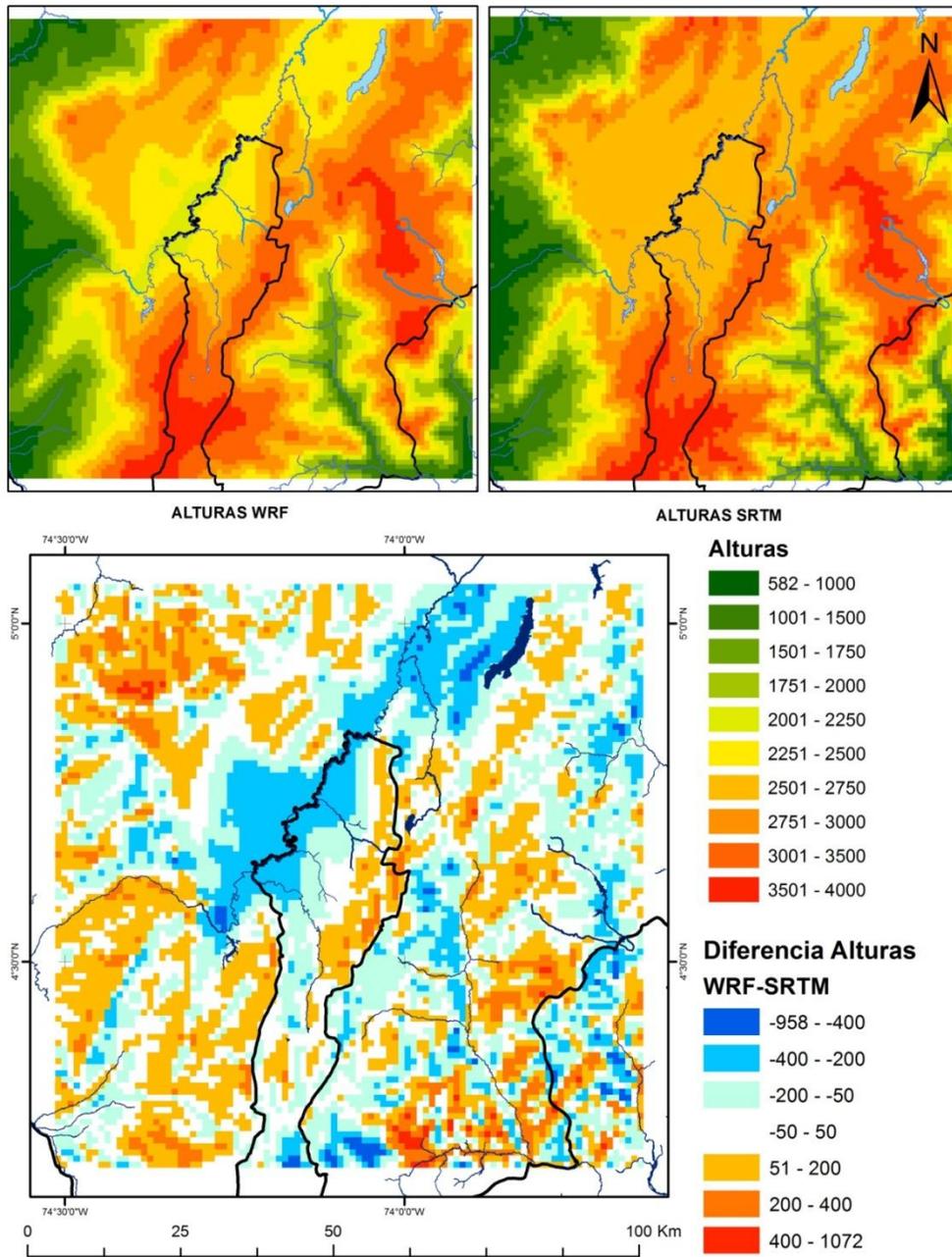


Figura 21 Diferencia de elevación entre WRF y base datos SRTM Dominio 3

Para apreciar dicha diferencia se genera una gráfica en 3D, la cual nos muestra la elevación de una manera más sencilla de comprender ver figura 22; en donde se aprecia el casco urbano de la ciudad de Bogotá y la Sabana.

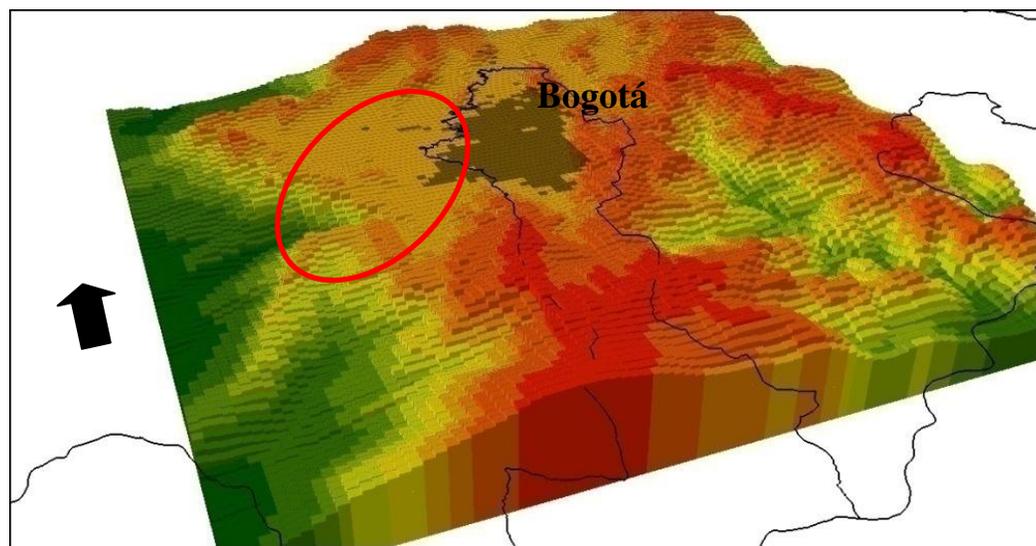
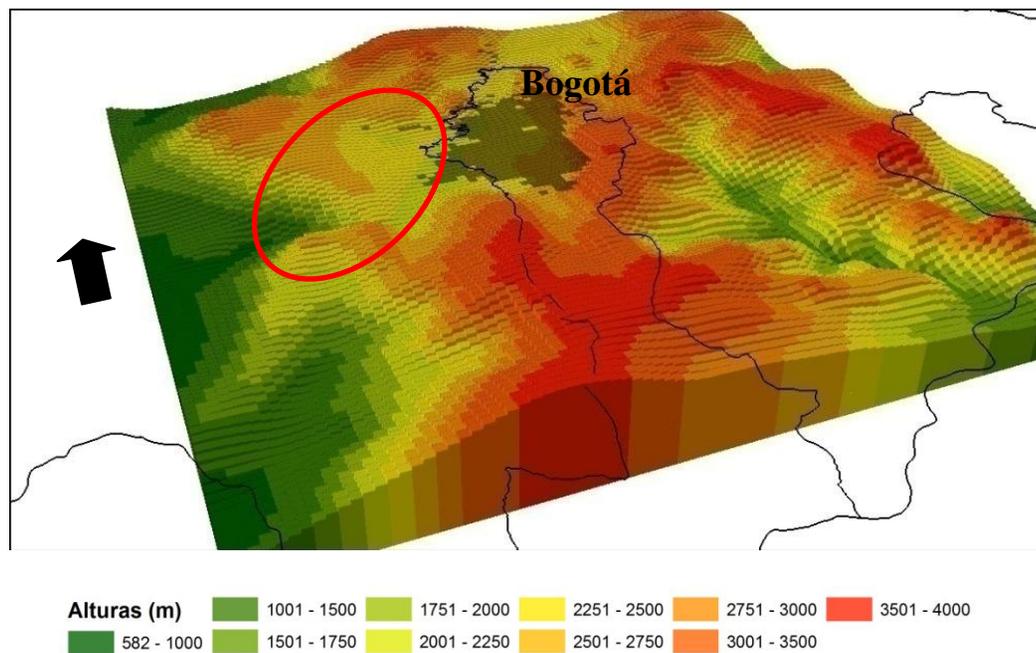


Figura 22 Diferencia elevaciones 3D entre WRF y base datos SRTM dominio 3

Otras de la variables que utiliza el modelo WRF y que tienen relación con la elevación son SLPX y SLPY, las cuales son gradientes de elevación y derivadas primeras de la altitud con respecto a los ejes (x, y).

$$SLPX=dZ/dx,SLY=dx/dy$$

Estos valores representan la tasa de cambio de la altitud con respecto a los ejes X y Y. Estas variables son calculadas en cada punto de retícula. Para su cálculo se utilizó

un algoritmo que tiene internamente el software MatLab. Este cálculo se hace sobre las elevaciones modificas puesto que representa el cambio de los ejes X y Y de los nuevos datos de altura.

Al realizar la modificación de los componentes en el eje X se mejora la resolución de los datos y esto se ve refelejado en la definición de la resolución de las imágenes comparadas en la figura 23.

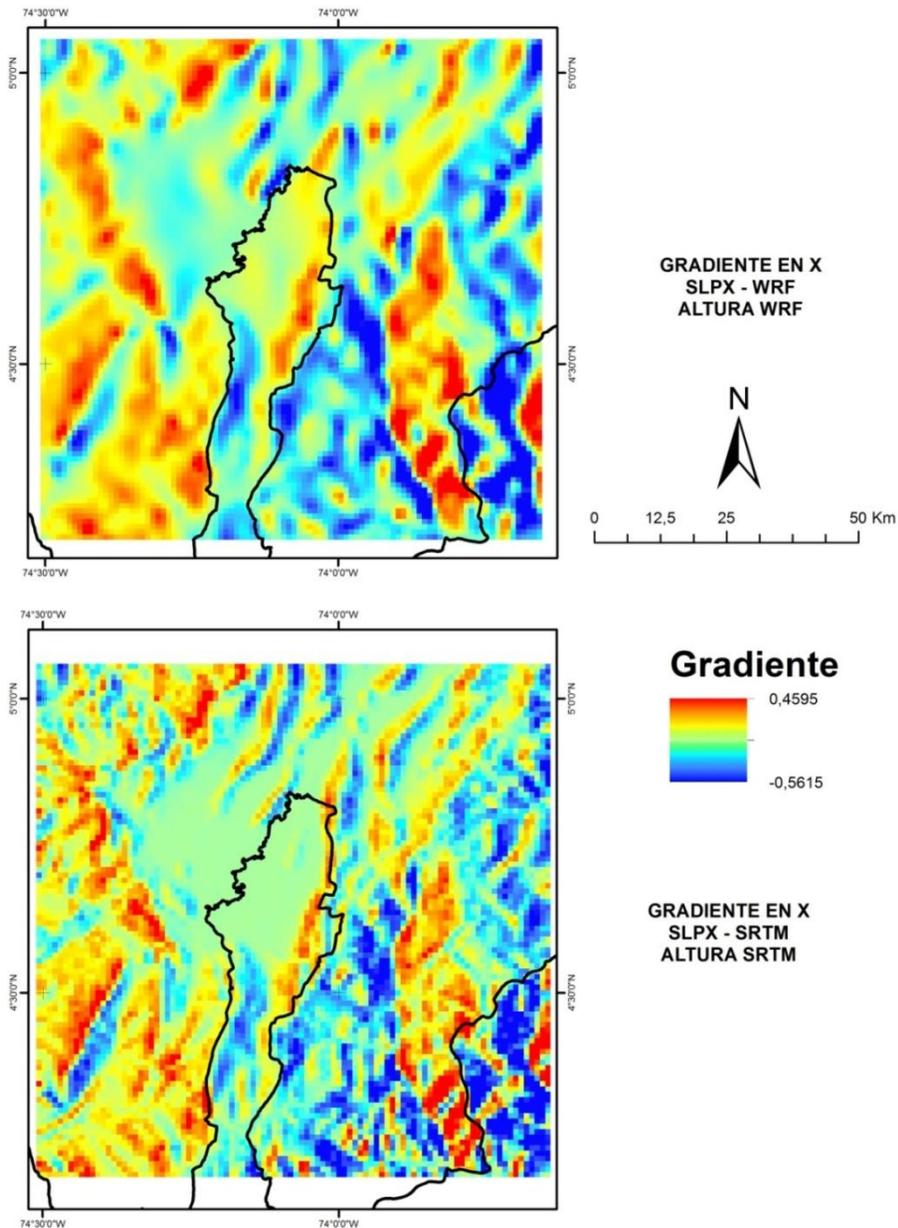


Figura 23 Diferencia de los gradientes entre WRF y base datos SRTM en el eje X

También se aprecia que en la sabana de Bogotá se presenta variación en la elevación pero no de manera tan marcada como lo presenta la base del modelo WRF. A continuación se muestran las diferencias que se presentaron en los gradientes en el eje Y ver figura 24.

Al igual que en el gradiente en el eje Y también se ve la diferencia entre los datos de las dos bases. Esta modificación de los gradientes es necesario hacerla en los tres dominios para que pueda ejecutar la corrida del modelo.

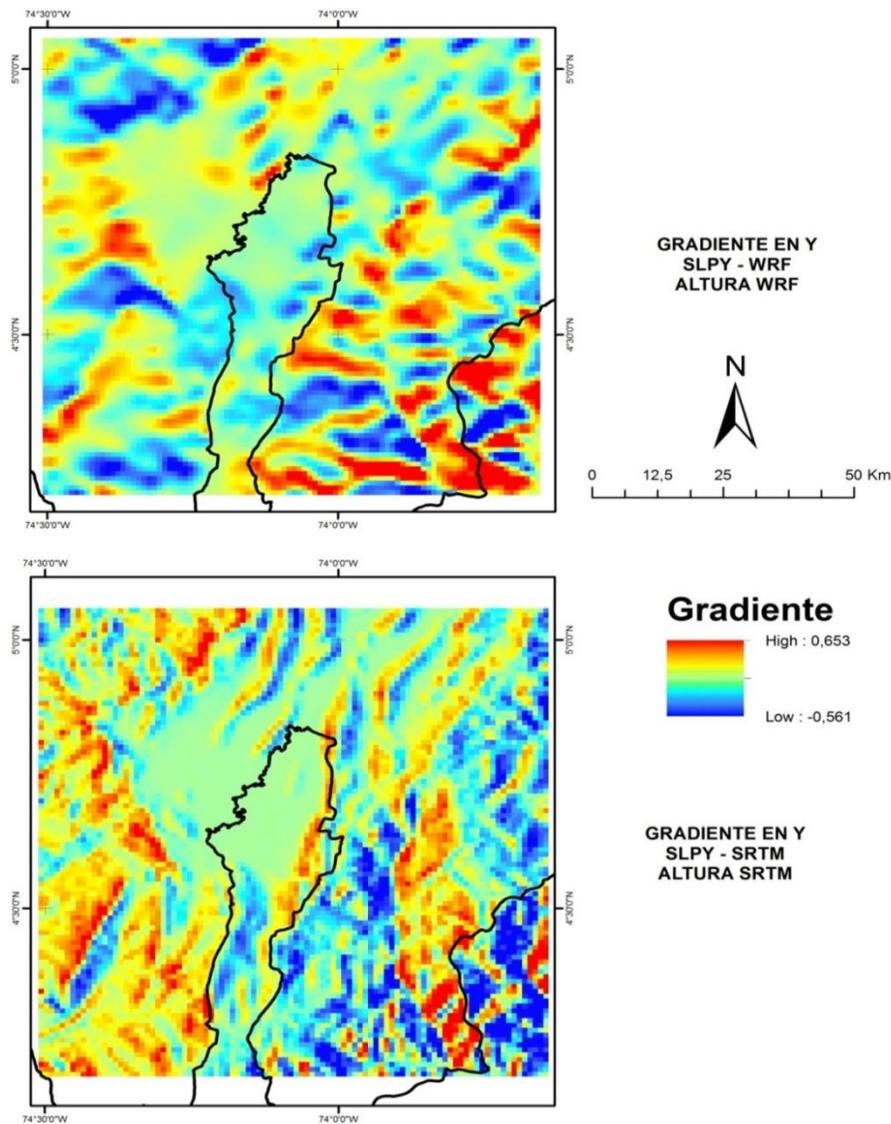


Figura 24 Diferencia de los gradientes entre WRF y base datos SRTM en el eje Y

7.2 Integración de datos usos del suelo/cobertura vegetal al WRF

Los usos del suelo que se utilizan son los procedentes de un estudio del IGAC de todo el territorio colombiano, con fechas de 2001-2002 (CORINE, 2003).

Las categorías usadas en el estudio del IGAC usan una clasificación propia para el país y se relacionaron con las establecidas en la clasificación del modelo WRF (clasificación de uso MODIS). Se establece su respectiva correspondencia para después ser incorporada al modelo y así ejecutarlo.

Para poder realizar la correspondencia es necesario entender cada una de las categorías de las dos fuentes de información para encontrar su mejor equivalencia (F.O.A,2005), por ello se compara el método de clasificación del uso del suelo para las dos fuentes. La tabla 6 nos muestra la correspondencia de las dos clasificaciones:

Por ejemplo, los territorios agrícolas (2), los cultivos transitorios (2.1) y las áreas agrícolas heterogéneas (2.4), pasan a ser el código 14 en la clasificación del MODIS - WRF cultivos/mosaico vegetación natural.

En Colombia se tienen bosques o plantas que pierden las hojas por las estaciones climáticas (Invierno, Primavera, Verano, Otoño). Es por esta razón que se escogió la clasificación de la tabla para condiciones de verano del WRF, .Esto se puede ver en la asimilación de la categoría del IGAC Bosques (3.1), la cual pasa a la categoría MODIS-WRF a Bosques latifoliado siempre verde (2).

Tabla 6 Asimilación tablas IGAC - MODIS-WRF

CORINE 100.000 IGAC		CODIGO MODIS-WRF		
Cod	Descripcion	Cod	Descripcion	Traduccion
1.	TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS			
1.1	zonas urbanizadas	13	Urban and Built-Up	Zona Urbana
1.2	Zonas industriales o comerciales	13	Urban and Built-Up	Zona Urbana
1.3	Zonas de extraccion minera y escombreras	16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja Vegetacion
1.4	Zonas verdes artificializadas	10	Grasslands	Pastizales
2.	TERRITORIOS AGRICOLAS			
2.1	Cultivos transitorios	14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	Cultivos /Mozaico vegetacion natural
2.2	Cultivos permanentes	12	Croplands	Tierra cultivo
2.3	Pastos	10	Grasslands	Pastizales
2.4	Areas agricolas heterogeneas	14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	Cultivos /Mozaico vegetación natural
3.	BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES			
3.1	Bosques	2	Evergreen Broadleaf Forest	Bosque Latifoliado siempre verdes
3.2	Areas con vegetacion herbacea y/o arbustiva			
3.2.1	Herbazal	8	Woody Savannas	Sabanas Leñosas
3.2.2	Arbustal			
3.2.2.1	Arbustal denso	6	Closed Shrublands	Matorrales Cerrados
3.2.2.2	Arbustal abierto	7	Open Shrublands	Matorrales Abiertos
3.2.3	Vegetacion secundaria o de transicion	6	Closed Shrublands	Matorrales Cerrados
3.3	Areas abiertas sin o con poca vegetacion			
3.3.1	Zonas arenosas naturales	16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja vegetación
3.3.2	Afloramientos rocosos	16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja vegetación
3.3.3	Tierras desnudas y degradadas	16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja vegetación
3.3.4	Zonas quemadas	16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja vegetación
3.3.5	Zonas glaciares y nieves	15	Snow and Ice	Hielo y Nieve
4.	AREAS HUMEDAS			
4.1	Areas humedas continentales	11	Permanent Wetlands	Humedales Permanetes
4.2	Areas humedas costeras	11	Permanent Wetlands	Humedales Permanetes
5.	SUPERFICIES DE AGUA			
5.1	Aguas continentales	17	Water	Agua
5.2	Aguas marítimas	17	Water	Agua

Fuente: Elaboración propia

En la figura 25 se aprecia la codificación de las dos bases de datos que se están usando en la investigación, la del MODIS-WRF y la del IGAC, cuya leyenda utiliza la misma paleta de colores. La variación de los usos del suelo se ve en el cambio de color, no hay una zona de usos del suelo con variaciones drásticas; y los cambios no se presentan de manera concentrada sino dispersa en toda la zona de estudio.

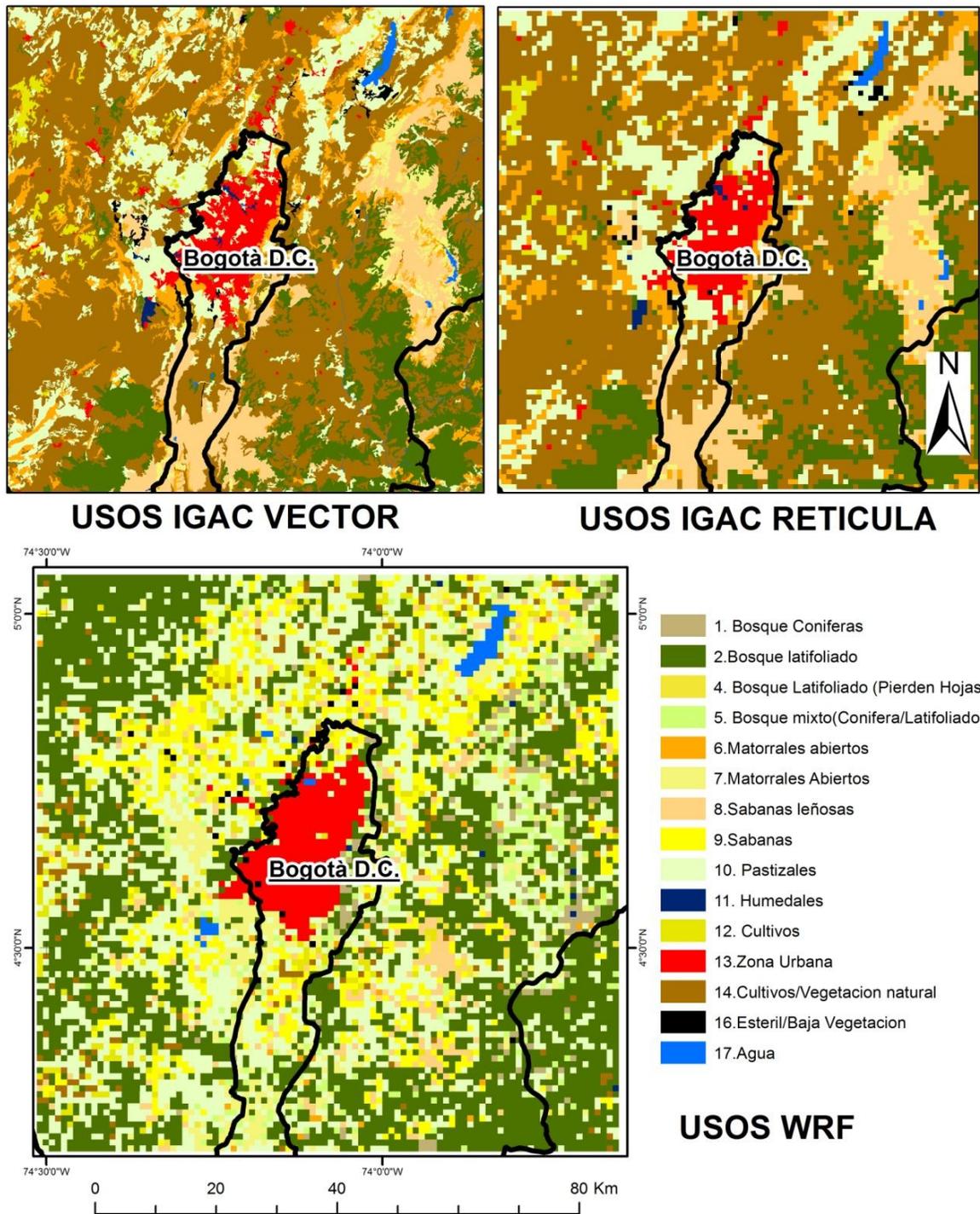


Figura 25 Diferencia de usos del suelo IGAC-MODIS-WRF

La tabla 7 nos muestra un comparativo en el número de retículas que han cambiado de uso, Los usos del suelo que más cambios presentan se encuentran en la

categoría de los cultivos/mosaico vegetación natural con un 45.8%, seguida de sabanas leñosas con 10.2% y Pastizales con 9.5% del total del dominio 3; el cambio total del dominio es del 81.5%.

