



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Postgrados**

**Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad  
de Cuenca**

**Marcelo Astudillo Romero**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Magister en  
Ciencias de Información Geográfica

Quito, Abril de 2012

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**Colegio de Postgrados**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Modelación de dispersión espacial de contaminantes del aire en la ciudad  
de Cuenca**

**Marcelo Astudillo Romero**

Victor Viteri, PhD  
Decano del Colegio de Postgrados

---

Stella de la Torre, PhD  
Decana del Colegio de Ciencias Biológicas  
y Ambientales

---

Richard Resl, PhD (c)  
Director del Programa de Maestría en  
Sistemas de Información Geográfica

---

Pablo Cabrera, MSc  
Profesor de Maestría en  
Sistemas de Información Geográfica

---

Quito, Abril de 2012

© **Derechos de autor**

Marcelo Astudillo Romero

2012

## Agradecimientos

Un especial agradecimiento al Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la Universidad de Cuenca por facilitarme todos los recursos técnicos para llevar a cabo este trabajo.

También un sincero agradecimiento a todos mis profesores y tutores del proyecto UNIGIS de la Universidad San Francisco de Quito por brindarme sus conocimientos y experiencia.

A mi esposa Nancy, quien ha sido mi punto de apoyo y el eje fundamental para la consecución de mis metas y objetivos.

## Resumen

La Universidad de Cuenca a través del Centro de Estudios Ambientales (CEA) conjuntamente con la I. Municipalidad de Cuenca a través de la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) apoyadas por Fundación Natura y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), desde Julio del año 2003, vienen ejecutando el proyecto "Calidad del Aire" para la prevención y control de emisiones vehiculares en la ciudad de Cuenca.

En la mayoría de los países, los vehículos automotores, la actividad industrial y la generación de electricidad representan un gran porcentaje de la producción antropogénica de los óxidos de nitrógeno y de azufre. Estos, junto con el monóxido de carbono, las partículas y los compuestos orgánicos volátiles, se describen como contaminantes primarios del aire debido a que se producen directamente por el proceso de combustión.

Uno de los ejes más importantes del CEA, relacionado con el tema del proyecto de calidad de aire, tiene que ver con la generación de modelos de dispersión de contaminantes utilizando software de última generación que facilite la representación de las variaciones espaciales y temporales de los impactos de estos contaminantes en la calidad del aire.

Con este modelo se efectuaron simulaciones meteorológicas y fotoquímicas para un total de 4 horas. Las simulaciones fueron validadas a través de su comparación con observaciones en 9 puntos de medición.

En términos de un diagnóstico de los niveles de ozono en base de las observaciones, se analizaron los datos que generó el modelo, identificando las zonas hacia donde está transportándose este contaminante.

El análisis mostró que la cobertura espacial de información meteorológica es insuficiente para llegar a resultados concluyentes ya que se dispone de datos con muy baja resolución.

Las simulaciones fotoquímicas tuvieron problemas por la falta de disponibilidad de inventarios de emisiones que tenga relación con las características muy específicas del formato de los inventarios que requiere el modelo utilizado.

## Abstract

The University of Cuenca through the Center for Environmental Studies (CEA) in conjunction with I. Municipalidad of Cuenca through the Environmental Management Commission (CGA), supported by Fundación Natura and the Swiss Agency for Development and Cooperation (COSUDE), since July 2003, are implementing the project "Air Quality" for the prevention and control vehicle emissions in the city of Cuenca.

In most countries, motor vehicles, industrial and power generation comprise a large percentage of anthropogenic production of nitrogen oxides and sulfur. These together with carbon monoxide, particulates and volatile organic compounds are described as primary air pollutants because they are produced directly by the combustion process.

One of the major axes of the CEA, related to the issue of air quality project, has to do with the generation of pollutant dispersion models using art software that facilitates the representation of spatial and temporal variations of the impacts of these contaminants in air quality.

With this model simulations were performed photochemical weather and for a total of 4 hours. The simulations were validated by comparison with observations at 9 measuring points.

In terms of a diagnosis of ozone levels on the basis of the observations, we analyzed data generated by the model, identifying areas where it is transported to this pollutant.

The analysis showed that the spatial coverage of meteorological information is insufficient to reach conclusive results because it has very low resolution data.

The photochemical simulations were troubled by the lack of available emission inventories are related to very specific format that requires inventory model.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	1
Antecedentes generales.....	1
Reseña histórica .....	1
La contaminación atmosférica .....	1
Fuentes de contaminación del aire.....	2
Factores que afectan la concentración de los contaminantes del aire.....	3
Exposición a los contaminantes del aire. ....	4
La contaminación fotoquímica.....	4
Antecedentes para la modelación de contaminantes del aire .....	4
Monitoreo y evaluación de la calidad del aire. ....	4
Breve discusión de los modelos de dispersión de contaminantes.....	5
Tipos de modelos de dispersión de contaminantes.....	7
El proyecto de modelación de dispersión de contaminantes. ....	9
El software de modelamiento WRF-CHEM .....	10
Objetivos .....	12
Metodología.....	12
Actividades .....	12
Etapas del proyecto.....	13
I Etapa: preparación y generación de datos para la modelación meteorológica .....	13
II Etapa: preparación de datos para el modelo foto químico .....	25
III Etapa: generación de resultados.....	32
Resultados .....	33
Mapas geográficos .....	34
Mapas meteorológicos.....	39
Mapas de dispersión de contaminantes .....	54
Mapas de validación del modelo .....	58
Gráficos comparativos de datos modelados y medidos .....	75
Discusión .....	79

Conclusiones .....	83
Bibliografía .....	85

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de generación de un modelo de dispersión .....	6
<b>Figura 2:</b> Componentes para la ejecución del modelo meteorológico .....	13
<b>Figura 3:</b> Definición de dominios .....	17
<b>Figura 4.</b> Mapa de definición de dominios de estudio.....	18
<b>Figura 5:</b> Ubicación del punto central del dominio de estudio.....	19
<b>Figura 6.</b> Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo pasivo .....	24
<b>Figura 7.</b> Esquema de definición de un inventario de emisiones .....	25
<b>Figura 8.</b> Parámetros para la generación de datos en formato NetCDF.....	30
<b>Figura 9:</b> Mapa de ubicación de las estaciones en el dominio de estudio.....	33
<b>Figura 10.</b> Mapa geográfico: Altitudes.....	34
<b>Figura 11.</b> Mapa geográfico: Usos de suelo .....	35
<b>Figura 12.</b> Mapa geográfico: Fracción vegetal .....	36
<b>Figura 13.</b> Mapa geográfico: Reflectividad del Suelo.....	37
<b>Figura 14.</b> Mapa geográfico: Presión atmosférica .....	38
<b>Figura 15.</b> Mapa horario de precipitación .....	39
<b>Figura 16.</b> Mapa horario de temperatura.....	40
<b>Figura 17.</b> Mapa horario de presión hidrostática .....	41
<b>Figura 18.</b> Mapa horario de nubosidad.....	42
<b>Figura 19.</b> Mapa horario de vientos.....	43
<b>Figura 20.</b> Mapa horario de precipitación .....	44
<b>Figura 21.</b> Mapa horario de temperatura.....	45

<b>Figura 22.</b> Mapa horario de presión hidrostática .....	46
<b>Figura 23.</b> Mapa horario de nubosidad.....	47
<b>Figura 24.</b> Mapa horario de vientos.....	48
<b>Figura 25.</b> Mapa horario de precipitación .....	49
<b>Figura 26.</b> Mapa horario de temperatura.....	50
<b>Figura 27.</b> Mapa horario de presión hidrostática .....	51
<b>Figura 28.</b> Mapa horario de nubosidad.....	52
<b>Figura 29.</b> Mapa horario de vientos.....	53
<b>Figura 30.</b> Mapa horario de Monóxido de Carbono .....	54
<b>Figura 31.</b> Mapa horario de Dióxido de Nitrógeno .....	55
<b>Figura 32.</b> Mapa horario de Óxido de Nitrógeno.....	56
<b>Figura 33.</b> Mapa horario de Dióxido de Azufre.....	57
<b>Figura 34.</b> Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 1).....	58
<b>Figura 35.</b> Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 2).....	59
<b>Figura 36.</b> Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 3).....	60
<b>Figura 37.</b> Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 4).....	61
<b>Figura 38.</b> Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 1) .....	62
<b>Figura 39.</b> Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 2) .....	63
<b>Figura 40.</b> Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 3) .....	64
<b>Figura 41.</b> Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 4) .....	65
<b>Figura 42.</b> Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 1).....	66
<b>Figura 43.</b> Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 2).....	67
<b>Figura 44.</b> Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 3).....	68
<b>Figura 45.</b> Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 4).....	69
<b>Figura 46.</b> Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 1) .....	70

<b>Figura 47.</b> Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 2) .....	71
<b>Figura 48.</b> Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 3) .....	72
<b>Figura 49.</b> Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 4) .....	73
<b>Figura 50.</b> Mapa horario de Ozono .....	74
<b>Figura 51.</b> Cuadro comparativo para SO <sub>2</sub> .....	75
<b>Figura 52.</b> Cuadro comparativo para CO.....	76
<b>Figura 53.</b> Cuadro comparativo para NO <sub>2</sub> .....	77
<b>Figura 54.</b> Cuadro comparativo para NO <sub>x</sub> .....	78
<b>Figura 55.</b> Valores máximos para valores medidos .....	81
<b>Figura 56.</b> Valores máximos para datos modelados.....	82

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Variables que se registran en el archivo namelist.wps .....	15
<b>Tabla 2:</b> Variables que se registran en el archivo namelist.input .....	16
<b>Tabla 3:</b> Definición de parámetros para los dominios de estudio .....	17
<b>Tabla 4.</b> Variables geográficas.....	20
<b>Tabla 5.</b> Variables meteorológicas.....	21
<b>Tabla 6.</b> Estaciones de monitoreo.....	23
<b>Tabla 7.</b> Categorización del parque automotor de Cuenca .....	26
<b>Tabla 8.</b> Factores de emisión para NO <sub>x</sub> .....	27
<b>Tabla 9.</b> Conteos de flujo vehicular.....	28

## Introducción

### Antecedentes generales

#### Reseña histórica

La contaminación del aire ha sido un problema de salud pública desde el descubrimiento del fuego. En la antigüedad, las personas encendían fogatas en sus cuevas y cabañas y frecuentemente contaminaban el aire con humo nocivo.

El filósofo romano Séneca escribió sobre el "aire cargado de Roma" en el año 61 A.C. y en el siglo XI se prohibió la quema de carbón en Londres (OMS, 2004).

El origen de nuestros problemas modernos de contaminación del aire puede remontarse a la Inglaterra del siglo XVIII y al nacimiento de la revolución industrial. La industrialización comenzó a reemplazar las actividades agrícolas y las poblaciones se desplazaron del campo a la ciudad. Las fábricas para producir requerían energía mediante la quema de combustibles fósiles, tales como el carbón y el petróleo (OMS, 2004).

El principal problema de contaminación del aire a fines del siglo XIX e inicios del siglo XX fue el humo y ceniza producidos por la quema de combustibles fósiles en las plantas estacionarias de energía. La situación empeoró con el creciente uso del automóvil. Con el tiempo, se presentaron episodios importantes de salud pública a causa de la contaminación del aire en ciudades como Londres, Inglaterra y Los Ángeles, en los Estados Unidos (OMS, 2004).

#### La contaminación atmosférica

El aire puro está compuesto de oxígeno (21%) y nitrógeno (78%) y otros gases menos comunes, de los cuales el argón es el más abundante. La concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (0,03%) es menor que la del argón (0,93%) (OMS, 2004). El vapor de agua también está presente, hasta 4% por volumen. Las plantas generan oxígeno como un subproducto de la fotosíntesis y la atmósfera actual de la Tierra se describe como oxidante, en comparación con la atmósfera reductora rica en hidrógeno que existía antes de que comenzara la vida. El aumento de oxígeno ha hecho que muchos organismos vivos desarrollen defensas antioxidantes (OMS, 2004).

La atmósfera contiene varios gases que, en concentraciones mayores que las normales, son venenosos para los seres humanos y animales y dañinos para las plantas. Estos incluyen el O<sub>3</sub>, el SO<sub>2</sub>, el NO<sub>2</sub>, el CO y una amplia gama de COV (compuestos orgánicos volátiles) (OMS, 2004). Algunos de estos gases son carcinógenos, como el benceno y el butadieno (OMS, 2004). Todos estos gases potencialmente tóxicos se denominan contaminantes del aire.

Además de los gases, la atmósfera contiene una gran variedad de partículas, sólidas y líquidas, cuyo tamaño varía desde unos cuantos nanómetros hasta 0,5 milímetros. Las partículas pequeñas

(> 2,5 mm) permanecen en el aire por periodos largos y forman un aerosol moderadamente estable. Las partículas más grandes se pierden más rápidamente debido a que su peso hace que se sedimenten con velocidad mayor (OMS, 2004).

La contaminación del aire es un importante problema de salud ambiental que afecta a países desarrollados y en desarrollo de todo el mundo. En una escala global, se emiten a la atmósfera grandes cantidades de partículas y gases potencialmente nocivos que afectan la salud humana y el ambiente y que en el largo plazo dañan los recursos necesarios para el desarrollo sostenible del planeta (OMS, 2004).

### **Fuentes de contaminación del aire**

Las fuentes de contaminación del aire se pueden dividir en antropogénicas y naturales. No obstante, esta distinción podría confundirnos debido a que la actividad humana también causa estragos en los sistemas naturales.

Las fuentes naturales incluyen las tormentas de polvo, la acción volcánica, los incendios forestales y la formación de partículas radiactivas de gases como el radón. Las incursiones provenientes de la estratósfera aumentan las concentraciones del nivel inferior (troposférico) de O<sub>3</sub>. En el caso de algunos contaminantes, como el SO<sub>2</sub>, las fuentes naturales exceden las fuentes antropogénicas en una escala global (OMS, 2004). Sin embargo, al considerar los efectos de los contaminantes del aire en la salud, principalmente en las zonas urbanas con alta densidad demográfica, las fuentes antropogénicas son muy importantes y generalmente son las que se observan para el control.

La mayoría de las fuentes antropogénicas de partículas finas —es decir, aquellas con un diámetro aerodinámico menor de 2,5 mm— implican algún tipo de combustión (OMS, 2004). Los materiales de origen biológico (por ejemplo, la madera, el carbón y el petróleo) se queman en el aire debido a su contenido de carbono. Si una sustancia que contiene solo compuestos de hidrocarburo se inflama con total eficiencia, producirá solo agua y CO<sub>2</sub>, lo cual es imposible en la práctica.

Los fragmentos del material combustible no quemado, los compuestos orgánicos semivolátiles, que se vaporizan y que, por consiguiente, se vuelven a condensar en forma de gotitas, y la materia no combustible, generalmente se emiten como compuestos de humo durante y después del proceso de combustión. La mejora de la mezcla de aire y combustible y la remoción previa de compuestos volátiles pueden reducir la producción de humo. De esta manera, el combustible se prepara y quema sin humo. Cuando el suministro de oxígeno es inadecuado, la producción de CO aumenta significativamente.

En la mayoría de los países, los vehículos automotores, la actividad industrial y la generación de electricidad representan un gran porcentaje de la producción antropogénica de los óxidos de nitrógeno y de azufre. Estos, junto con el CO, las partículas y los COV, se describen como contaminantes primarios debido a que se producen directamente por el proceso de combustión. Las reacciones que tienen lugar en la tropósfera generan contaminantes secundarios como el clásico O<sub>3</sub>. El NO<sub>2</sub> se descompone foto químicamente bajo la acción de la luz ultravioleta para generar NO y oxígeno atómico (OMS, 2004). Este último se mezcla con el oxígeno molecular para producir O<sub>3</sub>. La presencia de los radicales peróxidos derivados de las reacciones atmosféricas de

HC y de otros compuestos orgánicos asegura que el NO vuelva a oxidarse a NO<sub>2</sub> sin pérdida de O<sub>3</sub>. Por lo tanto, se produce una serie de reacciones que generan O<sub>3</sub>. El O<sub>3</sub> generalmente se produce a medida que el aire contaminado se aleja de los sitios de producción incluidas las áreas urbanas. Esto significa que el O<sub>3</sub> se puede producir muy lejos de las fuentes de NO<sub>2</sub> y HC. El NO<sub>2</sub> es un contaminante tanto primario como secundario. Los vehículos automotores emiten NO y NO<sub>2</sub>. En la atmósfera, el NO se oxida y se transforma a dióxido lentamente en reacción con el oxígeno, pero rápidamente en reacción con el O<sub>3</sub>. Esto explica las bajas concentraciones de O<sub>3</sub> que generalmente se observan cerca de las fuentes de óxido de nitrógeno.

Además de lo anterior, el azufre que contienen los combustibles también produce contaminantes primarios y secundarios. El SO<sub>2</sub> se forma por oxidación durante la combustión. La posterior oxidación de SO<sub>2</sub> genera SO<sub>3</sub>, que rápidamente experimenta la hidratación para formar ácido sulfúrico, el cual, a su vez, es neutralizado por el NH<sub>3</sub> para formar bisulfato de amonio y sulfato de amonio. Estos compuestos tienen una contribución importante en la dispersión de las partículas finas (OMS, 2004).

La combustión del petróleo y de la gasolina en los motores de combustión interna da lugar a la descarga de compuestos orgánicos que se condensan en el aire para producir partículas pequeñas en el rango de 1 µm de diámetro (OMS, 2004). Estas partículas y las gotitas de ácido sulfúrico de tamaño similar se describen como partículas generadas por nucleación (proceso de cambio de estado de un cuerpo). Estas partículas tienen un tiempo de vida corto (< 1 hora) y se agrupan o aglomeran para producir partículas de un diámetro en el rango de 0,2 a 2,0 µm, que se definen como partículas de acumulación. Tales partículas son estables y de larga vida; además, pueden viajar cientos de kilómetros antes de perderse en el aire, normalmente como resultado del arrastre por precipitación bajo la nube (OMS, 2004).

### **Factores que afectan la concentración de los contaminantes del aire**

La concentración local de los contaminantes del aire depende de la magnitud de las fuentes y de la eficiencia de su dispersión. Las variaciones diarias en las concentraciones están más afectadas por las condiciones meteorológicas que por los cambios en la magnitud de las fuentes (OMS, 2004).

El viento es un elemento clave en la dispersión de los contaminantes del aire: para fuentes ubicadas en el nivel del suelo, la concentración de los contaminantes tiene una relación inversa con la velocidad del viento (OMS, 2004). La turbulencia también es importante: un espacio accidentado, como el que presenta un conglomerado de edificios, tiende a incrementar la turbulencia y la dispersión de los contaminantes.

La altitud, la temperatura y la humedad varían significativamente en todo el mundo. A mayor altitud, la presión parcial de oxígeno disminuye y, en compensación, la inhalación aumenta. En el caso de las partículas transmitidas por el aire, los mayores volúmenes de inhalación darán lugar a la ingesta de un mayor número de ellas. Por otro lado, en el caso de los contaminantes gaseosos, no se espera ningún aumento en los efectos respecto a aquellos esperados en el nivel del mar (OMS, 2004).

La temperatura tiene un efecto importante en la salud, mientras que la humedad probablemente no causa un efecto significativo en la toxicidad de los contaminantes gaseosos (OMS, 2004).

## **Exposición a los contaminantes del aire.**

La exposición diaria total de un individuo a la contaminación del aire equivale a la suma de los contactos independientes que tiene con el aire contaminado cuando pasa a través de diferentes ambientes (también llamados microambientes) a lo largo del día, como el hogar, el trayecto de la casa al trabajo, la calle, etc. La exposición en cada uno de estos ambientes se puede estimar como el producto de la concentración del contaminante en cuestión y el tiempo que el individuo ha permanecido en tal ambiente (OMS, 2004). Existen muchos factores que pueden explicar las sustanciales diferencias entre las concentraciones de contaminantes medidas en sitios centralizados y aquellas medidas en las zonas respiratorias de los habitantes de la comunidad. Muchos de esos factores se pueden expresar a través de modelos que se han usado para estimar la distribución de las dosis asociadas con las concentraciones del aire ambiental (OMS, 2004).

## **La contaminación fotoquímica**

La contaminación fotoquímica se genera a partir de la existencia en la atmósfera de contaminantes químicamente muy reactivos, los cuales, en presencia de radiación solar, dan lugar a otros contaminantes, conocidos como contaminantes secundarios. Considerando su impacto en salud, el contaminante secundario más importante es el ozono troposférico. Dadas las características de su formación en la atmósfera, las máximas concentraciones de ozono troposférico se aprecian a decenas de kilómetros de las fuentes emisoras principales (OMS, 2004).

## **Antecedentes para la modelación de contaminantes del aire**

### **Monitoreo y evaluación de la calidad del aire.**

El concepto de “calidad del aire”, se define como la relación existente entre la contaminación del aire y los efectos que estos tienen en la salud de la población.

Las tres herramientas principales para evaluar la calidad del aire son:

- ✓ Monitoreo del ambiente
- ✓ Modelos
- ✓ Inventario o medición de emisiones (OMS, 2004)

La finalidad última del monitoreo no es simplemente recopilar datos sino proporcionar la información necesaria para que los científicos, los encargados de formular políticas y los planificadores tomen decisiones fundamentadas sobre la gestión y mejoramiento del ambiente.

El monitoreo cumple un papel central en este proceso, ya que brinda la base científica necesaria para el desarrollo de políticas y estrategias, el establecimiento de objetivos y la medición del cumplimiento de las metas y medidas coercitivas. No obstante, debe reconocerse que el monitoreo tiene limitaciones. Desde el punto de vista geográfico el monitoreo puede no abarcar todas las zonas que se requieren analizar, así como también si no se establece una adecuada red de monitoreo, los puntos que se definan pueden no ser representativos para el estudio. Ningún

programa de monitoreo, aunque esté bien fundamentado y diseñado, puede aspirar a cuantificar de manera integral los patrones de contaminación del aire en el espacio y en el tiempo. En muchas circunstancias, las mediciones por sí solas pueden ser insuficientes o impracticables para definir cabalmente la exposición de la población en una ciudad o país. Por ello, el monitoreo a menudo debe usarse conjuntamente con otras técnicas objetivas de evaluación, incluidas la elaboración de los modelos, la medición y la elaboración de inventarios de emisiones, la interpolación y elaboración de mapas. En el mejor de los casos, el monitoreo proporciona una figura incompleta, aunque útil, de la calidad actual del ambiente.

Del mismo modo, tampoco se puede confiar únicamente en la elaboración de modelos de simulación. Si bien estos pueden ser una herramienta poderosa para la interpolación, la predicción y la optimización de las estrategias de control, la posibilidad de usarlos efectivamente depende de la disponibilidad de datos de monitoreo reales y validados de forma apropiada. Además, es importante que los modelos usados sean apropiados para las condiciones, las fuentes y la topografía locales, y que sean compatibles con las bases de datos disponibles sobre las emisiones y la meteorología. Muchos modelos dependen de la disponibilidad de datos de emisiones confiables.

Un inventario completo de emisiones para una ciudad puede requerir emisiones de fuentes puntuales, de área y móviles. En algunos casos, se debe considerar si es necesario evaluar los contaminantes transportados al área en estudio. Los inventarios generalmente serán estimados con factores de emisión (relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad) apropiados para los diferentes tipos de fuentes (verificados a través de la medición) y se usarán en conjunción con estadísticas de datos sustitutos como la densidad demográfica, el uso de combustibles, los kilómetros recorridos por los vehículos y la producción industrial. La medición de las emisiones generalmente estará disponible solo para fuentes puntuales grandes de tipo industrial o para tipos representativos de vehículos bajo condiciones estandarizadas de manejo.

Las tres herramientas de evaluación son interdependientes en alcance y aplicación. Por lo tanto, el monitoreo, la elaboración de modelos de simulación y la evaluación de las emisiones deben ser concebidos como componentes interrelacionados en todo enfoque integral para estudiar la exposición o determinar el cumplimiento de los criterios de calidad del aire.

Dentro de este proyecto se desarrolla el componente relacionado con la elaboración de modelos de simulación y evaluación de las emisiones, también denominado modelo de dispersión de contaminantes.

### **Breve discusión de los modelos de dispersión de contaminantes.**

Los modelos atmosféricos de dispersión de contaminantes son herramientas físico-matemáticas que permiten simular las condiciones reales de transporte y dispersión de los contaminantes como producto de la interacción de las condiciones meteorológicas y las propias de las fuentes de emisión (Universidad de Chile-MI5DD, 2008).

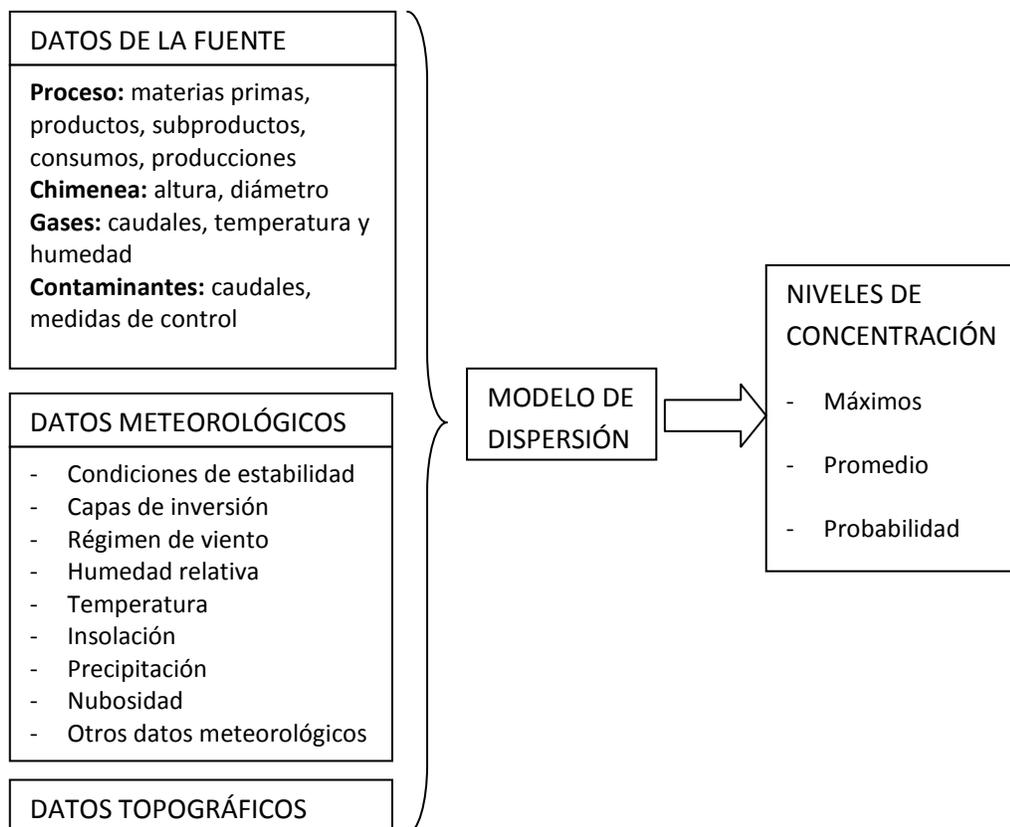
La información requerida considera la ubicación geográfica de las fuentes, la concentración de los contaminantes emitidos, y factores meteorológicos tales como la turbulencia atmosférica,

velocidad del viento, temperatura y presión atmosférica. Por otro lado, los datos de salida de los modelos (concentraciones diarias, horarias, etc.) varían dependiendo de la complejidad de los modelos empleados.

Los modelos no describen con exactitud el problema de contaminación de una zona determinada, estos sólo constituyen una representación, cercana o no, de lo que sucede; por lo tanto, no hay que olvidar que sólo son modelos y que la calidad de los resultados depende de diversos factores tales como:

- ✓ Exactitud del inventario de emisiones,
- ✓ Incertidumbre de los procesos físico químicos que sufren los contaminantes durante su transporte,
- ✓ Calidad y representatividad de los datos meteorológicos,
- ✓ Validación del modelo en una situación determinada. El modelo puede ser adecuado en una situación particular pero no en otra (Universidad de Chile-MI5DD, 2008).

Los modelos de dispersión incluyen información tanto de la fuente emisora como de las características particulares del lugar donde se ubica dicha fuente tal como se indica en la Figura 1. Una vez ingresada toda la información, es posible determinar las concentraciones de los contaminantes en un punto del espacio y en un tiempo determinado.



**Figura 1.** Esquema de generación de un modelo de dispersión (Universidad de Chile-MI5DD, 2008).

## Tipos de modelos de dispersión de contaminantes

La agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA, 2011) agrupa a los modelos de dispersión de contaminantes en las siguientes categorías:

- Gaussianos

Es la técnica más ampliamente usada para contaminantes no reactivos. Proporciona una excelente aproximación matemática a la dispersión de contaminantes. Está basado en la distribución Gaussiana o distribución normal de estadísticas.

El modelo Gaussiano asume que el material proveniente de una fuente, continuamente es transportado en dirección del vector de velocidad de viento, estando las concentraciones más altas en el centro de la pluma y las más bajas en los extremos. En resumen, asume que la concentración de la pluma, en cada distancia vientos abajo, posee una distribución Gaussiana o normal independiente horizontal y verticalmente.

- Numéricos

Este tipo de modelos es usado cuando los contaminantes analizados están reaccionando y formando contaminantes secundarios. Son mucho más apropiados que los modelos Gaussianos para análisis de una fuente de área urbana cuando están involucrados contaminantes reactivos; pero requieren unas bases de datos mucho más extensas y complejas, por lo cual no son usados ampliamente.

Sus aplicaciones más comunes son para la formación de ozono y en el estudio de la conversión de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  para formar sulfatos y nitratos que contribuyen a la lluvia ácida. Un modelo numérico ampliamente usado es el UAM (Urban Airshed Model) (NASA, 2011) para la simulación de áreas urbanas calculando concentraciones de ozono.