Aunque se presentan gran cambio de una categoría a otra se puede apreciar que los cambios no son entre categorías tan extremas como por ejemplo de bosque a urbano o viceversa, más bien es un cambio pequeño como pasar de bosque a mosaicos de vegetación natural o de sabanas a pastizales, esto se puede presentar porque los dos tipos de cobertura MODIS/WRF y los usos del IGAC son de la misma época 2001 2002.

Tabla 7 Matriz relacional usos del suelo IGAC -MODIS-WRF Dominio 3

USOS Y COBERTURA DE SUELO		USOS MODIS/WRF														Total general	No Celdas Cambio	%CAMBIO	%CAMBIO NETO		
		Bosque Coníferas	Bosque Latifoliado siempre verdes	Bosques Latifoliado (pierden hoja)	Bosques Mixtos	Matorrales cerrados	Matorrales Abiertos	Sabanas Leñosas	Sabanas	Pastizales	Humedales Permanetes	Tierra Cultivo	Zona Urbana	Cultivos /mozaico vegetacion natural	Esteril o Baja Vetetacion					Agua	
USOS IGAC	Bosque Latifoliado siempre verdes	60	800	8	49	6	29	18	38	219	1	8		10	1	5	1252	452	36.1	4.9	
	Matorrales cerrados	32	282	1	40	3	77	23	34	139	3	15	7	18			674	671	99.6	7.3	
	Matorrales Abiertos	13	44	2	27	6	21		3	42	1						159	138	86.8	1.5	
	Sabanas Leñosas	52	298	2	123	16	170	15	8	268				2	1		955	940	98.4	10.2	
	Pastizales	1	280	3	17	3	73	61	227	407		82	64	46	6	10	1280	873	68.2	9.5	
	Humedales Permanetes							1	1	3	3					5	18	18	100.0	0.2	
	Tierra Cultivo		48		1				1	3	18		9	1	6		87	78	89.7	0.8	
	Zona Urbana	3	6		6		16	2	10	20		1	6	280	1	5	358	78	21.8	0.8	
	Cultivos /mozaico vegetacion natural	24	1614	24	56	14	127	207	621	1327		1	156	18	152	10	6	4357	4205	96.5	45.8
	Esteril o Baja Vetetacion		7		1		10		2	13			1	1			3	38	38	100.0	0.4
	Agua	2	5		2		2			2						1	22	38	16	42.1	0.2
	Total general	187	3384	40	322	48	526	328	949	2458	9	277	376	235	24	53	9216				81.5

Fuente: Elaboración propia

El modelo WRF usa una capa de enmascaramiento para realizar los cálculos que tiene como referencia los cuerpos de agua, puesto que su comportamiento es diferente al de los usos en la tierra firme. Este enmascaramiento se aprecia mejor en la figura 26

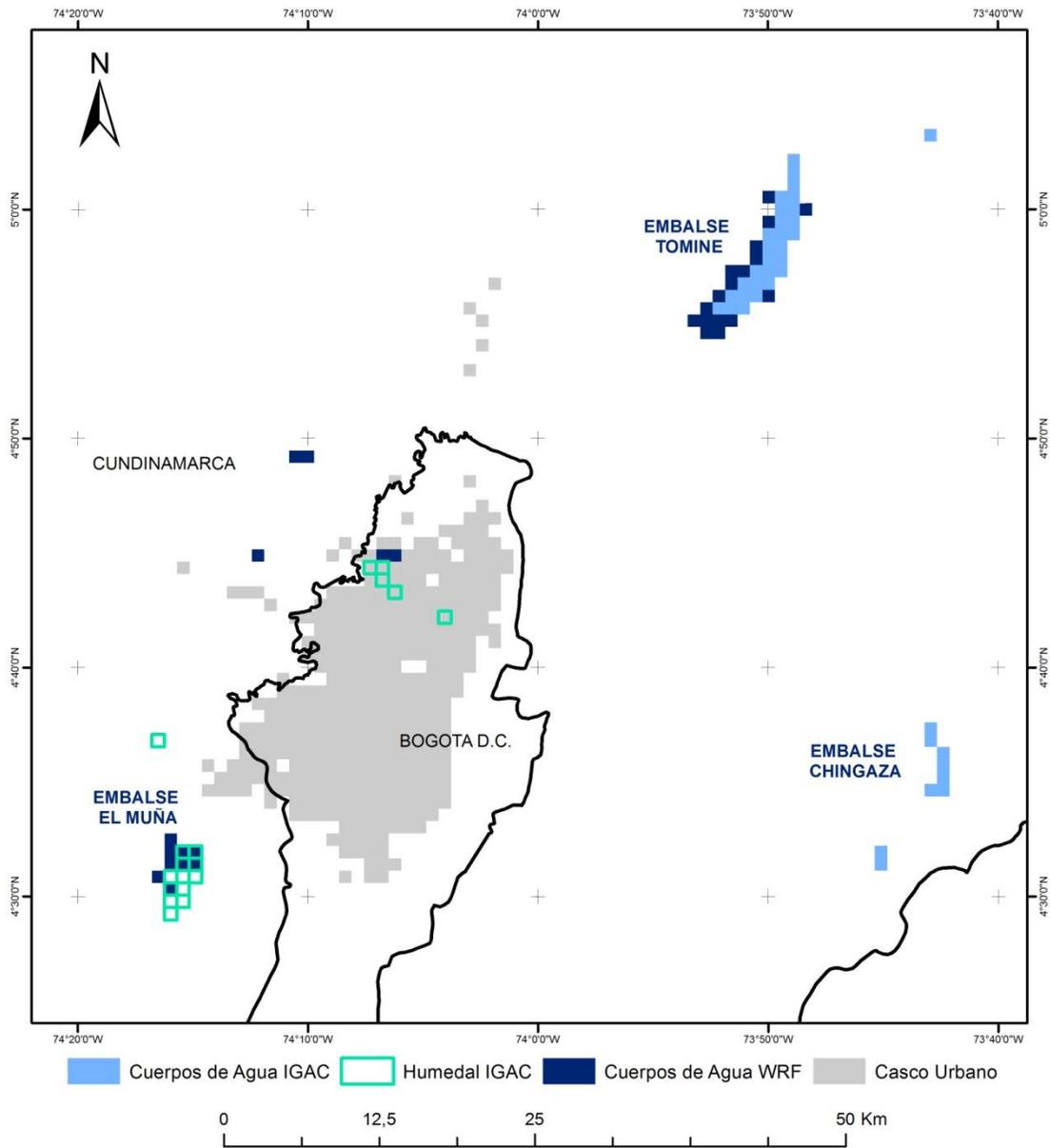


Figura 26 Cuerpos de agua/Máscara de uso IGAC y uso MODIS-WRF Dominio 3

Los usos del suelo en su componente LU_INDEX se ubican en forma de matriz de varias dimensiones donde cada una de estas dimensiones representa un uso del suelo expresado en porcentaje del área que ocupa cada retícula. De manera ilustrativa se puede ver la figura 27.

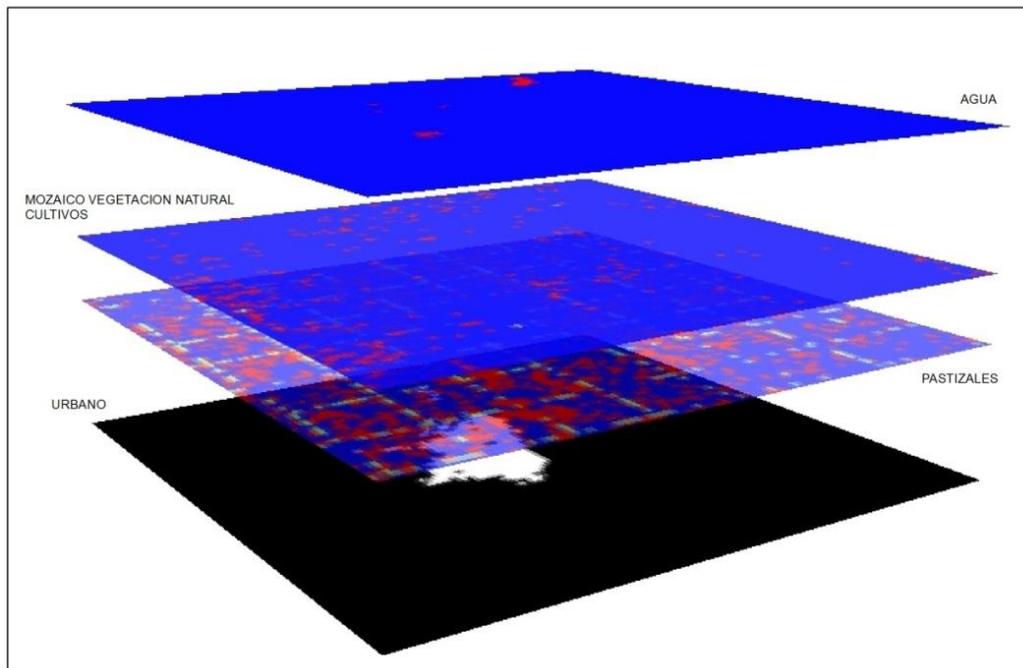
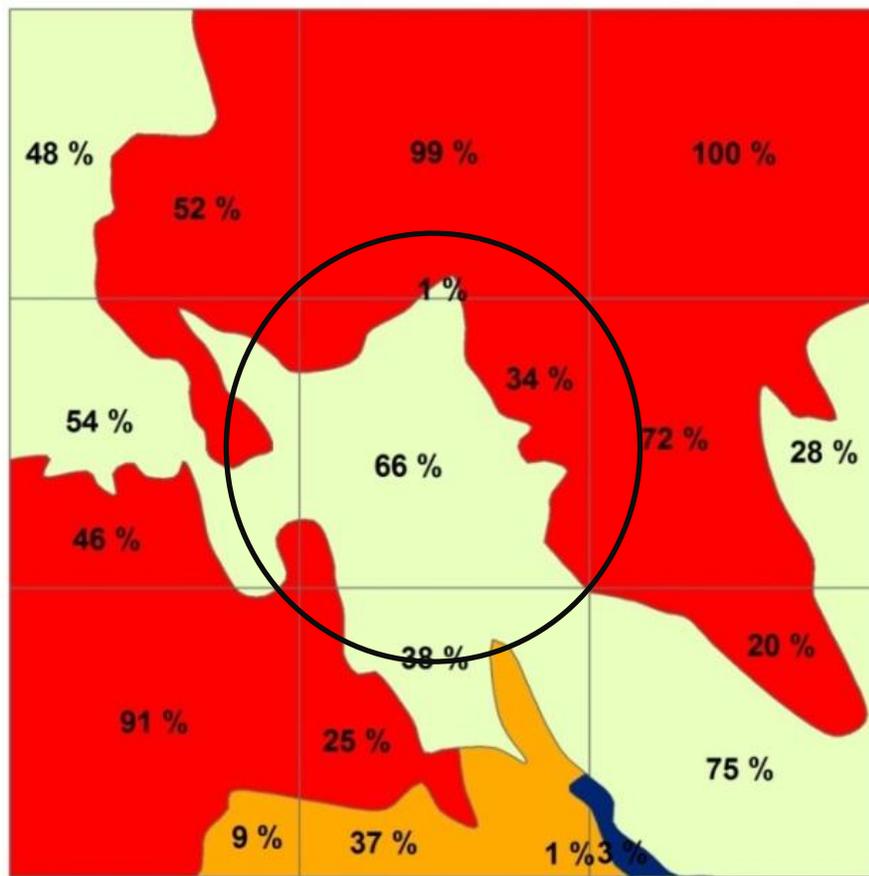


Figura 27 Diagrama de matrices de usos del suelo LU_INDEX

En la figura 28 se presenta un ejemplo ilustrativo de cómo se calcula el porcentaje de uso del suelo para cada retícula.

En la retícula del centro (círculo negro) que pertenece a la categoría de uso del suelo urbano, se presenta un 34% del área total de la retícula; y la misma retícula pero en la categoría pastizales, se presenta el 66%. El máximo valor que podrá tener una misma retícula es de 1, así se puede tener más información detallada del uso del suelo con 20 matrices, donde cada matriz arroja una proporción de usos del suelo en cada retícula. En la retícula inferior derecha tendría datos en 4 categorías, las cuales tendría valores de 0.20, 0.75, 0.3, 0.1 donde suma en total 1.



USOS/COBERTURA

- | | | |
|--|------------------------|---------------------------------|
| 1. Bosque Coníferas | 7. Matorrales Abiertos | 13. Zona Urbana |
| 2. Bosque latifoliado | 8. Sabanas leñosas | 14. Cultivos/Vegetación natural |
| 4. Bosque Latifoliado (Pierden Hojas) | 9. Sabanas | 16. Esteril/Baja Vegetación |
| 5. Bosques mixtos (Coníferas/Latifoliados) | 10. Pastizales | 17. Agua |
| 6. Matorrales abiertos | 11. Humedales | |
| | 12. Cultivos | |

Figura 28 Porcentaje de uso del suelo en cada retícula

8. RESULTADOS SIMULACIONES WRF

Las diferencias de elevaciones entre las dos fuentes (WRF y SRTM) se pueden apreciar en los siguientes perfiles representados en la figura 29, donde la sabana de Bogotá presenta la mayor variación de elevación que puede tener hasta 300 m.s.n.m.

También se observa que la elevación de las bases de datos que tiene por defecto el WRF tienden a suavizar la altura, por ello los picos de las montañas se ven más ovalados en comparación con los datos del SRTM que se aprecian más puntiagudos.

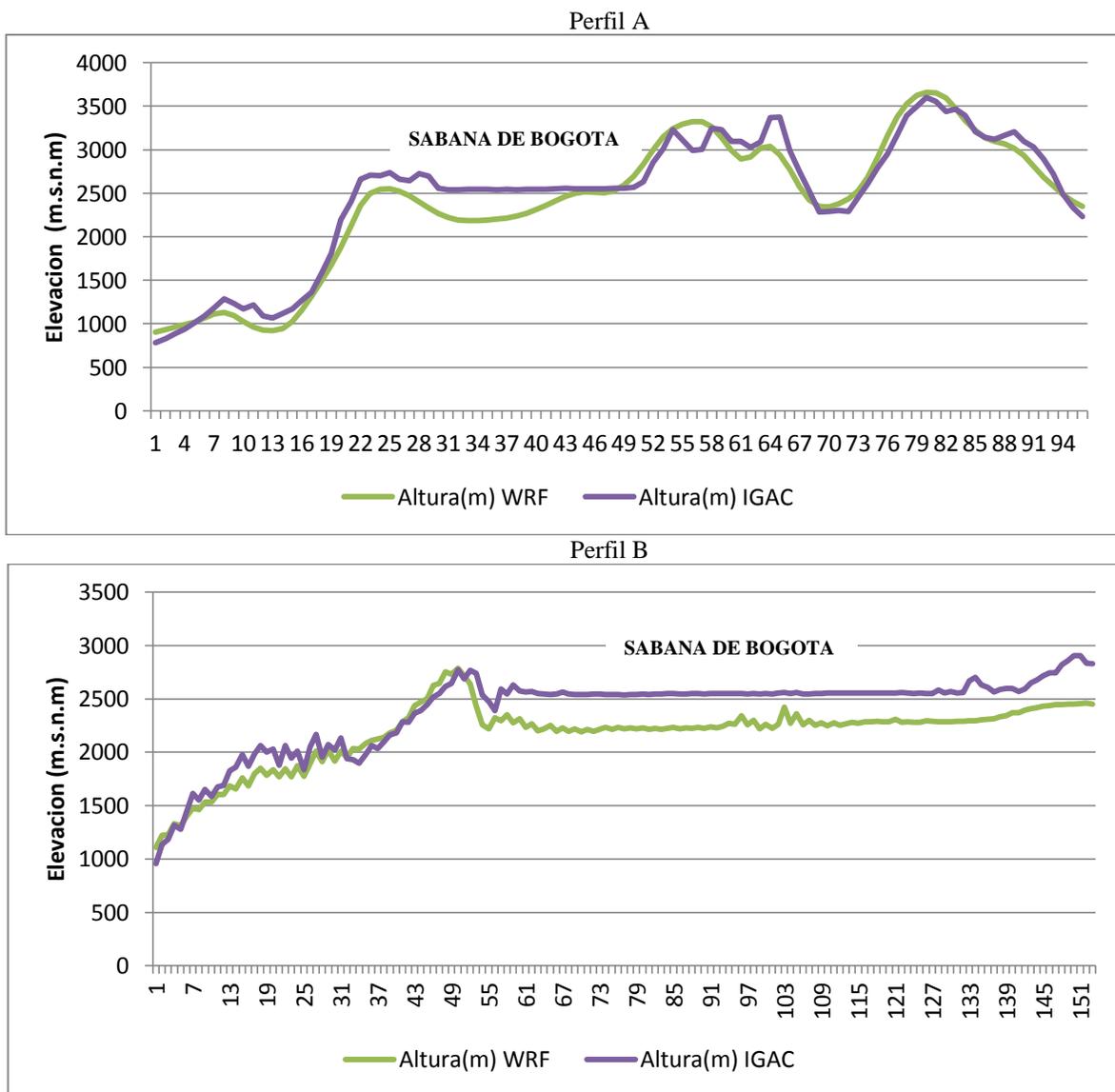


Figura 29 Comparación de la elevación del WRF vs SRTM en los perfiles A y B

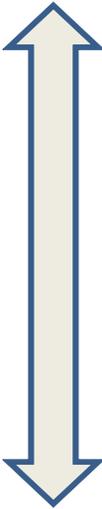
Los usos del suelo están clasificados en categorías donde cada uso tiene asignado un número de identificación, este número no corresponde a un orden determinado. Se propuso generar una nueva clasificación y ordenarlos de tal manera que el de menor valor correspondería a zonas verdes y el de mayor valor a zonas desnudas o construidas, para así poder comparar los cambios en los usos y las coberturas. Para una mayor ilustración, esto se puede apreciar al lado derecho de la tabla 8.

Teniendo en cuenta lo anterior, se reclasificaron tanto los usos del suelo de la base de datos del WRF, como los datos del uso del suelo del IGAC, la diferencia (resta) entre el resultado de las dos bases nos arroja la tendencia de cambio de cada retícula, y de esta manera identificar la tendencia de pérdida o ganancia de vegetación.

La tendencia de cambio del uso del suelo es una variable de tipo cualitativo y nos ayuda a comparar los cambios de uso del suelo con las variables que se usan para evaluar el modelo como son la temperatura y la precipitación.

Tabla 8 Matriz de la relación de cambio de los usos del suelo IGAC MODIS-WRF Dominio 3

Land Use Category	Land Use Description	Descripcion uso del suelo	RELACION DE CAMBIO
1	Evergreen Needleleaf Forest	Bosques Coniferas (siempre verdes)	1
2	Evergreen Broadleaf Forest	Bosque Latifoliado (siempre verdes)	2
4	Deciduous Broadleaf Forest	Bosque Latifoliado (pierden hojas)	3
5	Mixed Forests	Bosques Mixtos	4
6	Closed Shrublands	Matorrales Cerrados	5
7	Open Shrublands	Matorrales Abiertos	6
14	Cropland/Natural Vegetation Mosaic	Cultivos /mozaico vegetacion natural	7
12	Croplands	Tierra Cultivo	8
8	Woody Savannas	Sabanas Leñosas	9
9	Savannas	Sabanas	10
10	Grasslands	Pastizales	11
11	Permanent Wetlands	Humedales Permanetes	12
16	Barren or Sparsely Vegetated	Esteril o Baja vetetacion	13
15	Snow and Ice	Hielo y Nieve	14
17	Water	Agua	15
13	Urban and Built-Up	Zona Urbana	16



(+) Cobertura Vegetal

(-) Cobertura Vegetal

Fuente: Elaboración propia

En la figura 30 se puede observar una tendencia de cambio en el uso del suelo, reflejada en la disminución de la vegetación en sentido Sur-Norte por el costado occidental y oriental de la ciudad de Bogotá, mientras que en sus alrededores se presenta una tendencia de aumento de cambio, reflejada en el aumento de la vegetación. Esta tendencia se verá reflejada muy seguramente en los datos de precipitación.

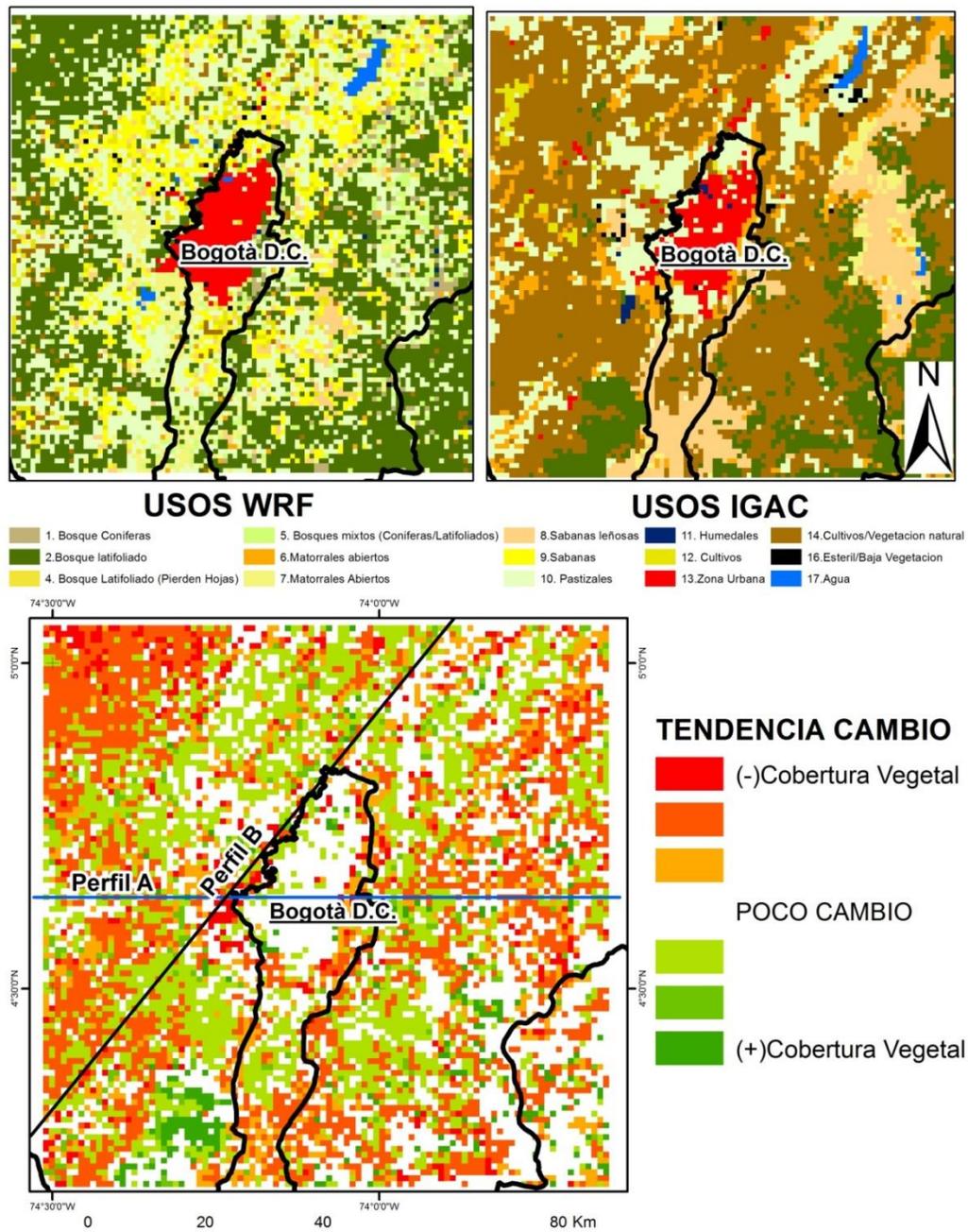


Figura 30 Tendencia de cambio del uso del suelo (Pérdida o ganancia vegetación) Dominio 3

En los perfiles que se muestran en la figura 31, podemos apreciar los cambios del uso del suelo en los perfiles de estudio, los cuales resultaron no ser tan extremos como por ejemplo pasar de una categoría de urbano (16) a bosque (1)]; por el contrario resultaron ser cambios suaves. Esto se puede explicar porque las dos bases de datos (WRF-MODIS e IGAC) son contemporáneas (2002-2003) y no se presentan grandes cambios de uso de las bases en términos de ganancia y pérdida de cobertura vegetal.

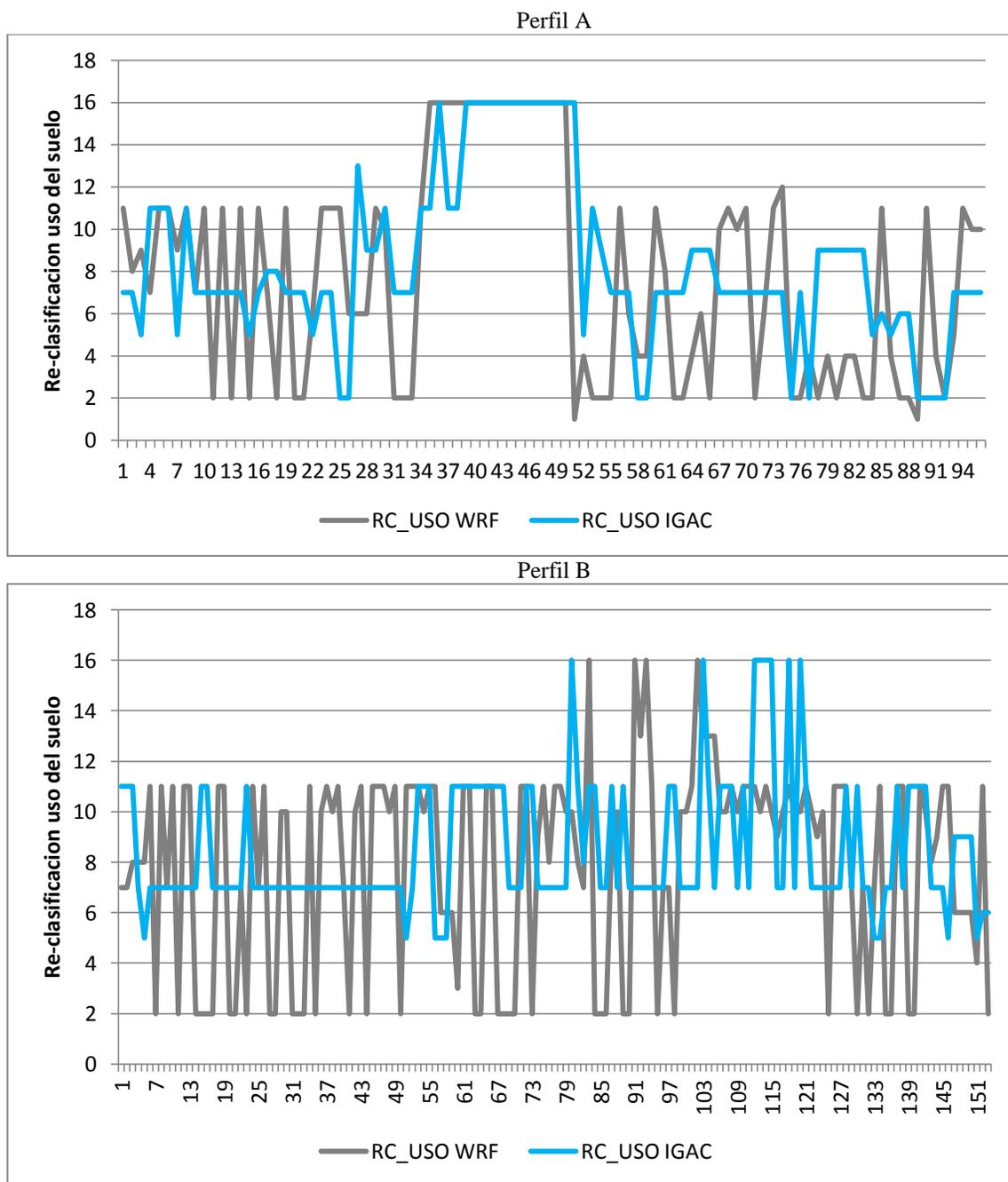


Figura 31 Relación de cambio (RC) del uso MODIS/WRF vs IGAC en los perfiles A y B

8.1 Estimación y correlación de resultados de temperatura - T2

En la figura 32 se comparan los diferentes escenarios propuestos en la metodología. Se puede observar sobre la línea del perfil B una disminución de la temperatura, debido principalmente a que esta zona presenta un incremento en la elevación. Esto se puede apreciar de una manera más clara en las gráficas de los perfiles, donde se compara la elevación que se extrae de los datos originales del WRF, en contraste con la elevación de los datos del SRTM.

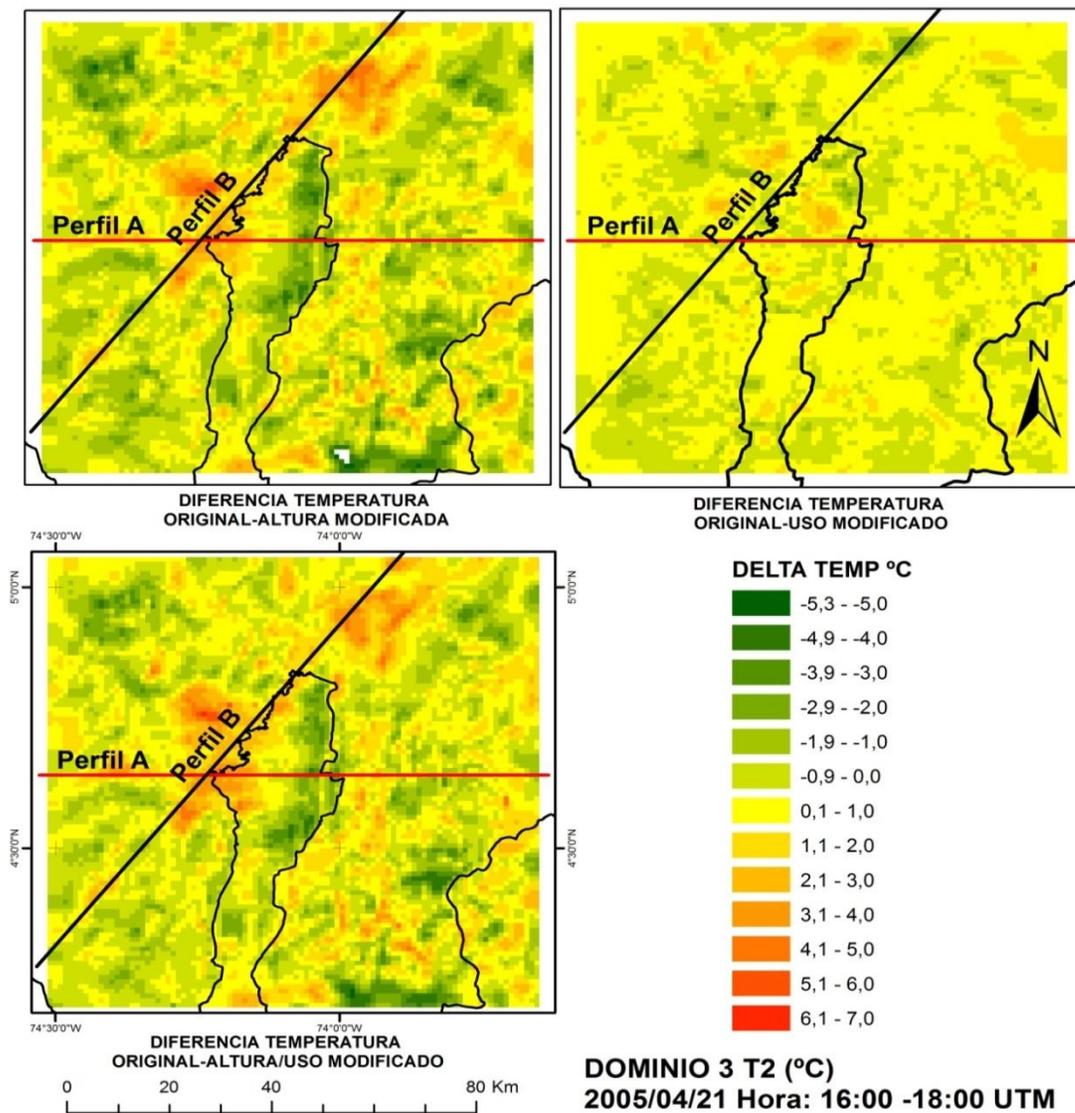


Figura 32 Diferencia de temperatura (WRF-SRTM/IGAC) todos los escenarios 2005/04/21 HORA= 16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 Col

Al igual que en la figura 32 (datos simulados para el 21 de abril), en la figura 33 se aprecia una variación de temperatura marcada principalmente por los cambios de elevación, ya sea positiva o negativa. La variación de temperatura con el cambio de uso del suelo es menor, como se muestra en la figura superior derecha.

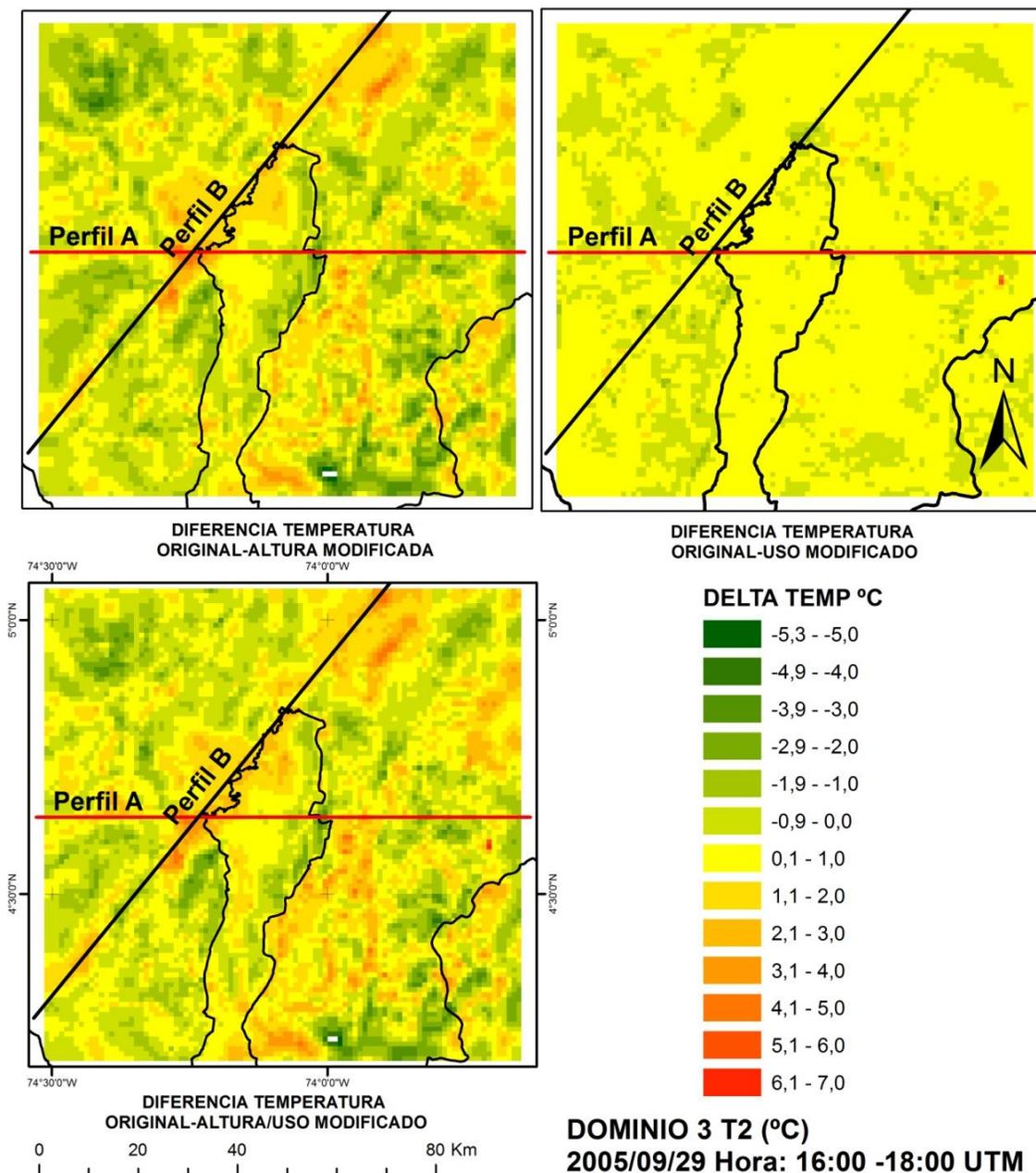
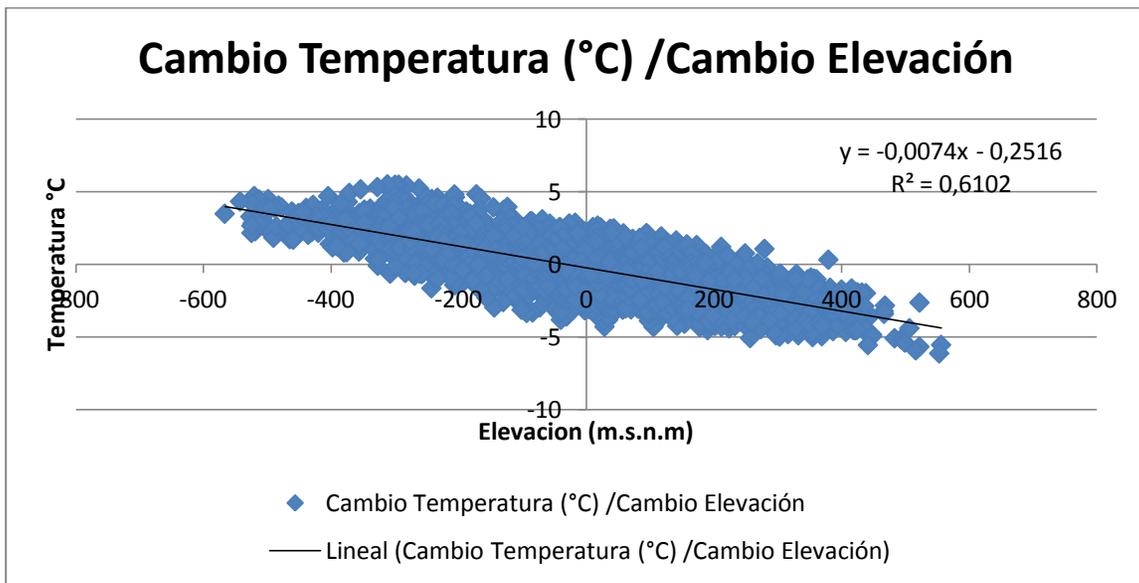


Figura 33 Diferencia de temperatura (WRF-SRTM/IGAC) todos los escenarios 2005/09/29 HORA= 16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 COL

8.1.1 Análisis Estadístico

Aplicando análisis estadístico a los datos del dominio 3 con 9216 datos (número total de retículas), en la figura 34 se encuentra la tendencia con pendiente negativa entre las dos variables (elevación y temperatura). Significa que si aumenta la diferencia de altura hacia los positivos, la diferencia de temperatura disminuye, es decir cuando se aumenta la altura, la temperatura disminuye.

*2005/04/21 HORA= 16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 COL



*2005/09/29 HORA= 16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 COL

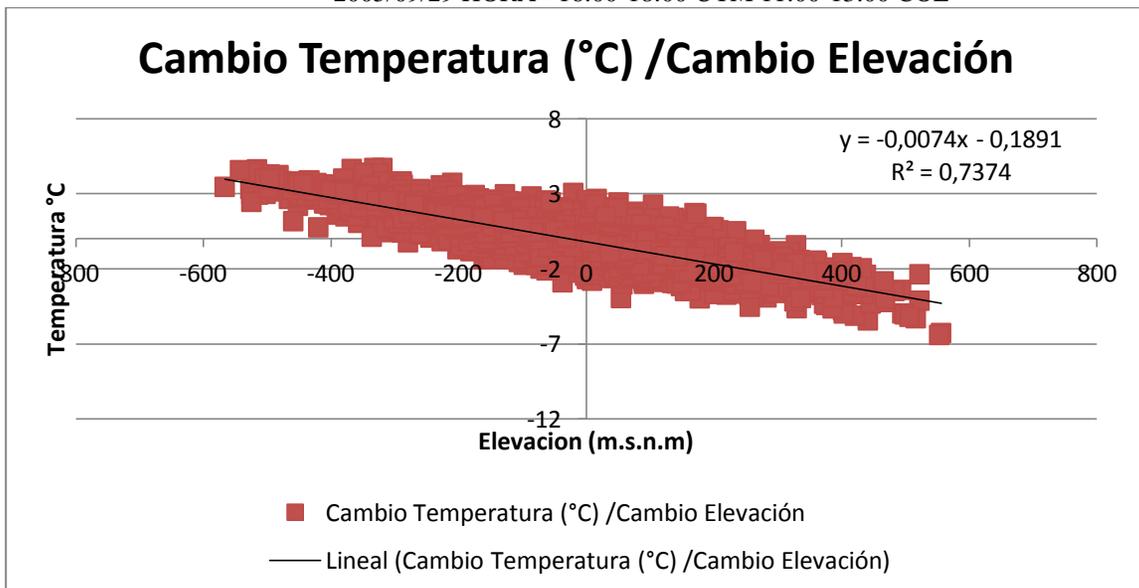


Figura 34 Diferencia de cambio de T °C(WRF-SRTM) Vs diferencia de cambio de elevación (WRF-SRTM)

El modelo estadístico se explica con una regresión lineal con $R^2= 0.610$ para Abril y $R^2=0.737$ para Septiembre lo que significa que tienen buena correlación de los datos.

En la figura 35 se puede apreciar la relación existente entre la diferencia de cambio de temperatura de los resultados del modelo ejecutado cambiando usos del suelo del WRF/MODIS, con los del IGAC en términos estadísticos.

Aunque los valores del R^2 son bajos en ambas fechas de la ejecución del modelo, la tendencia observada es que a medida que los cambios de uso del suelo tienden a ganar vegetación, se presenta un leve cambio en la temperatura, la cual tiende a disminuir (por la pendiente negativa).

Es necesario destacar que los cambios de uso del suelo en términos de pérdida y ganancia de vegetación no son muy fuertes entre las dos bases usadas por ser muy contemporáneas, además no se presentan grandes zonas de cambios drásticos, como por ejemplo la desertificación o el crecimiento urbano descontrolado.

Los cambios de temperatura oscilan entre los 2°C y -2°C en promedio en comparación con los cambios de temperatura por la modificación de alturas que pueden llegar a estar entre 4°C y -4°C .

Para poder comparar los resultados de temperatura y si esta variable es modificada con el cambio del uso del suelo se realizó una gráfica donde se compara el cambio de temperatura con el cambio en la tendencia en ganancia y pérdida de vegetación en el cambio del uso del suelo y cobertura. Esta tendencia de cambio se puede apreciar en la figura 30

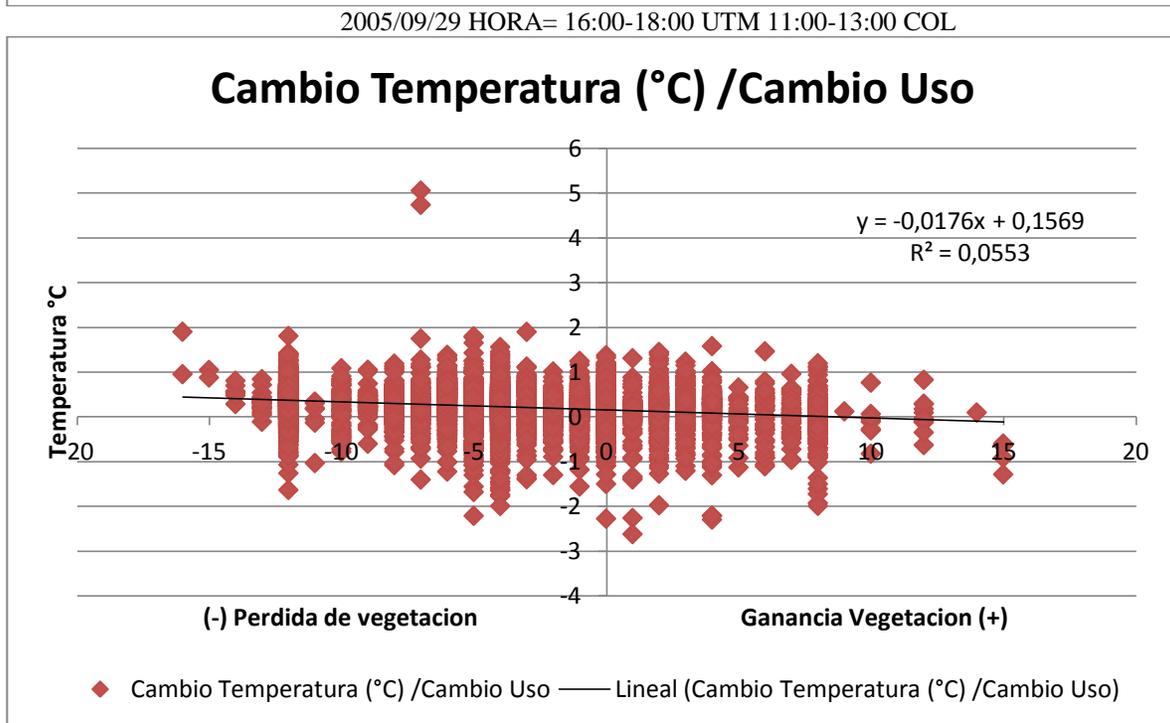
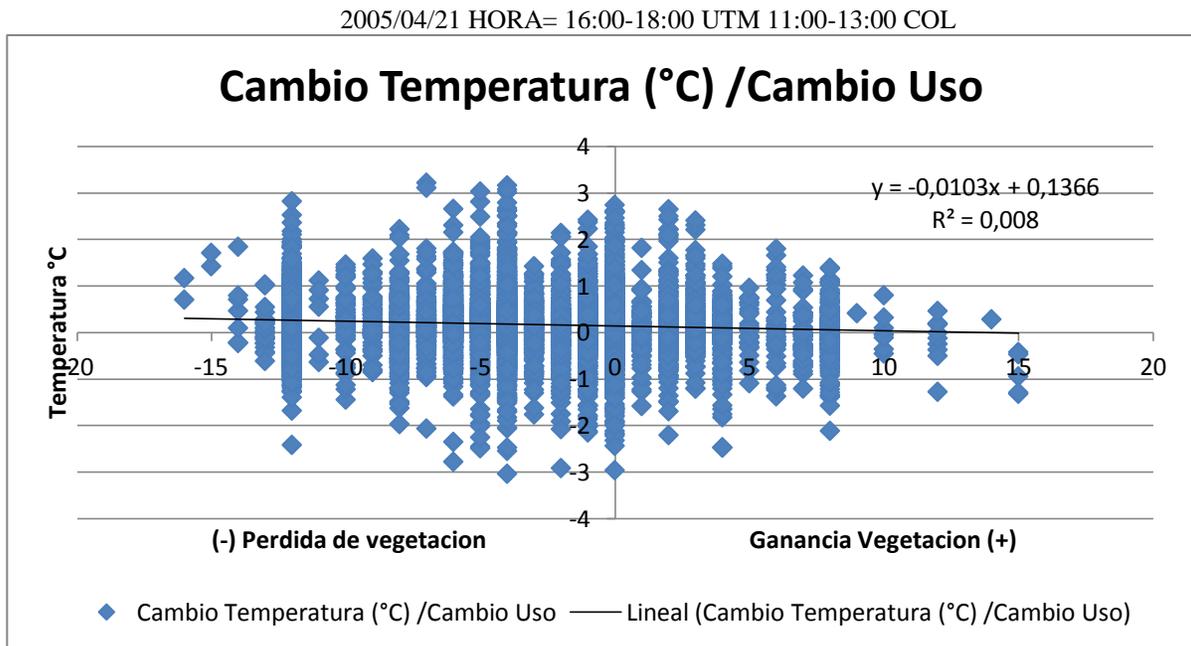


Figura 35 Diferencia de cambio de T °C(WRF-IGAC)Vvs diferencia relación de cambio de uso del suelo (WRF-IGAC)

Otra forma de observar los resultados es por medio de perfiles, en los cuales tenemos en cuenta la ubicación espacial de los cambios del fenómeno tanto de temperatura como de la precipitación.