- Estadísticos

Las técnicas estadísticas o empíricas son frecuentemente empleadas donde los procesos químicos y físicos no poseen una clara interpretación científica, o en situaciones donde no se cuenta con una fiable y completa base de datos.

Están basados en técnicas estadísticas o semi-empíricas para analizar tendencias, relaciones de la calidad del aire, las mediciones atmosféricas y para predecir la evolución de situaciones de contaminación de corto plazo. Lo anterior se hace usando análisis de distribución de frecuencias, análisis de series de tiempo y otros métodos estadísticos.

Poseen limitaciones por cuanto no se pueden establecer relaciones causa-efecto; sin embargo son muy útiles para realizar predicciones de corto plazo en tiempo real en donde se cuenta con información de concentraciones y sus tendencias.

- De caja

Este modelo asume que los contaminantes emitidos a la atmósfera se mezclan uniformemente en un volumen o caja de aire de dimensiones finitas. Se deben establecer algunos parámetros como las dimensiones con viento a favor, viento de costado y las dimensiones verticales de la caja. También se debe establecer el periodo de tiempo de emisión de contaminantes.

Los modelos de caja suponen también que las emisiones se mezclan totalmente de una manera inmediata con el aire disponible para la dilución. Se considera que los contaminantes son químicamente estables y que permanecen en el aire.

- Físicos

Involucra el uso de túneles de viento, canales de agua u otros medios para modelar fluidos. Esta clase de modelo requiere un alto nivel técnico especializado, así como el acceso a los recursos necesarios. Pueden ser muy útiles para simular situaciones de flujo complejo, con terrenos muy irregulares, donde se presentan edificaciones o sobre alturas del terreno sobresalientes. Es aplicable a un grupo de fuentes agrupadas en unos pocos kilómetros cuadrados. Esta es la mejor técnica y la más aproximada a la realidad, sin embargo es poco utilizado por los recursos (túneles de viento, canales de agua, etc.) que se deben poseer para utilizarla.

- Modelos Eulerianos

Es un modelo que hace una aproximación matemática de la dispersión de contaminantes a las ecuaciones Eulerianas (conservación de la masa del contaminante). Las funciones utilizadas son las integraciones temporales de Runge-Kutta de segundo y tercer orden y segundo y sexto orden en esquemas de advección (Universidad de Chile-MI5DD, 2008). Estos modelos están usualmente incluidos en modelos de pronóstico meteorológico.

En estos modelos la dispersión de contaminantes se describe usando las ecuaciones básicas de la hidrodinámica teniendo en cuenta:

- ✓ El balance del momentum
- ✓ El balance de calor
- ✓ El balance de humedad
- ✓ Las leyes de los gases
- ✓ Balance de masa del aire por debajo de la altura de mezcla
- ✓ El balance de los contaminantes estudiados

Un modelo de este tipo es aplicado en este proyecto: “Weather Research and Forecasting Model with Chemistry (WRF-CHEM)”, un modelo “online”, mantenido por el “National Center for Atmospheric Research” (NCAR, EE.UU, 2011). En el desarrollo de este modelo participa un gran número de científicos de centros de investigación y universidades. Es un modelo state-of-the-art en términos de tecnología de pronóstico tanto físico como químico. WRF-CHEM está usado a nivel global, con una base de usuarios en más de 100 universidades, centros científicos y agencias gubernamentales. Además, el código está completamente paralelizado, lo que permite pronósticos de alta resolución de una manera eficiente en computadores de procesadores múltiples y memoria distribuida (“cluster”) (Universidad de Chile-DGFS, 2008).

## El proyecto de modelación de dispersión de contaminantes.

La Universidad de Cuenca a través del Centro de Estudios Ambientales (CEA) conjuntamente con la I. Municipalidad de Cuenca a través de la Comisión de Gestión Ambiental (CGA) apoyadas por Fundación Natura y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), desde Julio del año 2003, vienen ejecutando el proyecto “Calidad del Aire” para la prevención y control de emisiones vehiculares en la ciudad de Cuenca.

Para ejecutar el diagnóstico de la calidad del aire, el CEA ha desarrollado tres ejes fundamentales:

- ✓ Medición de contaminantes
- ✓ Inventario de emisiones
- ✓ Modelación fotoquímica

El pronóstico de la calidad del aire comenzó en su evolución recién en los años 1970 aplicando métodos estadístico objetivos. Desde entonces los métodos de pronóstico han avanzado significativamente, conduciendo a modelos que acoplan la meteorología y los procesos químicos de la atmósfera. Al contrario de los modelos estadísticos no solamente se pueden usar con fines de pronóstico, sino también de diagnóstico. En términos generales, se distinguen entre modelos que calculan la parte meteorológica y la parte química por separado.

Debido a que la contaminación fotoquímica se genera a partir de la existencia en la atmósfera de contaminantes químicamente muy reactivos los cuales en presencia de radiación solar dan lugar a otros contaminantes, conocidos como contaminantes secundarios, se utiliza la modelación fotoquímica para el estudio de este fenómeno. Considerando su impacto en la salud, el contaminante secundario más importante es el ozono troposférico ( $O_3$ ). Responsables de las concentraciones de ozono son las emisiones de sus precursores, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los nitrógenos oxigenados ( $NO_x$ ) (CEA, 2011). En la realidad, los COV representan miles de sustancias químicas en la atmósfera. Cada una de estas sustancias se puede caracterizar por su reactividad particular con el radical OH y, por lo tanto, en su capacidad en producir ozono. En consecuencia, en el análisis del ozono troposférico no es suficiente conocer las concentraciones totales de los COV, sino las concentraciones de las sustancias más relevantes con respecto a las escalas espaciales y temporales del problema.

Para el caso de la modelación de ozono, el CEA cuenta con el inventario de emisiones de  $NO_x$  y COV y para validar el modelo, se han realizado mediciones de  $O_3$  y  $NO_x$ .

El tema de esta tesis está relacionado con la “Modelación fotoquímica”, y tiene que ver con la generación de modelos de dispersión de contaminantes utilizando software de última generación que facilite la representación de las variaciones espaciales y temporales de los impactos en la calidad del aire. La correcta aplicación de los modelos de dispersión servirá para la estimación de impactos ambientales de todo tipo de fuentes de emisión.

Para la generación de los modelos de dispersión de contaminantes, se han evaluado dos herramientas de software. La primera herramienta denominada “CANARINA”, es un software que utiliza el modelo Gaussiano (buen desempeño en terrenos planos) y que no es de uso libre. La segunda herramienta es el “WRF-CHEM” (NOAA, 2011), herramienta de software libre que utiliza

el modelo Euleriano que tiene excelente desempeño en topografías complejas como la nuestra y considera emisiones reactivas.

El resultado de las evaluaciones realizadas ha determinado que el software WRF-CHEM es el que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto.

Dentro del proyecto también se utilizan herramientas complementarias que sirven para la presentación de resultados, las mismas que se describirán dentro de cada etapa correspondiente.

### **El software de modelamiento WRF-CHEM**

El WRF-CHEM es un modelo de tipo euleriano. Los modelos eulerianos consideran la emisión, los procesos de transporte, dispersión, transformación en la atmósfera y deposición de contaminantes. Además proporcionan resultados de alta resolución espacial y temporal de la calidad del aire, dentro de un dominio de estudio tridimensional. Estos modelos pueden ser utilizados para explicar episodios pasados, para evaluar los potenciales efectos de las diferentes estrategias de reducción de emisiones o para realizar pronósticos de la calidad del aire.

El modelo WRF-CHEM, tiene dos componentes:

- ✓ **Componente meteorológica**

Denominado WRF (NOAA, 2011) es la parte del modelo que representa las ecuaciones básicas de la dinámica de la atmósfera. La componente meteorológica se basa en un núcleo dinámico computacionalmente eficiente, apropiado para la simulación de fenómenos característicos desde unos metros hasta miles de kilómetros. El modelo provee una gama de opciones para el registro de parámetros físicos que representan procesos importantes como son, por ejemplo, las interacciones suelo-atmósfera, radiación solar, física de nubes y precipitación. El modelo numérico es inicializado y forzado por los bordes, a partir de datos meteorológicos de modelos globales de pronóstico (Global Forecast Models, GFM) de baja resolución que se obtienen de forma gratuita (NOAA, 2011).

El desarrollo del sistema de modelación Weather Research and Forecasting (WRF) comenzó en el año 2000 y fue un esfuerzo de múltiples organismos para proporcionar un modelo meso escalar de última generación para pronóstico y asimilación de datos que ayudara en la comprensión y predicción de las condiciones meteorológicas. Entre las agencias que colaboraron para el desarrollo del WRF están el National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Forecast Systems Laboratory (FSL), Air Force Weather Agency (AFWA), Naval Research Laboratory, Federal Aviation Administration (FAA), y la Universidad de Oklahoma (NOAA, 2011).

El WRF es un modelo Euleriano, no hidrostático y compresible. Sus coordenadas verticales son las de la presión hidrostática de seguimiento de terreno. El modelo utiliza una variedad de métodos numéricos de grado superior para la resolución de las ecuaciones diferenciales de las variables modeladas. Esto incluye las integraciones temporales de

Runge-Kutta de segundo y tercer orden y segundo y sexto orden en esquemas de advección en las direcciones horizontales y verticales. Además cuenta con núcleos dinámicos múltiples numéricamente avanzados y computacionalmente eficientes, 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 (NOAA, 2011).

El WRF es adecuado para un amplio espectro de aplicaciones a través de escalas que van desde pocos kilómetros hasta miles de kilómetros. Permite a los investigadores la capacidad de llevar a cabo simulaciones que reflejan tanto los datos reales como configuraciones idealizadas (para condiciones específicas de estudio). El WRF proporciona un modelo operativo de pronóstico flexible y eficiente computacionalmente, ofreciendo al mismo tiempo modelos de la física atmosférica, numéricos, y la asimilación de los datos aportados por investigaciones de la comunidad científica (NOAA, 2011).

Entre las aplicaciones del modelo se puede mencionar las siguientes:

- Simulaciones Idealizadas
- Aplicaciones Regionales y Globales
- Pronóstico Meteorológico
- Investigación en Asimilación de Datos
- Investigación en Parametrización
- Investigación en Huracanes
- Aplicaciones de modelos acoplados

✓ **Componente química**

La componente química del modelo trata explícitamente del transporte y las reacciones de las especies químicas, más los aerosoles. La química es incorporada al modelo meteorológico siendo su tratamiento numérico consistente con las variables meteorológicas.

El modelo WRF-CHEM fue desarrollado por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), con la colaboración de NCAR, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), EPA y científicos universitarios. El modelo (WRF-CHEM) simula la emisión, transporte, mezcla y transformación de unas 40 especies químicas y aerosoles de forma simultánea con la meteorología (WRF). Este modelo se utiliza para la investigación de la calidad del aire a escala regional y para la investigación de las interacciones entre la cubierta de las nubes y la química.

El componente de calidad del aire del modelo es compatible con el componente meteorológico, los dos utilizan el mismo sistema de transporte (masa y preservación escalar), es decir que tanto los datos meteorológicos como los químicos mantienen sus valores dentro del modelo; utilizan también la misma grilla (componentes horizontal y vertical), los mismos esquemas físicos para el transporte y el mismo paso de tiempo por lo que no es necesaria la interpolación temporal (NOAA, 2011).

## Objetivos

- Objetivo 1 Conocer el transporte químico de los contaminantes a través del espacio, influidos por los diferentes fenómenos meteorológicos.
- Objetivo 2 Establecer las características más importantes del software de modelación WRF-CHEM con sus principales parámetros y sus potencialidades para resolver fenómenos de dispersión de contaminantes con otros parámetros.
- Objetivo 3 Aplicar el formato NetCDF como un medio para almacenar y recuperar información en un Sistema de Información Geográfico.
- Objetivo 4 Conocer los métodos de generación de un inventario de emisiones.

## Metodología

### Actividades

Las actividades desarrolladas de acuerdo a los objetivos trazados, fueron las siguientes:

#### Objetivo 1

- Identificar, recopilar, estimar, procesar y generar información meteorológica para aplicaciones de modelos de dispersión de contaminantes.
- Generación de modelos de dispersión espacial de contaminantes en función de parámetros meteorológicos y de contaminantes.
- Estimar impactos en calidad del aire usando el modelo WRF-CHEM, incluyendo el análisis e interpretación de los resultados.

#### Objetivo 2

- Instalación del software WRF-CHEM y sus componentes.
- Definición de los parámetros requeridos para la ejecución de la modelación.
- Aplicar información georeferenciada y características de las fuentes emisoras para completar la información de entrada al modelo WRF-CHEM.
- Pruebas de ejecución del software.
- Capacitación en el uso del software WRF-CHEM a los técnicos del CEA.

#### Objetivo 3

- Desarrollo de aplicativo en lenguaje de programación Java para el procesamiento de datos en formato NetCDF.
- Incorporación de los datos del componente químico en el componente meteorológico del modelo.

#### Objetivo 4

- Estudio de la metodología general de cálculo de emisiones vehiculares
- Estudio de las metodologías específicas de cálculo de emisiones vehiculares
- Definición de factores de emisión de fuentes móviles en ruta

## Etapas del proyecto

El proyecto consta de 3 etapas, en las que se detallan cada uno de los pasos requeridos para cumplir con el objetivo de la modelación de contaminantes.

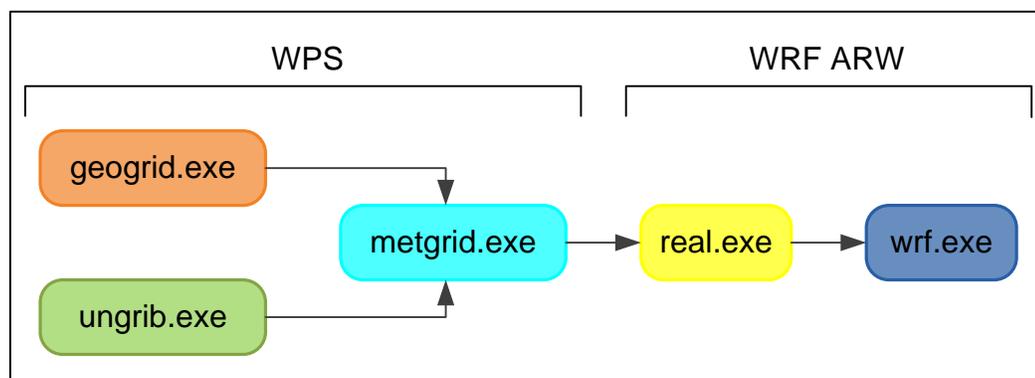
En la primera etapa se detalla la componente meteorológica de la modelación, junto con cada uno de sus subcomponentes, en la segunda etapa se describe la componente química y finalmente en la tercera etapa se detallan los resultados obtenidos.

### I Etapa: preparación y generación de datos para la modelación meteorológica

- Pasos para la ejecución del modelo WRF

El modelo WRF, consta de una serie de pasos que deben ser ejecutados de forma secuencial y ordenada.

Para la ejecución del modelo WRF se requiere de dos fases: una fase de preparación de los datos, denominada pre-procesamiento y otra fase de ejecución que se encarga de generar la modelación meteorológica.



*Figura 2: Componentes para la ejecución del modelo meteorológico (NOAA, 2011)*

La primera fase se basa en el sistema de pre-procesamiento del WRF (WPS) que se encarga de realizar el procesamiento de datos previo a la modelación. Consta a su vez de tres componentes:

- geogrid.exe
- ungrib.exe
- metgrid.exe

#### Componente geogrid.exe

El propósito del componente GEOGRID (geomalla) es definir el dominio de simulación e interpolar el conjunto de datos terrestres a las redes del modelo.

Los datos terrestres del modelo se los obtiene gratuitamente desde la página web [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps\\_files/geog.tar.gz](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/geog.tar.gz) (UCAR, 2011), con resoluciones que van desde 10' (10 minutos) hasta 1" (1 segundo). Estos datos poseen toda la información requerida por el modelo WRF.

Además de las coordenadas de longitud y latitud de computación para cada punto de la cuadrícula, la geomalla interpola las categorías del suelo, categorías de uso de suelo (24 categorías de uso de suelo del USGS), altura del terreno, temperatura media anual de profundidad, temperatura del suelo, fracción de vegetación (porcentaje mensual de vegetación).

#### Componente ungrib.exe

El propósito de UNGRIB es desempacar los datos meteorológicos GRIB (GRIB1 y GRIB2) (GRIB.US, 2012) (GRIB es el formato usado por los institutos meteorológicos del mundo para transportar y manipular los datos climáticos. En el pasado, acceder a datos GRIB ha requerido a menudo de una combinación de conocimientos técnicos y de software muy caro) y empacarlos en un archivo de formato intermedio.

Los datos meteorológicos necesarios provienen de modelos atmosféricos globales. La base de datos utilizada procede del 'Global Forecast System' (GFS, 2011), y pueden ser descargados desde la página web <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/>. Los datos incluyen tanto información de modelos como de observaciones. Cuenta con datos de meteorología desde el año 1999 hasta la fecha con actualizaciones diarias. Los datos se reportan cada seis horas. La cobertura de estos datos se encuentra en un rango de longitud de 180W a 180E y un rango de latitud de 90S a 90N, en celdas con resoluciones similares a los datos terrestres. El UNGRIB es independiente de la definición de dominios del GEOGRID. Esta componente descomprime los campos requeridos y los escribe en un formato que el programa METGRID puede leer.

#### Componente metgrid.exe

El programa METGRID interpola horizontalmente los datos meteorológicos dentro del dominio ejecutado en el modelo. Los archivos de salida de metgrid.exe sirven de entrada para la fase de ejecución del modelo WRF.

Luego de ejecutar el pre-procesamiento a través de las componentes del WPS, se inicia el módulo WRF. El WRF es el módulo principal del modelo y está encargado de realizar la simulación de la información meteorológica. El WRF consta a su vez de dos componentes:

- real.exe
- wrf.exe

#### Componente real.exe

Interpola verticalmente los archivos generados por el metgrid del WPS, crea los límites y archivos con las condiciones iniciales y realiza pruebas de consistencia.

#### Componente wrf.exe

Genera la simulación de la información meteorológica.

- Datos de configuración del modelo WRF

Tanto para la fase de pre-procesamiento como de ejecución del modelo, se requiere registrar parámetros que permiten configurar el modelo.

Para el registro de los parámetros, se dispone de dos archivos:

- namelist.wps
- namelist.input

**namelist.wps:** En este archivo se registran los valores de las variables que sirven de parámetro para la generación de los datos de pre-procesamiento del modelo meteorológico. En cada línea del archivo se generan registros de cada una de las variables necesarias para el pre-procesamiento de datos.

En la Tabla 1 se detallan las variables necesarias para el pre-procesamiento:

**Tabla 1:** Variables que se registran en el archivo namelist.wps

Registro	Variable	Parámetros			Descripción	
		Dominio 01	Dominio 02	Dominio 03		
&share	wrf_core	ARW			Registro de variables para todos los componentes	
	max_dom	3			Tipo de modelo	
	start_date	2011-11-21_00:00:00	2011-11-21_00:00:00	2011-11-21_00:00:00	Cantidad de dominios	
	end_date	2011-11-22_00:00:00	2011-11-22_00:00:00	2011-11-22_00:00:00	Fecha inicial del estudio	
	interval_seconds	21600			Fecha final del estudio	
	io_form_grid	2			Intervalo en segundos para generar los registros	
	debug_level	1000			Tipo de archivo a generar 2=NetCDF	
	&geogrid	parent_id	1	1	2	Nivel de generación de errores
		parent_grid_ratio	1	3	3	Registro de variables para el componente geogrid.exe
		i_parent_start	1	23	31	Lista de identificación de cada dominio, y definición de la relación entre ellos
j_parent_start		1	38	20	Grado de expansión de los dominios definidos a través de la relación entre cada uno de ellos	
e_we		82	70	31	La componente x de la esquina inferior izquierda de cada dominio	
e_sn		78	46	19	La componente y de la esquina inferior izquierda de cada dominio	
geog_data_res		10m	2m	30s	La dimensión oeste-este de cada dominio	
dx		9000			La dimensión sur-norte de cada dominio	
dy		9000			La resolución de los datos para cada dominio	
map_proj		mercator			El tamaño de la celda del dominio mayor en metros en el eje x	
&ungrib	ref_lat	-1.813			El tamaño de la celda del dominio mayor en metros en el eje y	
	ref_lon	-78.477			Tipo de proyección del mapa	
	true_lat1	-1.813			El valor de la latitud en grados decimales del punto central del dominio mayor	
	true_lat2	0			El valor de la longitud en grados decimales del punto central del dominio mayor	
	stand_lon	-78.477			Latitud real de proyección	
	out_format	WPS			Latitud real de proyección	
	prefix	FILE			Longitud estándar de proyección	
	&metgrid	fg_name	FILE			Registro de variables para el componente ungrid.exe
		io_form_metgrid	2			Formato de salida de los archivos resultantes
		press_pa	201300, 200100, 100000, 95000, 90000, 85000, 80000....			Prefijo para el nombre de los archivos resultantes
&mod_levels					Registro de variables para el componente metgrid.exe	
					Formato de salida de los archivos resultantes	

**namelist.input:** En este archivo se incluyen los registros de las variables que sirven como parámetros para la generación del modelo meteorológico.

En la Tabla 2 se detallan las variables más importantes que se registran en namelist.input:

**Tabla 2:** Variables que se registran en el archivo namelist.input

Registro	Variable	Parámetros			Descripción	
		Dominio 01	Dominio 02	Dominio 03		
&time_control	run_days	0			Registro de variables para todos los componentes	
	run_hours	3			Tiempo de ejecución en días	
	run_minutes	0			Tiempo de ejecución en horas	
	run_seconds	0			Tiempo de ejecución en minutos	
	start_year	2011	2011	2011	Tiempo de ejecución en segundos	
	start_month	11	11	11	Año de inicio del estudio	
	start_day	21	21	21	Mes de inicio del estudio	
	start_hour	6	6	6	Día de inicio del estudio	
	start_minute	0	0	0	Hora de inicio del estudio	
	start_second	0	0	0	Minuto de inicio del estudio	
	snd_year	2011	2011	2011	Segundo de inicio del estudio	
	end_month	11	11	11	Año de fin del estudio	
	end_day	21	21	21	Mes de fin del estudio	
	end_hour	12	12	12	Día de fin del estudio	
	end_minute	0	0	0	Hora de fin del estudio	
	end_second	0	0	0	Minuto de fin del estudio	
	interval_seconds	21600			Segundo de fin del estudio	
	input_from_file	true	True	True	Intervalo entre los datos reales entrantes que serán el intervalo para el archivo de condición de límite lateral	
	io_form_input	2			Indicador de si los dominios diferentes del dominio mayor tendrán archivos de entrada	
	debug_level	0			Tipo de archivo de entrada Z=NetCDF	
&domains					Nivel de depuración de la ejecución del programa	
					Definición de dominios	
		time_step	27			Paso de tiempo para la integración en segundos
		time_step_fract_num	0			Numerador para paso de tiempo en fracciones
		time_step_fract_den				Denominador para paso de tiempo en fracciones
		max_dom	3			Número de dominios
		e_we	82	70	31	La dimensión oeste-este de cada dominio
		e_sn	78	46	19	La dimensión sur-norte de cada dominio
		e_vert	28	28	28	Número de niveles en altitud
		p_top_requested	5000			Altitud tope en metros
		num_metgrid_levels	27			Número de niveles verticales
		num_metgrid_soil_levels	4			Número de niveles verticales en el suelo
		Dx	9000	3000	1000	Longitud de la geomalla en la coordenada x en metros
		Dy	9000	3000	1000	Longitud de la geomalla en la coordenada y en metros
	parent_id	1	1	2	Lista de identificación de cada dominio, y definición de la relación entre ellos	
	i_parent_start	1	23	31	La componente x de la esquina inferior izquierda de cada dominio	
	j_parent_start	1	38	20	La componente y de la esquina inferior izquierda de cada dominio	
	parent_grid_ratio	1	3	3	Grado de expansión de los dominios definidos a través de la relación entre cada uno de ellos	
	parent_time_step_ratio	1	3	3	Grado de expansión de paso de tiempo de los dominios definidos a través de la relación entre cada uno de ellos	

- Definición de las zonas de estudio

Para establecer el ámbito de generación del modelo, se definen las zonas que van a ser estudiadas, y se las denomina como dominios. Son tres los dominios definidos y representan lo siguiente:

Dominio 01: resolución de 9 Km, cuyos límites definen el territorio del Ecuador

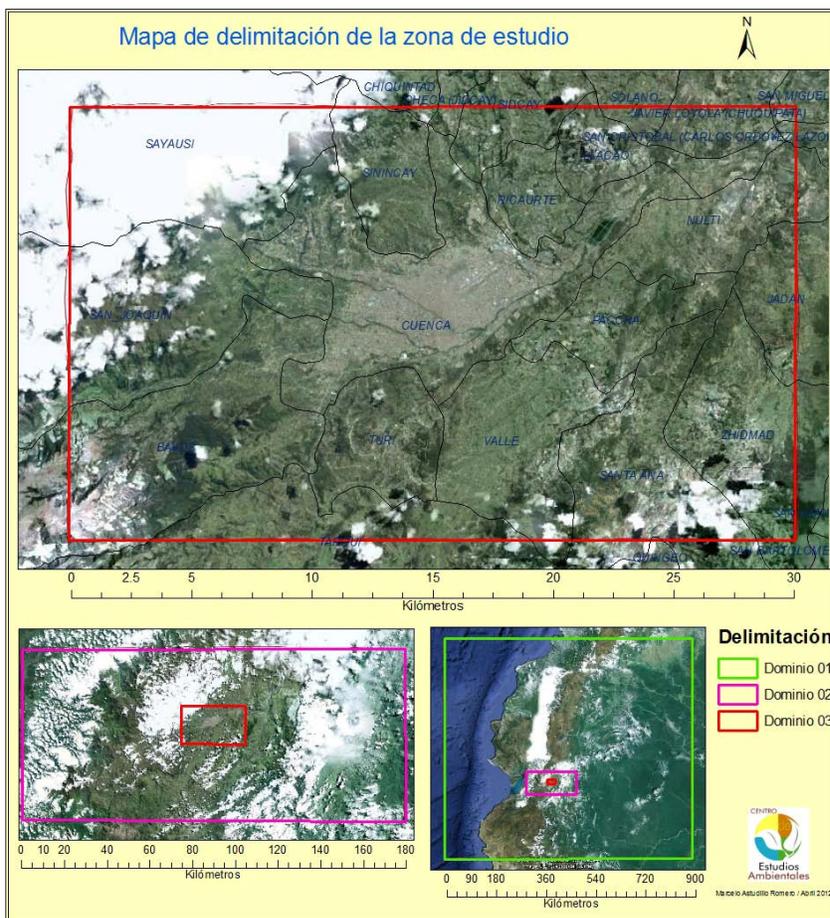
Dominio 02: resolución de 3 Km, cuyos límites definen la región Austral del Ecuador

Dominio 03: resolución de 1 Km, cuyos límites definen la ciudad de Cuenca

Para establecer y definir los dominios para el modelo WRF, se utiliza un aplicativo denominado “WRF Domain Wizard” (NOAA, 2011) (Interfaz gráfica de usuario que permite fácilmente localizar y definir dominios seleccionando una región de la tierra y escogiendo la

proyección del mapa), el cual permite de una forma fácil e intuitiva seleccionar y localizar los dominios de acuerdo al requerimiento, también permite definir dominios anidados y generar los registros de las variables para los archivos namelist.wps y namelist.input.

Las zonas elegidas para cada uno de los dominios se muestran en la Figura 3:



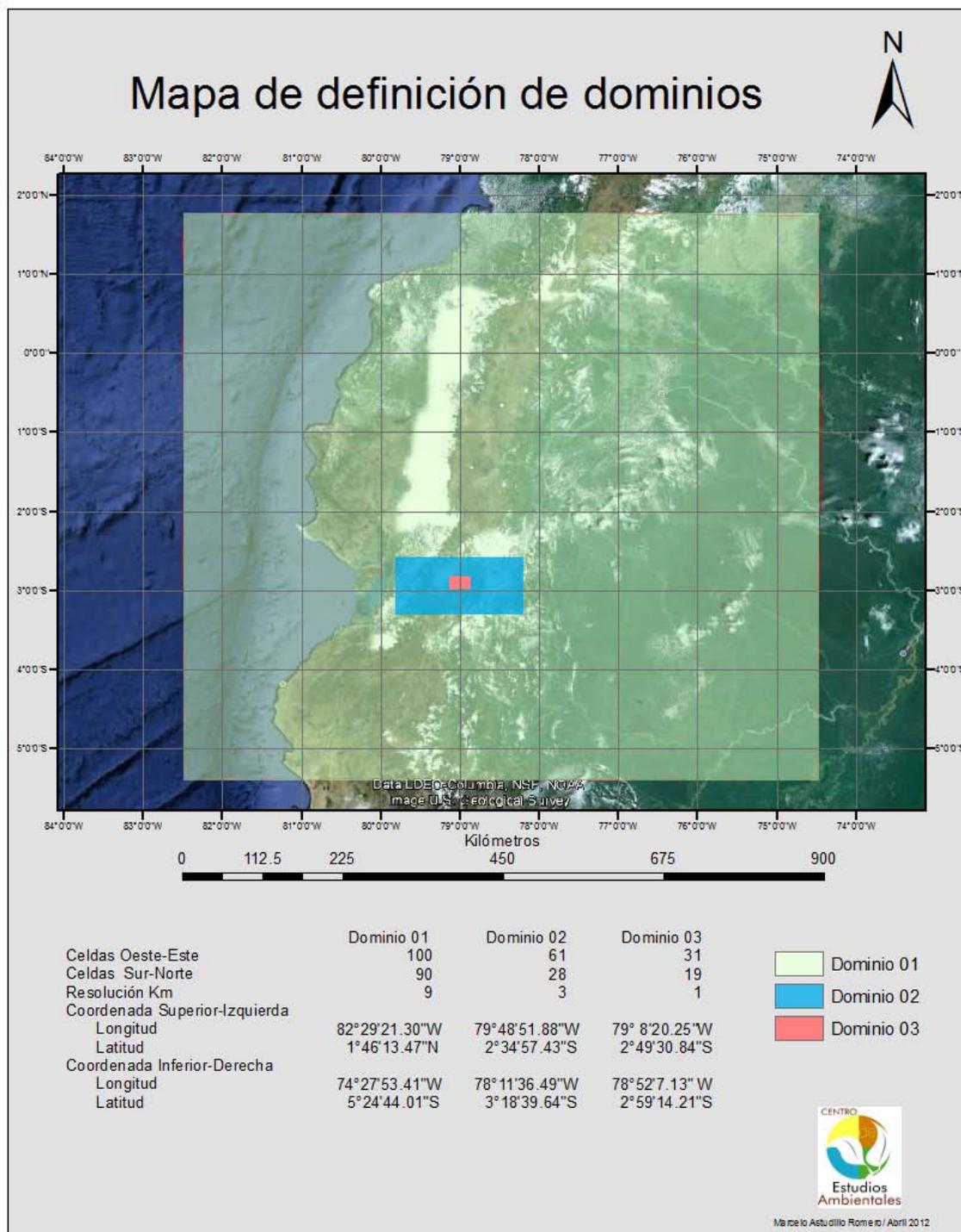
**Figura 3:** Definición de dominios

De acuerdo a la selección y localización de los dominios realizada con este aplicativo, en la Tabla 3 se detallan los parámetros resultantes:

**Tabla 3:** Definición de parámetros para los dominios de estudio

Dominio	Dominio Padre	Relación	Oeste Este	Sur Norte	Resolución Km	Latitud Central	Longitud Central	Puntos geomalla
01	1	1	100	90	9	1°48'46.80"S	78°28'37.20"W	9000
02	1	3	61	28	3	2°56'49.20"S	79° 0'14.40"W	1708
03	2	3	31	19	1	2°54'21.60"S	79° 0'14.40"W	589

La Figura 4, muestra un mapa integrado de definición de los dominios de estudio junto con los parámetros utilizados para su generación:



**Figura 4.** Mapa de definición de dominios de estudio

En las zonas que corresponden a los dominios 01 y 02, se realiza únicamente la modelación de la meteorología, ya que estas zonas únicamente sirven de referencia para el estudio y no disponen de datos de contaminantes.

La zona de estudio elegida para la modelación de contaminantes corresponde al dominio 03 y representa la zona urbana y urbano-marginal de la ciudad de Cuenca. Cuenca está ubicada en un valle interandino de la sierra sur ecuatoriana, a una altitud promedio de 2550 metros sobre el nivel del mar. La superficie del área urbana de la ciudad es de aproximadamente 72 km<sup>2</sup> (Wikipedia, 2011).

Para la definición del dominio 03 utilizado para el estudio de los contaminantes se considera como punto central la coordenada: 79° 0'14.40"W, 2°54'21.60"S que pertenece a un punto geográfico ubicado en la parte central de la ciudad de Cuenca. En la Figura 5 se muestra la ubicación de este punto en la ciudad.



**Figura 5:** Ubicación del punto central del dominio de estudio

- Preparación de datos geográficos

Para la obtención de los datos geográficos se parte de información satelital disponible en la página Web del NCAR Earth System Laboratory (NESL), Mesoscale & Microscale Meteorology Division (NCAR, 2011), que cuenta con la información a nivel global de la geografía.

En la Tabla 4 se muestran las variables geográficas:

**Tabla 4. Variables geográficas**

Siglas	Descripción	Unidades
<b>ALBEDO12M</b>	Superficie de reflexión	DU (Unidades Dobson)
<b>CON</b>	Convectividad orográfica	n/a
<b>COSALPHA</b>	Coseno del ángulo de rotación	n/a
<b>E</b>	Parámetro E de Coriolis	n/a
<b>F</b>	Parámetro F de Coriolis	n/a
<b>GHT</b>	Altura	M
<b>GREENFRAC</b>	Fracción vegetal mensual	n/a
<b>HGT_M</b>	Altura de la topografía, variable M	msnm
<b>HGT_U</b>	Altura de la topografía, variable U	msnm
<b>HGT_V</b>	Altura de la topografía, variable V	msnm
<b>LANDMASK</b>	Máscara de suelo : 1=suelo, 0=agua	n/a
<b>LANDSEA</b>	Máscara de superficie marítima	%
<b>LANDUSEF</b>	24 categorías de uso de suelo del USGS	category
<b>LU_INDEX</b>	Categoría dominante	Category
<b>MAPFAC_M</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable M	n/a
<b>MAPFAC_MX</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable M (dirección en X)	n/a
<b>MAPFAC_MY</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable M (dirección en Y)	n/a
<b>MAPFAC_U</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable U	n/a
<b>MAPFAC_UX</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable U (dirección en X)	n/a

<b>MAPFAC_UY</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable U (dirección en Y)	n/a
<b>MAPFAC_V</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable V	n/a
<b>MAPFAC_VX</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable V (dirección en X)	n/a
<b>MAPFAC_VY</b>	Factor del mapa en la grilla de masa, variable V (dirección en Y)	n/a
<b>OA1</b>	Asimetría orográfica	n/a
<b>OA2</b>	Asimetría orográfica	n/a
<b>OA3</b>	Asimetría orográfica	n/a
<b>OA4</b>	Asimetría orográfica	n/a
<b>OL1</b>	Longitud de orografía efectiva	n/a
<b>OL2</b>	Longitud de orografía efectiva	n/a
<b>OL3</b>	Longitud de orografía efectiva	n/a
<b>OL4</b>	Longitud de orografía efectiva	n/a

La información de la geografía, sirve como base para la definición de los dominios.

- Preparación de datos meteorológicos

Los datos meteorológicos necesarios para la aplicación de un modelo regional provienen de modelos atmosféricos globales. La base de datos utilizada procede del ‘Global Forecast System (GFS)’ (Sistema de Pronóstico Global) (GFS, 2011). Los datos incluyen tanto información de modelos como de observaciones. Cuenta con datos de meteorología desde el año 1999 hasta la fecha con actualizaciones diarias. Los datos se reportan cada seis horas. Los archivos descargados son de tipo GRIB, la cobertura de estos datos se encuentra en un rango de longitud de 180W a 180E y un rango de latitud de 90S a 90N, en celdas de 1º x 1º, es decir, celdas de aproximadamente 111Km x 111Km. Los parámetros disponibles dentro del conjunto de datos meteorológicos se mencionan en la Tabla 5:

**Tabla 5. Variables meteorológicas**

Código de parámetro	Siglas	Descripción	Unidades
1	PRES	Presión	Pa
2	PRMSL	Presión reducida a MSL	Pa
7	HGT	Altura Geopotencial	gpm

10	TOZNE	Ozono total	Dobson
11	TMP	Temperatura	K
13	POT	Potencial de Temperatura	K
27	GPA	Anomalía de altura Geopotencial	gpm
33	U GRID	Componente U de viento	m/s
34	V GRID	Componente V de viento	m/s
39	V VEL	Velocidad vertical (presión)	Pa/s
41	ABS V	Vorticidad absoluta	s <sup>-1</sup>
51	SPF H	Humedad Específica	Kg/kg
52	RH	Humedad Relativa	%
54	P WAT	Agua precipitable	Kg/m <sup>2</sup>
65	WEASD	Agua equivalente a la nieve acumulada	Kg/m <sup>2</sup>
71	T CDC	Cubertura total de nubes	%
81	LAND	Cobertura de la Tierra	fracción
91	ICE C	Concentración de hielo	fracción
131	LFT X	Superficie del índice de elevación	K
132	4LFTX	Mejores 4 capas del índice de elevación	K
136	VW SH	Corte vertical de la velocidad	s <sup>-1</sup>
144	SOILW	Contenido volumétrico de humedad del suelo	fracción
154	O3MR	Relación de mezcla de ozono	Kg/kg
156	CIN	Inhibición convectiva	J/kg
157	CAPE	Energía potencial convectiva disponible	J/kg
221	HPBL	Altura de la capa límite planetaria	m

- Generación de mapas geográficos y meteorológicos.

Como se había mencionado anteriormente, complementario a las etapas de pre-procesamiento y ejecución del módulo WRF, existe la etapa de post-procesamiento de datos. En esta etapa es donde se visualiza y analiza la información generada en las dos

etapas previas, utilizando una serie de herramientas de software libre y comercial que permiten verificar los resultados.

- Generación de mapas de referencia de las estaciones de monitoreo.

Mediante el software ArcGIS V9.3.1 (ESRI, 2011) se georeferencia la información correspondiente a los puntos de monitoreo establecidos para el estudio.

La ciudad de Cuenca cuenta con 19 estaciones de monitoreo pasivo distribuidas dentro de la zona urbana de la ciudad. La información que generan, es recolectada periódicamente por el personal técnico del CEA, y es analizada posteriormente en el laboratorio. Al tratarse de un monitoreo pasivo, el flujo de información no es muy dinámico, por esta razón, la calidad de la información no es la óptima (CEA, 2011).

En la Tabla 6 se indica la ubicación de las diferentes estaciones.

**Tabla 6.** Estaciones de monitoreo

No.	Estación	Ubicación	Coordenadas Geográficas	
1	CAI	Parque Industrial (Caucho Industrias)	2°52'36,5" S	78°58'45,2" W
2	CHT	Colegio Herlinda Toral	2°53'36,8" S	78°59'7,5" W
3	UDA	Universidad del Azuay	2°55'4,2" S	79°0'1,0" W
4	CRB	Colegio Rafael Borja	2°55'13,77" S	79°2'58,41" W
5	PAI	Feria Libre	2°53'48,24" S	79°1'31,64" W
6	BEA	Estación de Servicio Eloy Alfaro	2°53'28,73" S	79°1'28,06" W
7	TEC	Tecnológico de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca	2°54'1,25" S	79°0'46,53" W
8	BCB	Benemérito Cuerpo de Bomberos	2°53'56,53" S	79°0'13,54" W
9	UDL	Universidad de Loja	2°53'31,23" S	79°1'9,57" W
10	HDM	Hospital de la Mujer y el Niño	2°51'56,8" S	78°58'55,3" W
11	UPS	Universidad Politécnica Salesiana	2°53'11" S	78°59'19,2" W
12	BAS	Estación de Servicio Avenida Solano	2°54'20,80" S	79°0'26,62" W
13	QUB	Quinta Bolívar (Gapal)	2°54'55,9" S	78°59'36,6" W
14	AHS	Antiguo Hospital del Seguro	2°53'55,8" S	78°59'45,1" W
15	BOL	Calle Bolívar y Tarqui	2°53'46,37" S	79°0'27,56" W

16	VEG	Calle Vega Muñoz y Benigno Malo	2°53'34,59" S	79°0'14,16" W
17	TET	Terminal Terrestre	2°53'32,8" S	78°59'33,2" W
18	VEI	Velas Imperial (Av. Don Bosco)	2°54'50,80" S	79°1'43,84" W
19	BCS	Estación de Servicio Control Sur	2°55'26" S	79°2'23,3" W

Fuente: Centro de Estudios Ambientales (Enero, 2010)

En la figura 6, se muestra el mapa de ubicación de las estaciones:



**Figura 6.** Mapa de ubicación de las estaciones de monitoreo pasivo

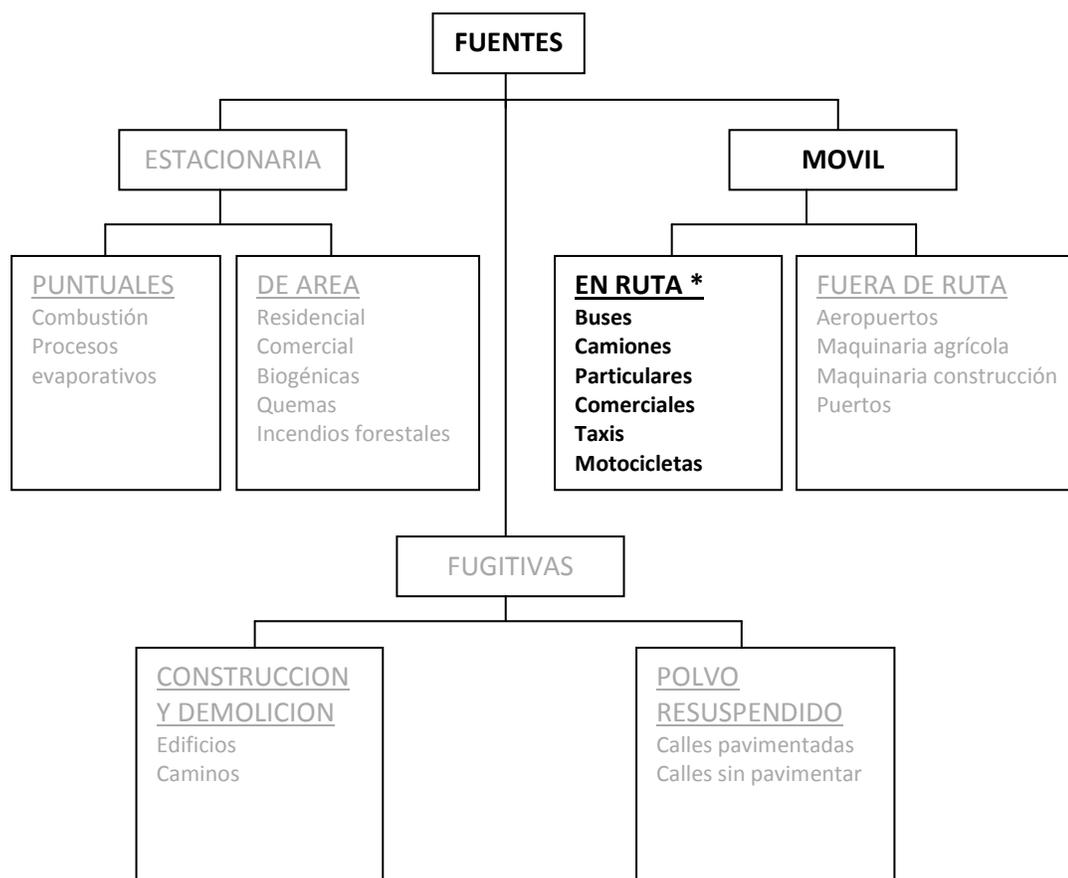
## II Etapa: preparación de datos para el modelo foto químico

- Preparación de los datos de contaminantes.

Una entrada fundamental para un modelo espacial foto químico son las emisiones. Ellas representan la condición de borde (en superficie) y el mayor forzante de la química atmosférica. La información de las emisiones se obtiene a través de sus inventarios. La información es distribuida en el espacio y en el tiempo realizándose además una especiación química detallada.

El inventario de emisiones es un instrumento de alta relevancia dentro de la gestión de calidad de aire ya que permite identificar quienes son los agentes contaminantes y evaluar la importancia y el impacto de cada una de las fuentes (Universidad de Chile, 2011)

El esquema de administración de un inventario de emisiones define lo que se muestra en la Figura 7:



**Figura 7.** Esquema de definición de un inventario de emisiones (Universidad de Chile, 2011)

\* Dentro de este proyecto de tesis se define el estudio únicamente de las fuentes móviles en ruta.

- Preparación del inventario de emisiones.

Como se ha mencionado, el proyecto únicamente comprende el inventario de emisiones de fuentes móviles en ruta.

Existen cuatro componentes básicos que se requieren para calcular un inventario de emisiones:

- ✓ Zonificación del área de estudio
- ✓ Caracterización del parque automotor
- ✓ Factores de emisión
- ✓ Conteos de flujo vehicular

#### Zonificación del área de estudio

Para efectuar el cálculo de inventario de emisiones de forma adecuada es necesario que se establezca la relación del comportamiento del flujo vehicular a lo largo del día y su composición vehicular en distintos sectores dentro de la ciudad (por ejemplo, hay sectores dentro de una ciudad por donde no circulan camiones pesados, etc.), para lograr esto es necesario zonificar el área de estudio.

#### Caracterización del parque automotor

La caracterización del flujo vehicular en cuanto a su composición hace posible obtener la mejor “fotografía” posible acerca de las diferentes clases de vehículos que circulan diariamente por la ciudad y conocer sus proporciones relativas, vale decir, qué porcentaje del flujo total corresponde a vehículos livianos, cuanto a camiones, a buses, etc. Esto es necesario debido a que la estimación de emisiones debe desagregarse en diferentes categorías vehiculares debido a las apreciables diferencias de emisiones entre un tipo de vehículo y otro. La categorización del parque automotor se la obtuvo del proceso de revisión técnica vehicular realizado por la I. Municipalidad de Cuenca en el año 2011.

En la Tabla 7, se detalla la categorización del parque automotor de la ciudad de Cuenca en el año 2011:

**Tabla 7.** *Categorización del parque automotor de Cuenca*

<b>Tipo</b>	<b>Subtipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Porcentaje</b>
<b>LIVIANOS</b>	AUTOS	72.395	59,11%
	CAMIONETAS	28.970	23,65%
	FURGONETAS	2.593	2,12%
	TAXIS	5.976	4,88%
	HIBRIDOS	423	0,35%
	OTROS	8	0,01%
<b>SUBTOTAL</b>		<b>110.365</b>	<b>90,11%</b>
<b>PESADOS</b>	CARGA PESADA	3.957	3,23%
	CARGA LIVIANA	1.062	0,87%

	OTROS	2	0,00%
<b>SUBTOTAL</b>		<b>5.021</b>	<b>4,10%</b>
<b>BUSES</b>	ESCOLAR	73	0,06%
	INTERPROVINCIAL	106	0,09%
	INTERPARROQUIAL	6	0,00%
	TURISMO	21	0,02%
	URBANO	1.307	1,07%
	MICROBUSES	104	0,08%
	FURGONETAS	21	0,02%
<b>SUBTOTAL</b>		<b>1.638</b>	<b>1,34%</b>
<b>MOTOS</b>	MOTOS	5.459	4,46%
<b>SUBTOTAL</b>		<b>5.459</b>	<b>4,46%</b>
<b>TOTAL</b>		<b><u>122.483</u></b>	<b><u>100,00%</u></b>

Fuente: I Municipalidad de Cuenca, Sistema de Revisión técnica vehicular, (Enero/2012).

### Factores de emisión

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y una unidad de actividad. Los factores de emisión, en general, se pueden clasificar en dos tipos: los basados en procesos y los basados en censos. Por lo general, los primeros se utilizan para estimar emisiones de fuentes puntuales y a menudo se combinan con los datos de actividad recopilados en encuestas o en balances de materiales. Por otro lado, los factores de emisión basados en censos se usan generalmente para estimar emisiones de fuentes de área (INE-México, 2011),

El nivel de emisión de contaminantes atmosféricos generados por las diferentes categorías vehiculares existentes, se conoce como la tasa de emisión másica por unidad de desplazamiento o “factor de emisión”.

La referencia principal para factores de emisión específicos para contaminantes tóxicos del aire es el sistema de datos FIRE (U.S. EPA, 1995b).

En la Tabla 8, se detallan algunos de los factores de emisión definidos por la EPA para los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):

**Tabla 8.** Factores de emisión para NO<sub>x</sub>(EPA, 2011)

Tipo vehículo	Combustible	Medida	Factor	Unidad
<b>Pesado</b>	Diesel	1000 galones	4.38E+02	Libra
<b>Liviano</b>	Diesel	1000 galones	2.60E+02	Libra
<b>Pesado</b>	Diesel/Kerosene	1000 galones	9.77E+01	Libra

N/A	Gasolina	1000 galones	1.02E+02	Libra
N/A	Diesel/Kerosene	1000 galones	6.04E+02	Libra

### Conteos de flujo vehicular

Para poder calcular emisiones a lo largo de todo el día y todo el año, es decir, llegar a estimar las emisiones anuales, es necesaria una expansión del flujo vehicular, al menos a todo el día. Como el modelo de emisiones requiere calcular emisiones en un periodo continuo de tiempo, es necesario extrapolar estas asignaciones a todo el día y a todo el año, para lo cual se debe contar con perfiles de flujos diarios que caractericen el comportamiento a lo largo de los días y semanas característicos. Los conteos de flujos ejecutados como se muestra en la Tabla 9, entregan la información relevante para su obtención.

**Tabla 9. Conteos de flujo vehicular**

Puntos monitoreados	Fecha	Hora	Livianos	Pesados	Motos	Buses	Total
CAI	07/06/2011	06:00 - 07:00	335	39	25	15	414
		12:00 - 13:00	542	90	33	6	671
		18:00 - 19:00	432	31	15	4	482
TET	13/06/2011	06:00 - 07:00	656	5	12	103	776
		12:00 - 13:00	2274	48	76	105	2501
		18:00 - 19:00	2269	40	80	120	2509
HDM	07/06/2011	06:00 - 07:00	89	16	5	0	110
		12:00 - 13:00	84	15	3	0	102
		18:00 - 19:00	62	21	8	0	91
VEI	13/06/2011	06:00 - 07:00	315	13	6	54	388
		12:00 - 13:00	709	39	26	51	825
		18:00 - 19:00	819	39	22	64	944
PAI	08/06/2011	06:00 - 07:00	1068	35	24	91	1218
		12:00 - 13:00	1670	83	54	97	1904
		18:00 - 19:00	1651	80	54	96	1880
UPS	14/06/2011	06:00 - 07:00	186	1	5	46	238
		12:00 - 13:00	752	30	31	54	865
		18:00 - 19:00	951	37	28	51	1067
BAS	07/06/2011	06:00 - 07:00	480	2	7	64	553
		12:00 - 13:00	1945	39	79	95	2158
		18:00 - 19:00	2173	38	69	99	2379
TEC	14/06/2011	06:00 - 07:00	155	4	1	35	195
		12:00 - 13:00	812	15	30	46	902
		18:00 - 19:00	791	9	14	37	851
QUB	08/06/2011	06:00 - 07:00	328	7	4	50	389

		12:00 - 13:00	882	39	18	33	972
		18:00 - 19:00	1034	34	19	64	1151
<b>BCB</b>	14/06/2011	06:00 - 07:00	425	4	25	40	494
		12:00 - 13:00	843	7	37	54	940
		18:00 - 19:00	808	5	28	40	881
<b>UDA</b>	07/06/2011	06:00 - 07:00	600	7	10	57	674
		12:00 - 13:00	1092	40	11	39	1181
		18:00 - 19:00	1143	18	20	53	1234
<b>BOL</b>	13/06/2011	06:00 - 07:00	295	1	7	0	303
		12:00 - 13:00	364	1	23	1	389
		18:00 - 19:00	414	3	13	2	432
<b>AHS</b>	07/06/2011	06:00 - 07:00	193	0	3	1	197
		12:00 - 13:00	510	13	13	0	536
		18:00 - 19:00	565	8	11	2	586
<b>UDL</b>	08/06/2011	06:00 - 07:00	348	6	12	63	429
		12:00 - 13:00	1263	25	25	101	1414
		18:00 - 19:00	1395	23	36	119	1573
<b>VEG</b>	14/06/2011	06:00 - 07:00	98	2	4	34	138
		12:00 - 13:00	935	25	19	35	1012
		18:00 - 19:00	1113	37	36	47	1233
<b>CHT</b>	13/06/2011	06:00 - 07:00	208	6	6	19	239
		12:00 - 13:00	359	14	19	7	398
		18:00 - 19:00	327	9	10	4	350
<b>CRB</b>	14/06/2011	06:00 - 07:00	300	14	3	56	373
		12:00 - 13:00	425	19	20	53	517
		18:00 - 19:00	419	13	9	63	504
<b>BEA</b>	08/06/2011	06:00 - 07:00	481	23	48	87	639
		12:00 - 13:00	2634	132	103	114	2983
		18:00 - 19:00	1982	106	71	88	2247

Fuente: Centro de Estudios Ambientales (Noviembre, 2011)

La metodología general para estimar las emisiones vehiculares en ruta consiste en estimar los niveles de actividad de las diferentes categorías vehiculares y asociar a cada una de ellas un nivel de emisión promedio o factor de emisión como se muestra en la Ecuación 1:

$$E_i = \sum_k \text{Nivel de actividad}_k \times FE_{ik}$$

**Ecuación 1**

Donde:

**E<sub>i</sub>**: Emisiones [gr] del contaminante considerado i

**Nivel de actividad**: Nivel de actividad de la categoría vehicular k

**FE<sub>ik</sub>**: Factor de emisión del contaminante i para la categoría k evaluada [gr/km]

Para los vehículos motorizados, el nivel de actividad es representado, básicamente, por el kilometraje recorrido por el vehículo en el tiempo y área donde se desarrolla el inventario.

Los factores de emisión se expresan en unidades de gramos por kilómetro recorrido, los que generalmente son altamente dependientes de la velocidad media de circulación del vehículo (Universidad de Chile, 2011).

Debido a que no existen estudios detallados de la circulación vehicular en la ciudad de Cuenca, se consideró este parámetro estimando una velocidad promedio de 50 Km/h y una distancia de 30 Km, que son los valores promedios que un vehículo recorre en la ciudad de Cuenca durante un día normal (CEA, 2011).

El nivel de actividad asociado a este tipo de fuentes, puede ser obtenido de una manera desagregada y en detalle estimando directamente la información a partir de datos de flujo vehicular (modelos de transporte, conteos vehiculares, etc.), entre otras variables, generados por los modelos de transporte. Muchas veces estos datos no están disponibles y es necesario estimar el nivel de actividad vehicular de forma más agregada con la ayuda de otros parámetros alternativos, tales como las estadísticas de consumo de combustible regionales, caracterización detallada del parque y/o encuestas directas a usuarios, o bien aplicar una metodología alternativa de asignación de flujo a la red vial.

- Integración de los datos geográficos y meteorológicos a los químicos.

Para el registro de los datos de la química, se requiere que los datos a integrar se generen con el formato NetCDF (Network Common Data Form) (Unidata, 2011). NetCDF es un conjunto de librerías de formatos de datos auto-descritos, no dependientes de una máquina o sistema operativo en particular que soportan la creación, acceso y la posibilidad de compartir información orientada a datos científicos en forma de arreglos.

Para la preparación de los datos químicos, es necesario registrar los datos de emisiones en el formato NetCDF para que pueda ser procesado por el WRF-CHEM. Con este fin, el autor ha desarrollado un programa utilizando el lenguaje de programación Java, mediante el cual se registran para cada período, nivel de altitud y celda, los datos de emisiones de los contaminantes recopilados en las diferentes estaciones de monitoreo.

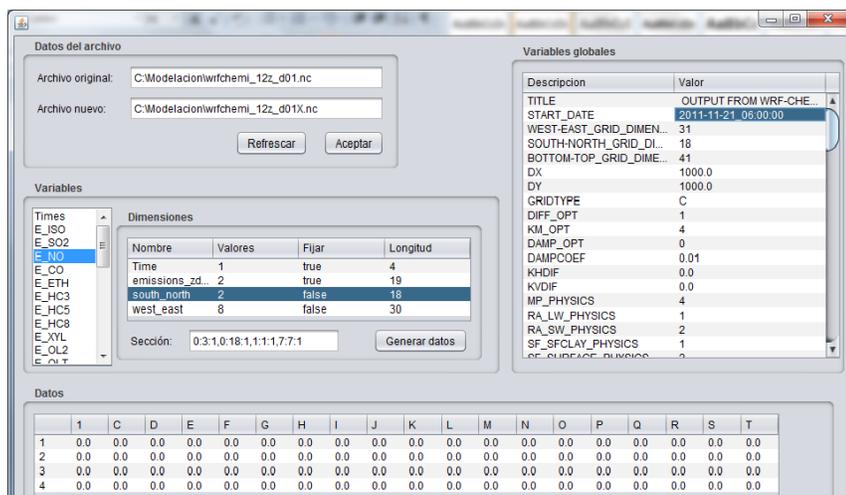


Figura 8. Parámetros para la generación de datos en formato NetCDF

- Implementación del modelo numérico

Para la implementación del modelo numérico se realizó un experimento el día 21 de Noviembre de 2011. En este día se realizaron mediciones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{O}_3$  y un conteo de vehículos por categoría en las diferentes estaciones de monitoreo pasivo.

Se descarga la información meteorológica correspondiente a ese día y se ejecuta el modelo WRF estableciendo 12 horas de modelación para generar los datos meteorológicos de los tres dominios.

Luego se calcula el inventario de emisiones tomando como base la información del año 2009 incluyendo el conteo de vehículos para definir los factores de emisión, definiendo el nivel de actividad utilizando los datos de la Tabla 9, donde se detalla el conteo del flujo vehicular.

Se registra la información correspondiente al inventario de emisiones generando el archivo en formato NetCDF y luego se ejecuta el modelo WRF-CHEM para el dominio que representa la ciudad de Cuenca que es el que dispone de datos de contaminantes.

### III Etapa: generación de resultados

- Generación de los mapas de resultados.