8.1.2 Resultados Perfil A

La variación de la temperatura está influenciada drásticamente por la elevación, es decir, donde la elevación es mayor se presenta menor temperatura en los datos modificados. Esto se puede apreciar en la figura 36.

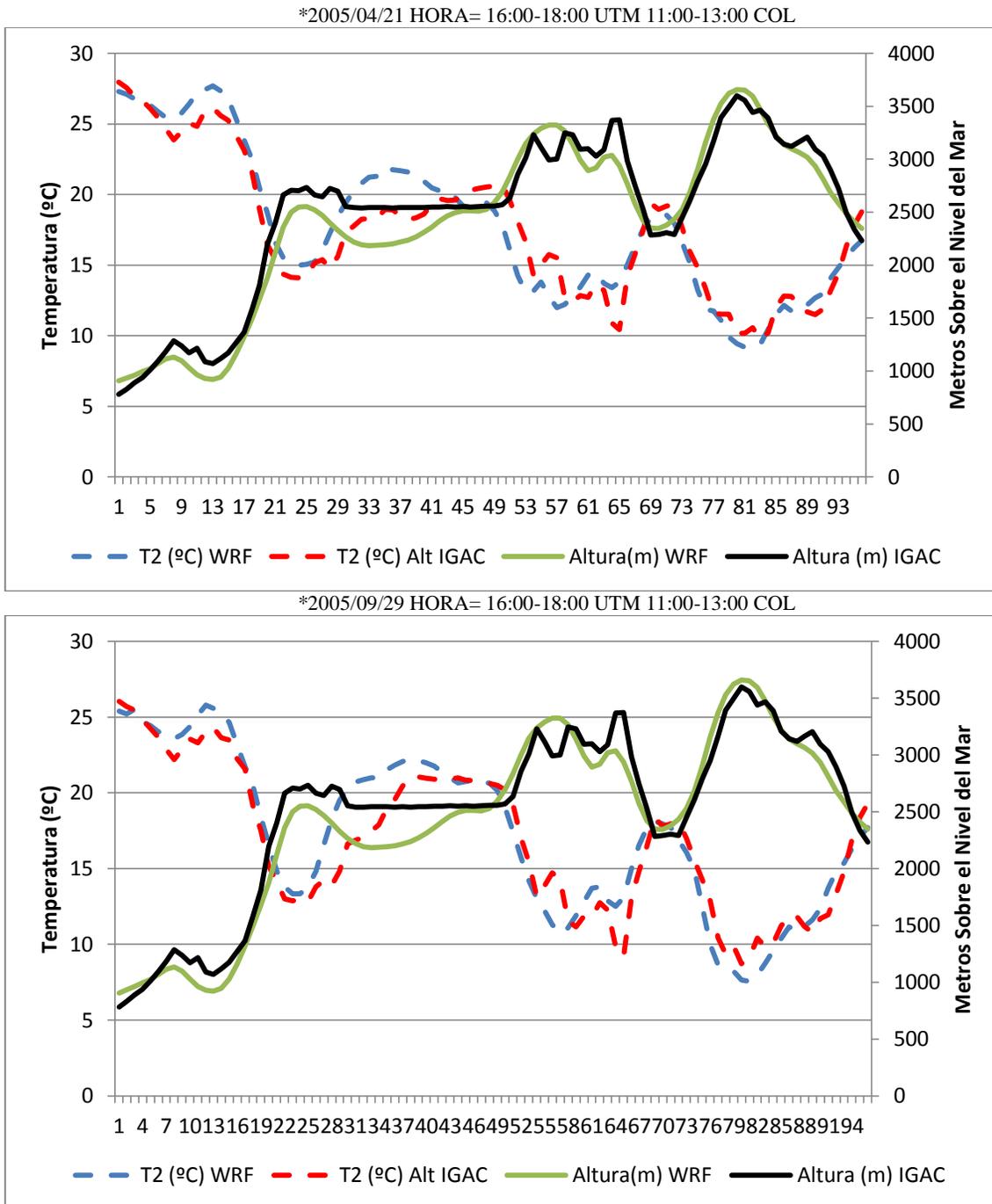


Figura 36 Elevación del WRF e IGAC con Temperatura simulada WRF e IGAC perfil A

El uso del suelo también modifica la temperatura pero no es tan marcada como la altura, dado que los cambios no son tan representativos en términos de pérdida de vegetación. Ver figura 37.

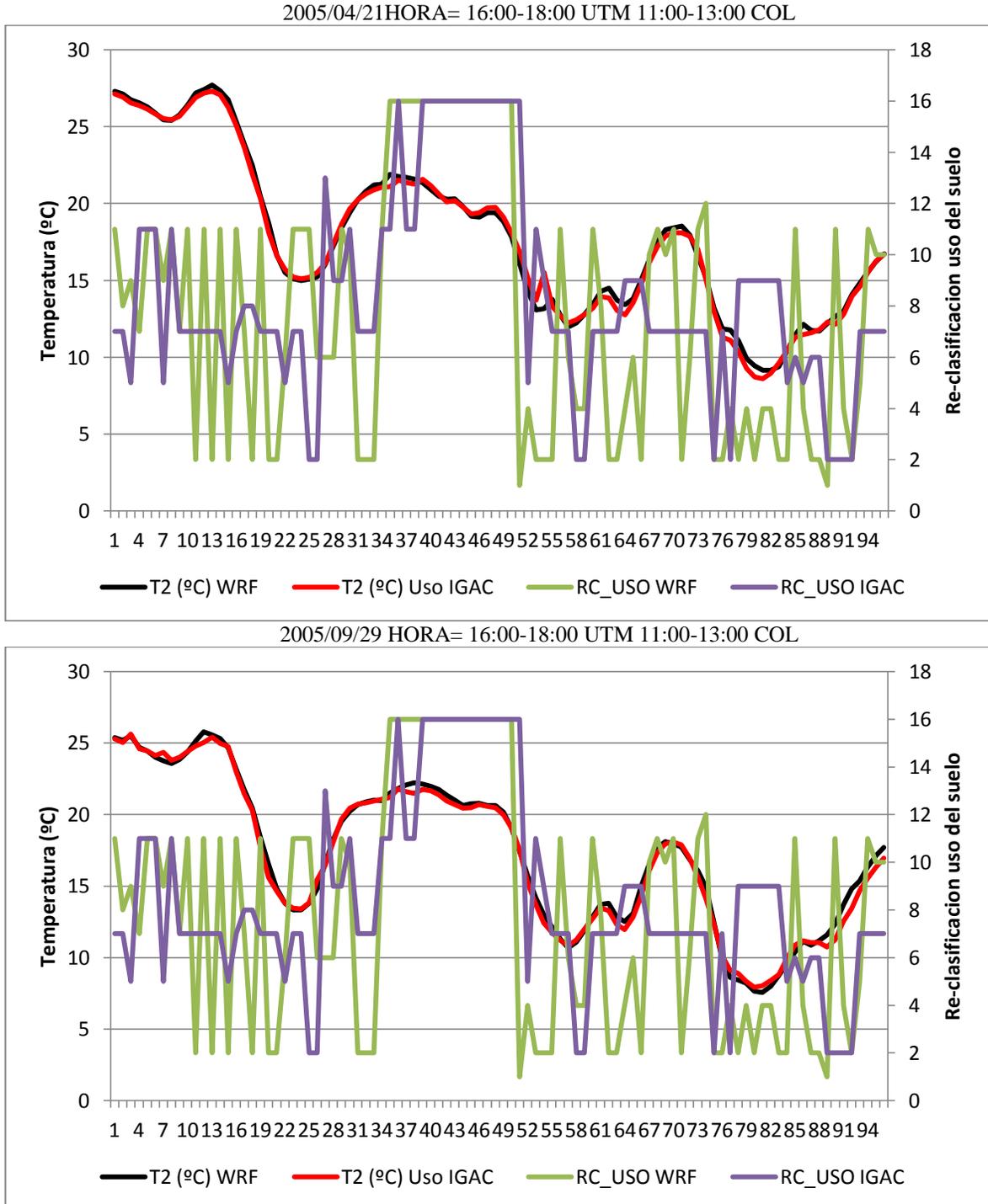


Figura 37 Relación de cambio (RC) del uso del suelo MODIS-WRF e IGAC contra temperatura simulada WRF e IGAC perfil A

La relación entre la temperatura y el cambio del uso del suelo es más difícil de interpretar, dado que la distribución de estos usos no está zonificada y se presenta de manera dispersa en toda la zona de estudio, presentándose algunas variaciones en la temperatura simulada por el WRF con respecto a las variaciones en el uso del suelo.

La variación de la temperatura que se produce con la ejecución del modelo en el escenario cuatro (modificando elevación y uso del suelo), presenta una mayor influencia por parte de la variable de elevación lo que se aprecia en las ejecuciones de los meses de abril y septiembre ver figura 38.

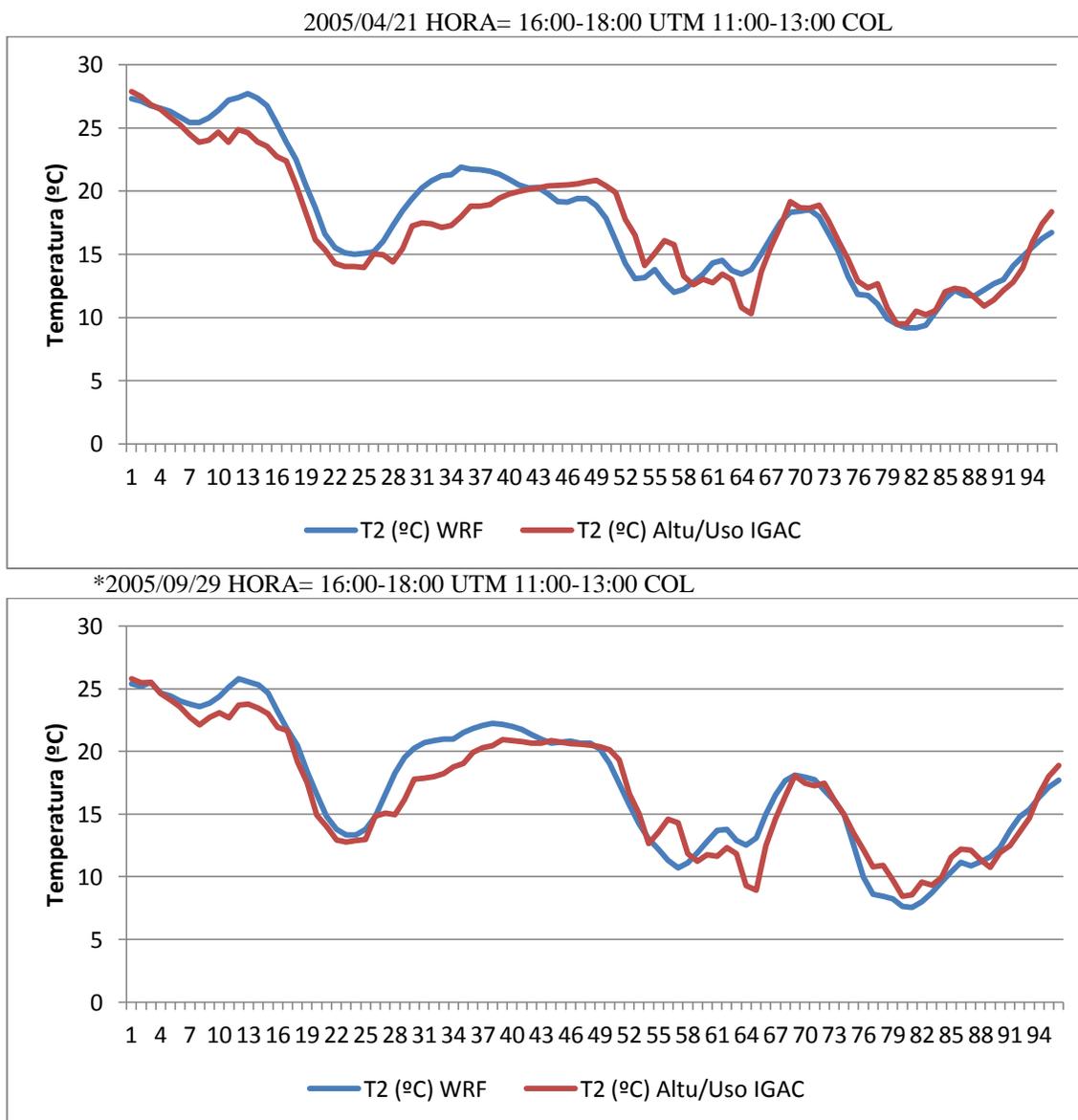


Figura 38 Temperatura WRF contra T°C modificado Elevación y Usos del suelo IGAC perfil A

Al comparar las temperaturas simuladas en los 4 escenarios, se puede observar notoriamente la influencia de la altura con respecto a esta variable. Se reitera que la variación de los usos del suelo no es tan marcada en esta investigación ver figura 39.

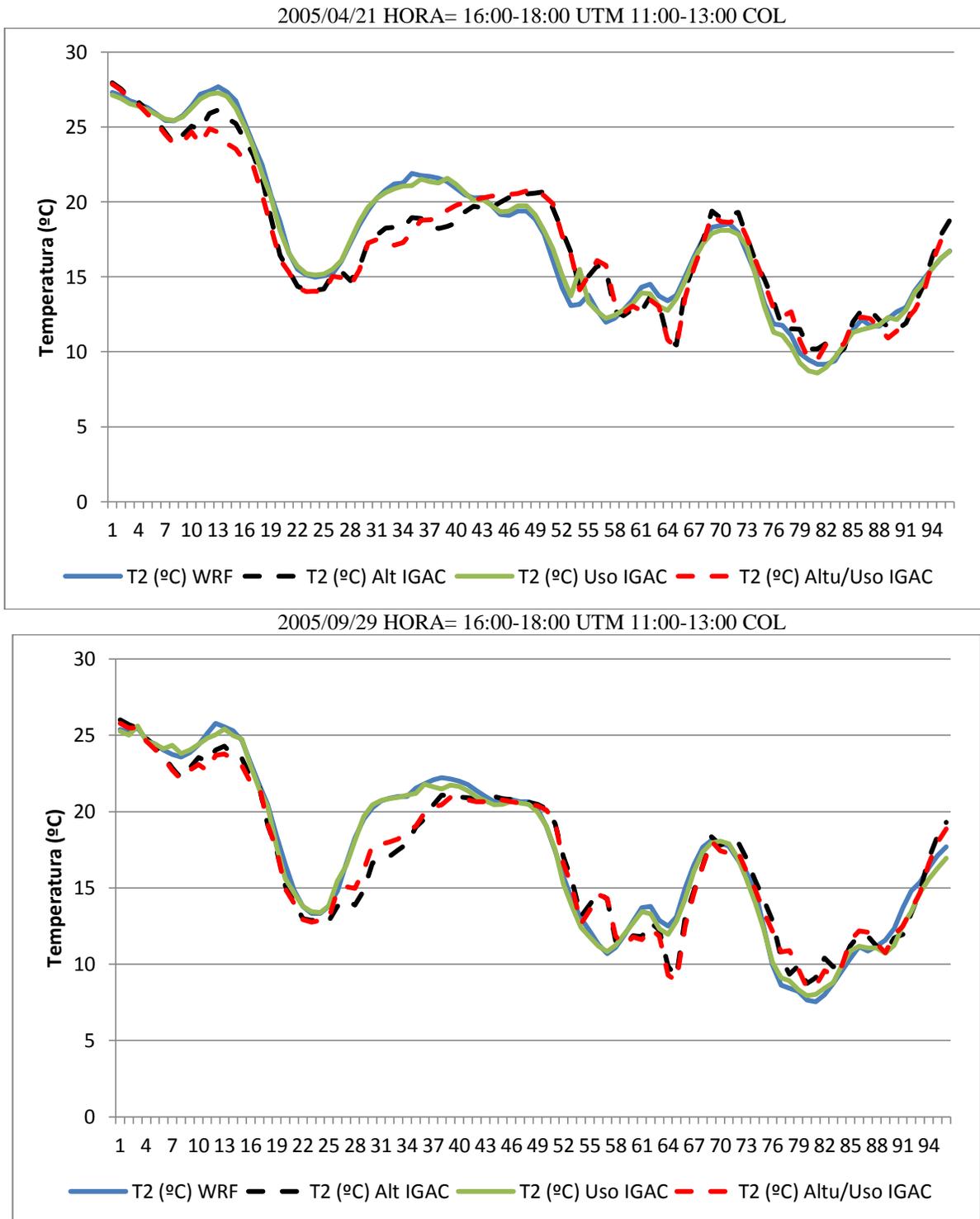


Figura 39 Comparación resultados de Temperatura en los 4 escenarios propuestos perfil A

8.1.3 Resultados Perfil B

La dirección del perfil B es hacia el Valle del río Bogotá, en donde se presenta gran diferencia de elevación. Se aprecia que en la posición de las celdas 61 a la 131, la diferencia de elevación es de cercana a los 200 m y la diferencia de temperatura es de aproximadamente 2°C, presentándose una relación inversamente proporcional figura 40

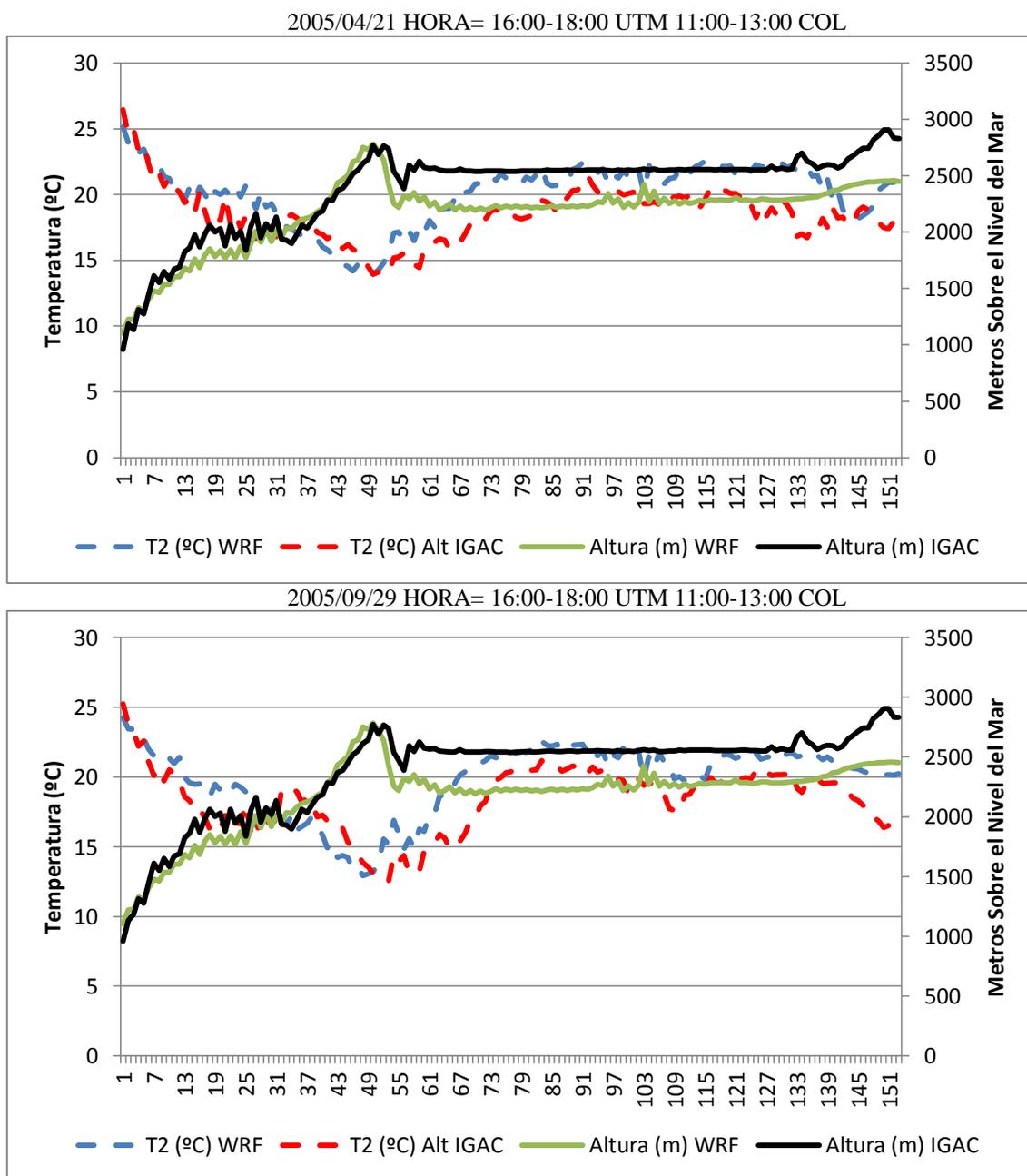


Figura 40 Elevación del WRF e IGAC comparada con T°C simulada WRF e IGAC perfil B

Al observar el perfil, es más complicado definir de manera concluyente que cuando se pasa de categoría (por ejemplo de bosque a otro tipo de cobertura) se incrementa o disminuye la temperatura. Por el contrario, en el análisis estadístico si se pueden apreciar estos cambios de temperatura. Lo que se puede decir es que la variación del uso del suelo si modifica la temperatura ver figura 41.

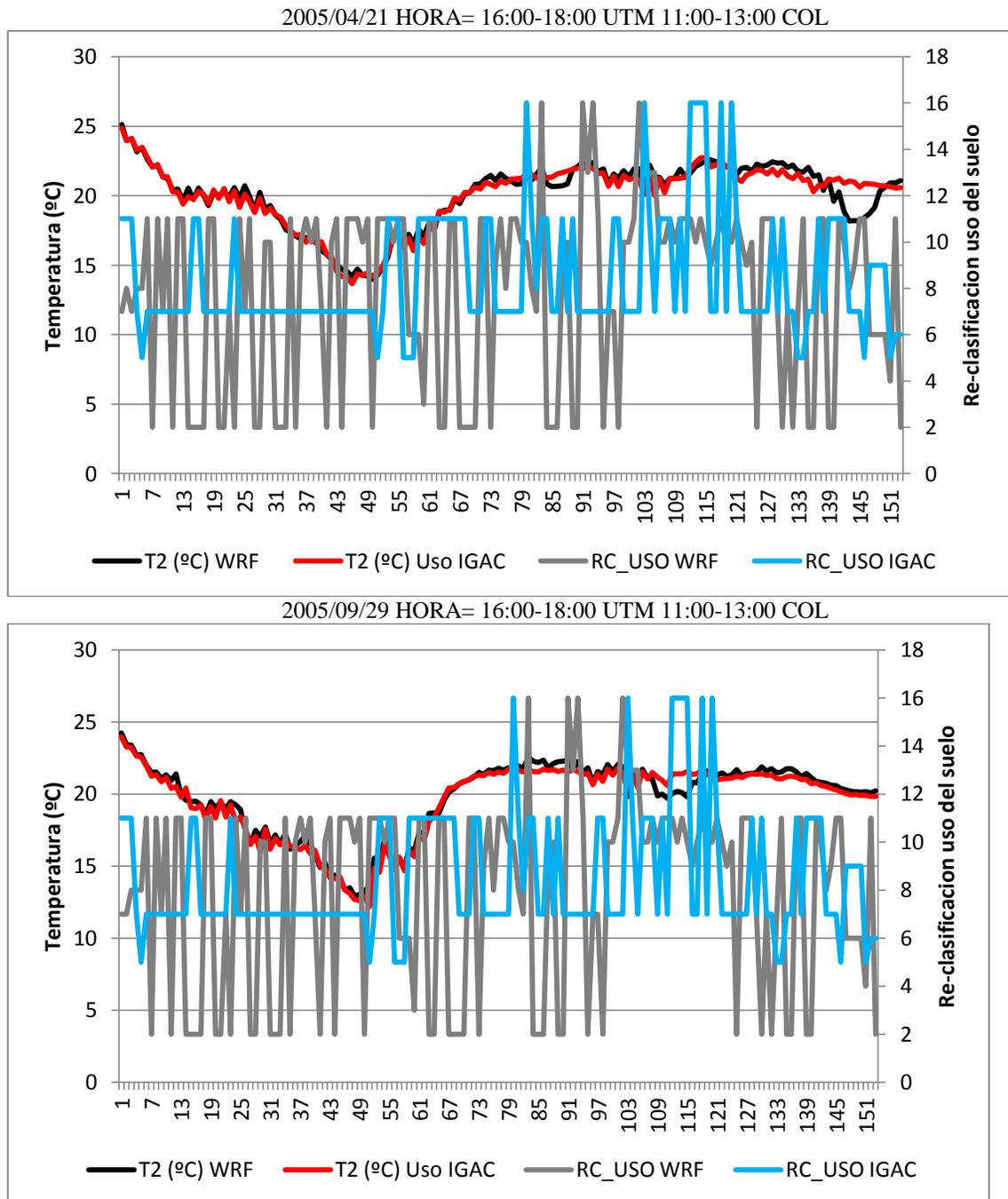


Figura 41 Relación de cambio (RC) del uso del suelo MODIS/WRF e IGAC contra Temperatura simulada WRF e IGAC perfil B

Al igual que en el perfil A de la figura 39, la variación de la temperatura está marcada por la elevación. Esto se puede apreciar al combinar de igual forma la elevación y el uso del suelo, como lo muestra la figura 42.

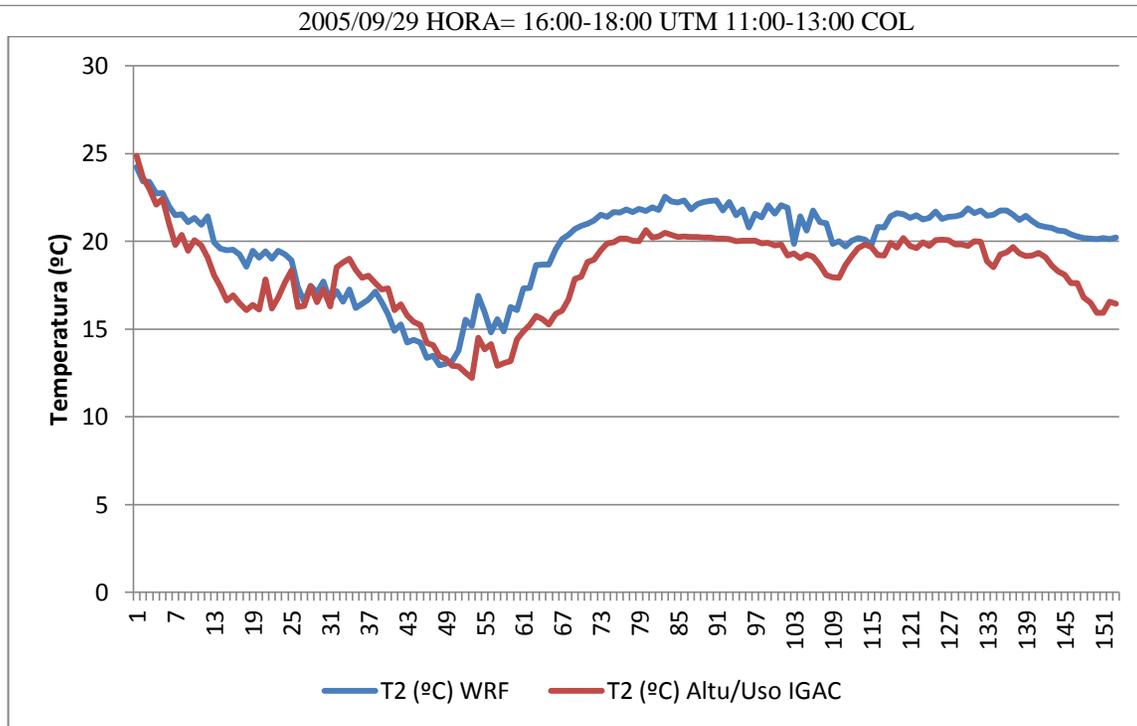
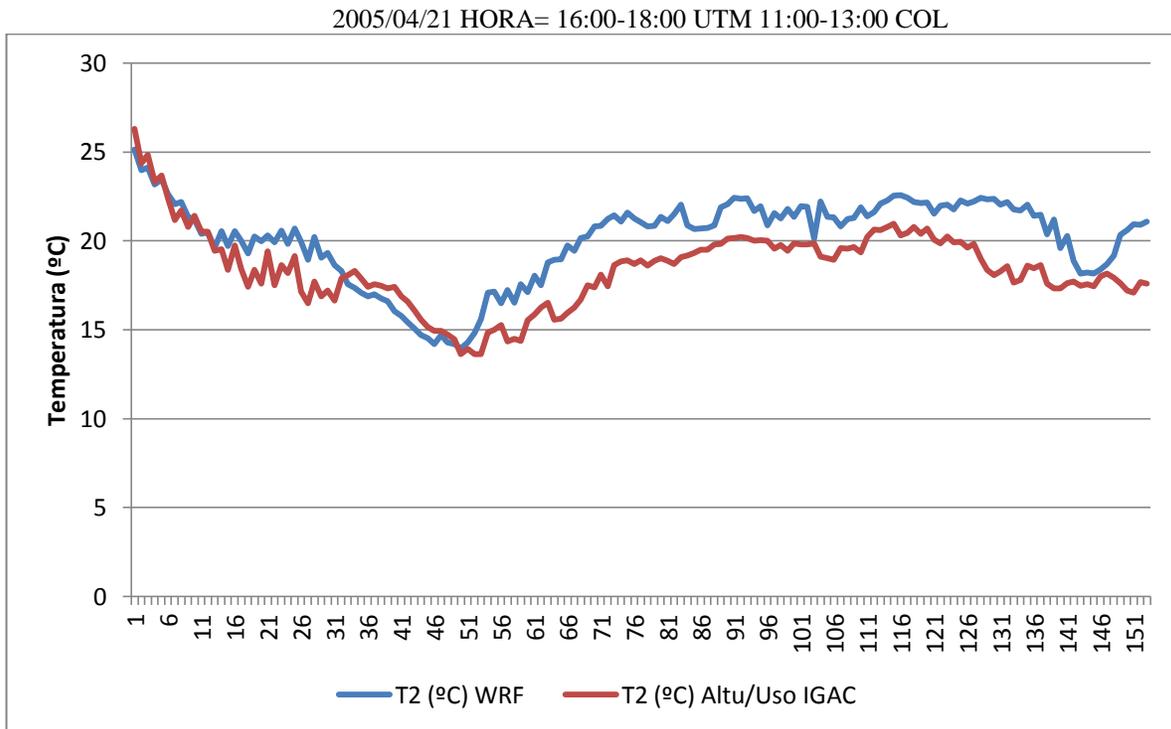


Figura 42 Temperatura WRF contra T°C modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil B

En la figura 43 se muestran los diferentes valores de temperatura simulados en los cuatro escenarios. Los resultados son similares a los presentados también en el perfil A de la figura 39.

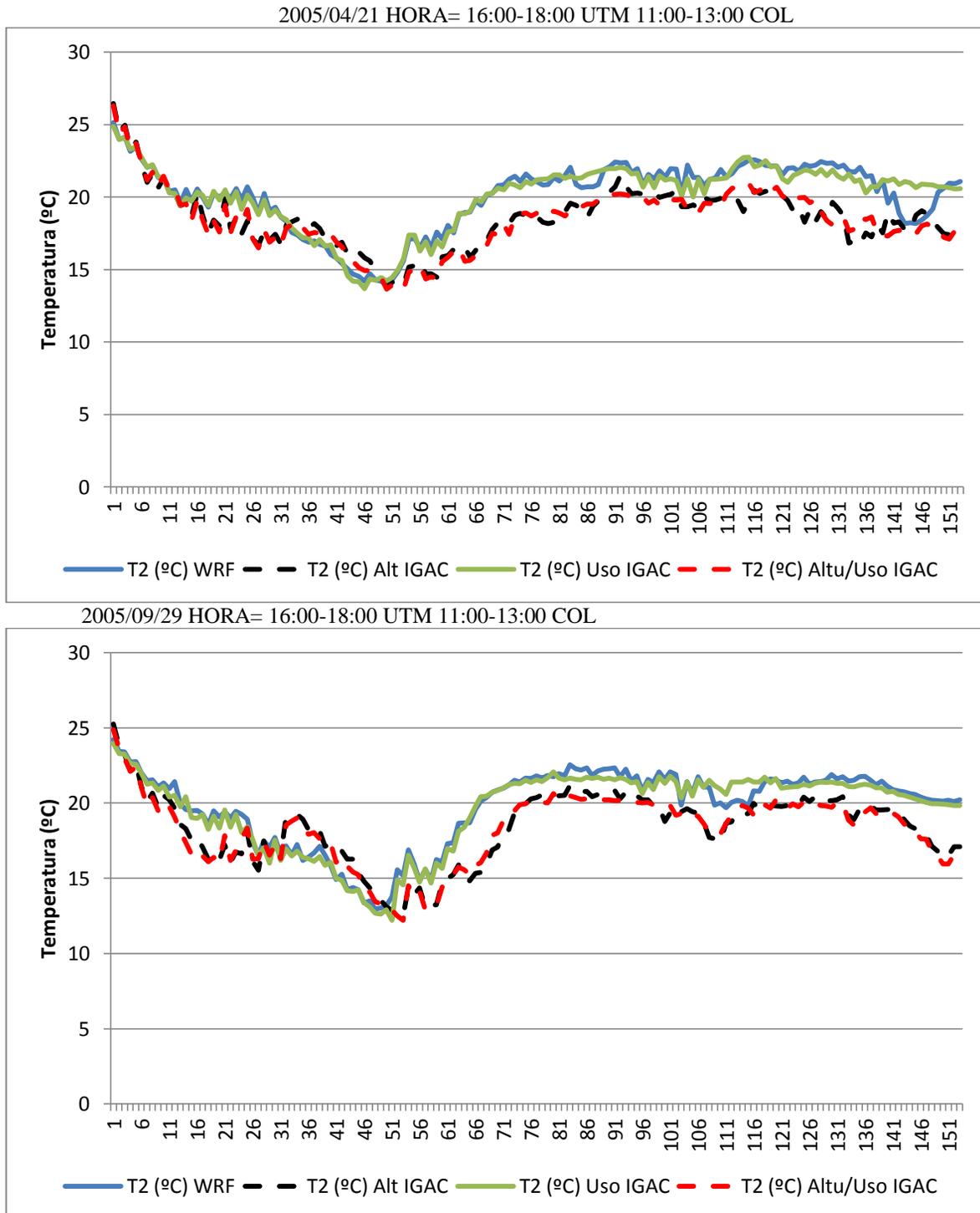


Figura 43 Comparación de Temperatura en los 4 escenarios propuestos perfil B

8.2 Estimación y correlación de resultados de precipitación - RAINNC

Se realizó la comparación entre los valores generados en el escenario uno, donde se tienen los valores de precipitación sin modificar las variables estáticas (elevación y usos del suelo), restando los demás resultados en donde sí se modificaron estas variables estáticas. En la figura 44 se puede observar que hay gran variación en las zonas de ladera tanto en la vertiente del río Magdalena (lado izquierdo) como en la zona del pie de monte llanero (lado derecho).

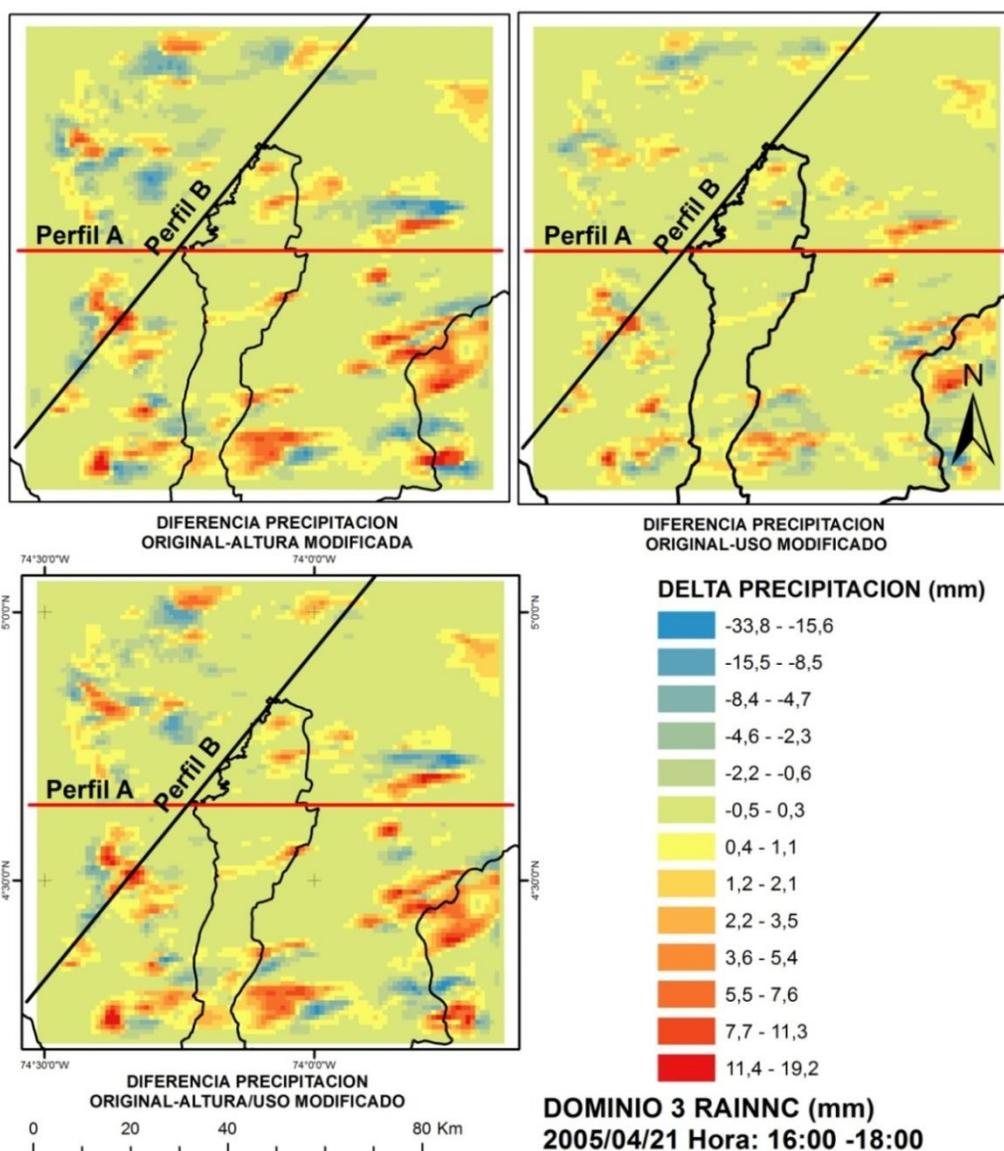


Figura 44 Diferencia de precipitación WRF-IGAC todos los escenarios 2005/04/21 HORA= 16:00-18:00 UTM 11:00-13:00 COL

Aunque en la simulación del mes de abril figura 44 se presentan menos niveles de precipitación, también se puede ver la tendencia de distribución de la precipitación de la figura 45. Por ejemplo, las zonas del parque de Chingaza. Se presentan áreas de coloración azul al lado de las áreas rojas, casi de la misma forma, lo que refleja la relocalización de la cantidad de lluvia.

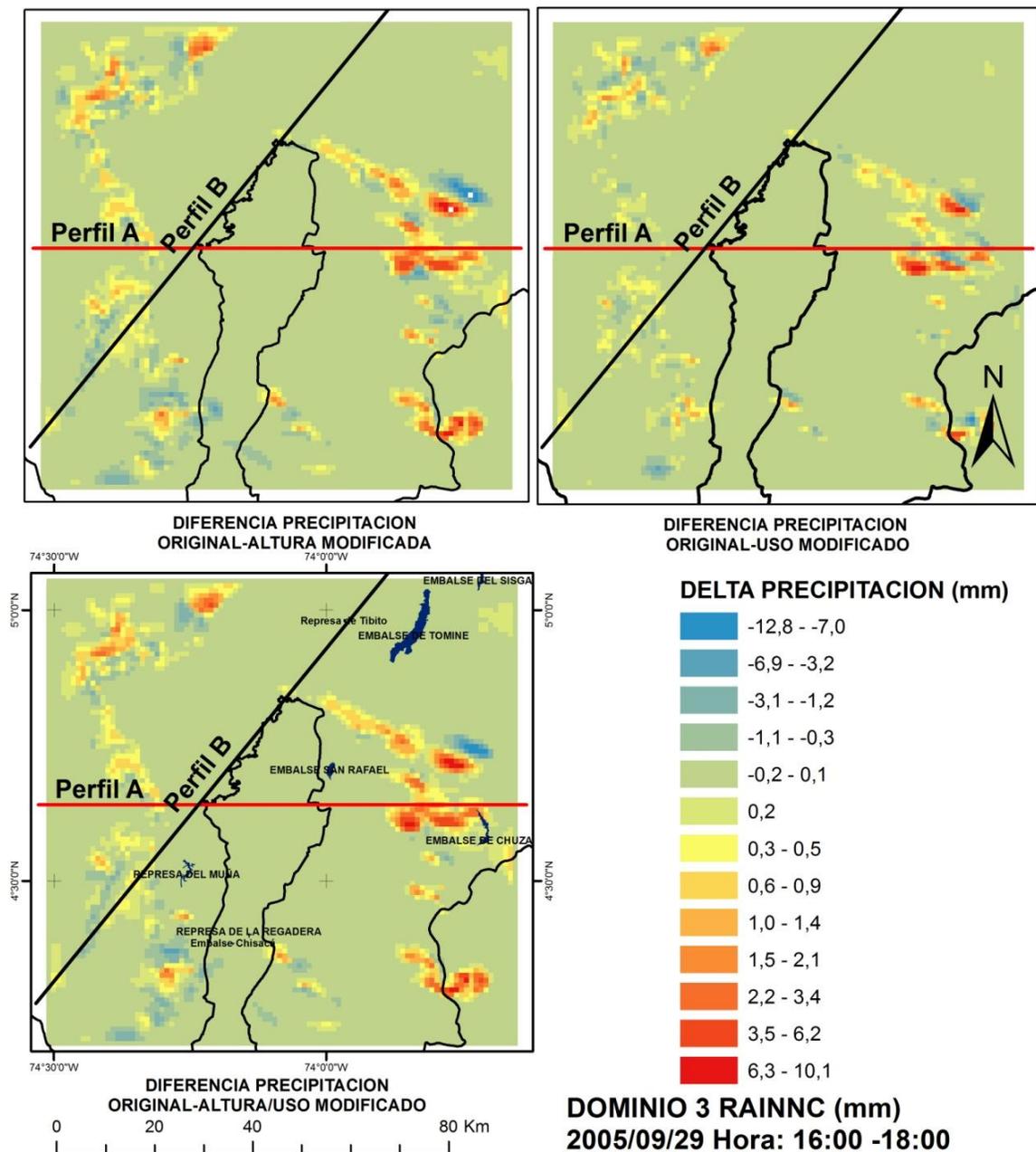


Figura 45 Diferencia de precipitación todos los escenarios 2005/09/29 HORA=16:00-18:00 UTM 11:00-13:00

COL

8.2.1 Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realiza usando regresión lineal entre la variable de precipitación con la elevación. Esto nos da como resultado que no existe buena relación estadística, ya que el R^2 es muy bajo y la pendiente de la recta es casi cero ver figura 46. Para nuestro caso específico, es necesario realizar otros tipos de análisis para poder determinar algunas conclusiones.

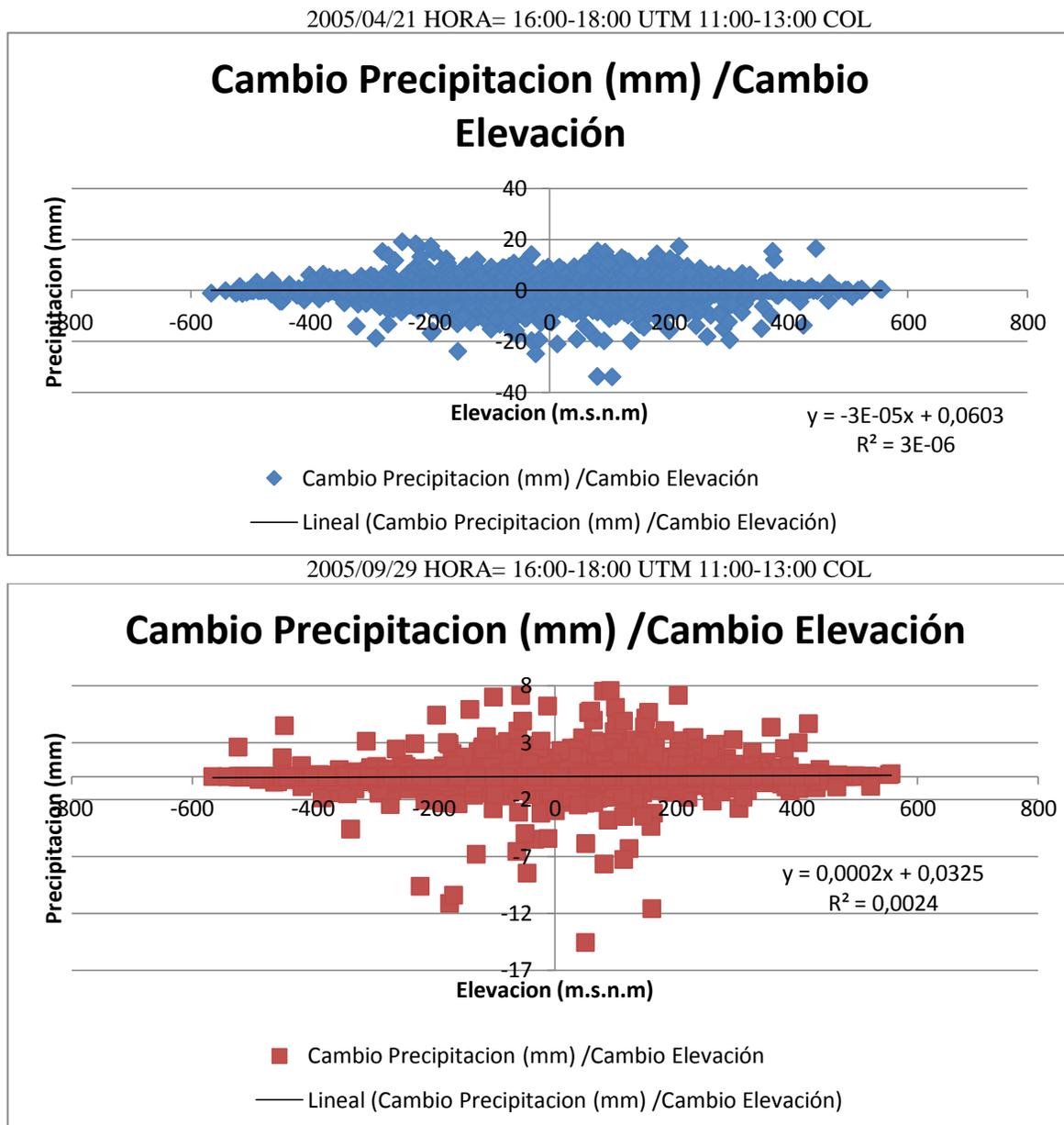


Figura 46 Diferencia de cambio de la precipitación (WRF-IGAC)Vs diferencia relación de elevación (WRF-IGAC)

Al igual que en el caso de la figura 46, no se presenta relación entre la diferencia de cambio de la precipitación respecto al cambio de uso con este método estadístico de regresión lineal ver figura 47.