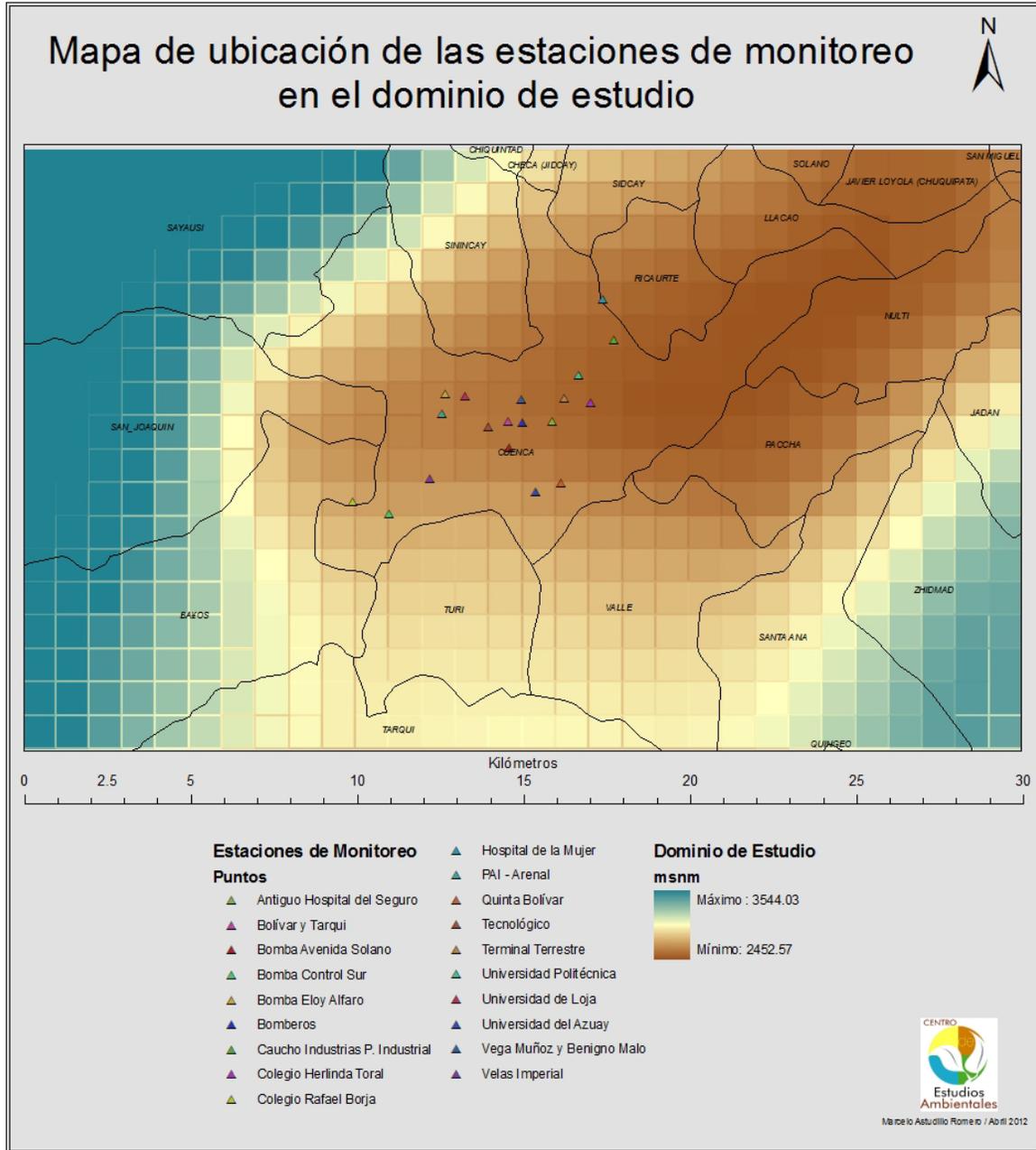
Los archivos generados por WRF (modelo meteorológico) y WRF-CHEM (modelo fotoquímico), son procesados con el software ArcGIS 9.3.1, utilizando la herramienta “Make NetCDF Raster Layer” para generar los diferentes mapas de resultados.

- Generación de mapas de validación de los resultados.

La información que se obtiene en los mapas de resultados es contrastada con los valores monitoreados en los mismos períodos de modelación.

## Resultados

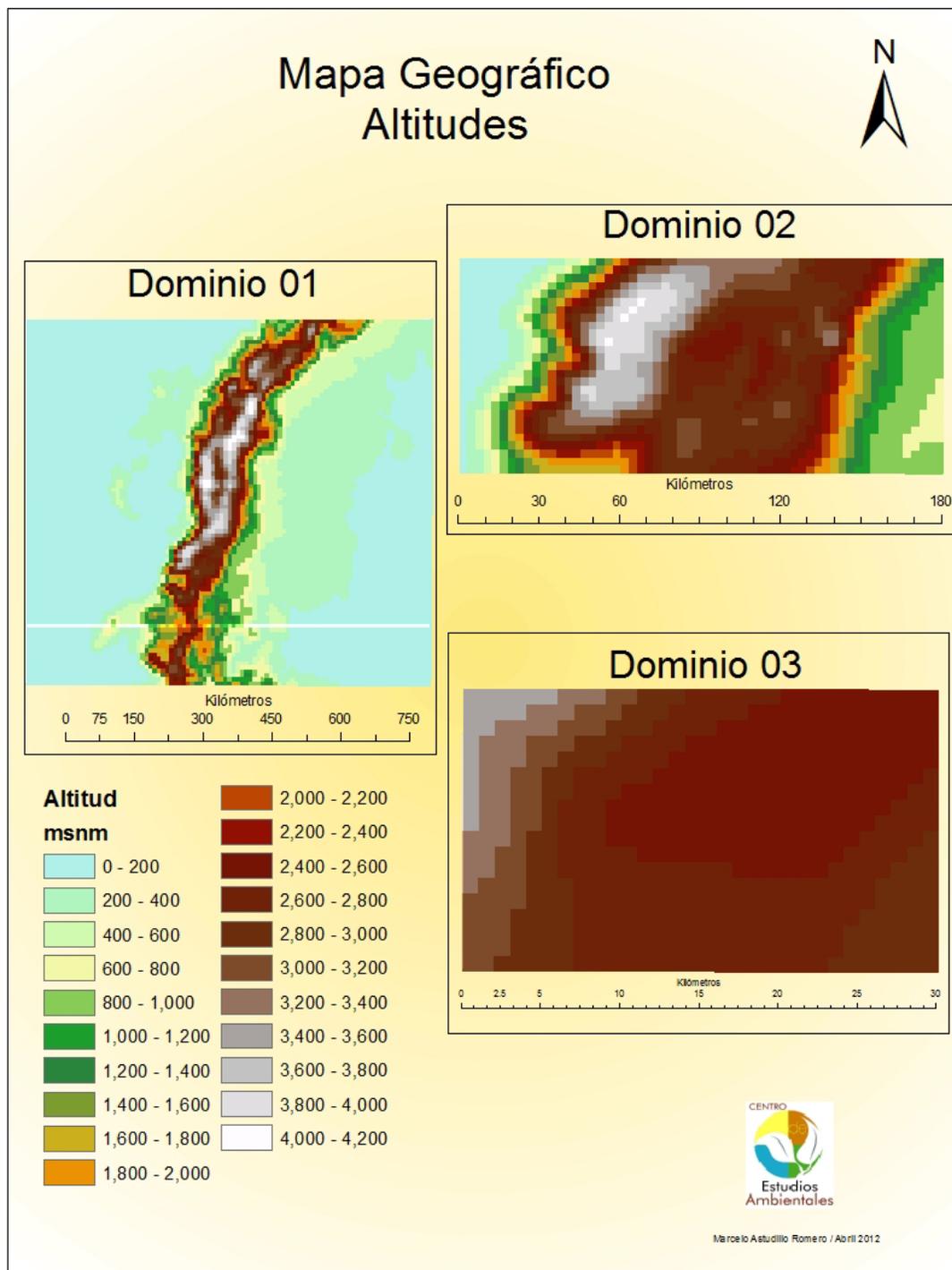
En la Figura 9, se muestra la distribución de las estaciones en la zona de estudio correspondiente al mapa de parroquias de Cuenca:



**Figura 9:** Mapa de ubicación de las estaciones en el dominio de estudio

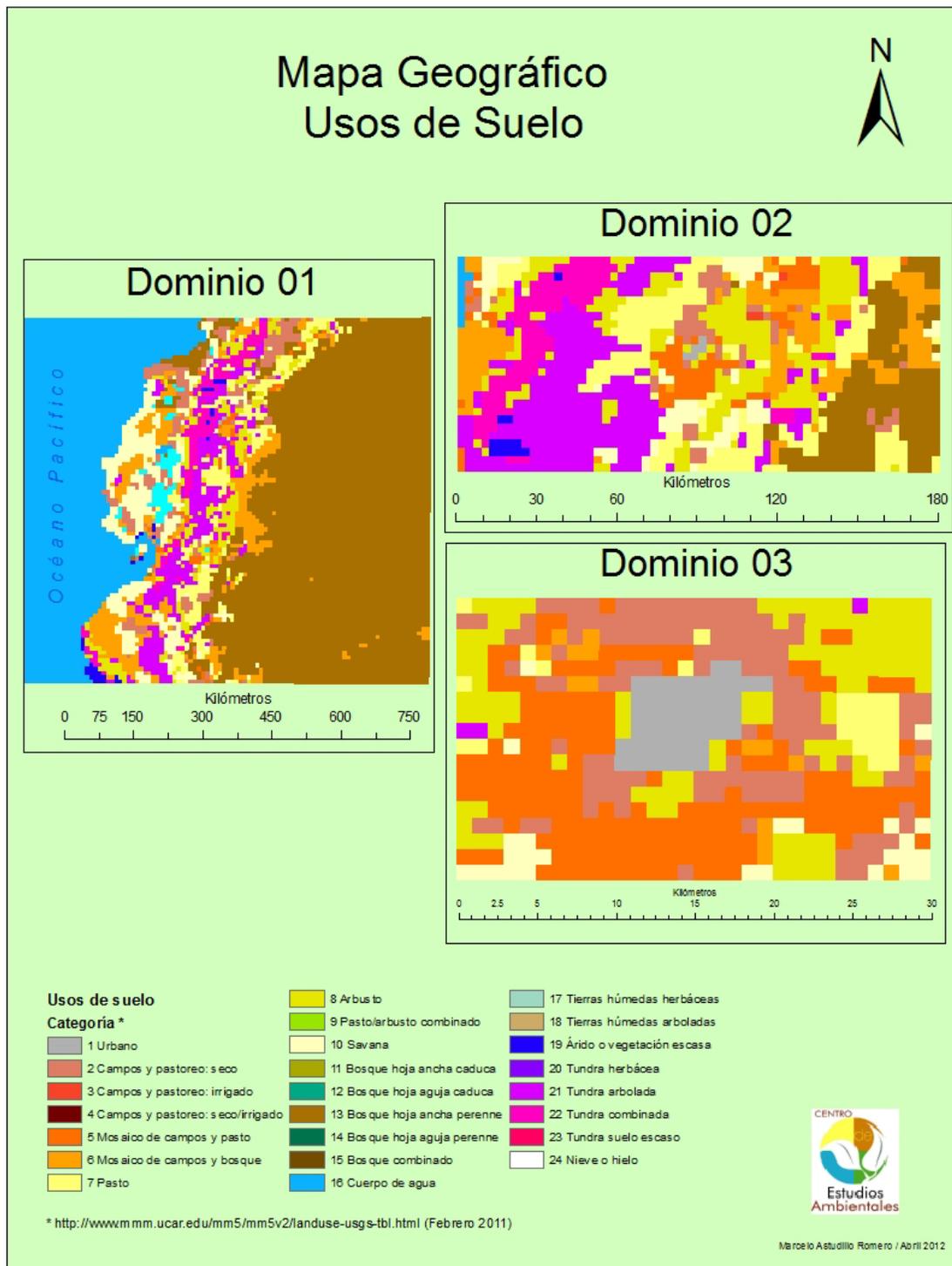
## Mapas geográficos

En la Figura 10, se muestran los mapas de altitudes para cada uno de los dominios de estudio:



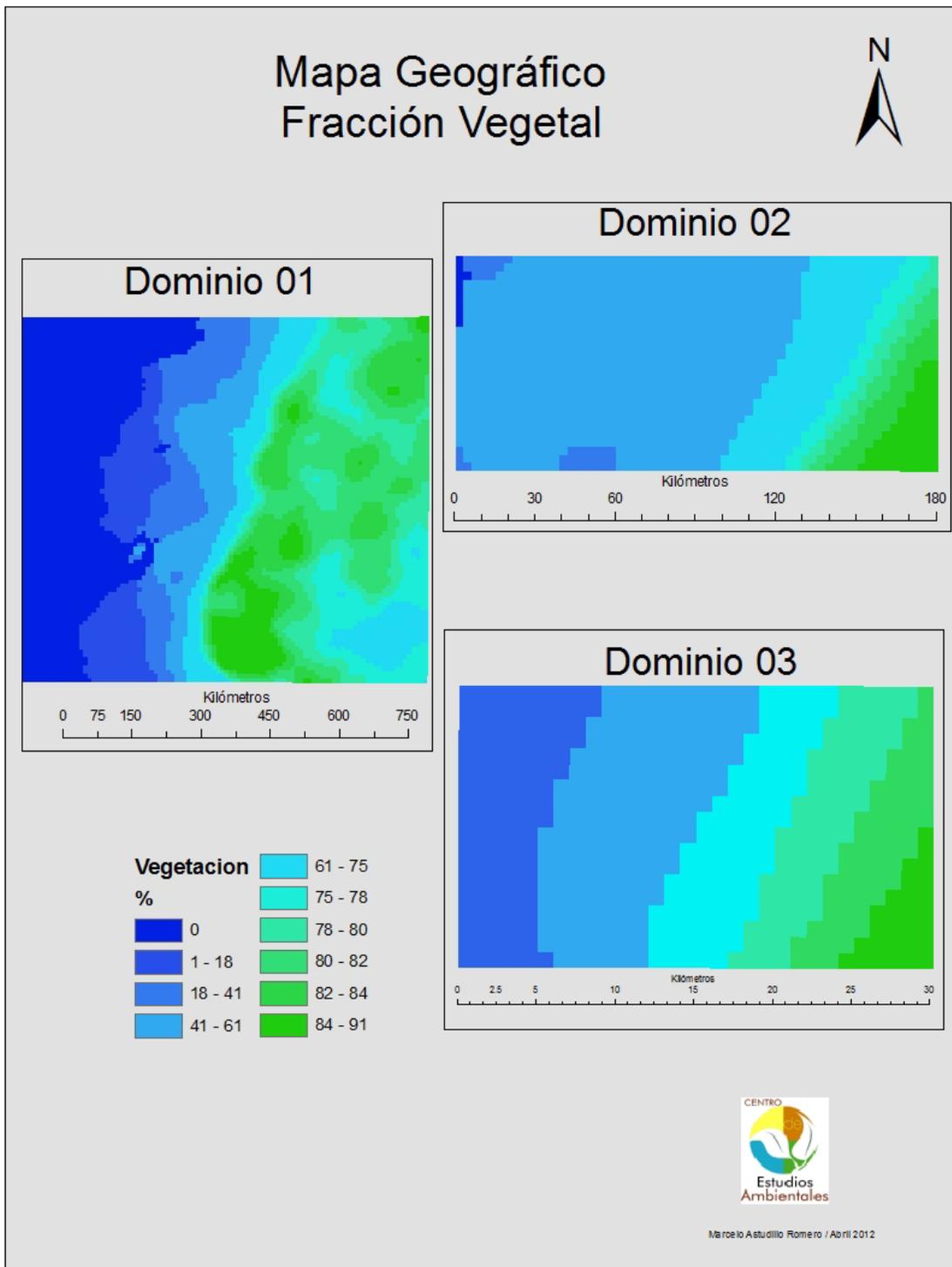
**Figura 10.** Mapa geográfico: Altitudes

En la Figura 11, se muestran los mapas de usos de suelo para cada uno de los dominios de estudio:



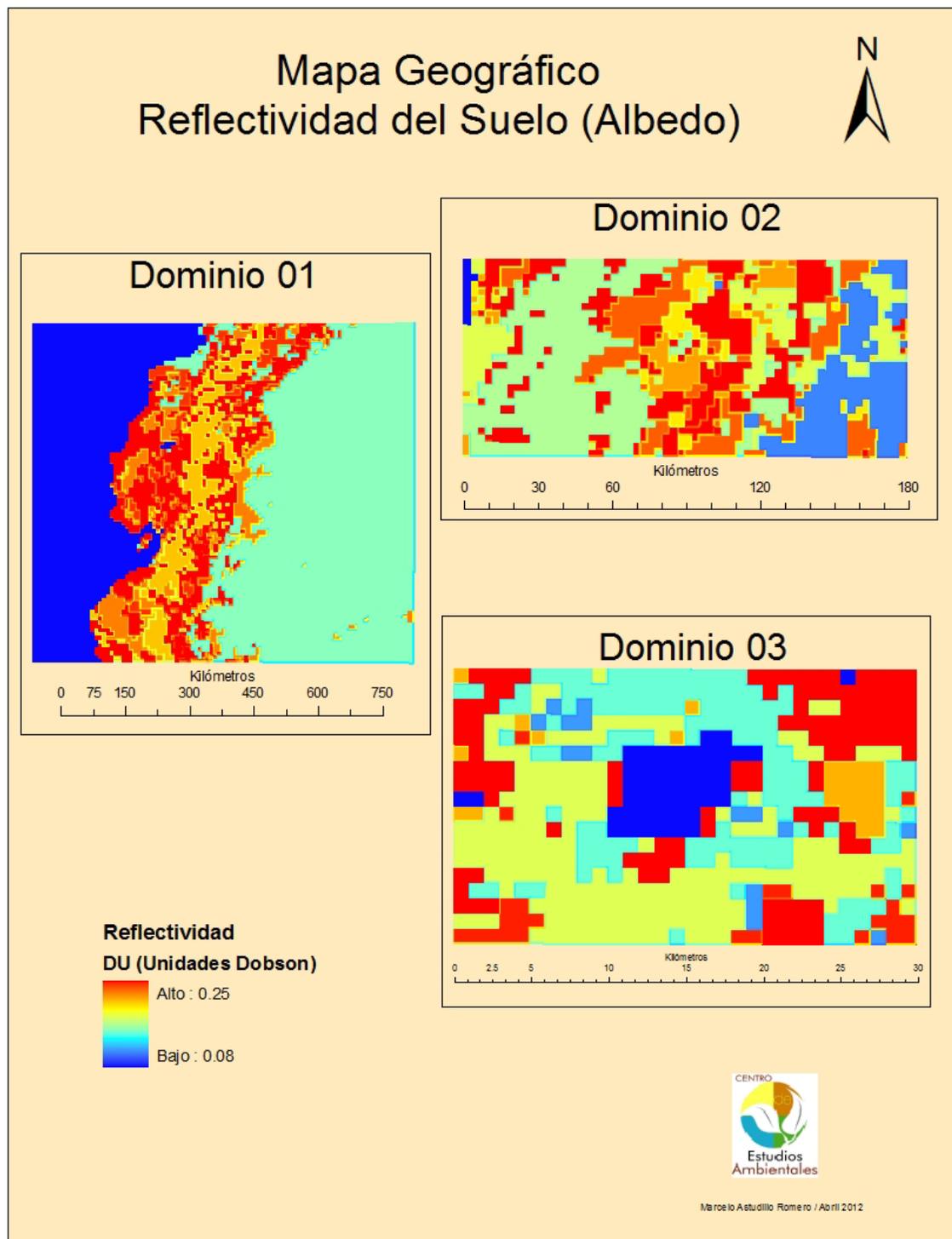
**Figura 11.** Mapa geográfico: Usos de suelo

En la Figura 12, se muestran los mapas de porcentaje de fracción vegetal del territorio definido para cada uno de los dominios de estudio:



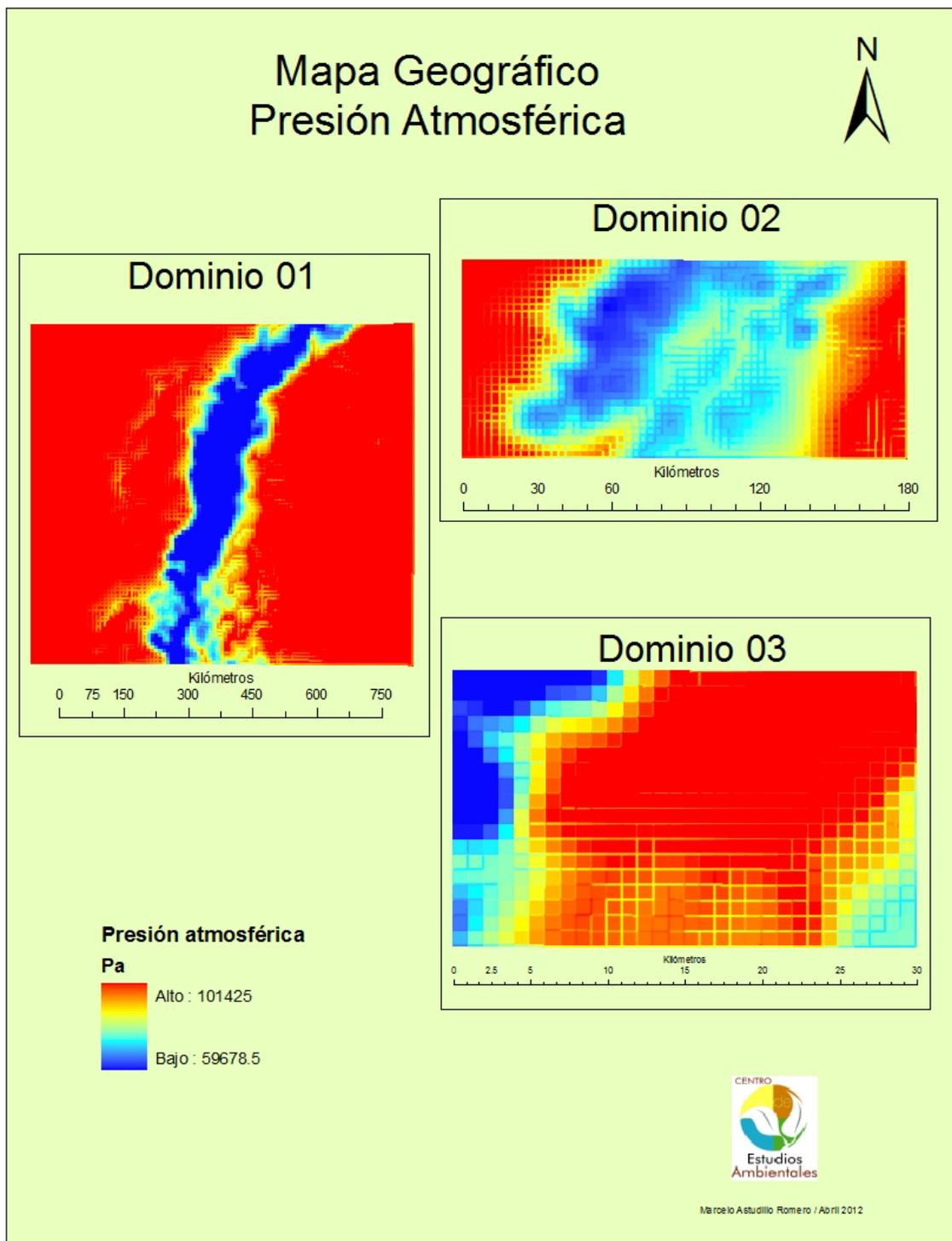
**Figura 12.** Mapa geográfico: Fracción vegetal

La Figura 13 muestra los valores de reflectividad del suelo (superficie de reflexión) para cada uno de los dominios de estudio:



**Figura 13.** Mapa geográfico: Reflectividad del Suelo

La Figura 14 muestra los valores de presión atmosférica para cada uno de los dominios de estudio:

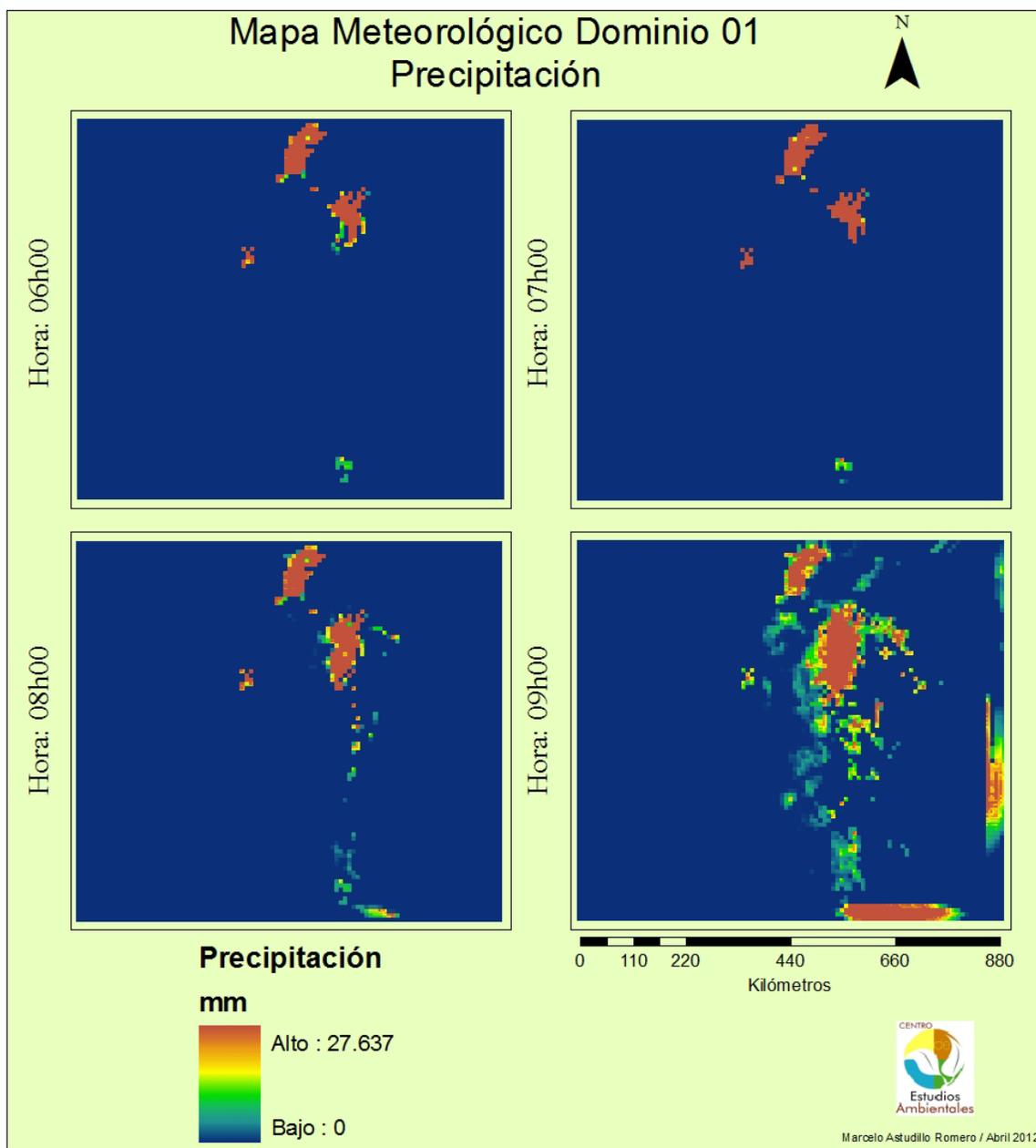


**Figura 14.** Mapa geográfico: Presión atmosférica

## Mapas meteorológicos

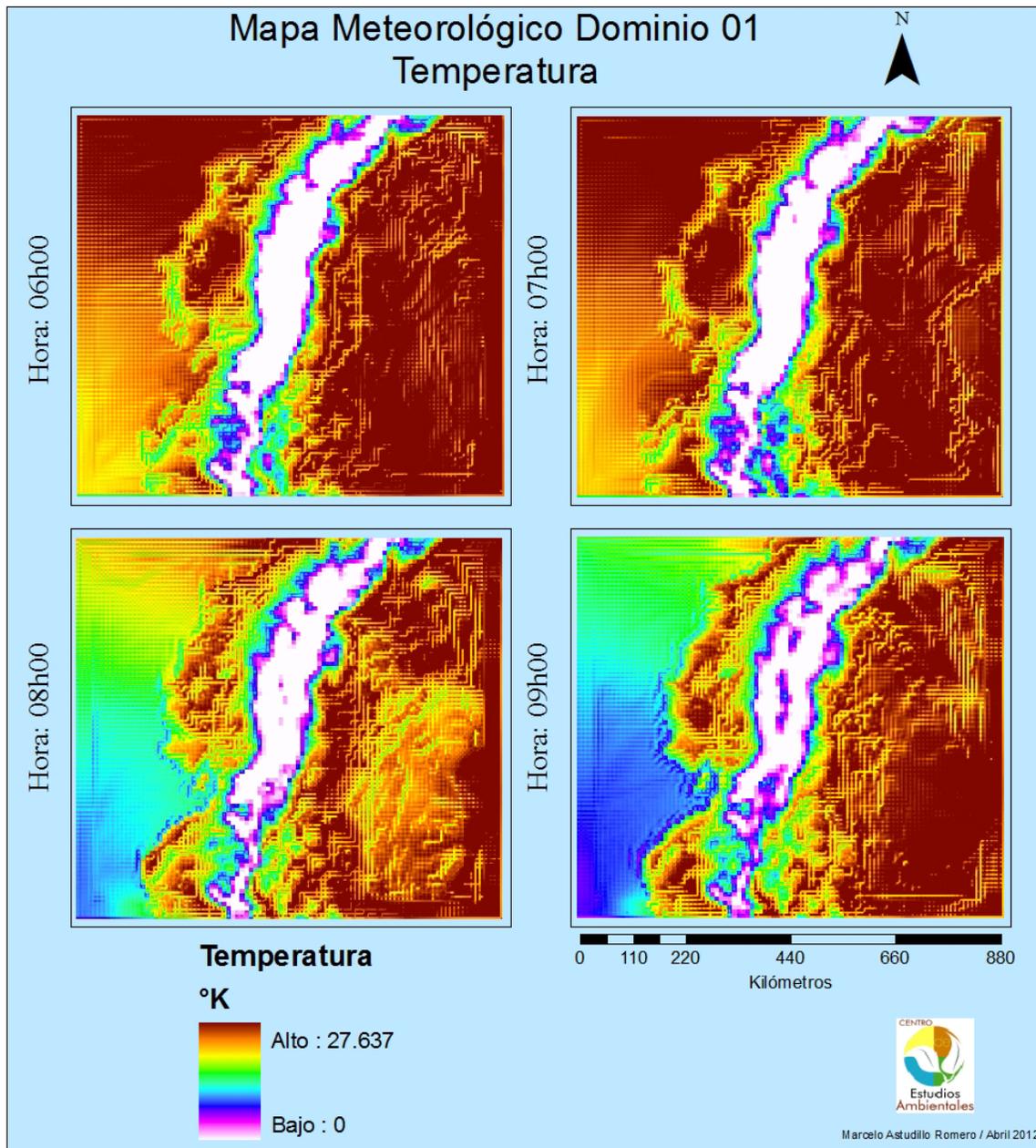
### a. Dominio 01

En la Figura 15 se muestra el mapa comparativo de precipitación entre las cuatro horas del estudio para el dominio 01:



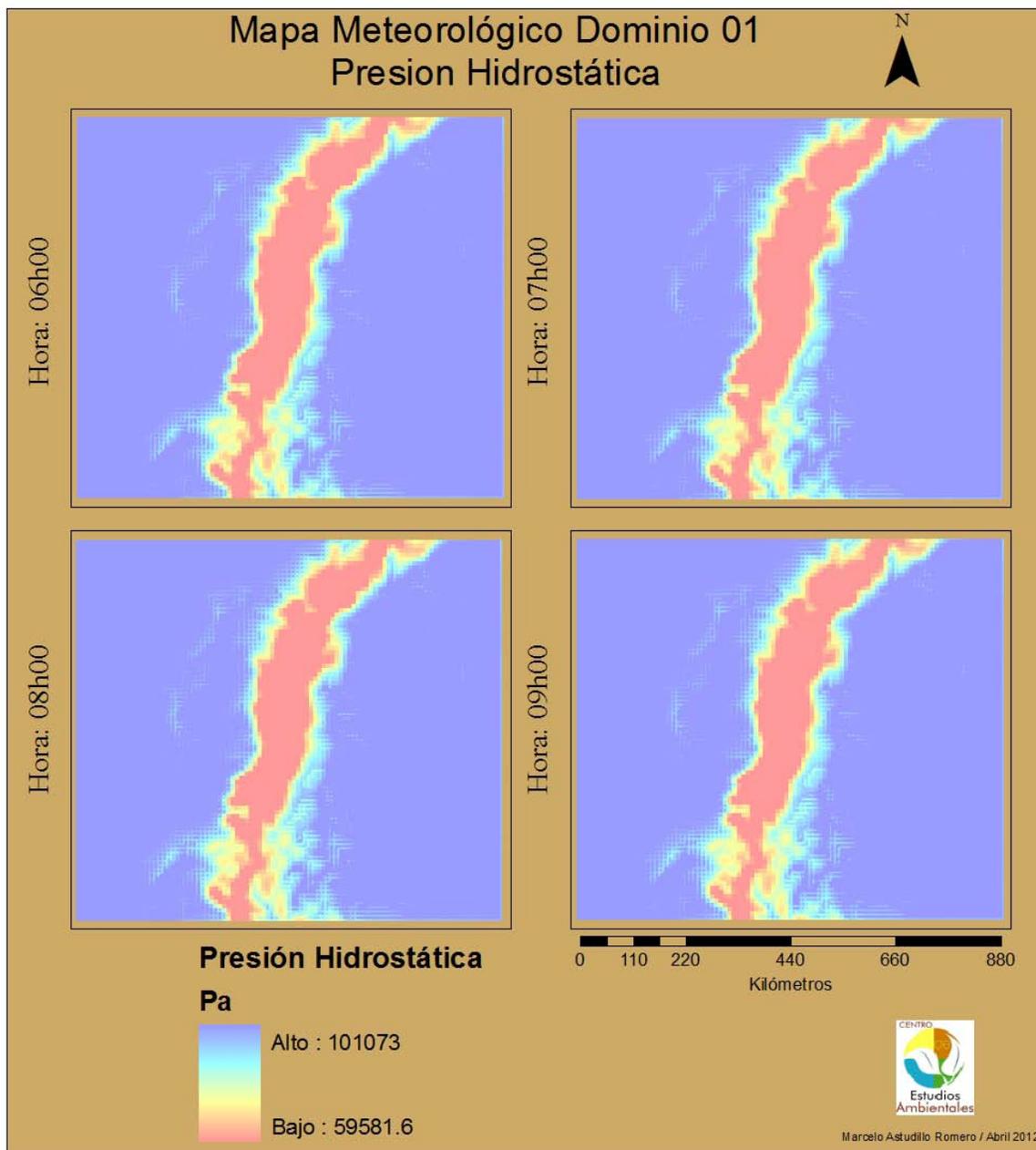
*Figura 15. Mapa horario de precipitación*

En la Figura 16 se muestra el mapa comparativo de temperatura entre las cuatro horas del estudio para el dominio 01:



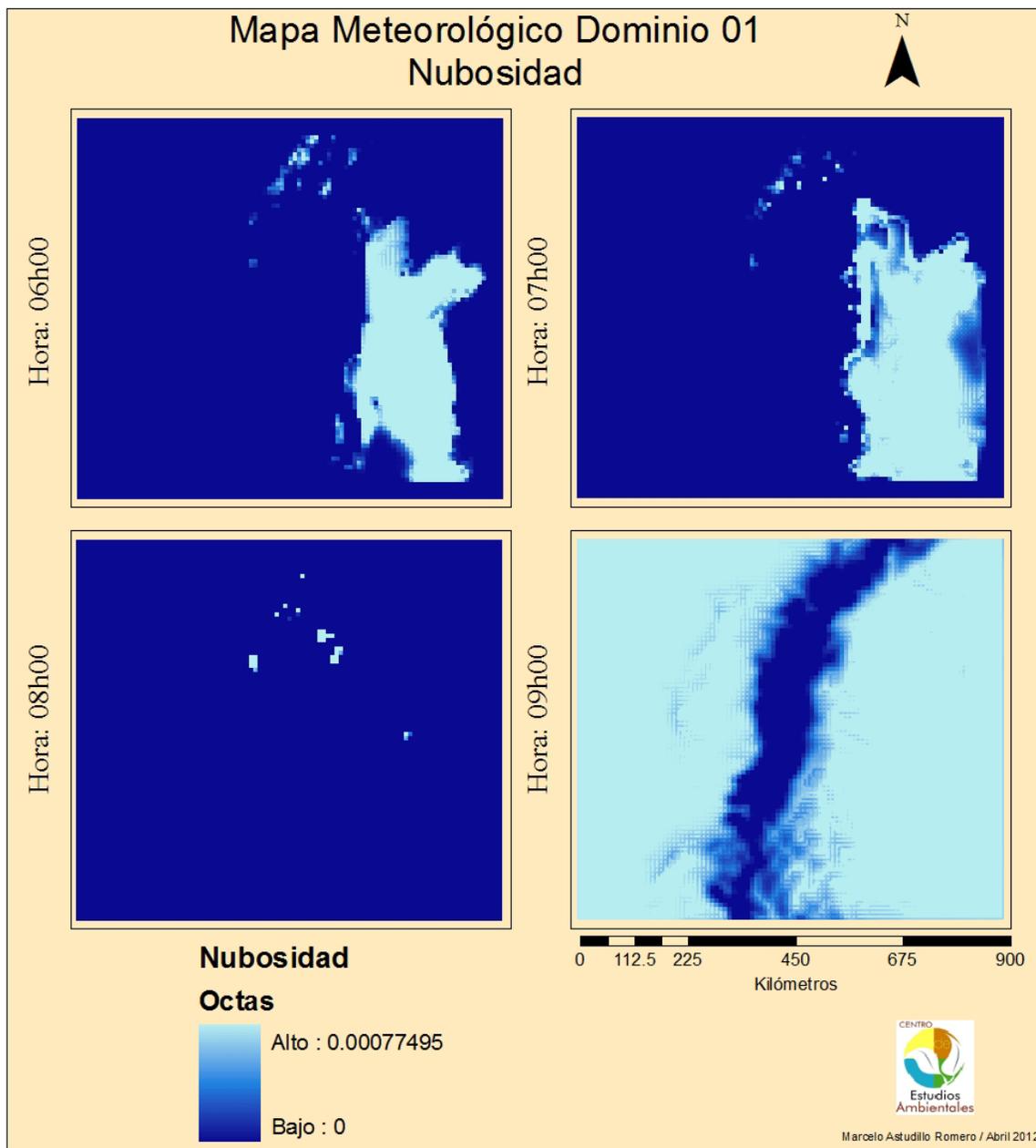
*Figura 16. Mapa horario de temperatura*

En la Figura 17 se muestra el mapa comparativo de presión hidrostática entre las cuatro horas del estudio para el dominio 01:



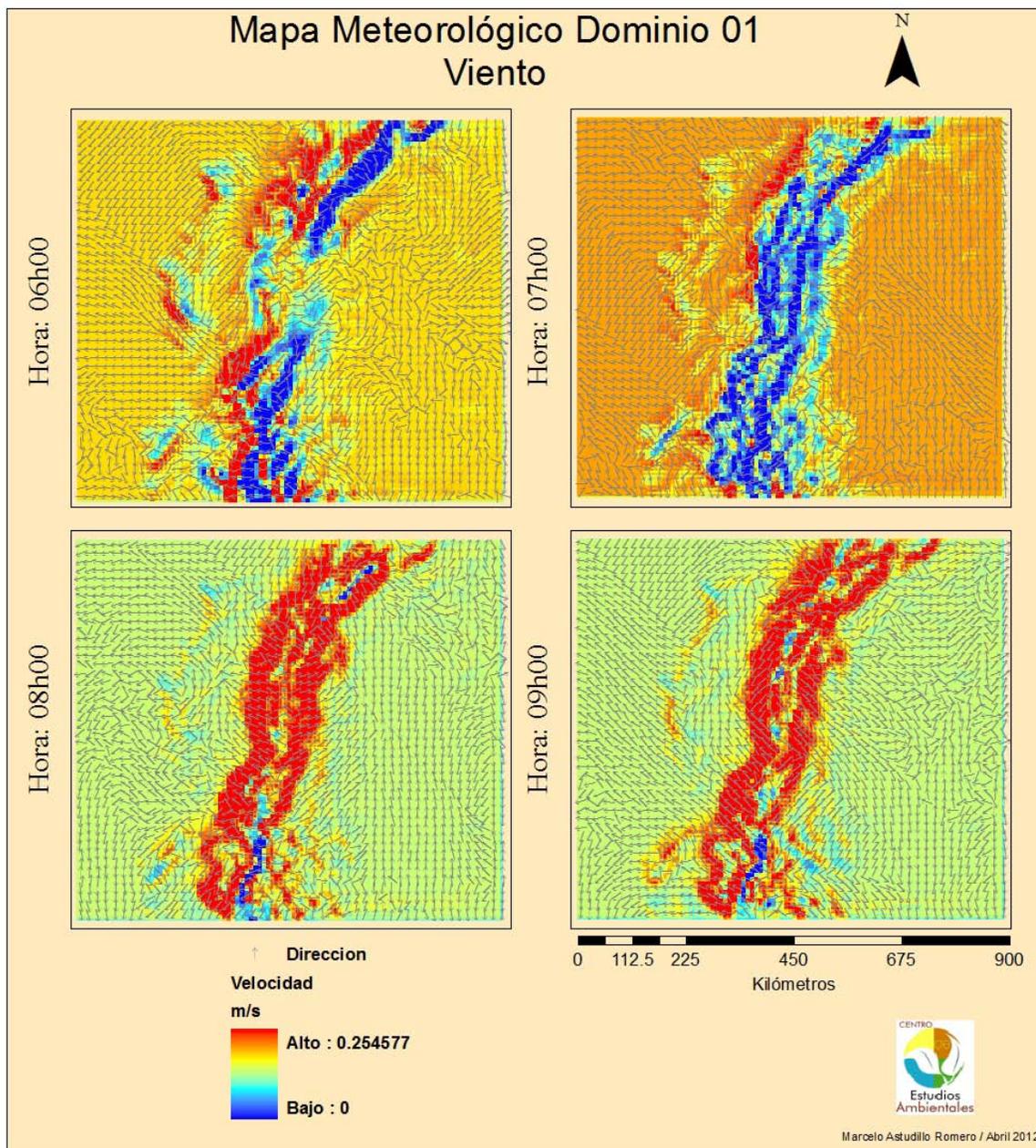
**Figura 17.** Mapa horario de presión hidrostática

En la Figura 18 se muestra el mapa comparativo de nubosidad entre las cuatro horas del estudio para el dominio 01:



**Figura 18.** Mapa horario de nubosidad

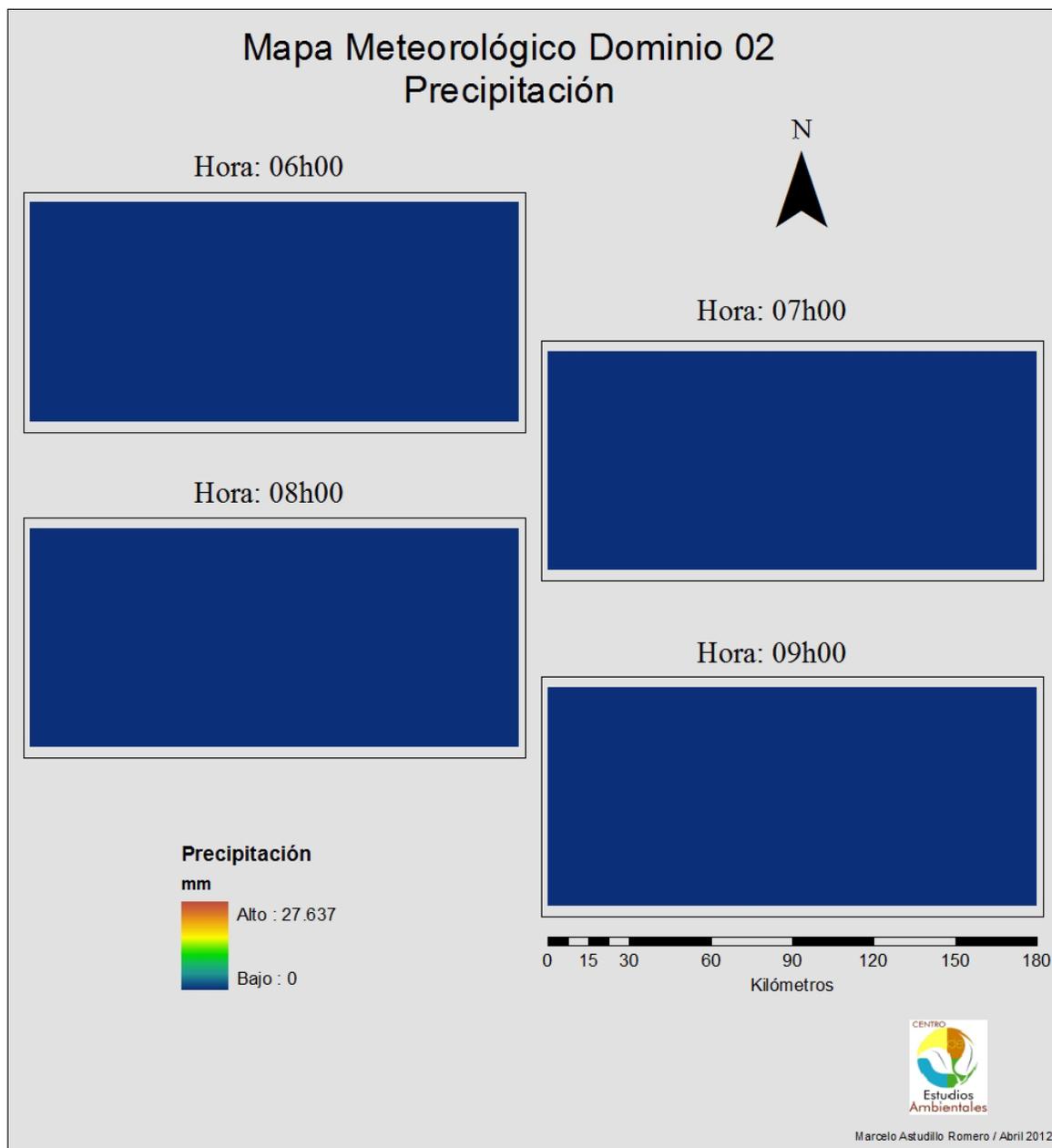
En la Figura 19 se muestra el mapa comparativo de vientos (velocidad y dirección) entre las cuatro horas del estudio para el dominio 01:



**Figura 19.** Mapa horario de vientos

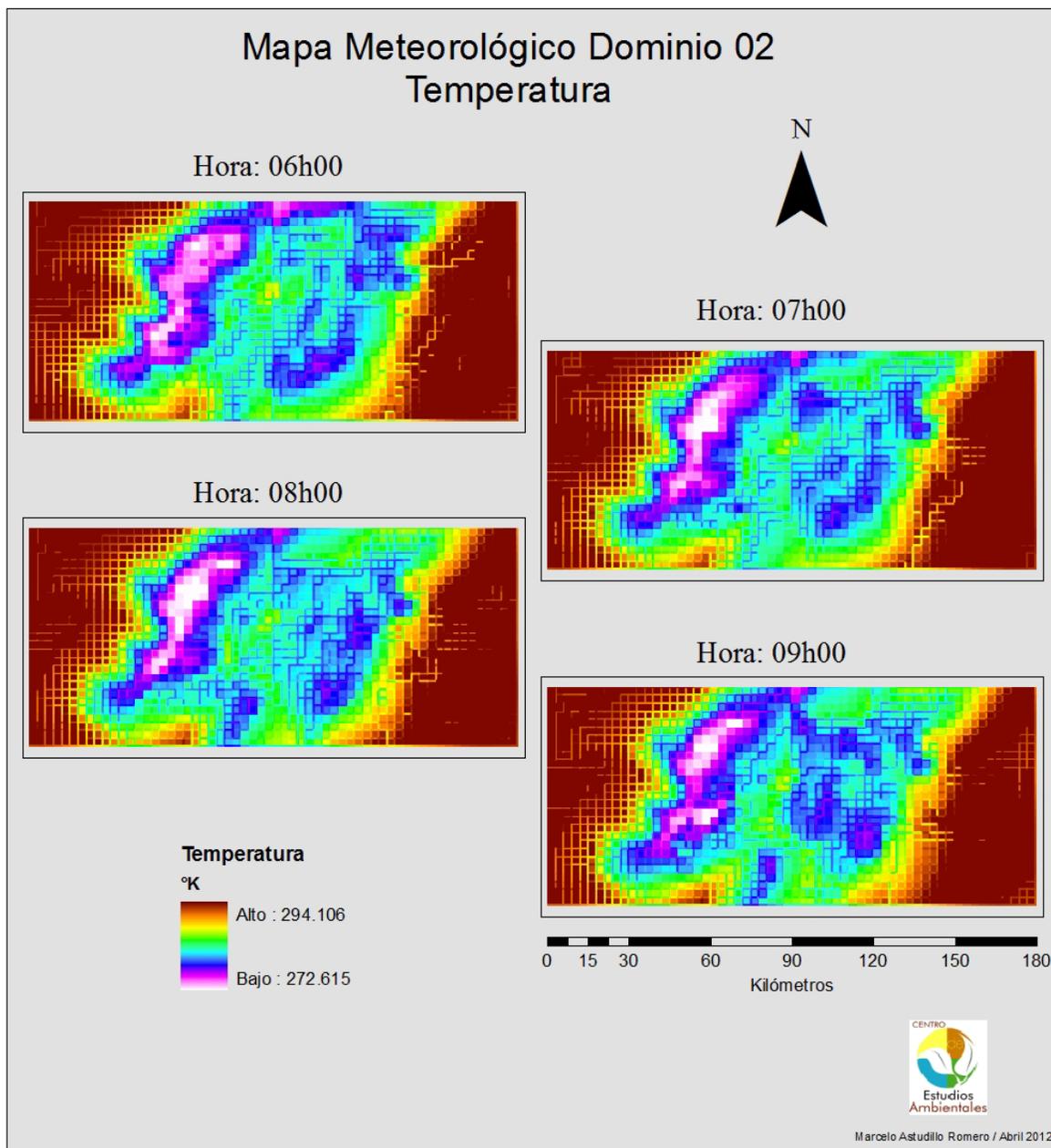
b. Dominio 02

En la Figura 20 se muestra el mapa comparativo de precipitación entre las cuatro horas del estudio para el dominio 02:



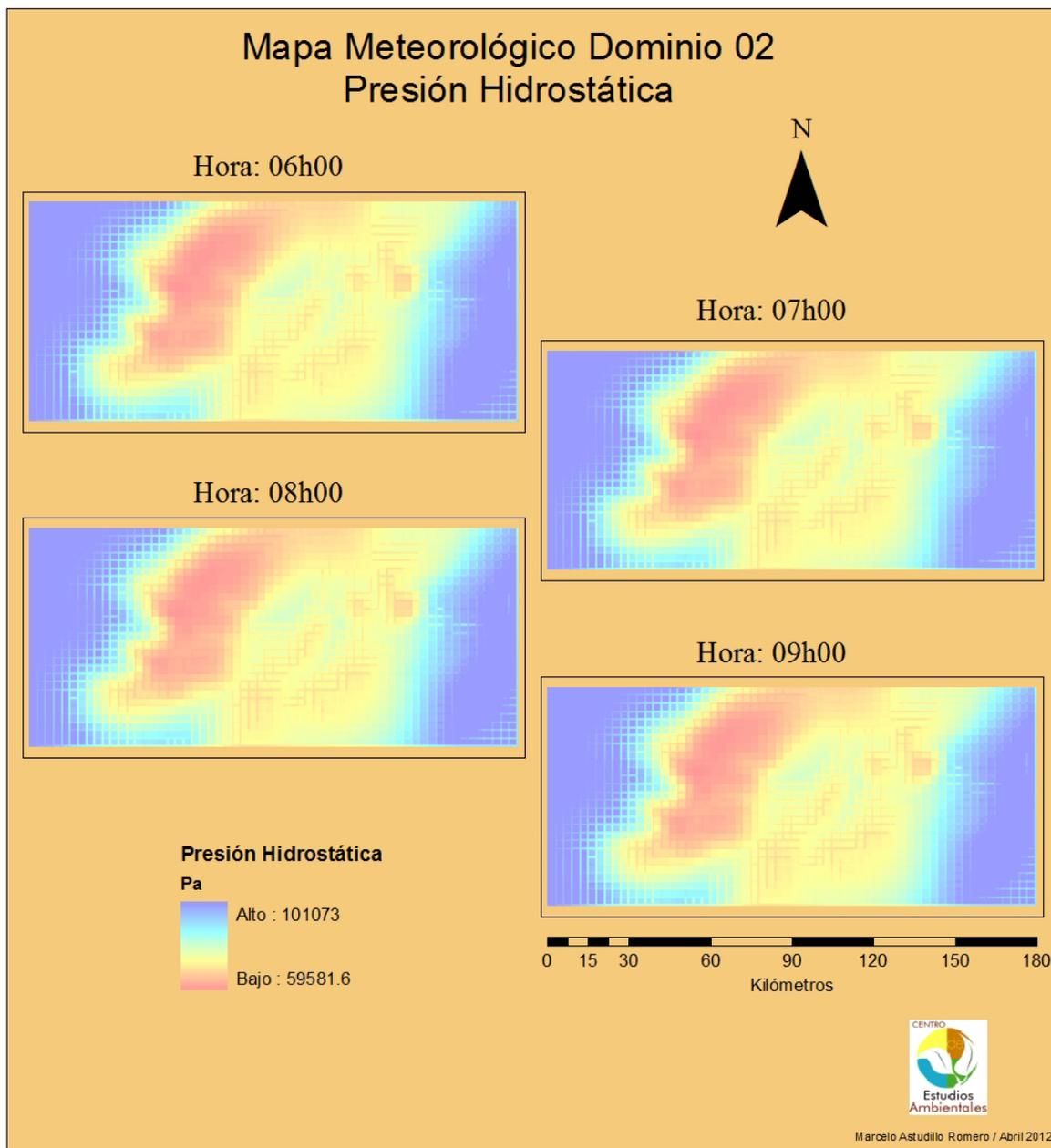
*Figura 20. Mapa horario de precipitación*

En la Figura 21 se muestra el mapa comparativo de temperatura entre las cuatro horas del estudio para el dominio 02:



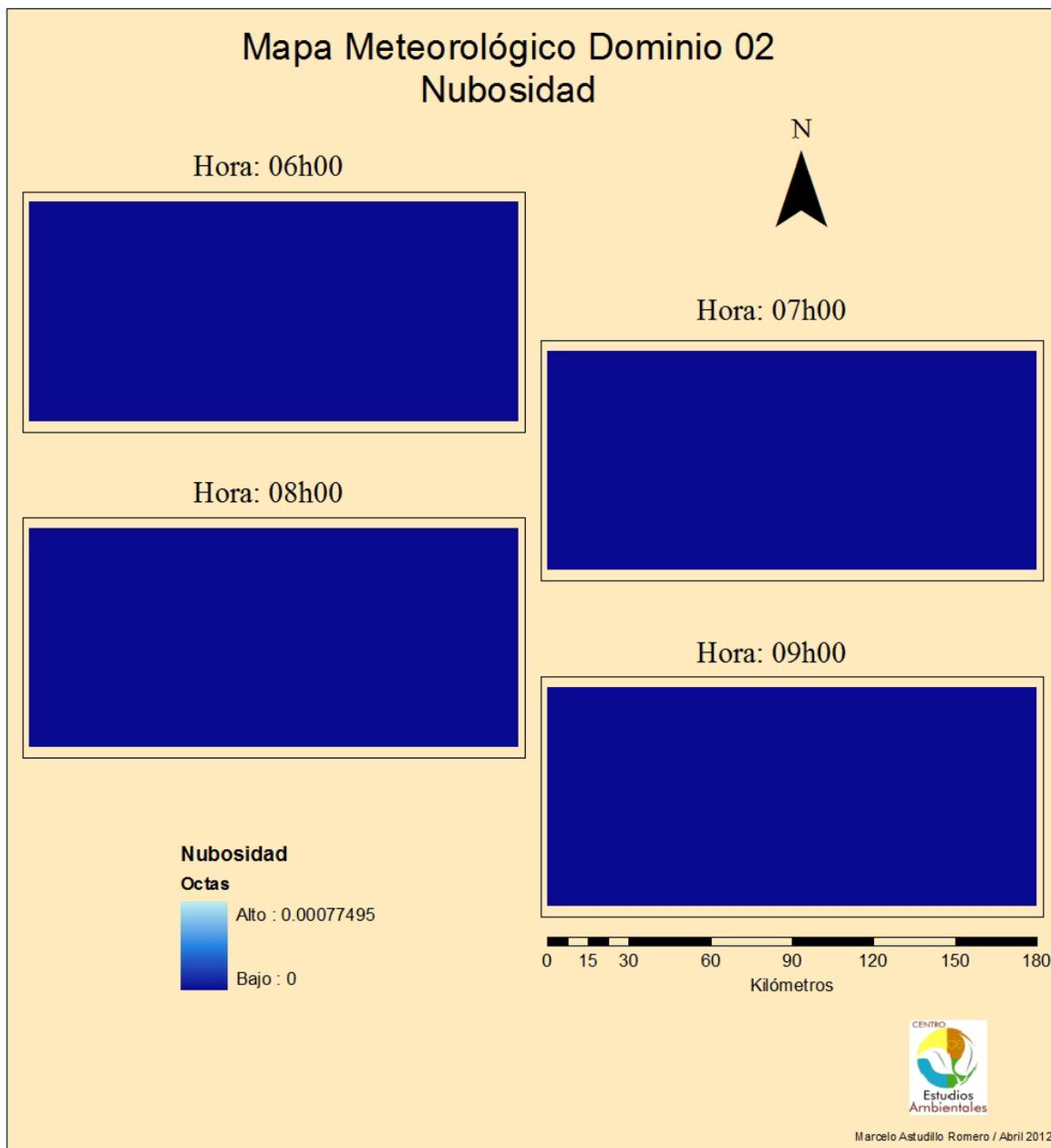
**Figura 21.** Mapa horario de temperatura

En la Figura 22 se muestra el mapa comparativo de presión hidrostática entre las cuatro horas del estudio para el dominio 02:



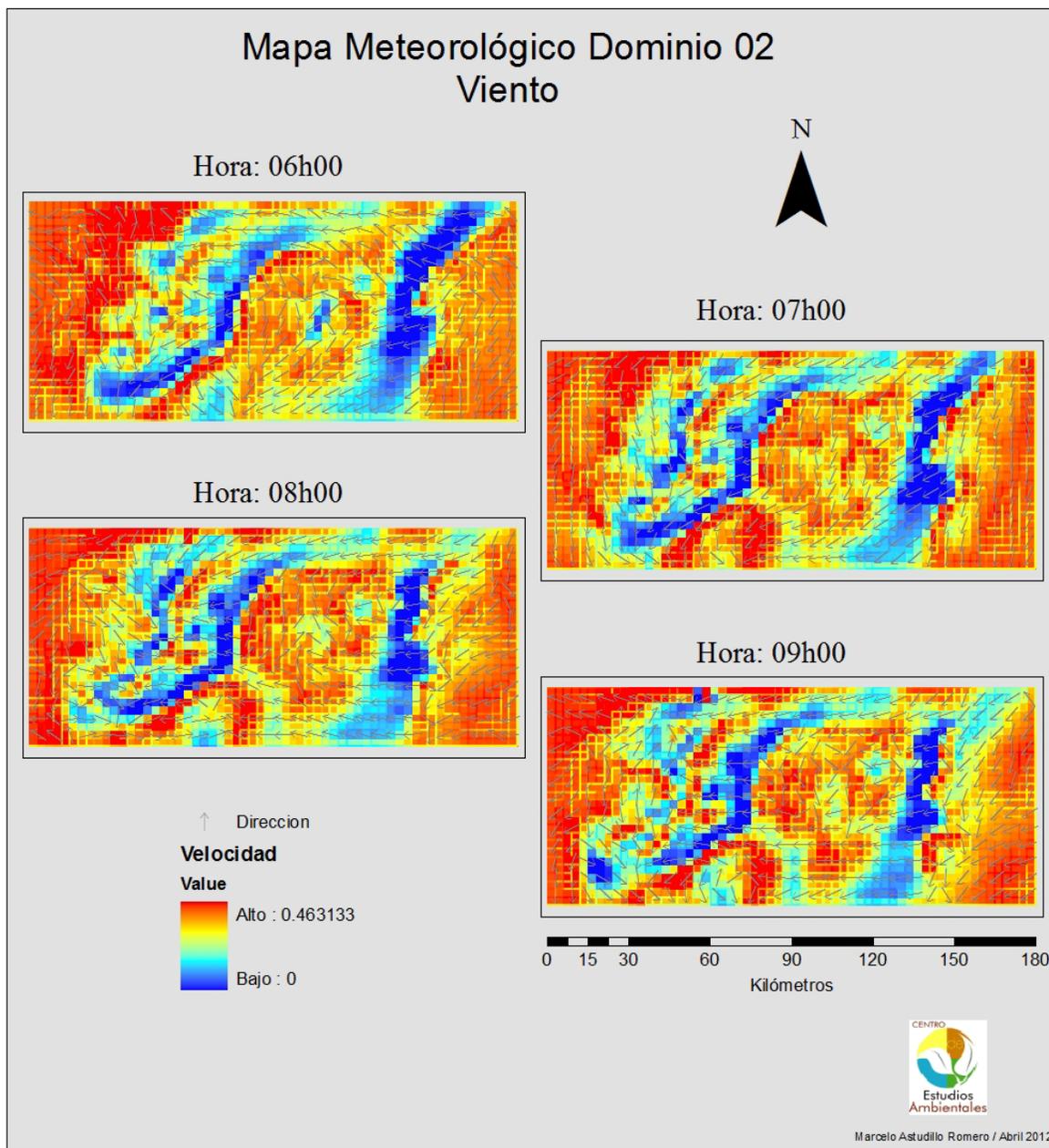
**Figura 22.** Mapa horario de presión hidrostática

En la Figura 23 se muestra el mapa comparativo de nubosidad entre las cuatro horas del estudio para el dominio 02:



**Figura 23.** Mapa horario de nubosidad

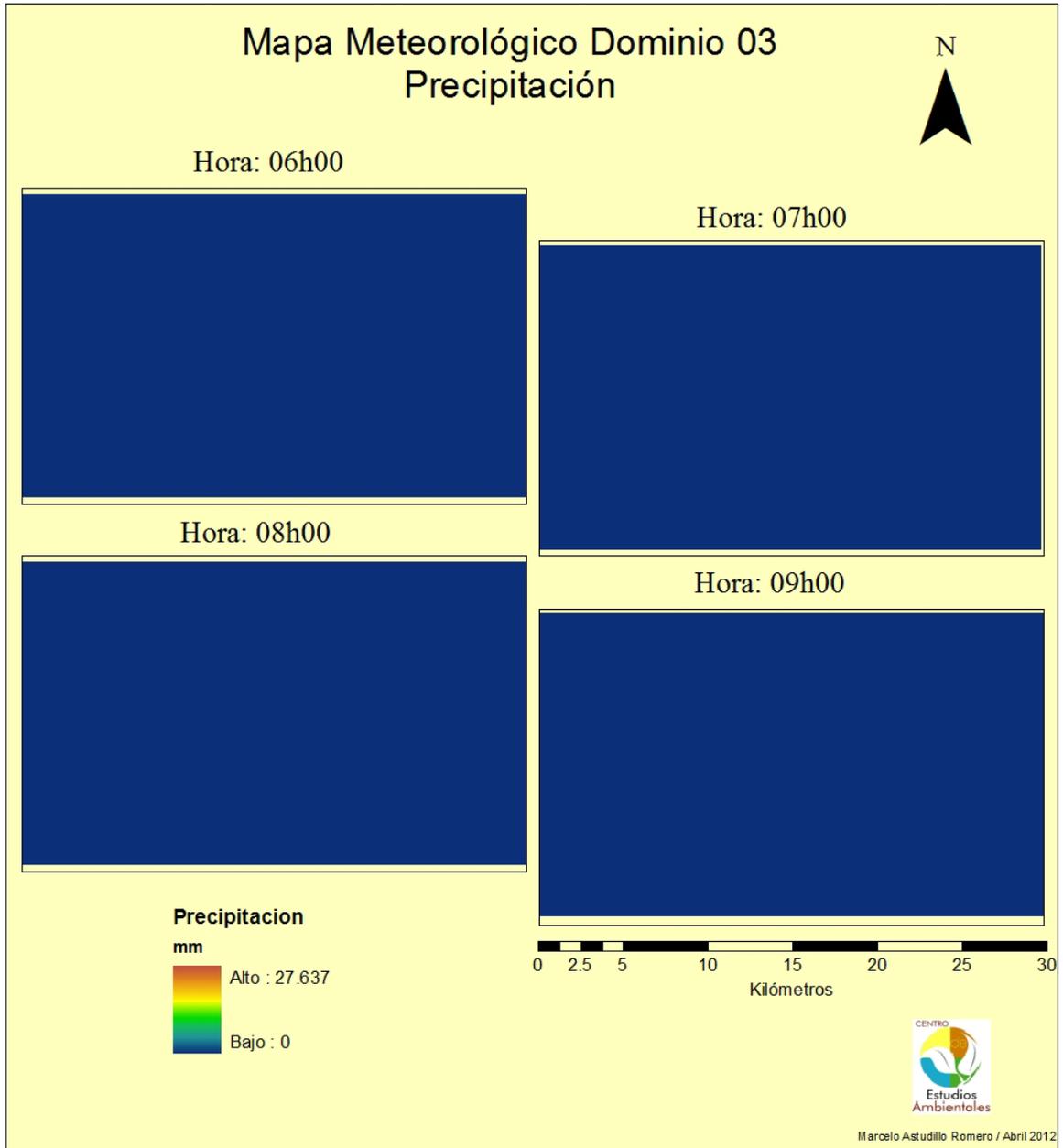
En la Figura 24 se muestra el mapa comparativo de vientos entre las cuatro horas del estudio para el dominio 02:



**Figura 24.** Mapa horario de vientos

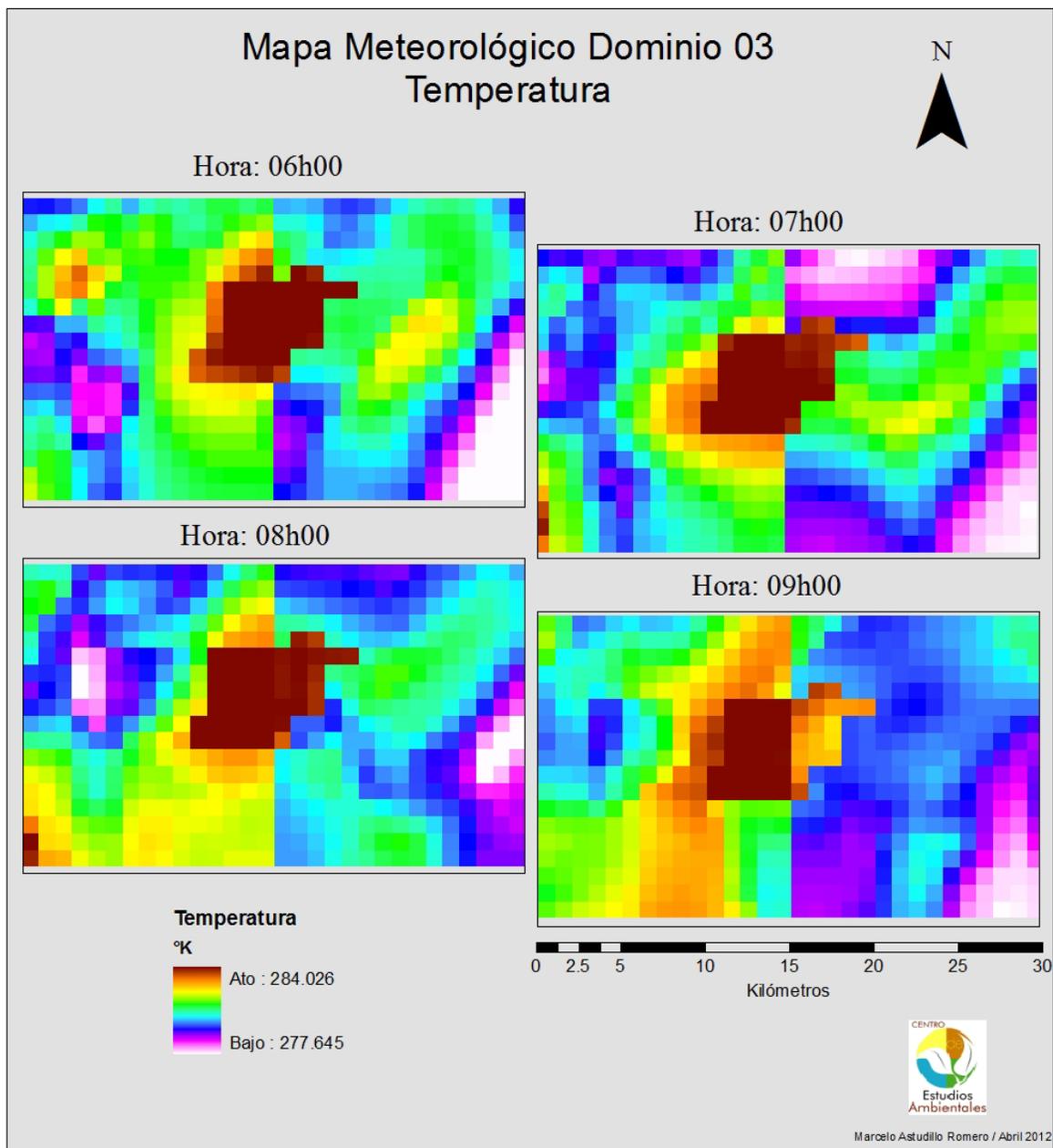
c. Dominio 03

En la Figura 25 se muestra el mapa comparativo de precipitación entre las cuatro horas del estudio para el dominio 03:



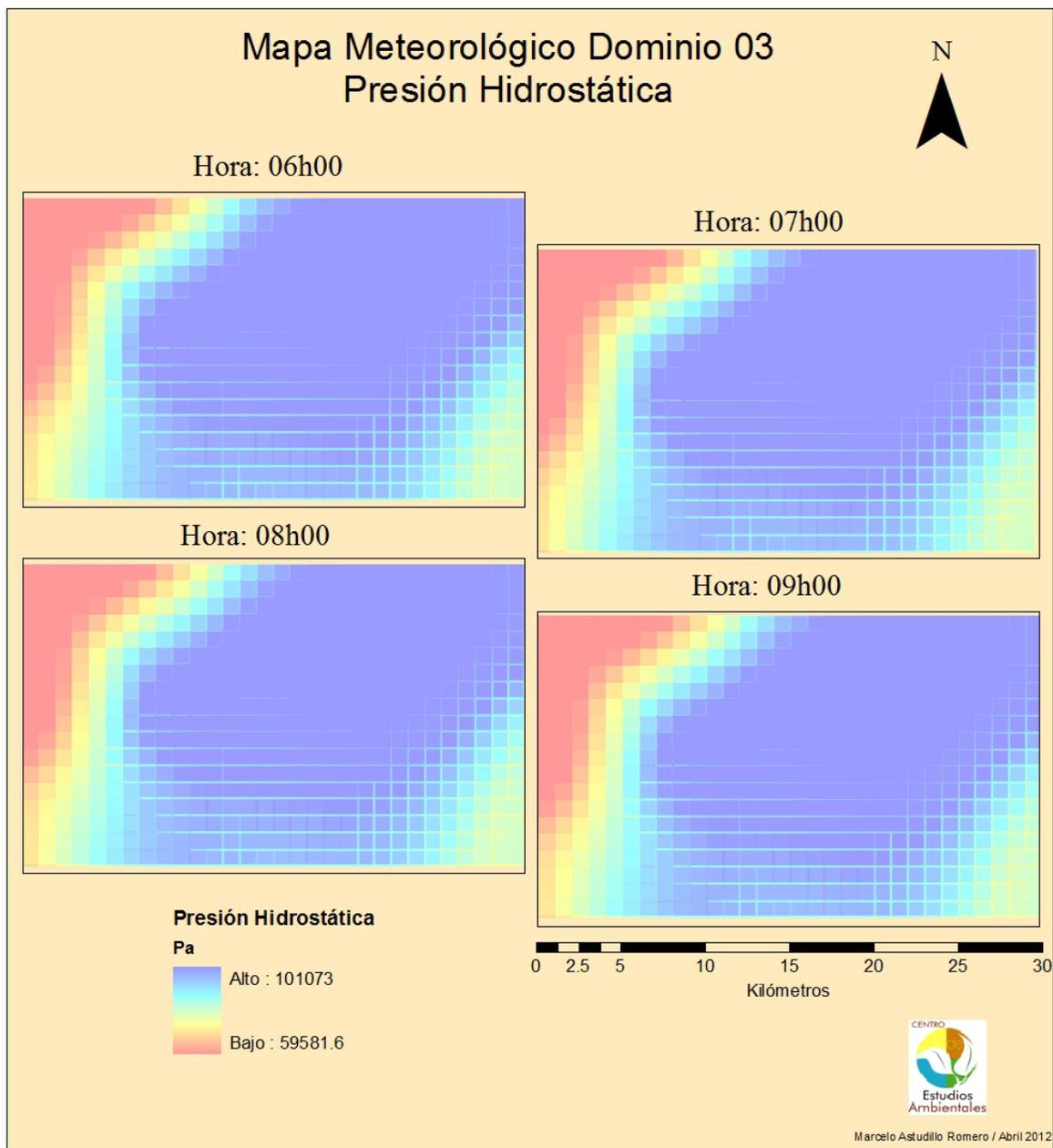
*Figura 25. Mapa horario de precipitación*

En la Figura 26 se muestra el mapa comparativo de temperatura entre las cuatro horas del estudio para el dominio 03:



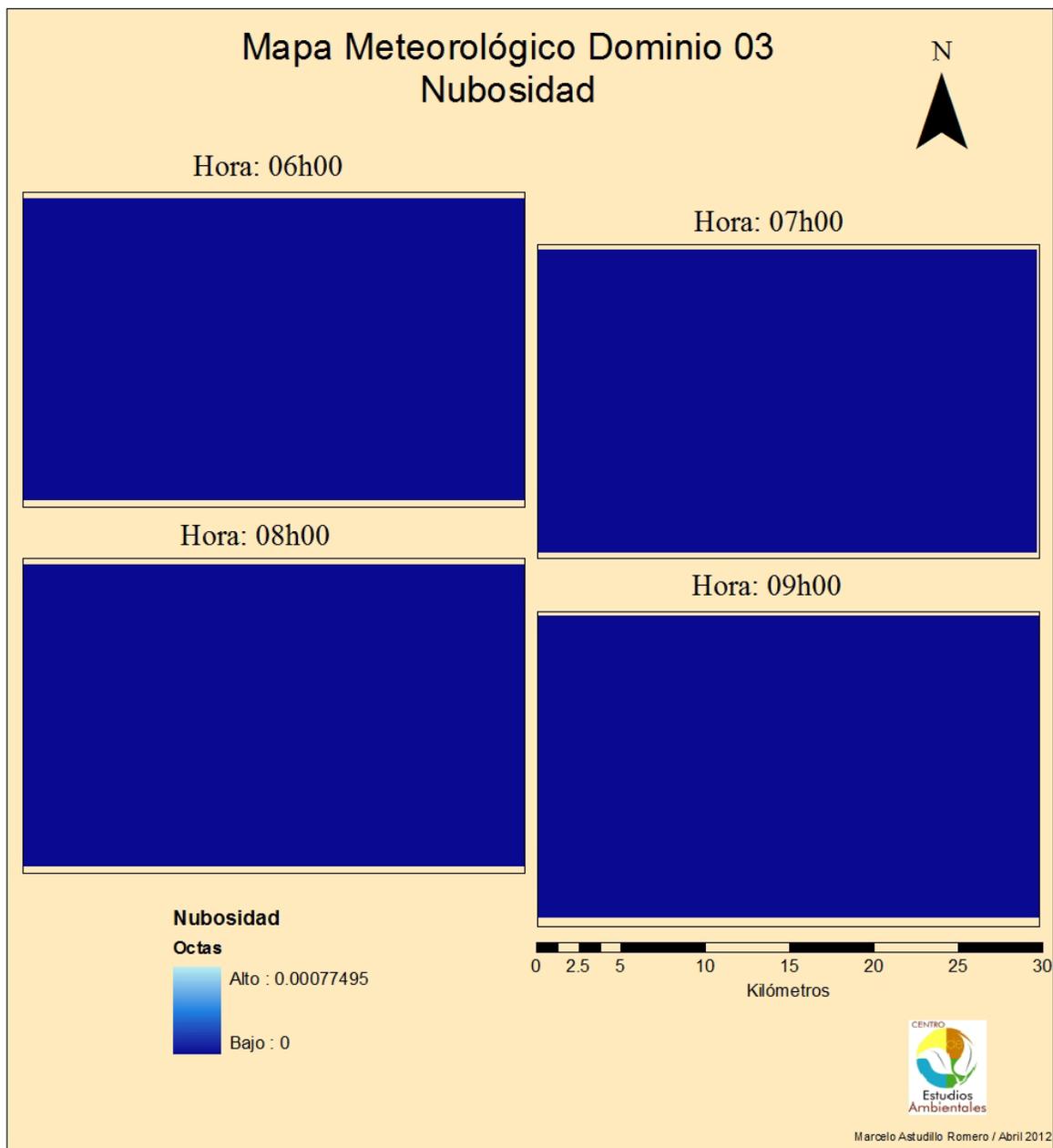
**Figura 26.** Mapa horario de temperatura

En la Figura 27 se muestra el mapa comparativo de presión hidrostática entre las cuatro horas del estudio para el dominio 03:



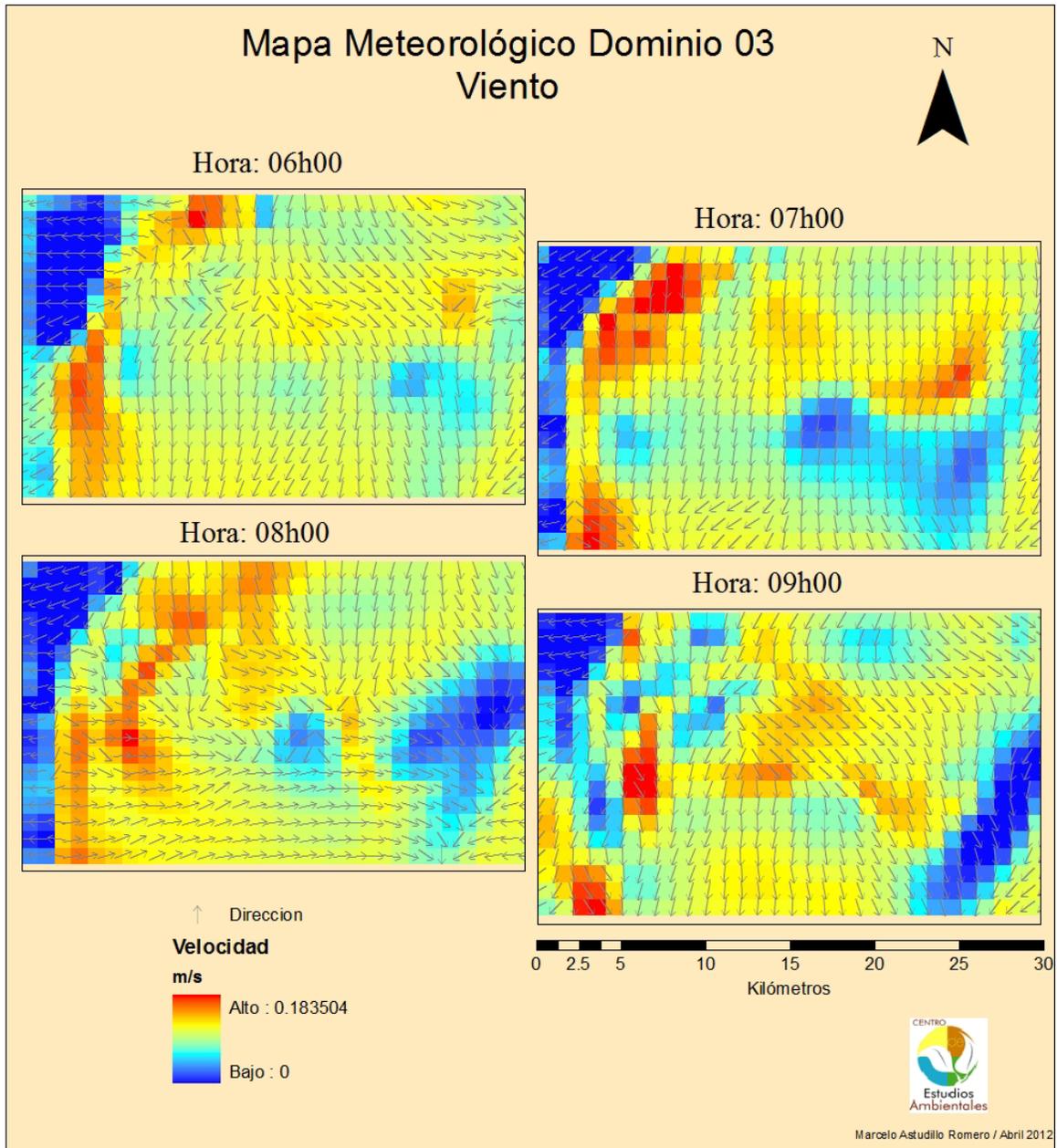
**Figura 27.** Mapa horario de presión hidrostática

En la Figura 28 se muestra el mapa comparativo de nubosidad entre las cuatro horas del estudio para el dominio 03:



**Figura 28.** Mapa horario de nubosidad

En la Figura 29 se muestra el mapa comparativo de vientos entre las cuatro horas del estudio para el dominio 03:



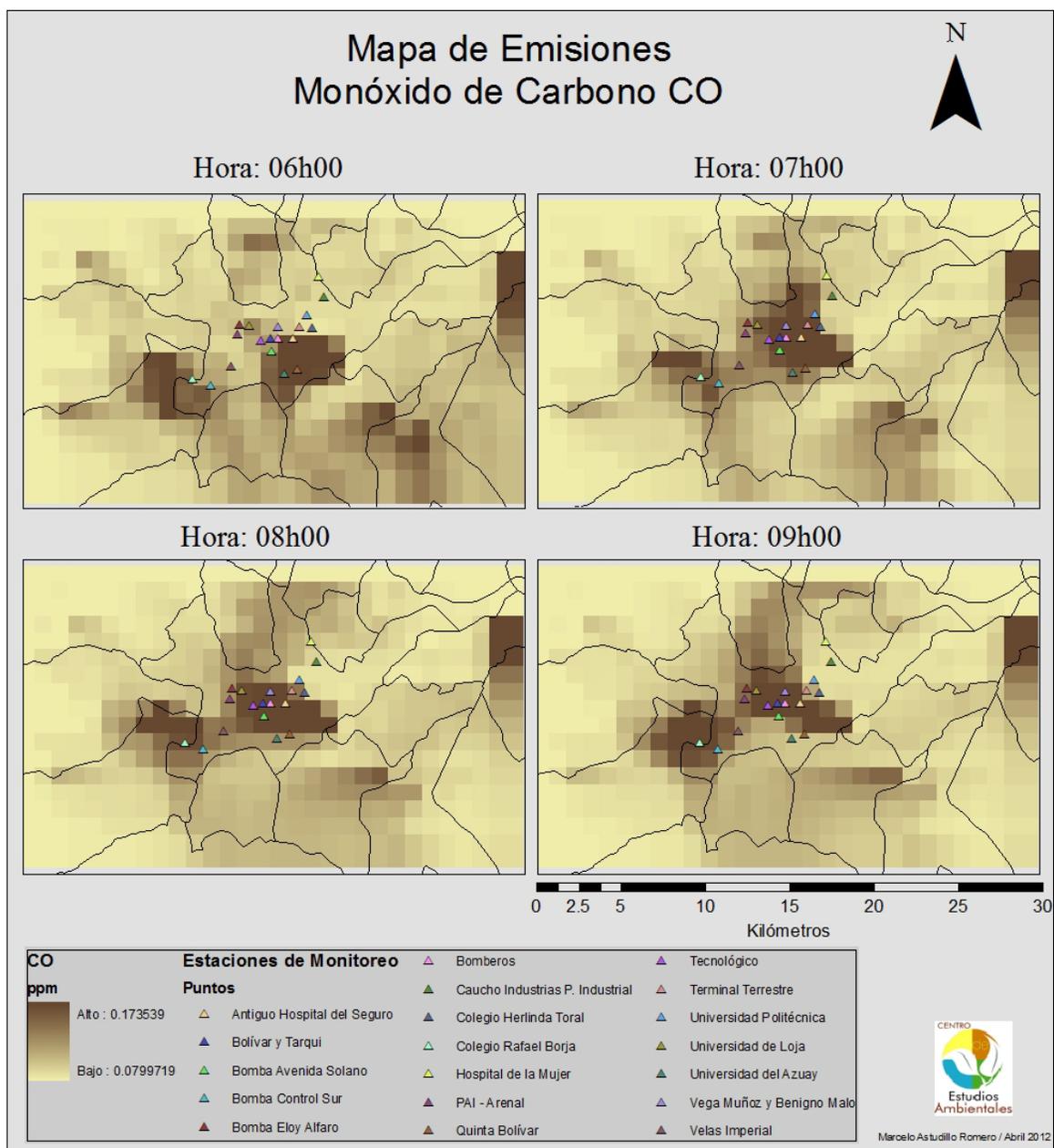
**Figura 29.** Mapa horario de vientos

En el período de tiempo seleccionado para la modelación (6:00h-9:00h) no se registró precipitaciones (Figura 25), como tampoco se tiene nubosidad (Figura 28). Las temperaturas registradas están entre 277°K y 284 °K. Se puede observar un evidente cambio de temperatura entre las 6:00h y las 9:00h (Figura 26), sin embargo en el mapa meteorológico del viento se ve que no hay cambios significativos para este parámetro entre una hora y otra.