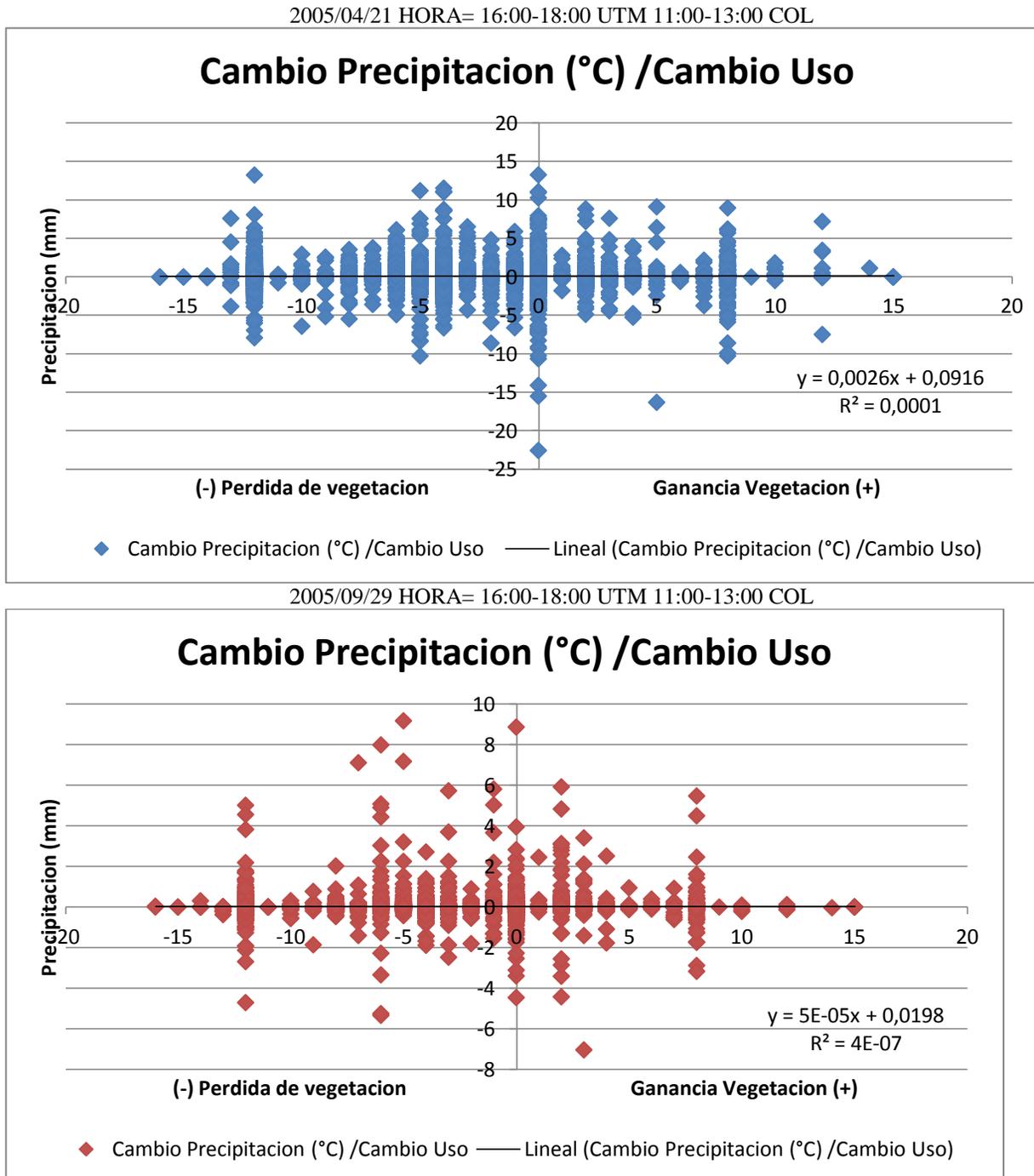


Figura 47 Diferencia de cambio de precipitación (WRF-IGAC) Vs diferencia relación de cambio de uso del suelo (WRF-IGAC)

8.2.2 Resultados Perfil A

Tanto en abril como en septiembre, se aprecia un desplazamiento de la precipitación debido a la nueva ubicación de la barrera montañosa, donde se presenta el fenómeno de condensación, esto se aprecia entre las celdas 19-25 ver la figura 48.

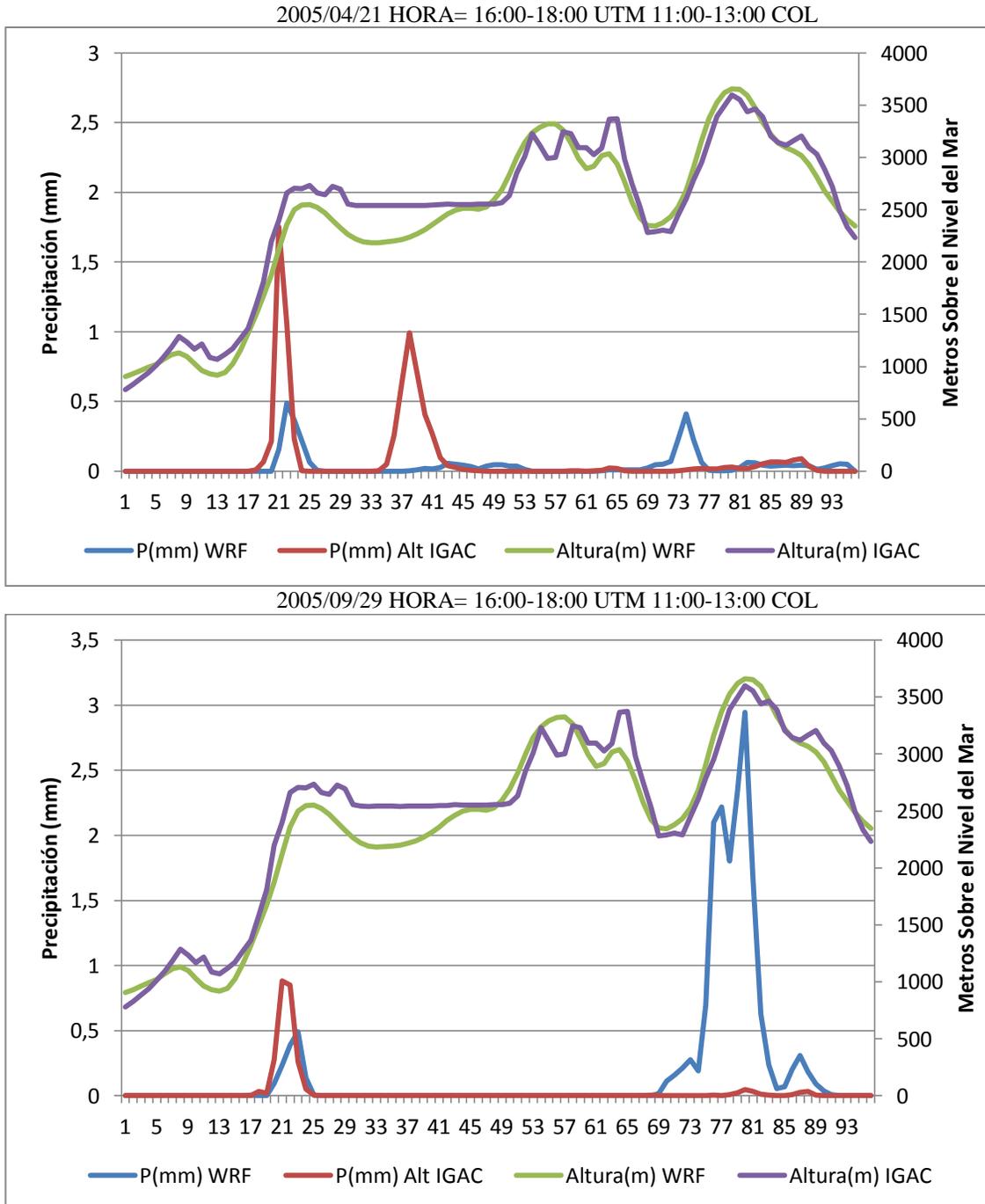


Figura 48 Elevación WRF e IGAC Vs Precipitación simulada WRF e IGAC perfil A

Se aprecia una disminución de la precipitación cuando se cambia el uso del suelo. Las zonas donde se presentó baja precipitación coinciden con las zonas en donde la variación del uso de suelo tuvo tendencia a la pérdida de cobertura vegetal ver figura 49. Es de aclarar que esto es solo en los perfiles de estudio, porque en las figura 47 y 48 se encuentra redistribución de precipitación, lo que quiere decir que en unos lugares disminuye en función de otros que aumentan.

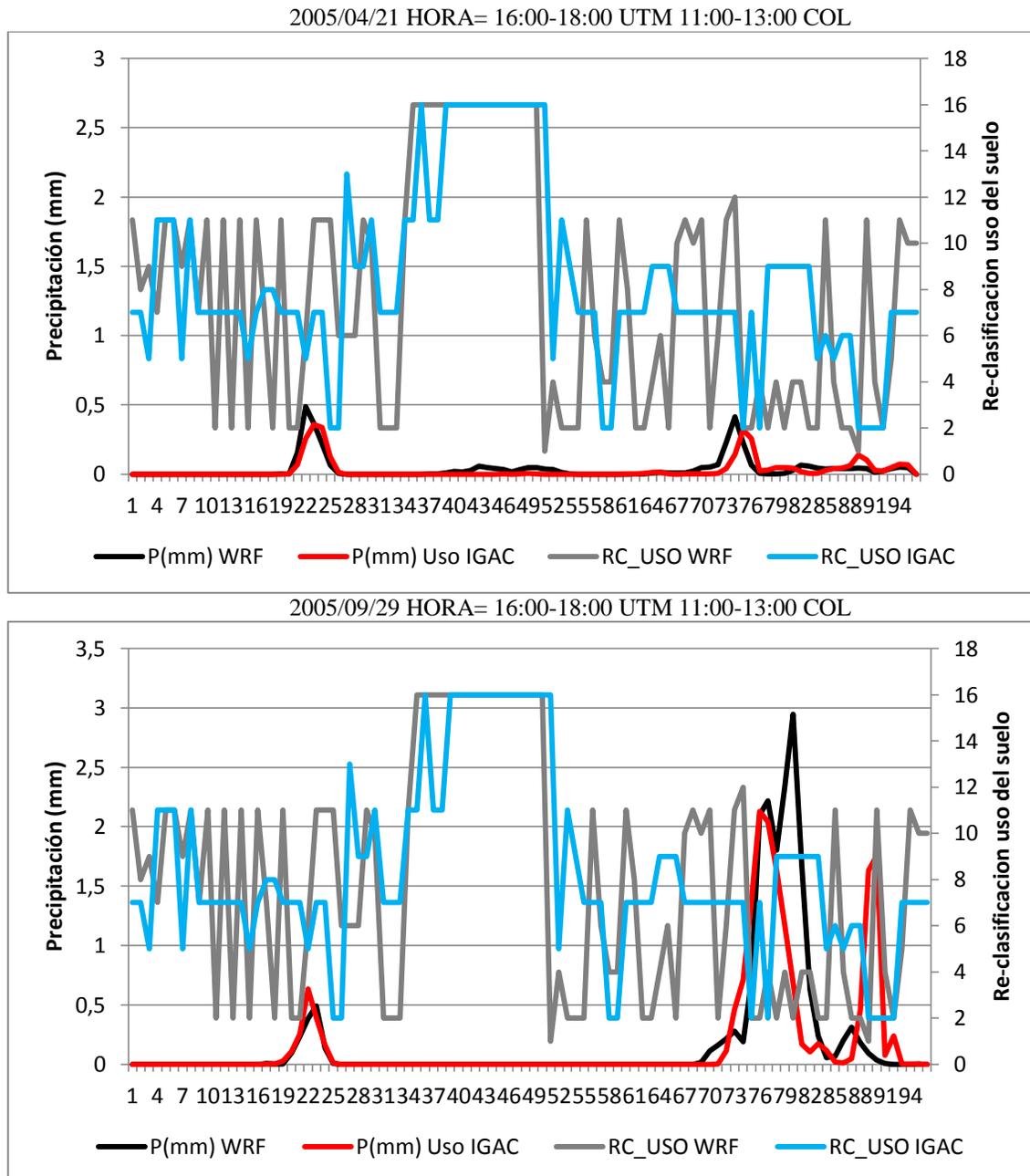


Figura 49 Relación de cambio (RC) del uso del suelo/Precipitación perfil A

Se aprecia un desplazamiento de la precipitación hacia la izquierda de la figura 50 en las celdas 19-25, debido a que se distribuye sobre el flanco occidental de la cordillera occidental, mientras en el pico de precipitación del WRF de las celdas 69 -91 (derecha) se disminuye la precipitación, dado que este se desplaza hacia el sur ver figura 44-45.

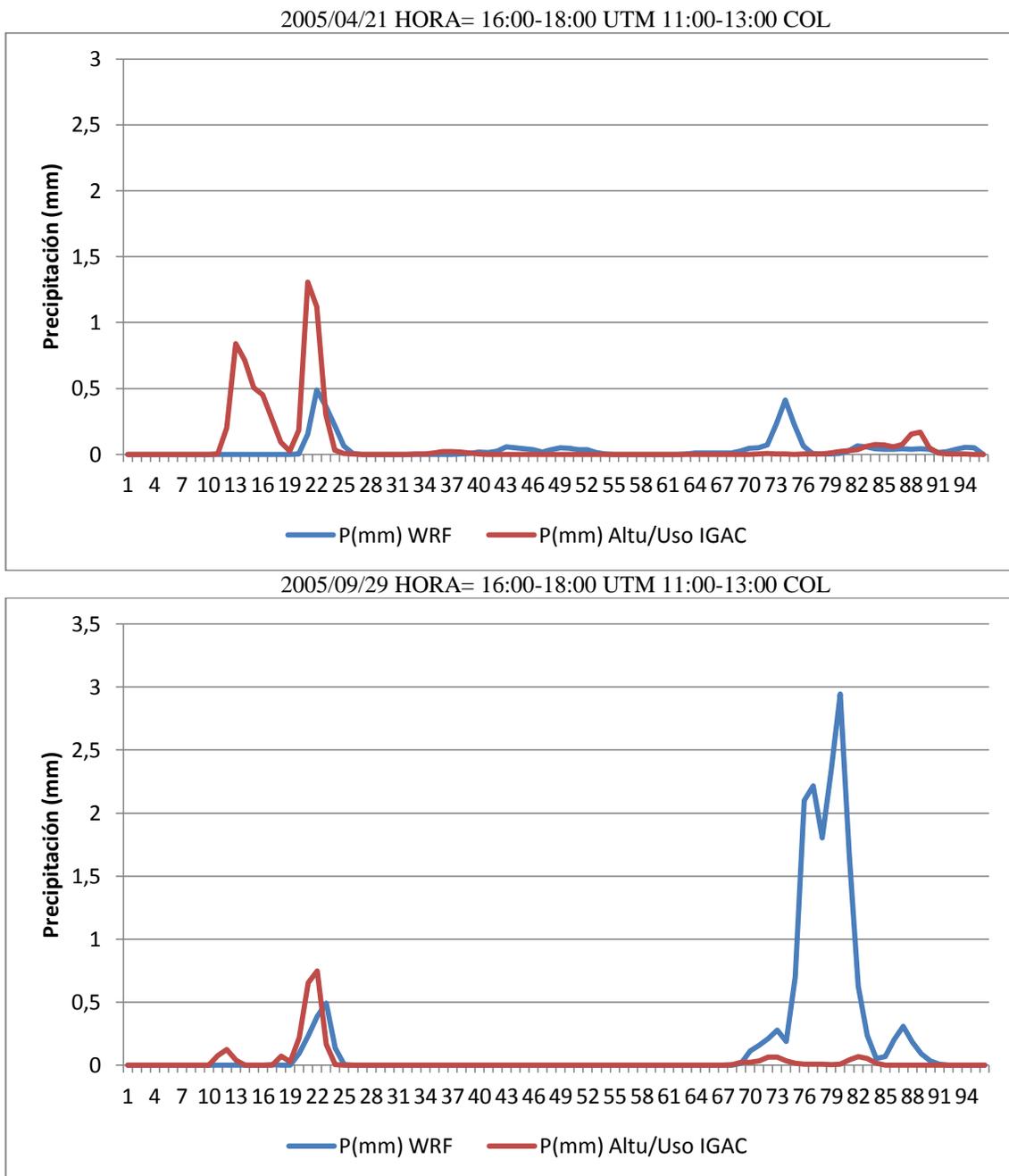


Figura 50 Precipitación WRF contra precipitación modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil A

El uso del suelo modifica la precipitación y se aprecia en este perfil de la figura 51, la cual se mantiene muy parecida con los resultados de la precipitación original. La variación de la elevación, modifica de una manera más atenuada la precipitación.

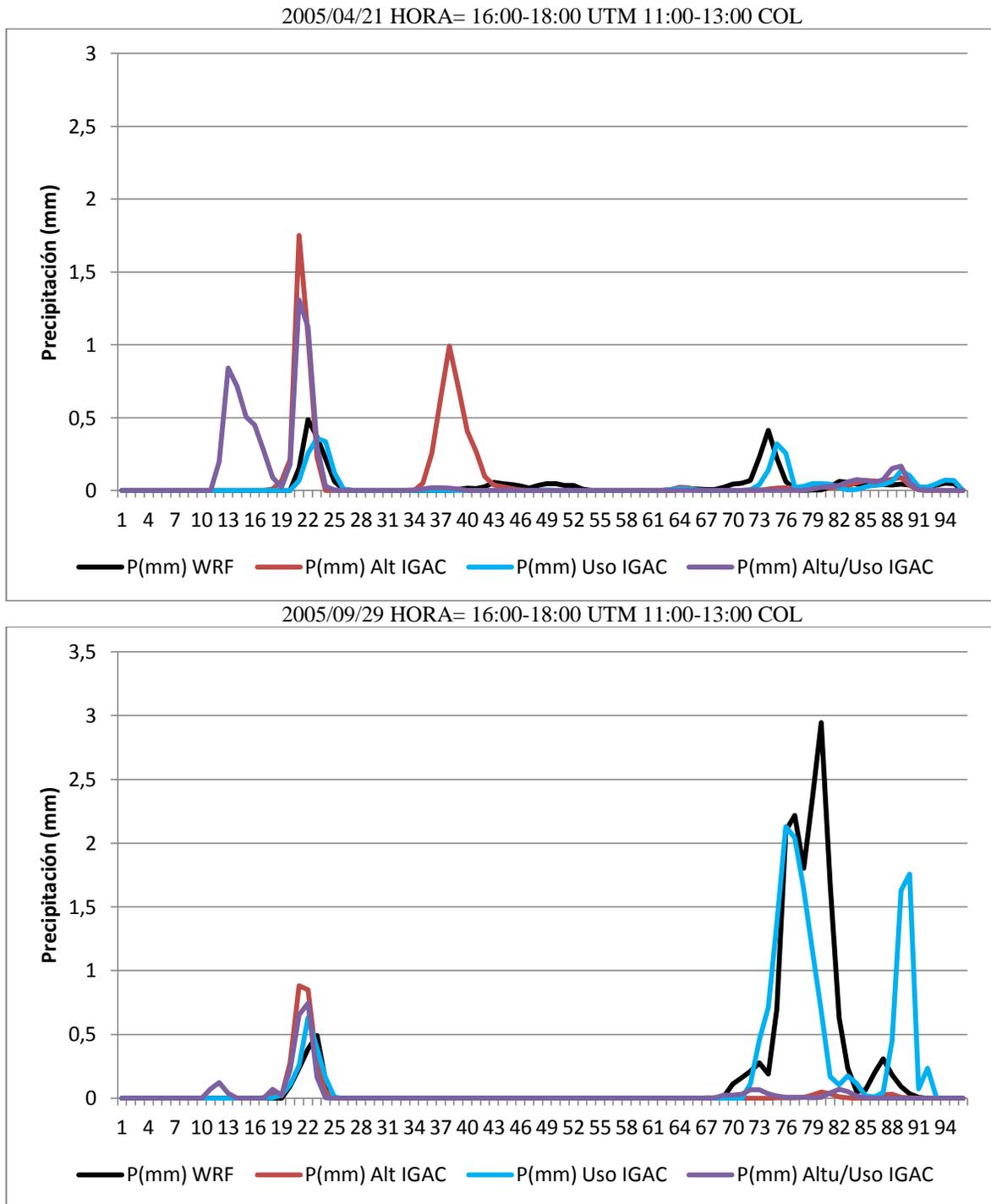


Figura 51 Comparación de Precipitación en los 4 escenarios propuestos perfil A

8.2.3 Resultados Perfil B

En el perfil B se aprecia más característicamente la redistribución de la precipitación por la modificación de la elevación como en el caso de la figura 52 se ve que se desplaza a hacia la izquierda porque la elevación del IGAC es más alta que la del WRF. Esta precipitación se presenta por el fenómeno de condensación de los vientos húmedos del Valle del Magdalena.

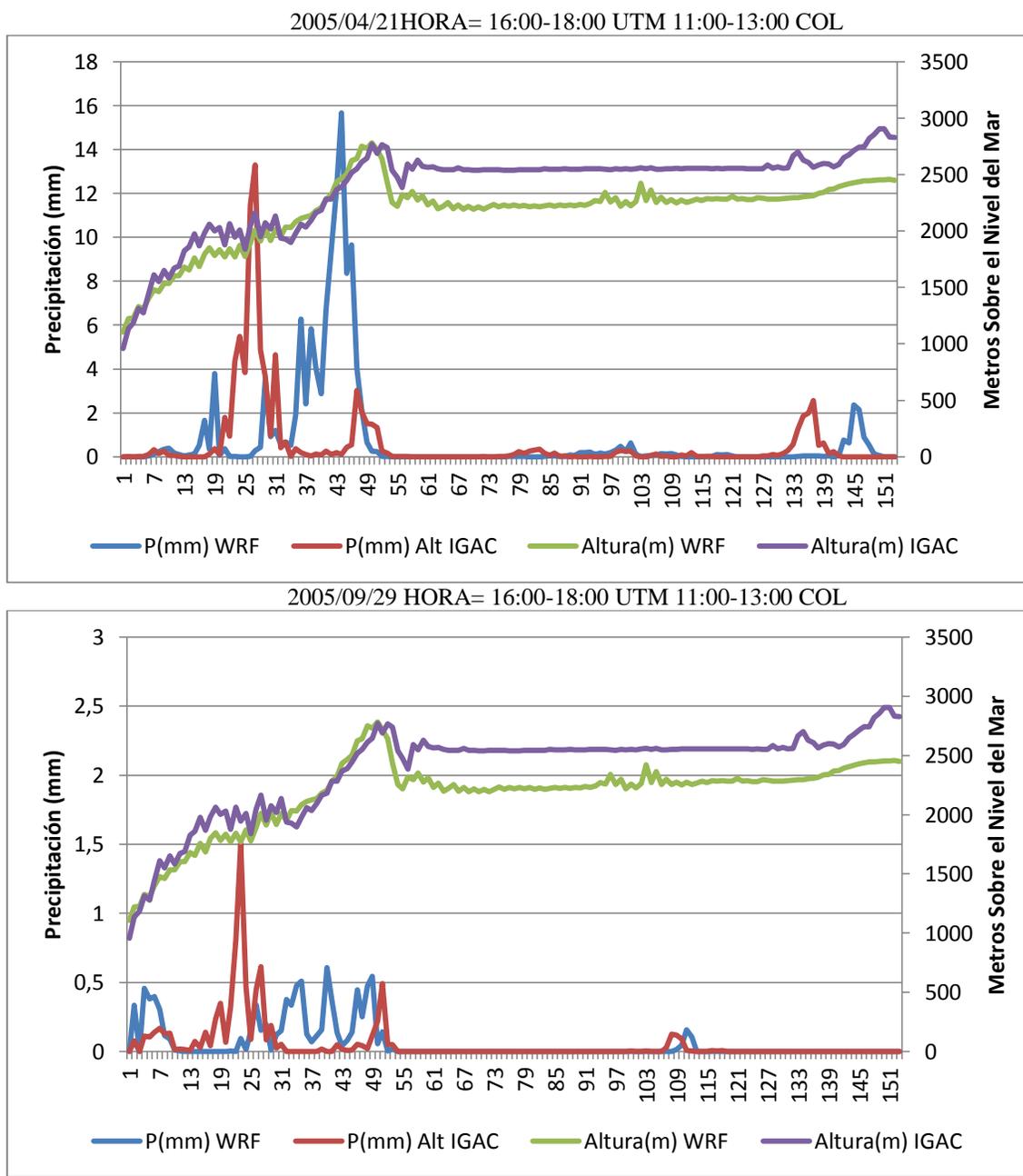


Figura 52 Elevación WRF e IGAC Vs Precipitación simulada WRF e IGAC perfil B

Aunque se presenta diferente intensidad en la precipitación de las dos épocas evaluadas, se presenta una disminución de este fenómeno ver figura 53. Aunque no es concluyente, se aprecia esta tendencia de cambio en las zonas donde se disminuye la cobertura vegetal.

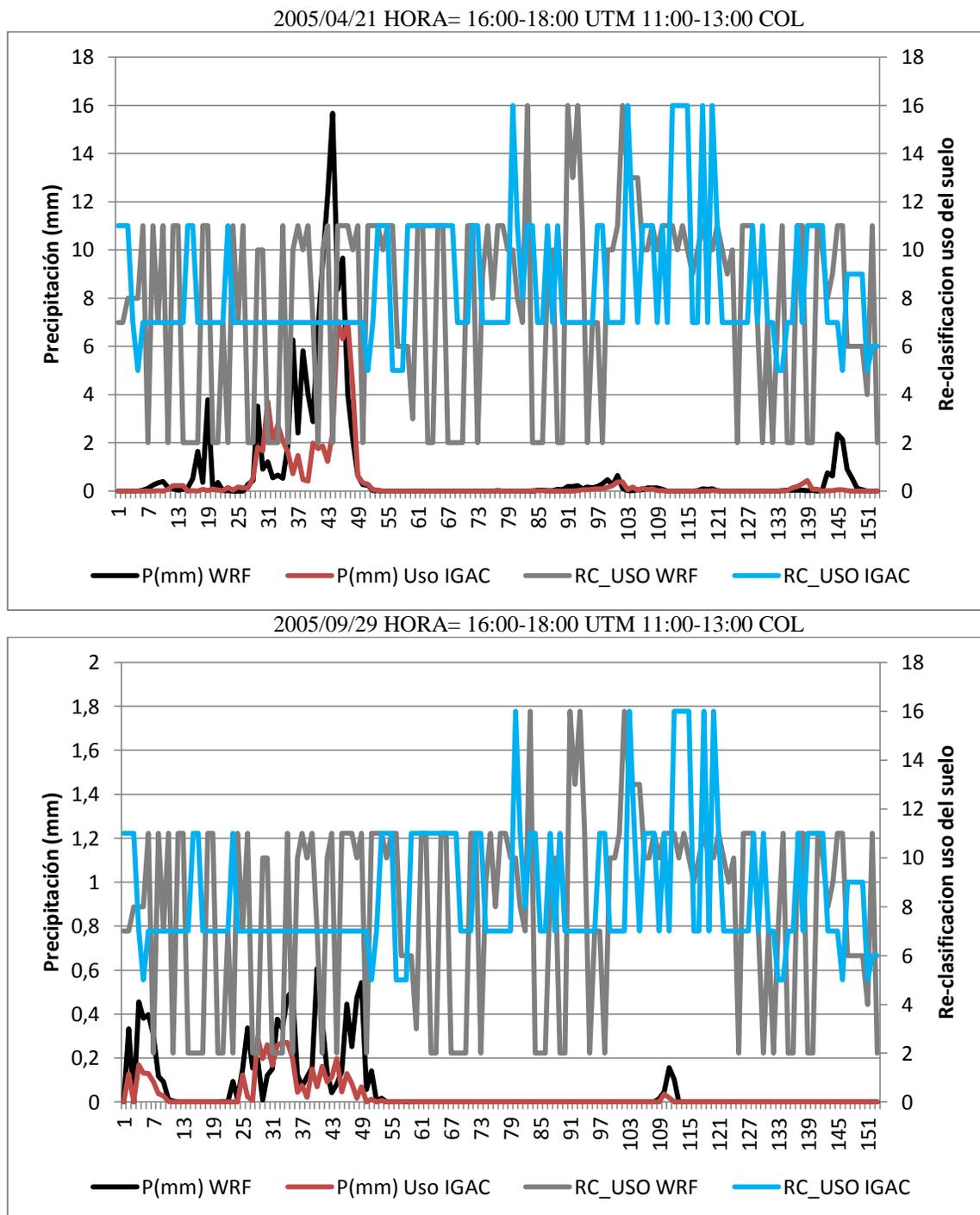


Figura 53 Relación de cambio (RC) del uso del suelo/Precipitación perfil B

La elevación influye de manera considerable tanto en el perfil A figura 51 como en el perfil B ver figura 54, en la relocalización de la precipitación. Cabe anotar que el uso del suelo también modifica este fenómeno.

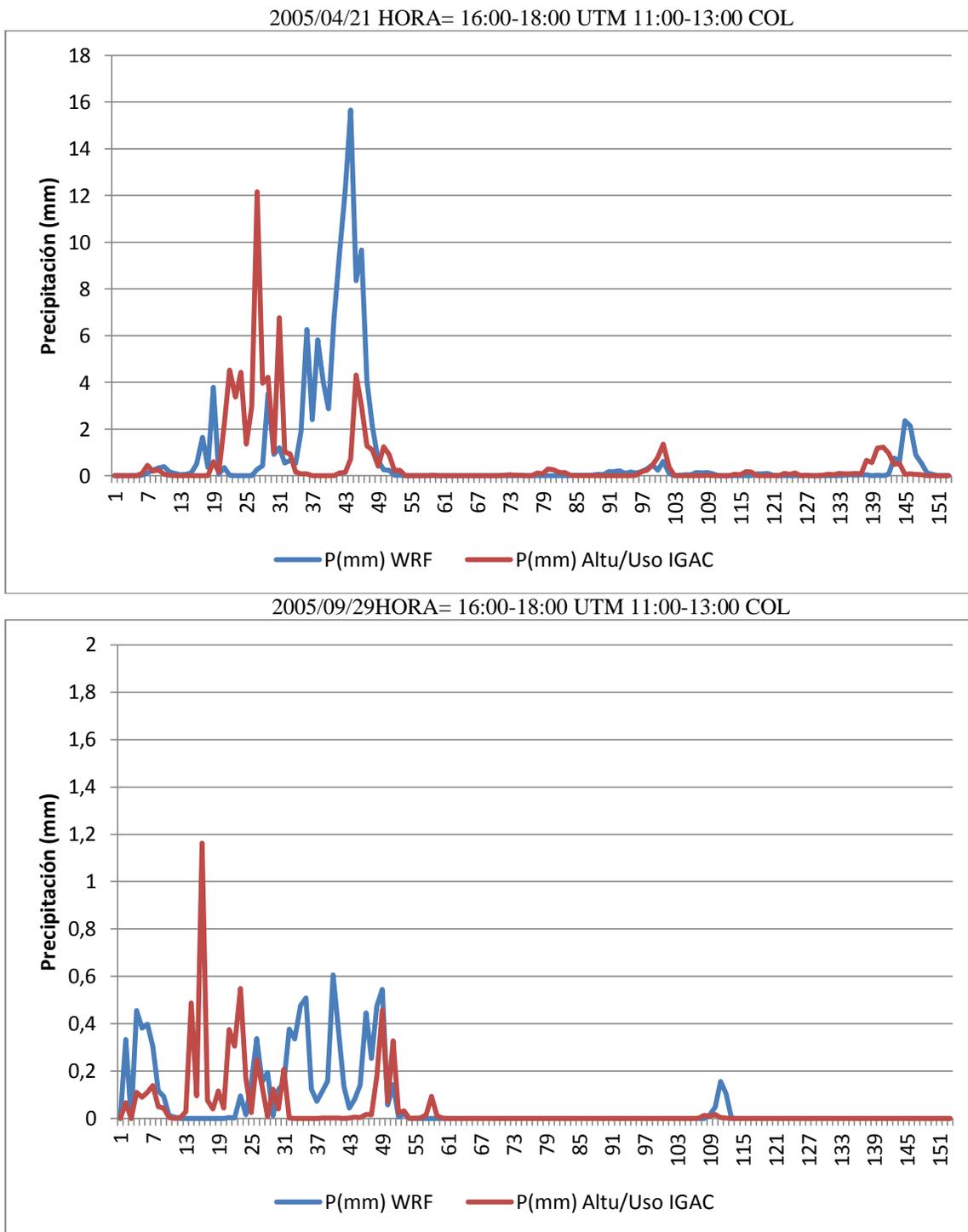


Figura 54 Precipitación WRF contra precipitación modificando Elevación y Usos del suelo IGAC perfil B

Aunque la simulación se realiza en dos épocas diferentes, se pueden establecer patrones de comportamiento en la modificación de elevación y uso del suelo. Con la elevación hay relocalización de estas precipitaciones y con los usos del suelo puede haber aumento o disminución de precipitación en algunas zonas ver figura 55. Es complicado establecer algunos patrones para determinar relaciones Uso del suelo/precipitación. Estas dudas se dejan planteadas para próximas investigaciones.

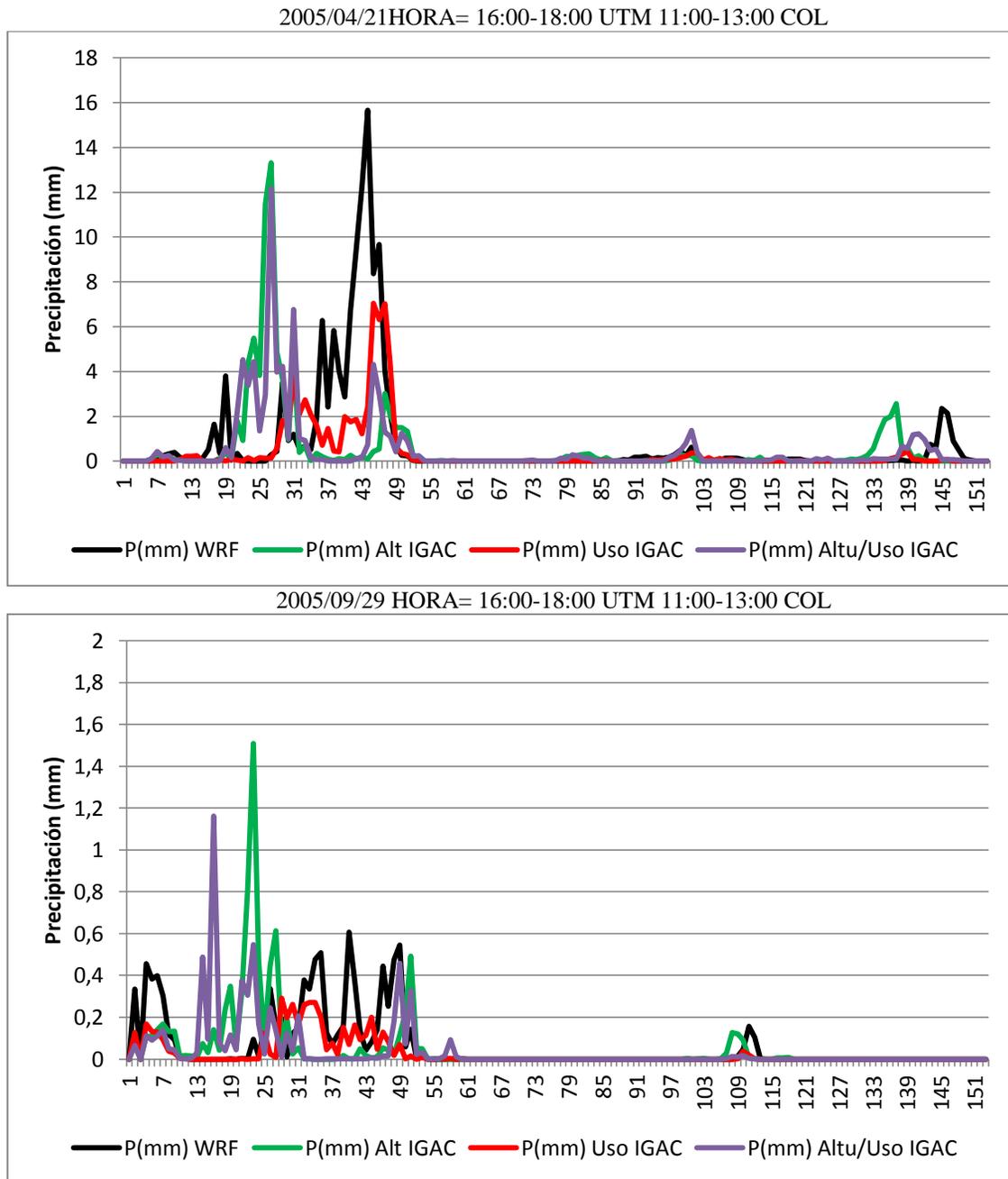


Figura 55 Comparación de Precipitación en los 4 escenarios propuestos perfil B

8.3 Evaluación de datos

Para corroborar los datos obtenidos en los diferentes escenarios de la simulación, es necesario compararlos con datos reales. Con este fin se buscó en primera instancia las estaciones climatológicas del IDEAM, entidad encargada de los recursos naturales y condiciones hidro-meteorológicas a nivel nacional..

Se evaluaron 19 estaciones en el proyecto del IDEAM. Sin embargo solo se contó con datos de 3 estaciones para temperatura y 4 estaciones para precipitación. (Tabla 9-10). No se pueden sacar conclusiones debido al escaso número de datos. Lo que se puede decir es que el modelo está arrojando datos dentro de un rango posible de simulación y no está arrojando datos que salgan de la realidad.

Al no tener suficientes datos de las estaciones climáticas para la época de la simulación, se toman estos datos de manera apreciativa para saber que los resultados en términos generales concuerdan con valores reales observados para las respectivas fechas de simulación. En cuanto a la precipitación, no se presenta en las estaciones con datos, al igual que las precipitaciones simuladas en estos puntos es muy baja.

Tabla 9 Datos estaciones automáticas-datos temperatura

ESTACIONES		2005/04/21 Hora 16-18				2005/09/29 Hora 16-18					
COD	NOMBRE	ESTACION	T2_O	T2_A	T2_U	T2AU	ESTACION	T2_O	T2_A	T2_U	T2AU
21205012	UNIVERSIDAD NACIONAL	19,4	19,4	20,5	19,7	20,7	----	20,6	20,6	20,5	20,5
21206940	CIUDAD BOLIVAR	16,3	19,5	16,9	18,8	15,2	----	19,7	18,7	19,2	18,2
21206990	TIBAITATA	20,1	20,7	18,4	20,5	18,2	18,5	21,5	20,4	21,2	20,1

Tabla 10 Datos estaciones automáticas-datos precipitación

ESTACIONES		2005/04/21 Hora 16-18					2005/09/29 Hora 16-18				
COD	NOMBRE	ESTACION	P_O	P_A	P_U	P_AU	ESTACION	P_O	P_A	P_U	P_AU
21205012	UNIVERSIDAD NACIONAL	0,000	0,035	0,000	0,001	0,000	----				
21206940	CIUDAD BOLIVAR	0,000	0,000	0,005	0,004	0,114	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21206990	TIBAITATA	0,000	0,081	0,041	0,005	0,276	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23065180	VILLETA	---					0,000	0,010	0,000	0,000	0,000

T2_O= Temperatura original, T2_A=Temperatura Elevación modificada, T2_U=Temperatura Uso modificado, T2_AU=Temperatura Elevación y Uso modificado, P_O= Precipitación original, P_A= Precipitación Elevación modificada, P_U= Precipitación Uso modificado, P_AU= Precipitación Elevación y Uso modificado,

Se realizó la búsqueda de otras fuentes de datos para poder comparar los datos simulados con datos reales. Una fuente de datos son los suministrados por Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) - NASA. Este proyecto es una unión de la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar las

precipitaciones tropicales y subtropicales, entre 35° N y 35° S. Se cuenta con datos de diferentes resoluciones espaciales las cuales varían entre los 5°X5 °, 1°X1°, 0.25°X0.25°, 25kmX25X, y 4kmX4km.

Se descargan datos en formato *.HDF los cuales pueden ser manipulados en el software MatLab con el módulo de "hdftool". En la figura 56 podemos ver la interfaz gráfica en la WEB de donde se puede descargar la información de este servicio.



Add Selected Files To Cart		Add All Files in All Pages To Cart	
<input checked="" type="checkbox"/> Select All in Page	<input type="checkbox"/> File Names/Descriptive File Names	Start Time	
<input checked="" type="checkbox"/>	2A25.20050422.42378.7.HDF.Z (23.71 MB)	2005-04-22 20:59:57	
One Click Download: HDF (FTP) HDF (HTTP) QPeNDAP		Metadata	
<input checked="" type="checkbox"/>	2A25.050422.42378.6.HDF.Z (20.38 MB)	2005-04-22 20:59:57	
One Click Download: HDF (FTP) HDF (HTTP) QPeNDAP		Metadata	

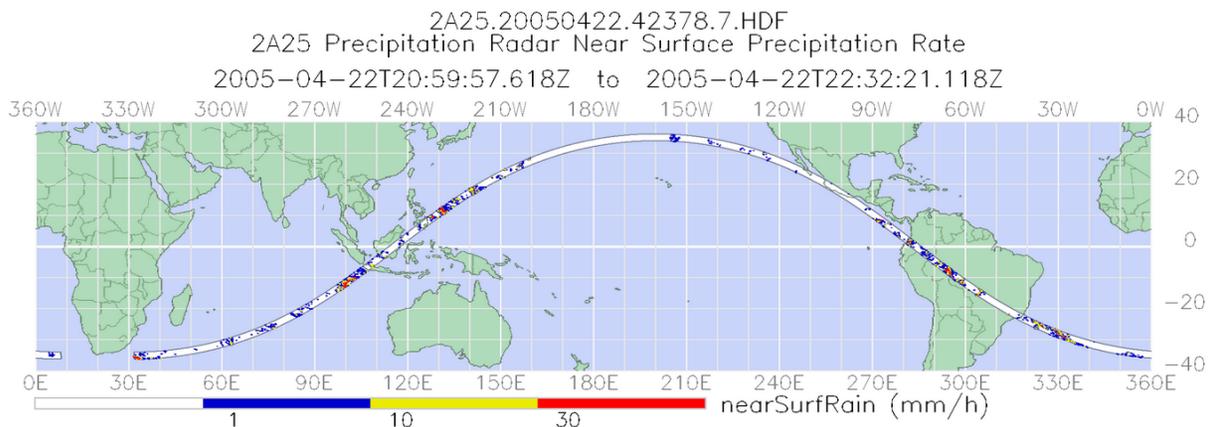


Figura 56 Página descarga datos Tropical RainfallMeasuringMission (TRMM) <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/services>

Para el periodo de tiempo en el cual se realizó la investigación no hay datos que coincidan con la zona de estudio, pero para eventuales investigaciones es clave esta opción de datos para corroborar la información modelada, ya que se descargan zonas continuas y no solo información puntual como en el caso de las estaciones convencionales.

9. CONCLUSIONES

- El análisis comparativo de la geodata (elevación y uso del suelo) incorporada en el modelo WRF con datos que representan mejor la realidad en escala local, permitió establecer que hay grandes diferencias que habría que tratar para mejorar dicho modelo.
- Se estableció que la variable elevación es de mayor importancia que el uso del suelo para una mejor representación de la temperatura a 2 metros (T2).
- La modificación de la variable elevación genera una relocalización de las zonas de precipitación (RAINNC) debido al cambio de la morfología del relieve. Al mejorar la elevación con sus picos en las montañas y no ser tan suavizadas como los datos del WRF se localizan mejor los sistemas de lluvia a sotavento.
- Aunque se presenta un gran cambio de categorías de uso del suelo entre el MODIS/WRF y del IGAC no se presenta un cambio drástico como pasar de una cobertura de bosque a urbano, más bien el nivel de cambio es pequeño por ello las variables de temperatura y precipitación no varían mucho con la modificación del uso del suelo.
- Los cambios de topografía minimizan los errores sistemáticos que es necesario corregir en post procesos para obtener buenos pronósticos y evitar algunos procesos de corrección.

- Para la variable usos del suelo, es necesario investigar y fortalecer la metodología en su valoración cuantitativa¹ (datos del MODIS/WRF vs datos modificados del IGAC) para obtener resultados más representativos, de tal forma que se pueda identificar su relación con las variables simuladas de temperatura y precipitación.
- La información captada por los diferentes satélites², así como los datos simulados, nos arrojan datos de una superficie continua (raster), los cuales son ideales porque permiten validar modelos y compararlos entre sí. Por otro lado, en el caso de los datos de las estaciones climáticas, se debe efectuar la comprobación punto a punto sin que se puedan validar los cambios generados en toda una superficie.

¹En la investigación se hizo una comparación de la variación cualitativa del uso del suelo (WRF Vs IGAC) teniendo como parámetro la pérdida o ganancia de vegetación.

²Existen diversas fuentes de información de datos meteorológicos que son captados por sensores remotos, los cuales pueden usarse para validar modelos que están a disposición de manera gratuita en los portales de las agencias meteorológicas mundiales.

ANEXOS

A. - ANEXOS: E1 modelo WRF

Es importante precisar que en Colombia se ejecutan 2 modelos de mesoescala que se utilizan actualmente: el modelo WRF y el modelo MM5, de los cuales el MM5 cuenta con una mayor difusión institucional y oficial, ya que es a partir de los modelos generados en esta plataforma que se realizan las predicciones climáticas; así por ejemplo, instituciones como el IDEAM en la fuerza aérea y en la academia lo utilizan para realizar sus modelos de predicción.

Por su parte, el modelo WRF se ha estado implementando en la última década ya que es el remplazo del MM5 por ello no es utilizado ampliamente, o al menos, su utilización es más restringida, dado que, la investigación en está apunta su configuración a las condiciones locales de Colombia.

Todo modelo por simple que sea debe partir de una información inicial para poder resolver las diferentes ecuaciones que están escritas en los códigos, los cuales constituyen un software. Esta información se expresa como datos, los cuales son las condiciones iniciales y parametrizaciones.

Esta información esta almacenada en diferentes archivos que pueden ser leídos por el programa, en la primera etapa el WRF, la cual se llaman Pre-processing System WRF – WPS son archivos binarios cuyas bases de datos pueden ser consultadas y descargadas en servidores de varias instituciones como la *UCAR*. Están compuestos de información referida a (albedo, temperatura, altura, precipitación, presión atmosférica, etc...)

Para efectos de la investigación aquí planteada, las variables que se utilizan de esta base de datos, son aquellas que se refieren a la variables estáticas del uso del suelo y altura.

En la etapa del WPS se convierten las bases de datos al formato NetCDF para así ser usados por el WRF. En este formato es posible realizar las modificaciones pertinentes de los datos de cobertura/uso del suelo y elevación que vienen del modelo estadounidense por defecto para incluir los valores de la sabana de Bogotá. Es necesario contar con una herramienta que sea capaz de leer/escribir archivos en este formato “.nc” algunas de ellas son:

NCAR Command Language () ,ARWpost, GrADS, MatLAB, Model Evaluation Tools (MET), WRF Post processor (WPP), ArcGIS

El modelo WRF necesita tener la configuración de los parámetros de las ecuaciones físicas que modelarán la simulación. Esta configuración se realizó con la asesoría del profesor tutor, y estudiantes de la Maestría en Ciencias-Meteorología que realizan investigaciones permanentes en la utilización del WRF para Colombia además esta parte se sale de los alcances de esta investigación. Para realizar la validación de los datos de salida de la simulación se pueden usar varios métodos como son los gráficos y los estadísticos, métodos que serán tenidos en cuenta dentro del presente trabajo. La figura 57 nos muestra el diagrama de flujo del modelo WRF:

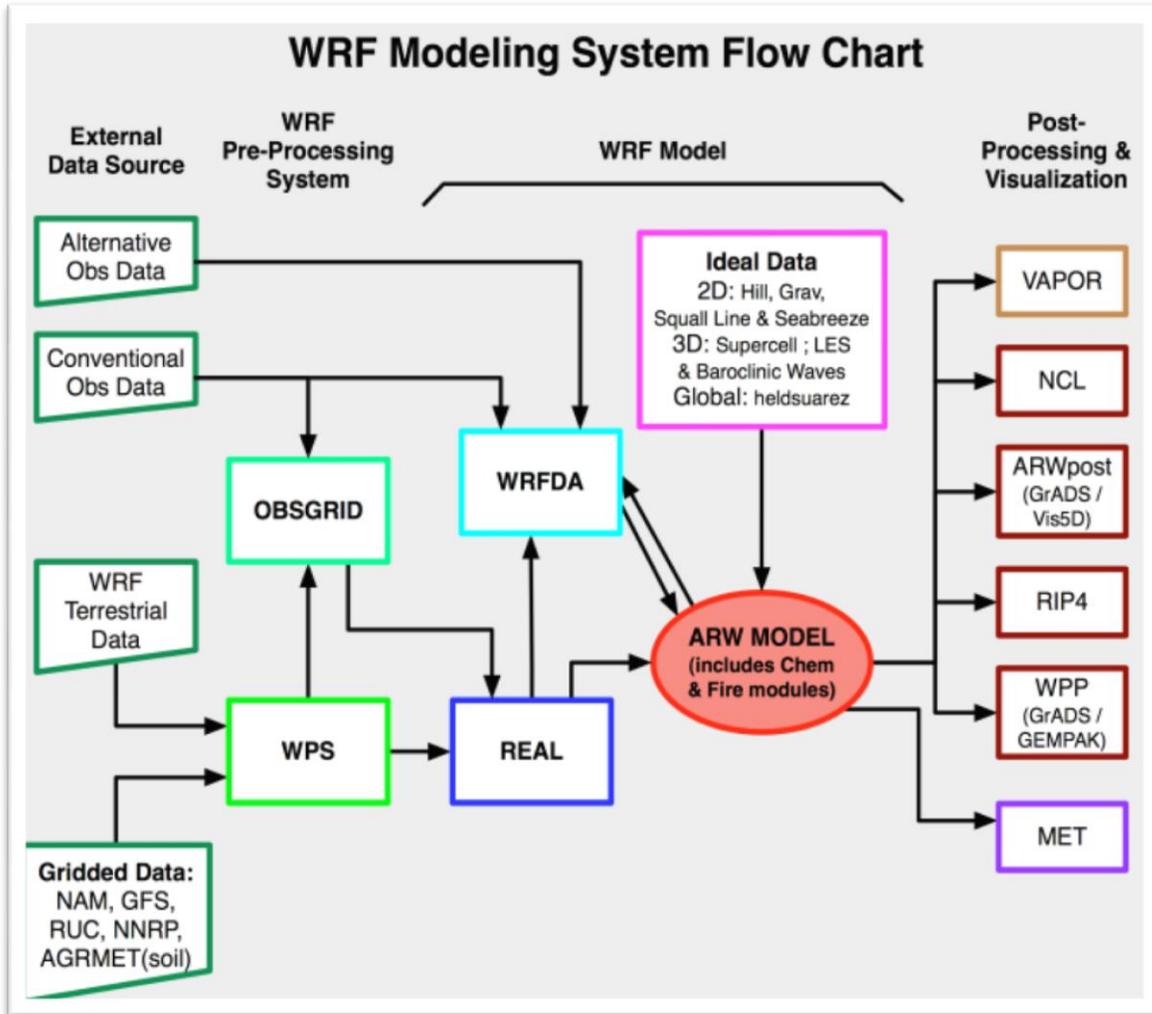


Figura 57 Diagrama del modelo WRF (ARW 2012)

A continuación se describen cada uno de los componentes que se muestran en el diagrama anterior.

Datos de entrada

Se necesitan datos de diversas fuentes y diverso tipo como datos de entrada al modelo meteorológico WRF. Estos incluyen datos de análisis meteorológico (AVN) en los que se consideran las variables de entrada dinámicas, y los datos topográficos y datos de uso del suelo que serían las variables de entrada estáticas

Datos meteorológicos

Existen diferentes formatos en los que se puede guardar la información atmosférica, entre los que se encuentran los formatos binarios empaquetados y formatos científicos estandarizados como son GRIB, CDF y NetCDF (Aristizabal, 2010).

Las condiciones iniciales y de contorno para el WRF se obtienen a partir del Global Forecast System (GFS). Este depende de la National Centers for Environmental Prediction (NCEP), el cual es una unidad del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este modelo es corrido cuatro veces al día produciendo un pronóstico meteorológico hasta para 16 días. El formato en el que se presentan estos archivos se denomina FNL; estos son archivos binarios GRIB (GRIdded Binary). Es una forma concisa de almacenar información que se emplea normalmente en meteorología y esta estandarizada por la Organización Meteorológica Mundial.

Los parámetros que incluyen estos archivos son: Presión superficial, presión a nivel del mar, elevación geopotencial, temperatura, humedad relativa, vientos y movimientos verticales. Los archivos a usar son extraídos de la página web de UCAR <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/> después de realizar una inscripción de usuario.

Datos de Elevación y uso del suelo

El conjunto de datos para elevación y uso del suelo para todo el planeta pueden ser descargados de forma gratuita a través de la página del WRF: (http://www.mmm.ucar.edu/wrf/OnLineTutorial/Basics/GEOGRID/ter_data.htm).

Esta información hace parte de datos geográficos con resolución de 30'', 2, 5' y 10' donde 10' (aproximadamente 18,5 Km) cada 30'' (aproximadamente 900 m).

Algunos datos que descargamos de esta fuente no se tienen en cuenta en el procesamiento que realiza el WRF, aunque en la etapa de pre-procesamiento se desempaqueten, como es el caso de los datos de pendiente SLOPECAT los cuales están en la carpeta ISLOPE de la base de datos que se carga (*ISLOPE: slope data. (Not yet used by WRF). Resolution: 1 degree ((ARW) Modeling System Version 2.2).*

La información obtenida en esta página se encuentra en diferentes resoluciones que van desde cada 10' (aproximadamente 18,5 Km) hasta cada 30'' (aproximadamente 900 m). Esta GEODATABASE de uso del suelo y elevación viene por defecto para usar con el modelo, la investigación modifica estos datos cambiándolos con la distribución de los usos del suelo y una corrección de la elevación de Colombia.

Sistema de Pre-procesamiento del WRF (WPS)

WPS es un conjunto de tres programas que se encargan de preparar los datos de entrada, para casos de modelaciones reales (no ideales). La figura 58 muestra los componentes del WPS:

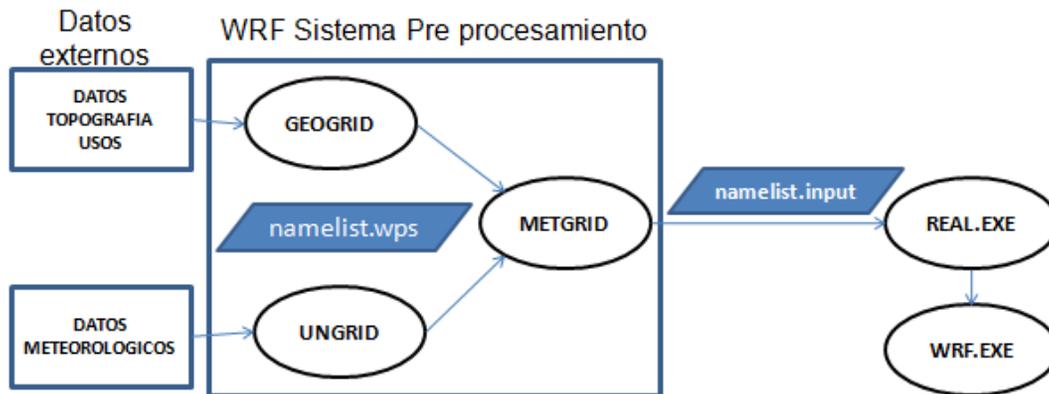


Figura 58 Componentes del WPS

- *Namelist.wps*

Es un archivo plano en el cual se dan todas las condiciones de entrada para el procesamiento de los datos: se fija la fecha de la simulación, se dan las coordenadas de cada uno de los dominios de modelación y se especifican las coordenadas de los dominios anidados

- *Geogrid.exe*

En este programa se definen los dominios, se fijan los puntos de coordenadas de las retículas y se interpola el conjunto de datos de información terrestre de entrada entre los puntos de retícula. Para cada punto de retícula se fijan latitud, longitud, categoría y uso del

suelo, elevación del terreno, temperatura media anual del subsuelo y albedo promedio mensual. Los datos que usa son los datos descargados de la página WRF antes mencionada

- *Ungrib.exe*

Este programa se encarga de leer y transformar los archivos meteorológicos de tipo GRIB en un formato intermedio. Este nuevo archivo se produce porque generalmente los archivos GRIB contienen más información de la que realmente se necesita para inicializar la simulación. Dependiendo de la fuente de la que se obtengan los archivos, el proceso de depuración que se requiere es diferente. Por ello, el programa incluye un conjunto de subprogramas denominados Vtables (los cuales deben ser seleccionados por el usuario) los cuales hacen que la información sea comprendida por el programa.

- *Metgrid.exe*

Este programa hace la interpolación horizontal de los archivos producidos por geogrid.exe y ungrib.exe. Es decir, los datos de variables estáticas uso del suelo, elevación con los datos meteorológicos. Los datos de salida al ejecutar el programa Metgrid son archivos NetCDF (.nc) Los archivos NetCFD son archivos multi-temporales, es decir, en un mismo archivo se almacenan varias capas unas encima de otras representando distintos periodos.

El formato NetCDF (Network Common Data Format) fue creado por UNIDATA como formato estándar para que sea usado en algunos de los software que ofrece la comunidad científica. La característica de este formato es que contiene la suficiente información para poder saber qué clase de data se encuentra en el archivo (tipo de variable, unidades, dimensiones, institución que la creo, etc.) a diferencia de otros formatos que necesitan de un archivo adicional para su correcta interpretación. También se puede contar como otra de sus características la portabilidad de su formato, es decir, puede ser manipulado por cualquier computadora que tenga las librerías NetCDF instaladas en su disco duro.

En esta etapa de preparación para correr el modelo es donde manipulamos los datos de uso del suelo y elevación con ayuda del Software Matlab 2012 y ArcGIS 10 para después correr la simulación del WRF.

- *real.exe*

Este programa verifica que todas las condiciones estén listas para poder correr WRF y posteriormente se encarga de interpolar verticalmente los datos en cada punto de retícula del dominio a simular.

- *wrf.exe*

Es el ejecutable y corre todos los algoritmos y nos presenta los resultados de la simulación de acuerdo a la configuración del archivo *namelis.input*

Visualización

En esta etapa se emplean diferentes herramientas que permiten visualizar los resultados obtenidos después de la simulación. Entre estas herramientas se encuentran los programas *ncarg*, *ncview*, *ncmapit*, *MatLab* y *ArcGIS*.

Post-proceso

En esta etapa se realiza la valoración de los datos obtenidos de la ejecución del WRF y se ajustan por varios métodos estadísticos, se presentan errores que pueden ser recurrentes o propios de las configuraciones, son necesarios los datos externos para poder realizar las diferentes valoraciones y generar los algoritmos para el proceso de corrección.

B.- ANEXO: Configuración nameliss.wps/namelist.input

namelis.wps

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2005-04-20_00:00:00','2005-04-20_00:00:00','2005-04-
20_00:00:00',
end_date = '2005-04-22_00:00:00','2005-04-22_00:00:00','2005-04-
22_00:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
parent_id = 1, 1, 2,
parent_grid_ratio = 1, 3, 3,
i_parent_start = 1, 8, 27,
j_parent_start = 1, 9, 28,
s_we = 1, 1, 1,
e_we= 45, 85, 97,
s_sn = 1, 1, 1,
e_sn= 45, 85, 97, ,
geog_data_res = 'modis_30s+10m','modis_30s+2m', 'modis_30s+30s',
dx = 9000,
dy = 9000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat= 4.6,
ref_lon = -74.00,
truelatl = 4.6,
geog_data_path = '/home/jose/programa/datogeo'
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2,
/3
```

 namelis.input

```

&time_control
run_days           = 2,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2005, 2005, 2005,
start_month        = 04, 04, 04,
start_day          = 20, 20, 20,
start_hour         = 00, 00, 00,
start_minute       = 00, 00, 00,
start_second       = 00, 00, 00,
end_year           = 2005, 2005, 2005,
end_month          = 04, 04, 04,
end_day            = 22, 22, 22,
end_hour           = 00, 00, 00,
end_minute         = 00, 00, 00,
end_second         = 00, 00, 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
fine_input_stream  = 0, 0, 0,
history_interval   = 60, 60, 60,
frames_per_outfile = 2, 2, 2,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 0
/
&domains
time_step          = 30,
time_step_fract_num = 0,
time_step_fract_den = 1,
max_dom            = 3,
s_we               = 1, 1, 1,
s_sn               = 1, 1, 1,
e_we               = 45, 85, 97,
e_sn               = 45, 85, 97,
e_vert             = 28, 28, 28,
p_top_requested    = 5000,
num_metgrid_levels = 27,
num_metgrid_soil_levels = 2,
dx                 = 9000, 3000, 1000,
dy                 = 9000, 3000, 1000,
grid_id            = 1, 2, 3,
parent_id          = 1, 1, 2,
i_parent_start     = 1, 8, 27,
j_parent_start     = 1, 9, 28,
parent_grid_ratio   = 1, 3, 3,
parent_time_step_ratio = 1, 3, 3,

```

```

feedback                = 1,
smooth_option           = 0
/
&physics
mp_physics              = 3,      3,      3,
ra_lw_physics           = 1,      1,      1,
ra_sw_physics           = 1,      1,      1,
radt                    = 9,      9,      9,
sf_sfclay_physics      = 1,      1,      1,
sf_surface_physics     = 2,      2,      2,
bl_pbl_physics          = 1,      1,      1,
bldt                    = 0,      0,      0,
cu_physics              = 1,      1,      0,
cudt                    = 5,      5,      5,
isfflx                  = 1,
ifsnow                  = 0,
icloud                  = 1,
surface_input_source    = 1,
num_soil_layers         = 4,
sf_urban_physics        = 0,      0,      0,
maxiens                 = 1,
maxens                  = 3,
  maxens2                = 3,
  maxens3                = 16,
ensdim                  = 144,
num_land_cat            = 20
/
&fdda
/
&dynamics
w_damping               = 0,
diff_opt                = 1,
km_opt                  = 4,
  diff_6th_opt           = 0,      0,      0,
  diff_6th_factor        = 0.12,  0.12,  0.12,
base_temp               = 290.
damp_opt                = 0,
zdamp                   = 5000.,  5000.,  5000.,
dampcoef                = 0.2,    0.2,    0.2,
khdif                   = 0,      0,      0,
kvdif                   = 0,      0,      0,
non_hydrostatic         = .true.,  .true.,  .true.,
moist_adv_opt           = 1,      1,      1,
scalar_adv_opt          = 1,      1,      1,
/
&bdy_control
spec_bdy_width          = 5,
spec_zone               = 1,
relax_zone              = 4,
specified                = .true.,  .false., .false.,
nested                  = .false., .true.,  .true.,
/
&grib2
/

```

```
&namelist_quilt  
nio_tasks_per_group      = 0,  
nio_groups                = 1,
```

GLOSARIO DE TERMINOS

Base de datos geográfica: (geodatabase) Conjunto de datos geográficos almacenados y organizados con el fin de facilitar su acceso y recuperación mediante un ordenador

Coordenada: Se dice de las líneas que sirven para determinar la posición de un punto, y de los ejes o planos a que se refieren aquellas líneas

Ejecutar: Realizar las operaciones especificadas por un programa de un ordenador

Elevación: Distancia vertical de un cuerpo respecto a la tierra o a cualquier otra superficie tomada como referencia

Temperatura: Magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente

T2: Temperatura medida a 2 m del suelo en °C

Meteorología: Ciencia que trata de la atmósfera y de los meteoros

Meteoro: Fenómeno atmosférico, que puede ser aéreo, como los vientos, acuoso, como la lluvia o la nieve, luminoso, como el arco iris, el parhelio o la paraselene, y eléctrico, como el rayo y el fuego de Santelmo.

Modelo: Esquema teórico, generalmente en forma matemática, de un sistema o de una realidad compleja, como la evolución económica de un país, que se elabora para facilitar su comprensión y el estudio de su comportamiento.

Perfil: Figura que representa un cuerpo cortado real o imaginariamente por un plano vertical.

Precipitación: Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra

Programa: Conjunto unitario de instrucciones que permite a un ordenador realizar funciones diversas, como el tratamiento de textos, el diseño de gráficos, la resolución de problemas matemáticos, el manejo de bancos de datos, etc.

RAINNC: precipitación acumulada entre tiempos de simulación en mm

Retícula: Placa de cristal dividida en pequeños cuadrados, generalmente de un milímetro de lado, que se usa para determinar el área de una figura

Simular: Representar algo, fingiendo o imitando lo que no es.

Software: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora.

SIGLAS

ArcGIS	Sistema de información geográfica de ESRI
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
MatLab	MATrixLABoratory (Software de matemáticas)
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SIG	Sistema de Información Geográfica
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

BIBLIOGRAFÍA

- ARISTIZABAL G Juan P. (2010) Determinación de las condiciones de frontera para el modelo de calidad de aire de Bogotá empleando CHIMERE. Tesis Maestría Ing Ambiental, Universidad Nacional de Colombia P23-30
- ARW User's Guide for Advanced Research WRF Modeling System Version 3 - (2012), National Center for Atmospheric Research
- ARW User's Guide for Advanced Research WRF Modeling System Version 2.2 - (2008), National Center for Atmospheric Research
- BARONA Elizabeth A , GIRON Ernesto, FEISTNER Kelly L, John L. Dwyer Glenn Hyman (2006). Método de procesamiento de imágenes MODIS para Colombia. Centro Interamericano de Agricultura Tropical Cali-Colombia
- BARRERA Silva, Patricia. (2010) Glaciares, voz de alerta que se extingue Universidad Nacional de Colombia UN -Periódico, edición impresa 130
- BOSHELL José Francisco, Gloria E. León A., Andrés J. Peña Q. (2011), MANUAL N°4 Metodologías para generar y utilizar información meteorológica a nivel subnacional y local frente al cambio climático, Programa AACC -GIZ GmbH- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit P 46-62

- BUSTOS Salas Cristian (2004) Aplicación de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación de Impacto Ambiental: Análisis del Proceso, Universidad de Chile P 45 - 95
- CASELLAS Jorba, Oriol (2005), Tesis Doctoral Simulación de los campos de viento de la Península Ibérica y el área geográfica de Catalunya con alta resolución espacial para distintas situaciones meteorológicas típicas, Universidad Politécnica de Catalunya -España (6) 15-20
- DANE - Departamento Nacional de Estadística (2012) Informe de coyuntura económica regional- ICER.,ISSN 1794-3582
- DEMEIJ Alejandro and J.F Vinuesa (2014), Impact of SRTM and Corine Land Cover on meteorological parameters using WRF, Atmospheric Research 143. P 351-370
- FARR, Tom G., Paul A. Rosen, (2006)The Shuttle Radar Topography Mission Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, Pasadena, CA, P 24-27
- FERNANDEZ R., D. Allende, F. Castro, P. Cremades, E. Puliafito,(2010). Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/CHEM: implementación de datos globales y locales para Mendoza. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184
- FIGUEROA Urbano Juan José Amides. (2012) Análisis de Resultados de la Prueba de Rendimiento del modelo WRF para El Salvador a diferentes resoluciones Con1 a 4 procesadores, San Salvador - El Salvador
- FREITAS Saulo R. y LONGO KARLA M. (2002). Monitoreo del Transporte de la Contaminación Antropogénica y Proveniente de la Quema de Biomasa en América del Sur - Instituto de Física de la Universidad de São Paulo.

F.A.O Food and Agriculture Organization of the United Nations,(2005)Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra, Roma-Italia, ISSN 1684-8241, P 5-50

GAITÁN Mauricio, CANCINO Juliana, BEHRENTZ Eduardo (2007). Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. Universidad de los Andes Bogotá - Colombia

GONZALEZ Carlos, Muñoz Francisco (2014) Wind prediction using Weather research Forecast Model WRF A case study inn Peru, Energy Conversion and Management 81 P363-373

GSELLA A. (2014), Evaluation of MM5, WRF and TRAMPER meteorology over the complex terrain of Po Valley, Italy, Atmospheric Environment 89 P 797-806

HIGASHI, M. y BURNS, T.P, 1991.Enrichment of ecosystem theory.En:Higashi M & T.P. Burns. (Eds.). Theoretical Studies of Ecosystems. The network perspective. London, Cambridge University Press.

IDEAM, (2010). Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE LandCover adaptada para Colombia Escala 1:100.000. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.

IAvH, IDEAM, IIAP, INVEMAR, SINCHI, (2011). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá D.C., Colombia. 384.

ILLANES Yañez Lizett Pamela (2010) Sensibilidad a diferentes parametrizaciones de capa límite atmosférica y suelo con el modelo WRF, para el llano de chajnantor–Dept de Meteorología Universidad de Valparaíso Chile

- JEONG J-H, KIM Y-K, (2009). The Application of High-resolution Land Cover and Its Effects on Near-surface Meteorological Fields in two Different coastal areas, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment P 432-449.
- JINGBIAO liao, Tijian Wang (2014) Impacts of different urban canopy schemes in WRF/Chem on regional climate and air quality in Yangtze River Delta, China, Atmospheric Research P 226-243
- KIM Jea-Chul, LEE, Chong Bum (2011) A Study of Sensitivity of WRF Simulation to Microphysics Parameterizations, Slope Option and Analysis Nudging in Haean Basin, South Korea, Karlsruhe Institute of Technology, Germany P 77-82
- LÓPEZ Espinoza, J.ZAVALA Hidalgo, O.GÓMEZ Ramos (2011) Weather forecast sensitivity to changes in urban land covers using the WRF model for central México - Universidad Nacional Autónoma de México UNAM
- MARCELO MenaCarrasco, PhD, (2009) Impacto a meteorología de proyecto eólico Talinay, Escuela Ingeniería Ambiental Universidad Andrés Bello - Chile
- MICHALAKES J. (2001) Performance-portability and the Weather Research and Forecast model, Argonne National Laboratory- Chicago Illinois.
- NCAR National Center for Atmospheric Research (2010) ARW Modeling system user's guide NOAA-NCEP User's Guide for the NMM Core of the Weather Research and Forecast (WRF) Modeling System Version 3 2010
<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>

NASA (2004) Aura Press Kit Dedicated to The Health of the earth's atmosphere, NASA

PABÓN Caicedo., Rodríguez-Eraso N., J.D., Bernal-Suárez N.R. y Martínez-Collantes J. (2010). Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. 80 p.

PABÓN Daniel, THORSTEN Beisiegel (2011) Pronostico de granizadas mediante modelos numéricos regionales en la zona andina: El caso de la tormenta del 3 de noviembre de 2007 sobre Bogotá D.C.

PENAGOS Rincón John Fredy (2010), UN virtual Energía y Ambiente <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/index.html>

PSU/NCAR Mesoscale Modeling System (2005), Tutorial Class Notes and User's Guide MM5 Modeling System Version 3.

RINCON de Hoyos Miguel Eduardo (2012) Acoplamiento del modelo de mesoescala WRF al modelo de calidad del aire CALPUFF Tesis Maestría Meteorología, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Universidad Nacional de Colombia P 32-47

RUIZ Murcia José Franklyn (2009) ¿Cómo interpretar los modelos de pronóstico del estado del tiempo?, Sub dirección Meteorología IDEAM. Bogotá - Colombia

SDA Secretaria Distrital de Ambiente -, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. (2008), Informe anual de calidad del aire de Bogotá.- Colombia.

SDS Secretaría Distrital de Salud de Bogotá 2005. Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda en la ciudad de Bogotá - Colombia.

URIBE Cortes Alejandro (2012). Estimación de la capacidad del modelo WRF para pronosticar eventos extremos asociados con altas precipitaciones en la región Andina Colombiana, Tesis Maestría Meteorología Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Universidad Nacional de Colombia P 50-66.

XIAOHANG Wen and SHIHUA Lu, JIMING Jin (2011), Integrating Remote Sensing Data with WRF for Improved Simulations of Oasis Effects on Local Weather Processes over an Arid Region in Northwestern, Chinese academy of sciences - Lanzhou China.