## Mapas de dispersión de contaminantes

### a. Monóxido de Carbono (CO)

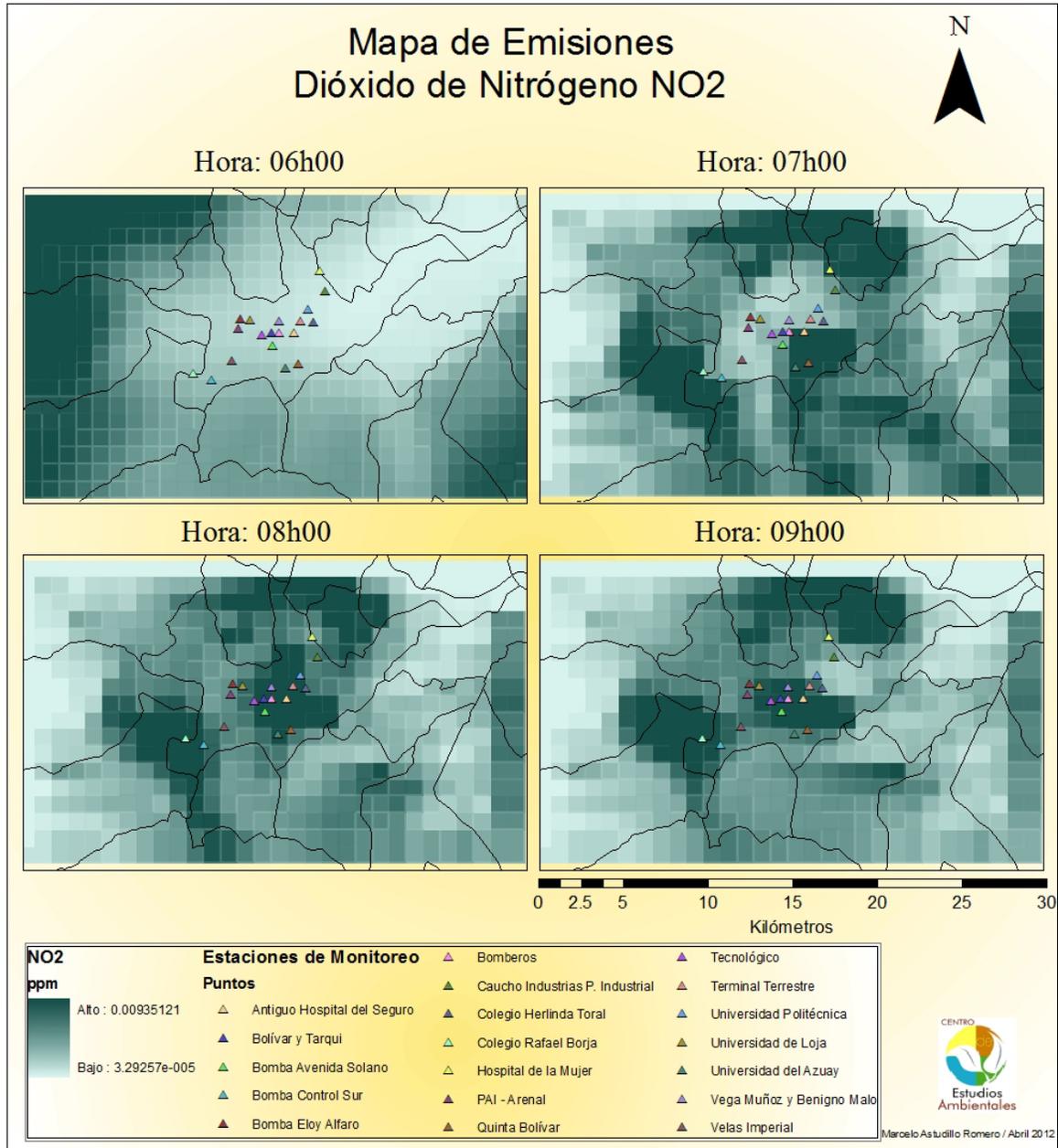
En la Figura 30 se muestra el mapa comparativo horario de dispersión del contaminante monóxido de carbono, junto con las estaciones de monitoreo:



**Figura 30.** Mapa horario de Monóxido de Carbono

b. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

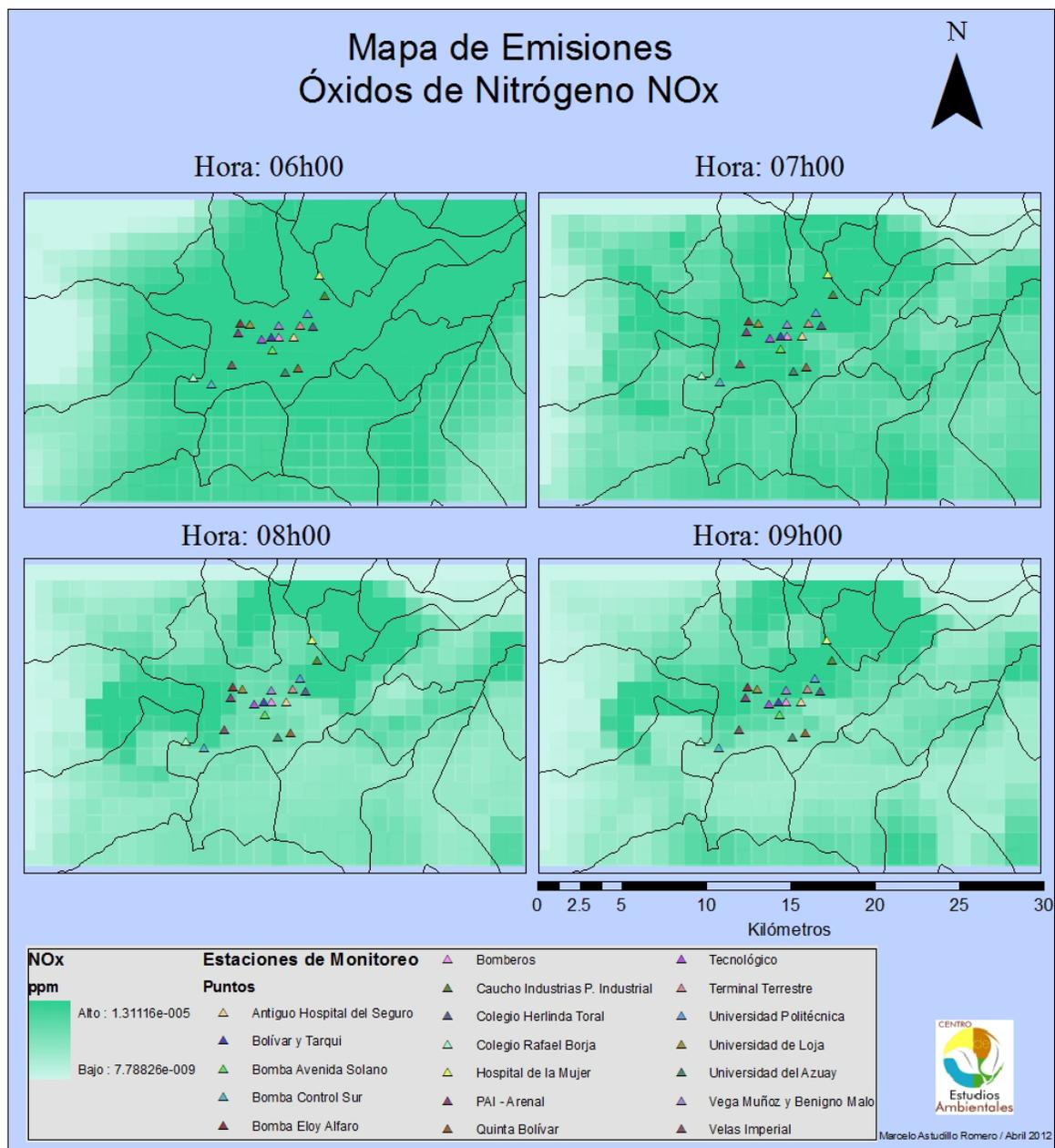
En la Figura 31 se muestra el mapa comparativo horario de dispersión del contaminante dióxido de nitrógeno, junto con las estaciones de monitoreo:



**Figura 31.** Mapa horario de Dióxido de Nitrógeno

c. Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

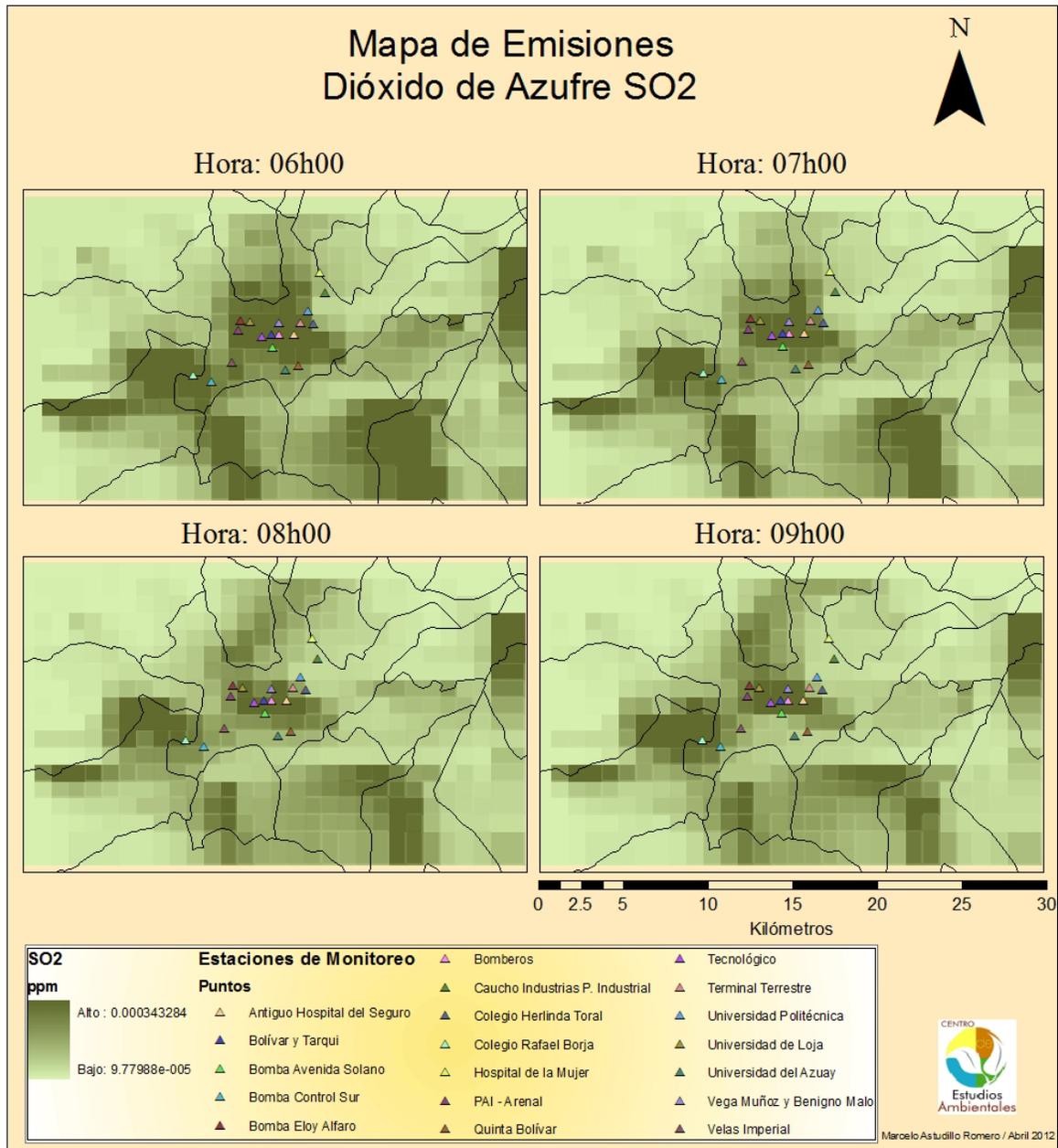
En la Figura 32 se muestra el mapa comparativo horario de dispersión del contaminante óxido de nitrógeno, junto con las estaciones de monitoreo:



**Figura 32.** Mapa horario de Óxido de Nitrógeno

d. Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

En la Figura 33 se muestra el mapa comparativo horario de dispersión del contaminante dióxido de azufre, junto con las estaciones de monitoreo:

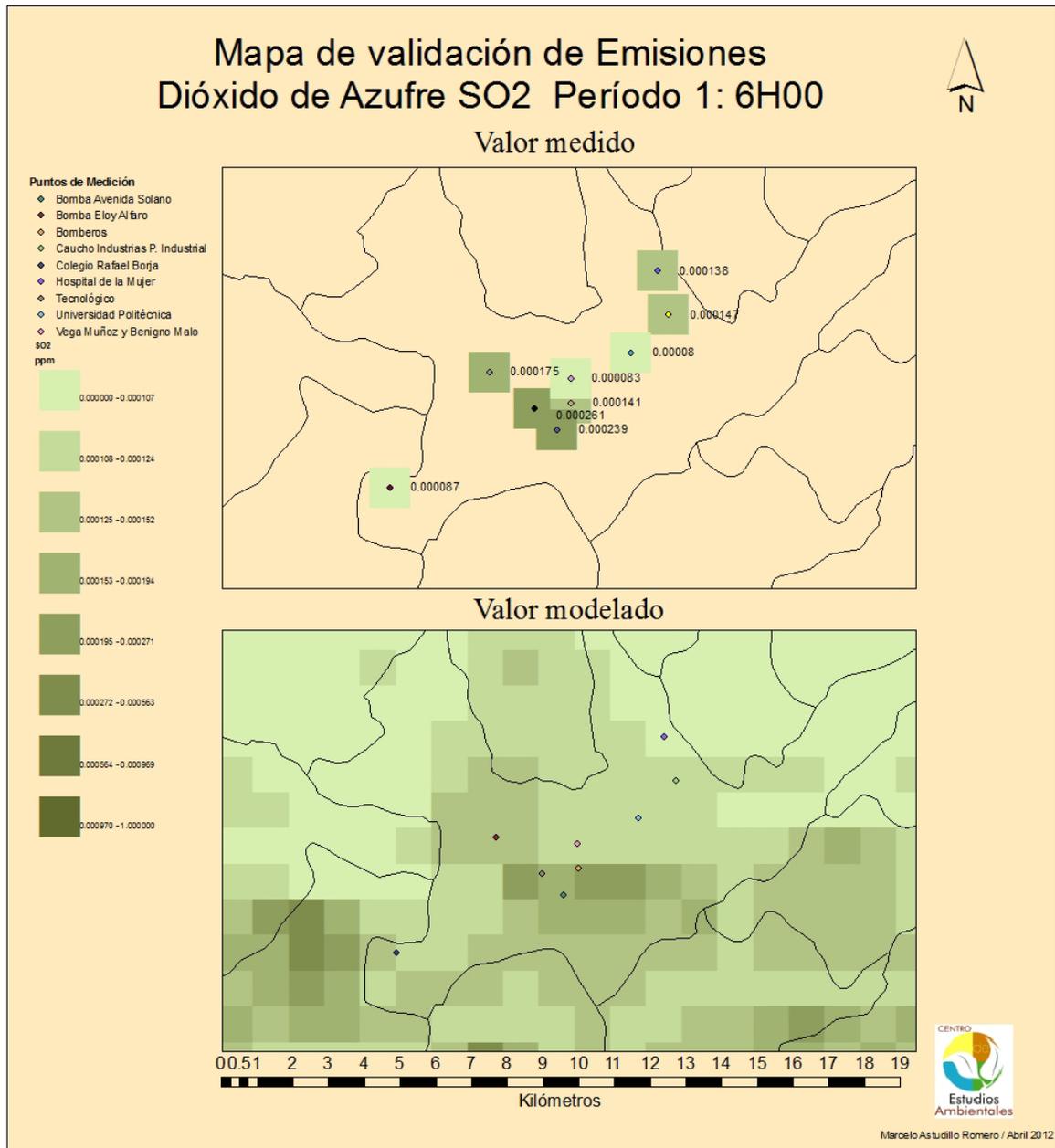


**Figura 33.** Mapa horario de Dióxido de Azufre

## Mapas de validación del modelo

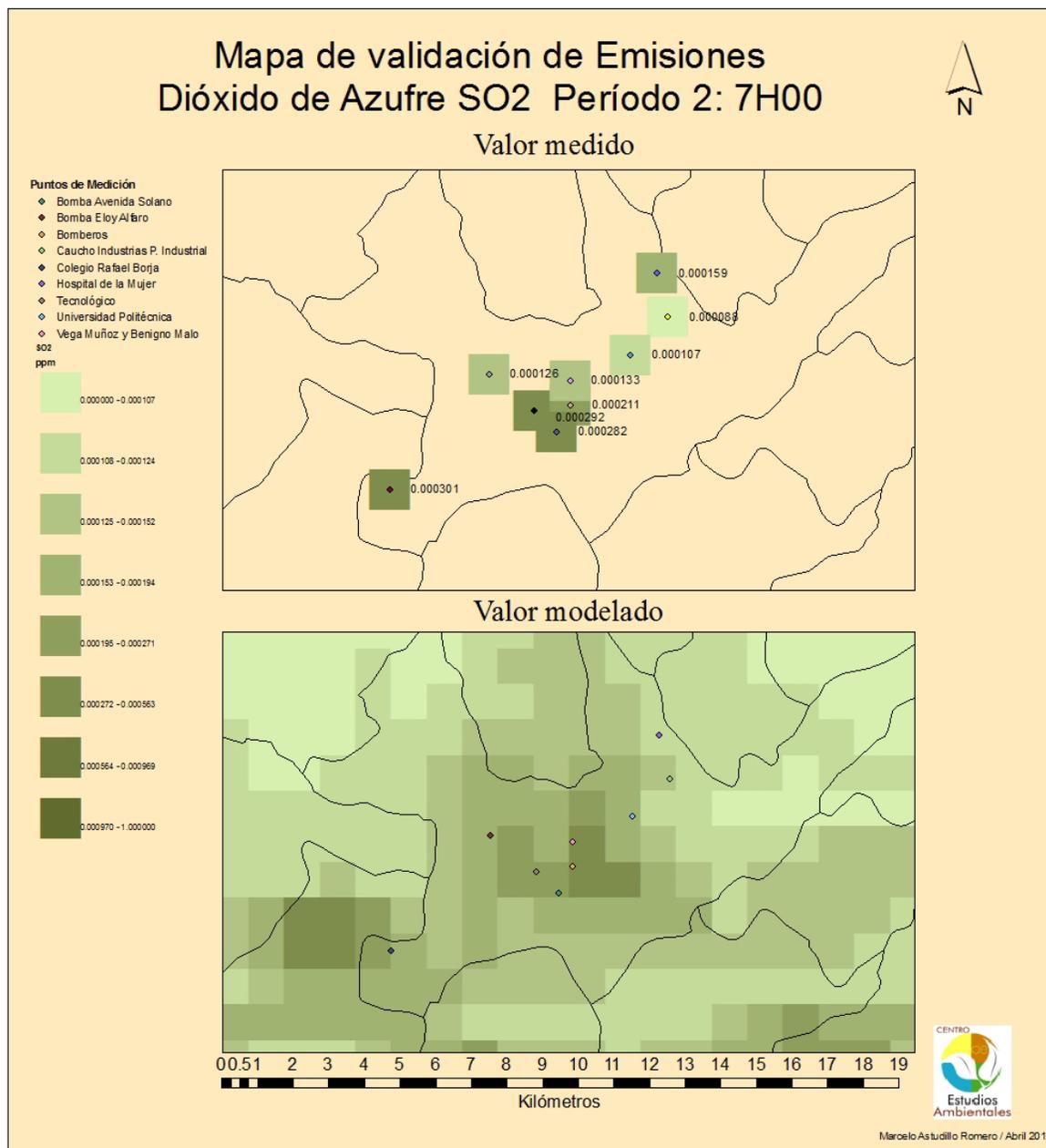
### a. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

En la Figura 34 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante SO<sub>2</sub>, para las 6H00:



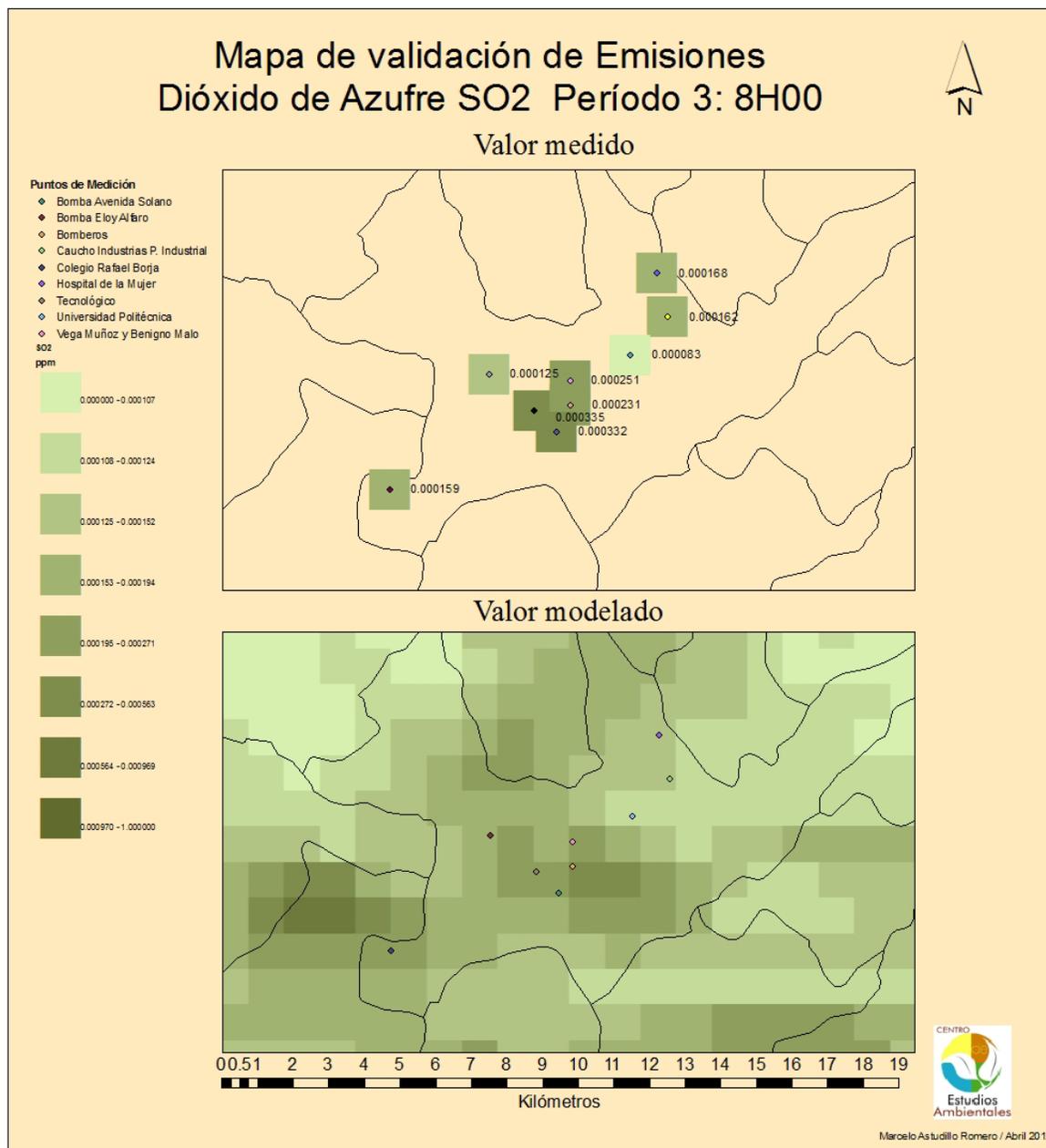
**Figura 34.** Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 1)

En la Figura 35 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante SO<sub>2</sub>, para las 7H00:



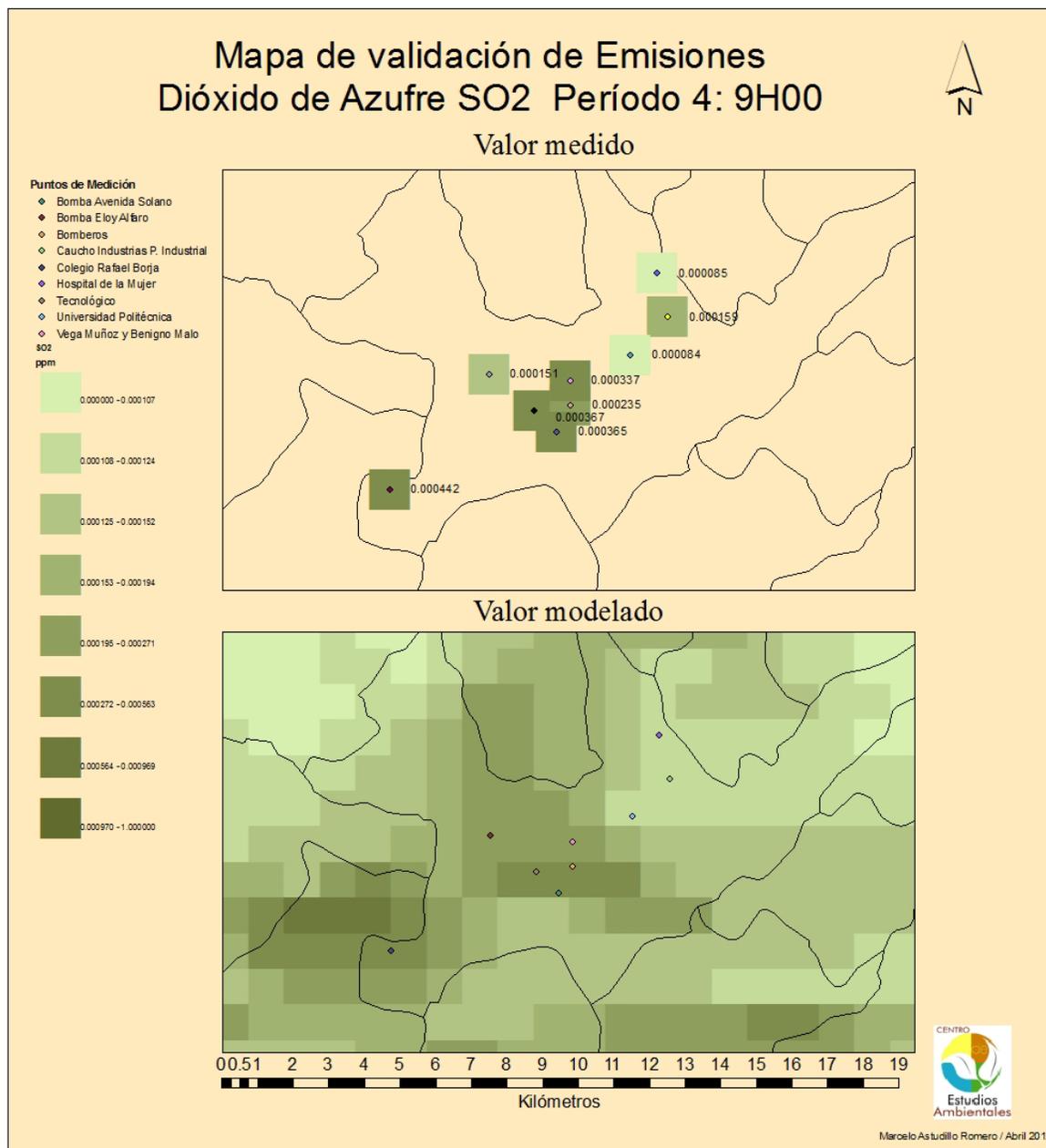
**Figura 35.** Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 2)

En la Figura 36 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante SO<sub>2</sub>, para las 8H00:



**Figura 36.** Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 3)

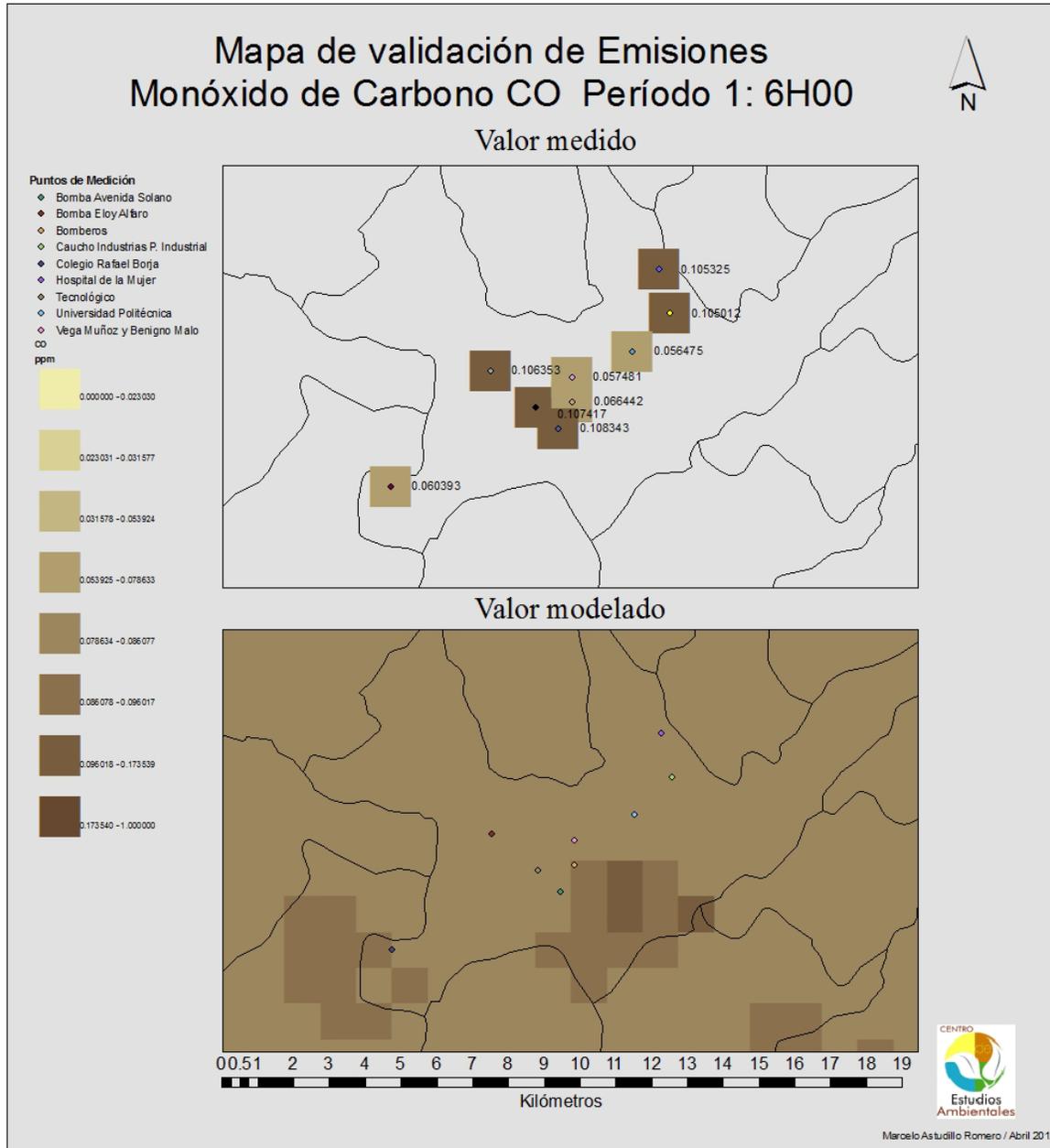
En la Figura 37 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante SO<sub>2</sub>, para las 9H00:



**Figura 37.** Mapa de validación de Dióxido de Azufre (Período 4)

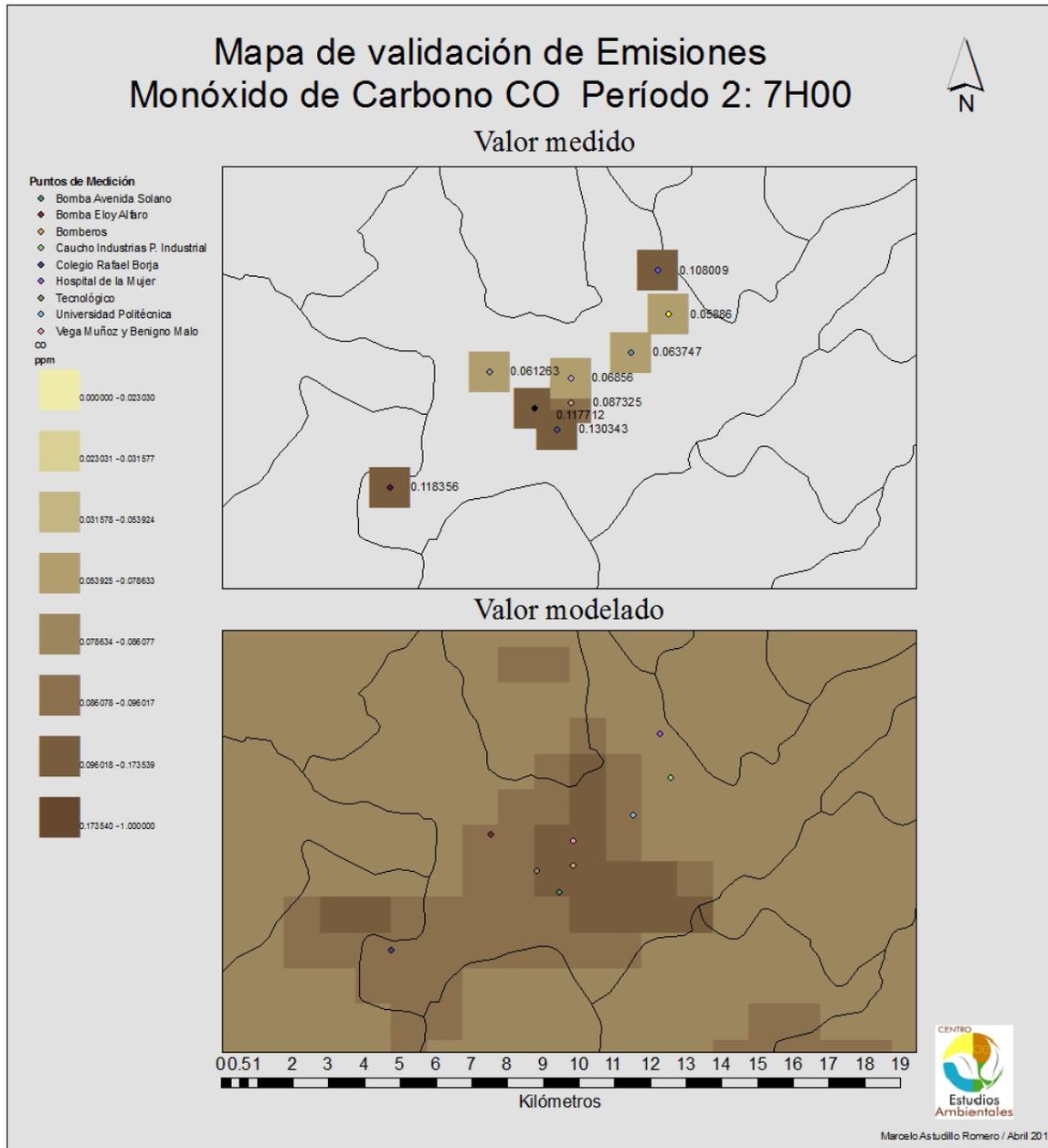
b. Monóxido de carbono (CO)

En la Figura 38 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante CO, para las 6H00:



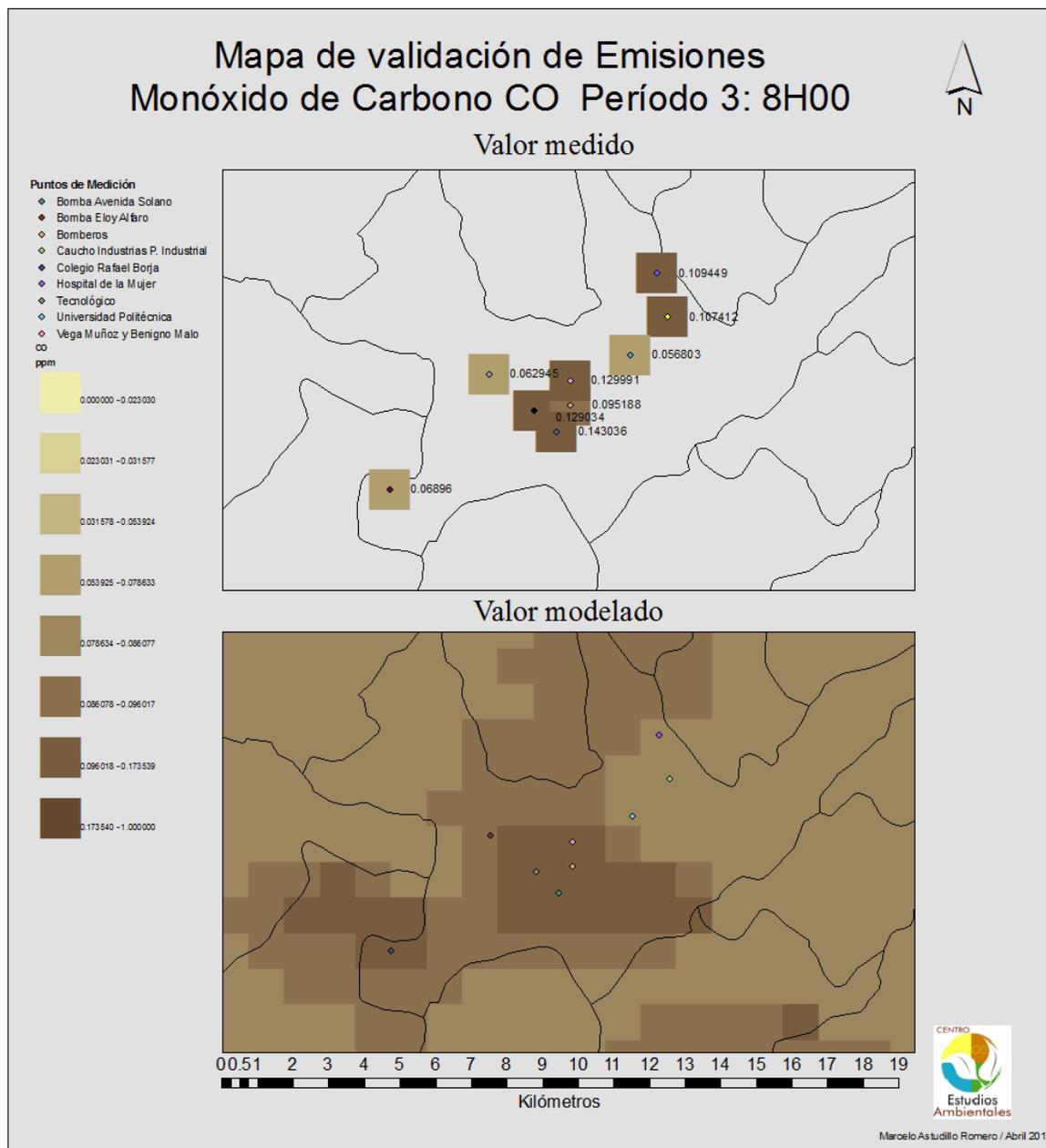
**Figura 38.** Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 1)

En la Figura 39 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante CO, para las 7H00:



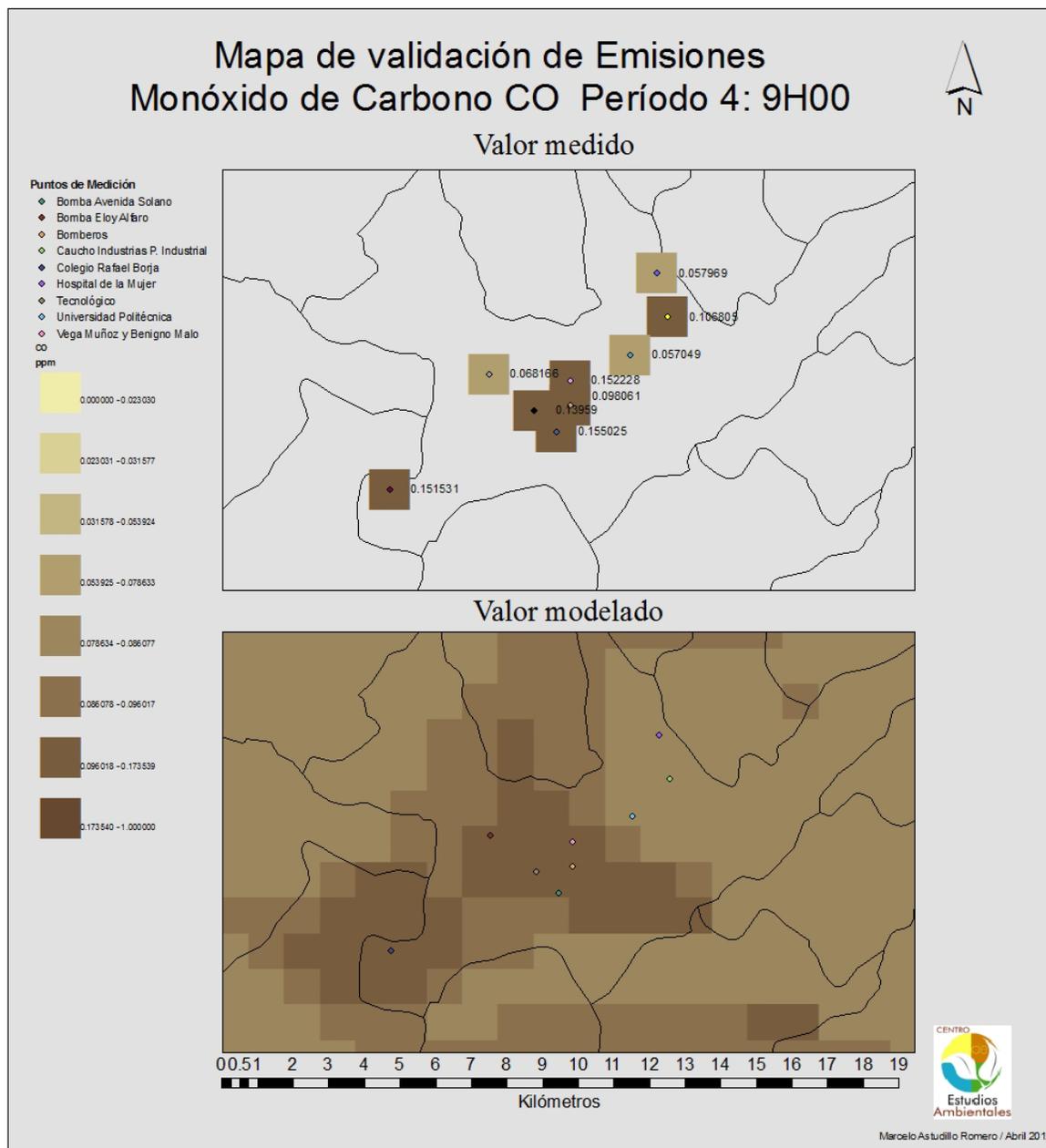
**Figura 39.** Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 2)

En la Figura 40 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante CO, para las 8H00:



**Figura 40.** Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 3)

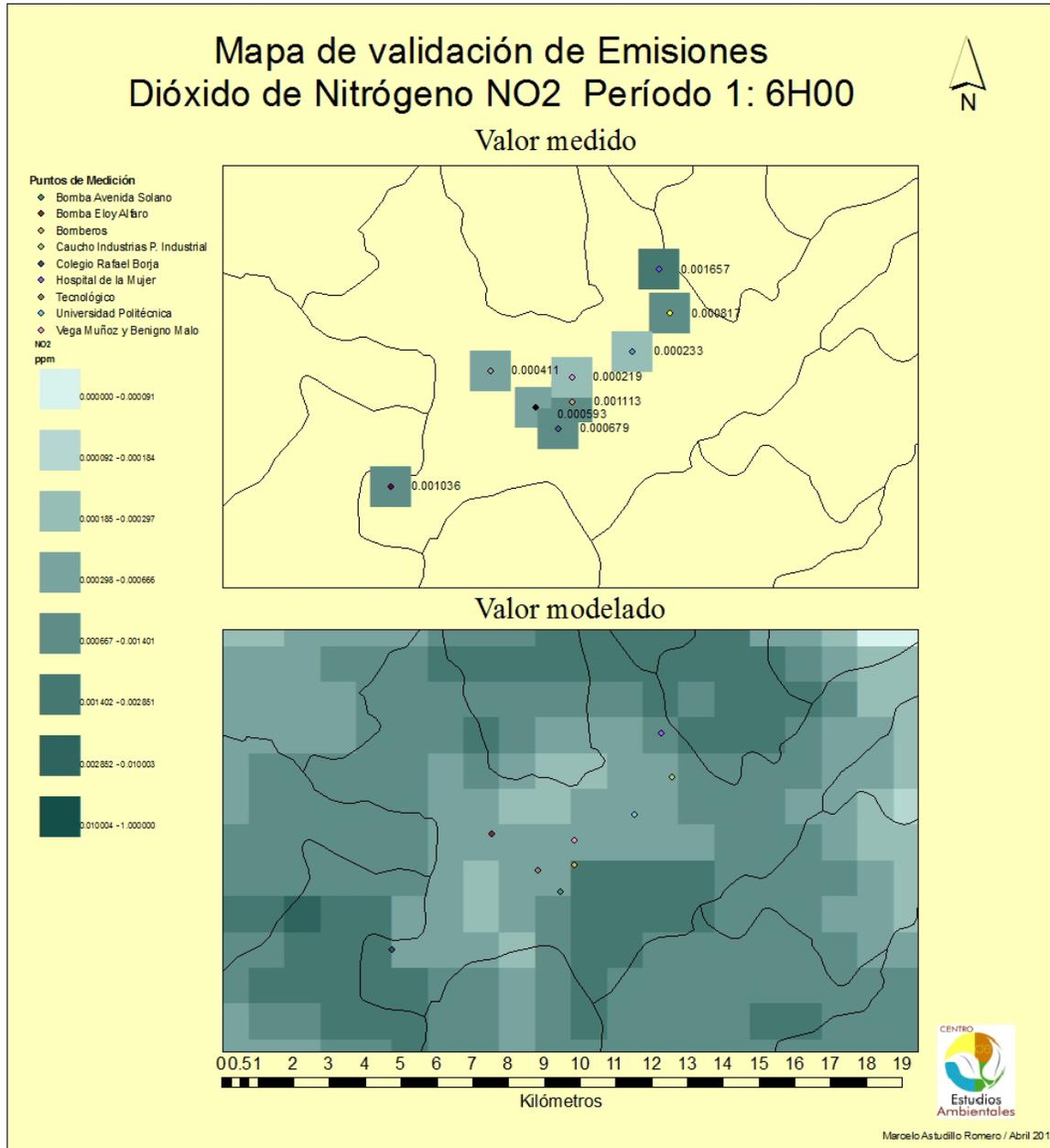
En la Figura 41 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante CO, para las 9H00:



**Figura 41.** Mapa de validación de Monóxido de Carbono (Período 4)

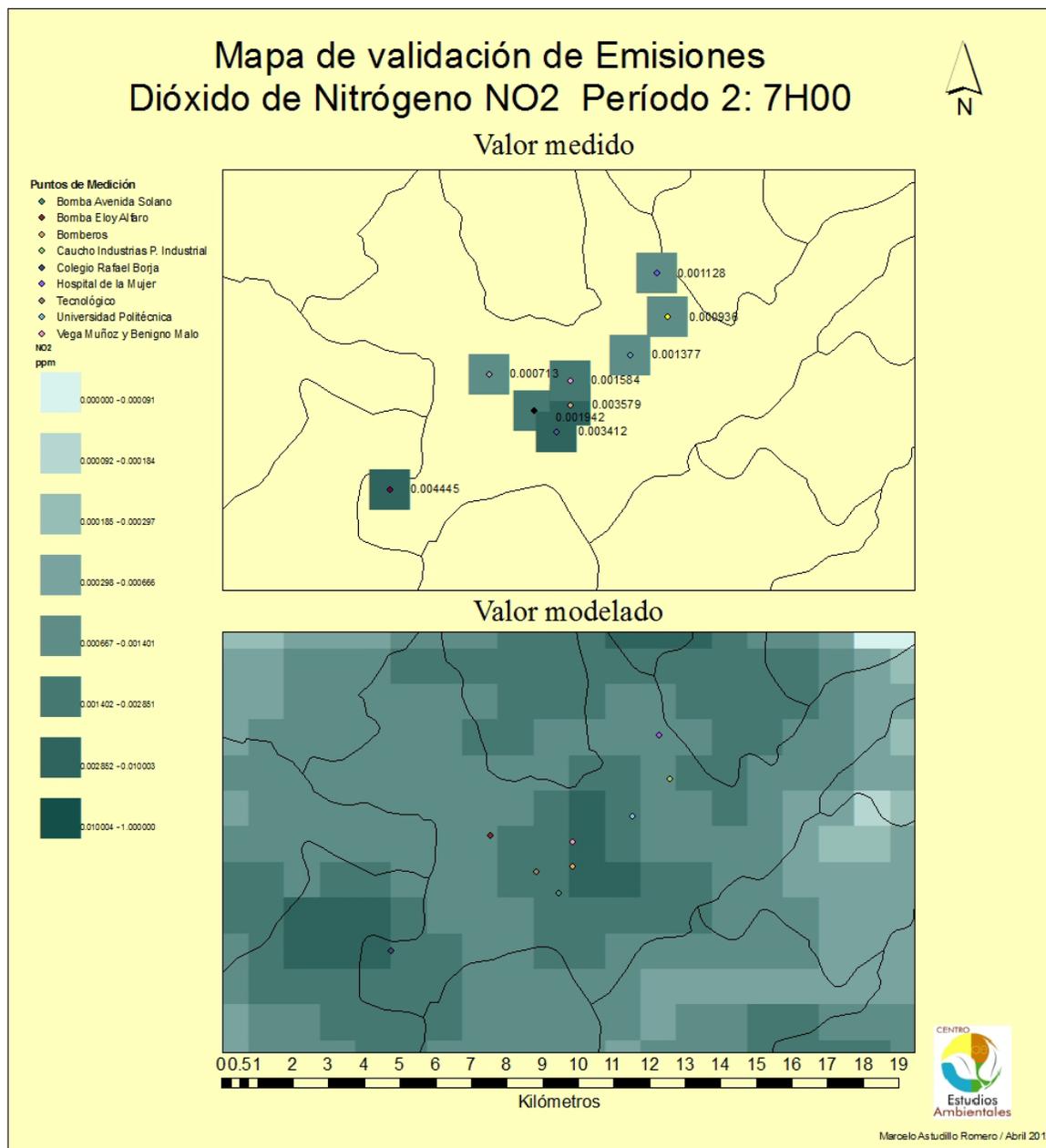
c. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

En la Figura 42 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>2</sub>, para las 6H00:



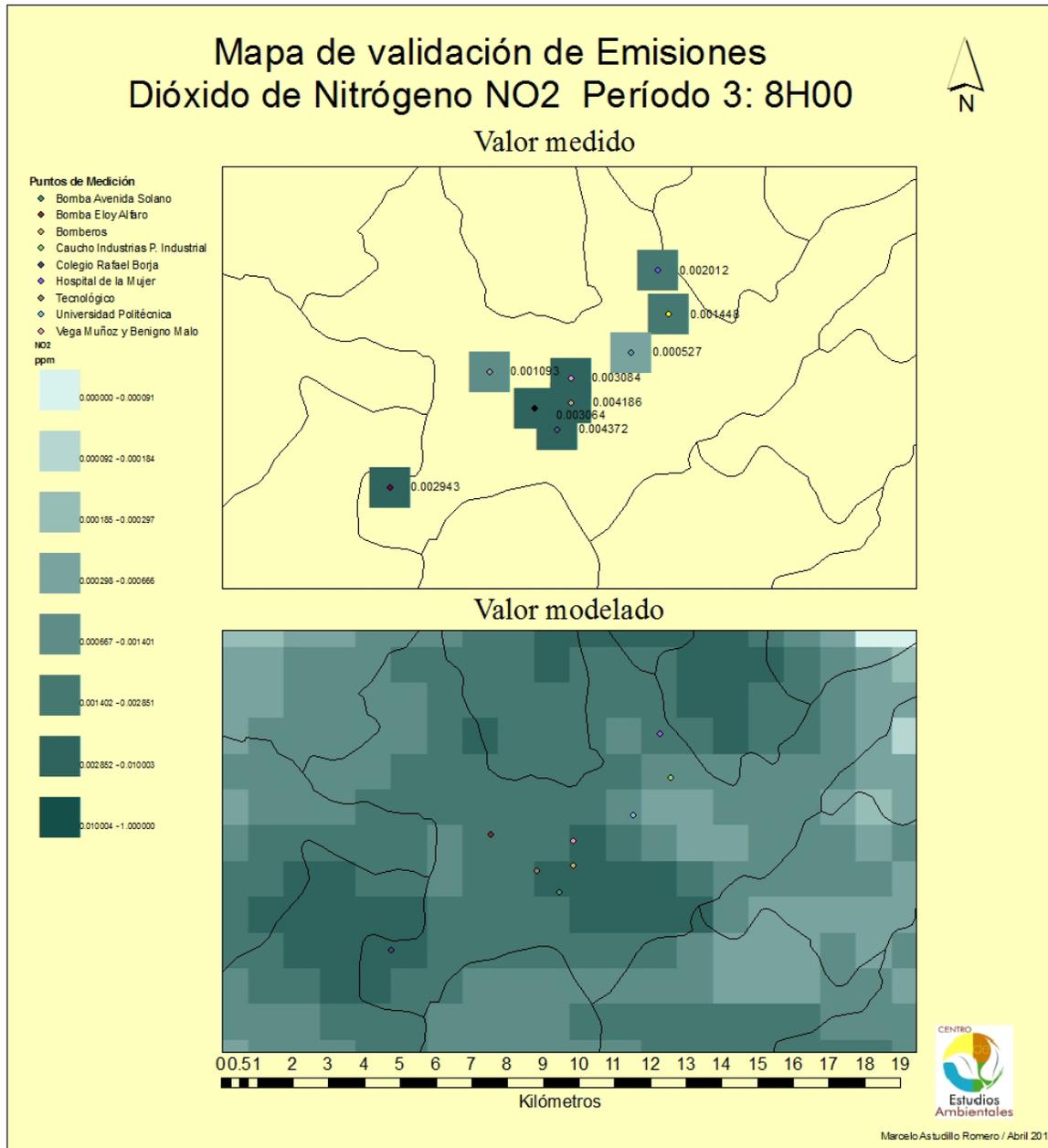
**Figura 42.** Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 1)

En la Figura 43 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>2</sub>, para las 7H00:



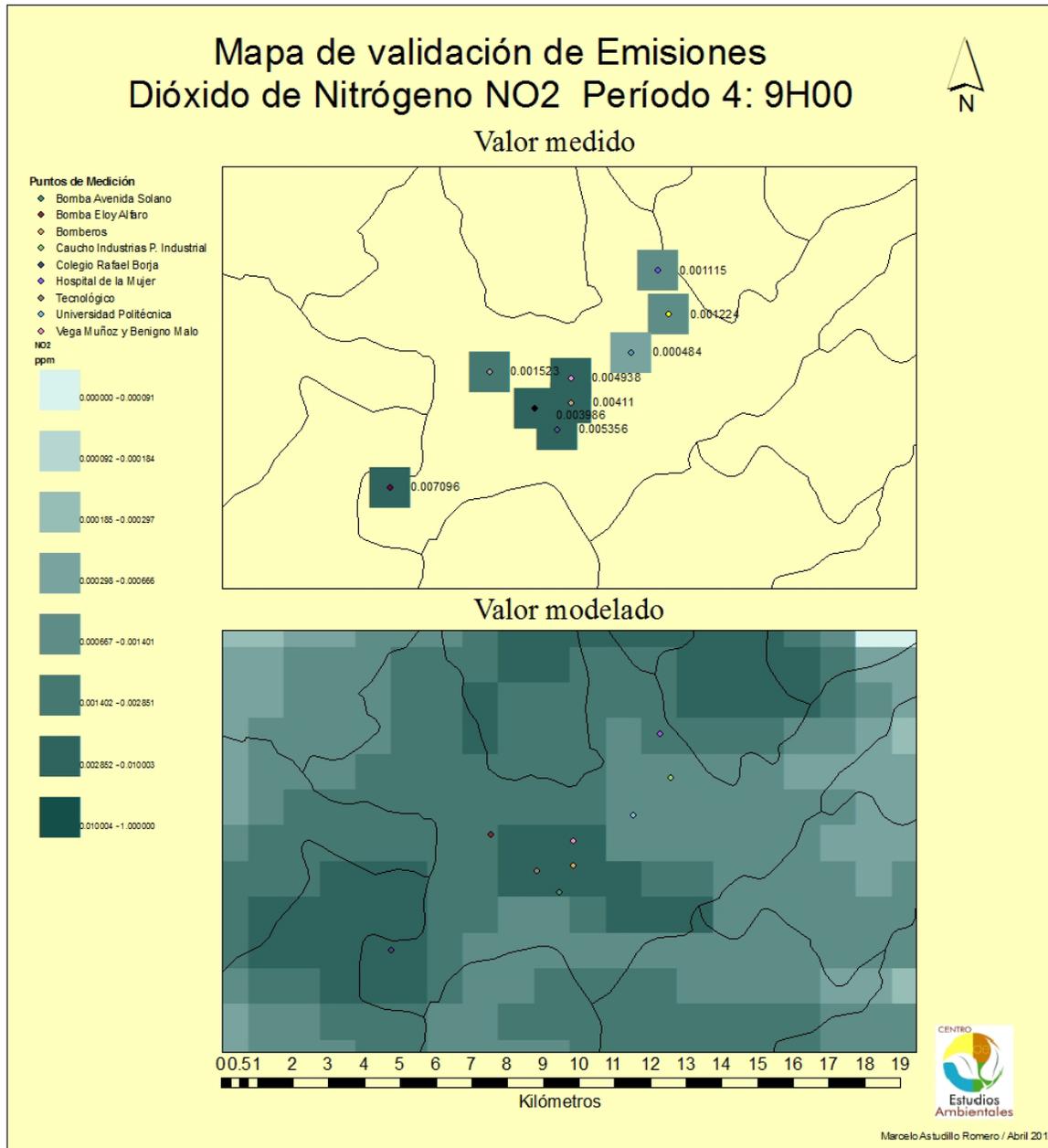
**Figura 43.** Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 2)

En la Figura 44 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>2</sub>, para las 8H00:



**Figura 44.** Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 3)

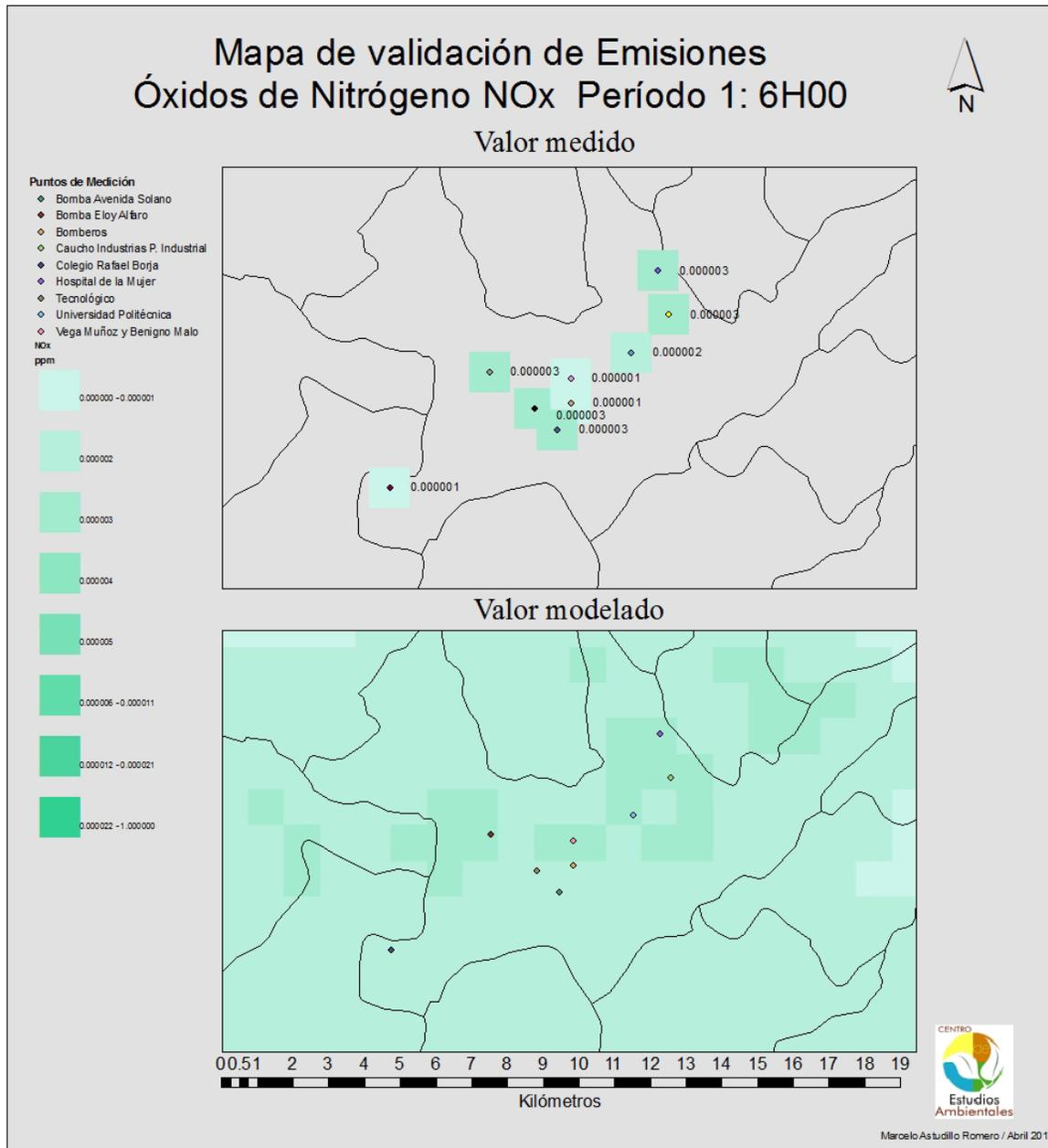
En la Figura 45 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>2</sub>, para las 9H00:



**Figura 45.** Mapa de validación de Dióxido de Nitrógeno (Período 4)

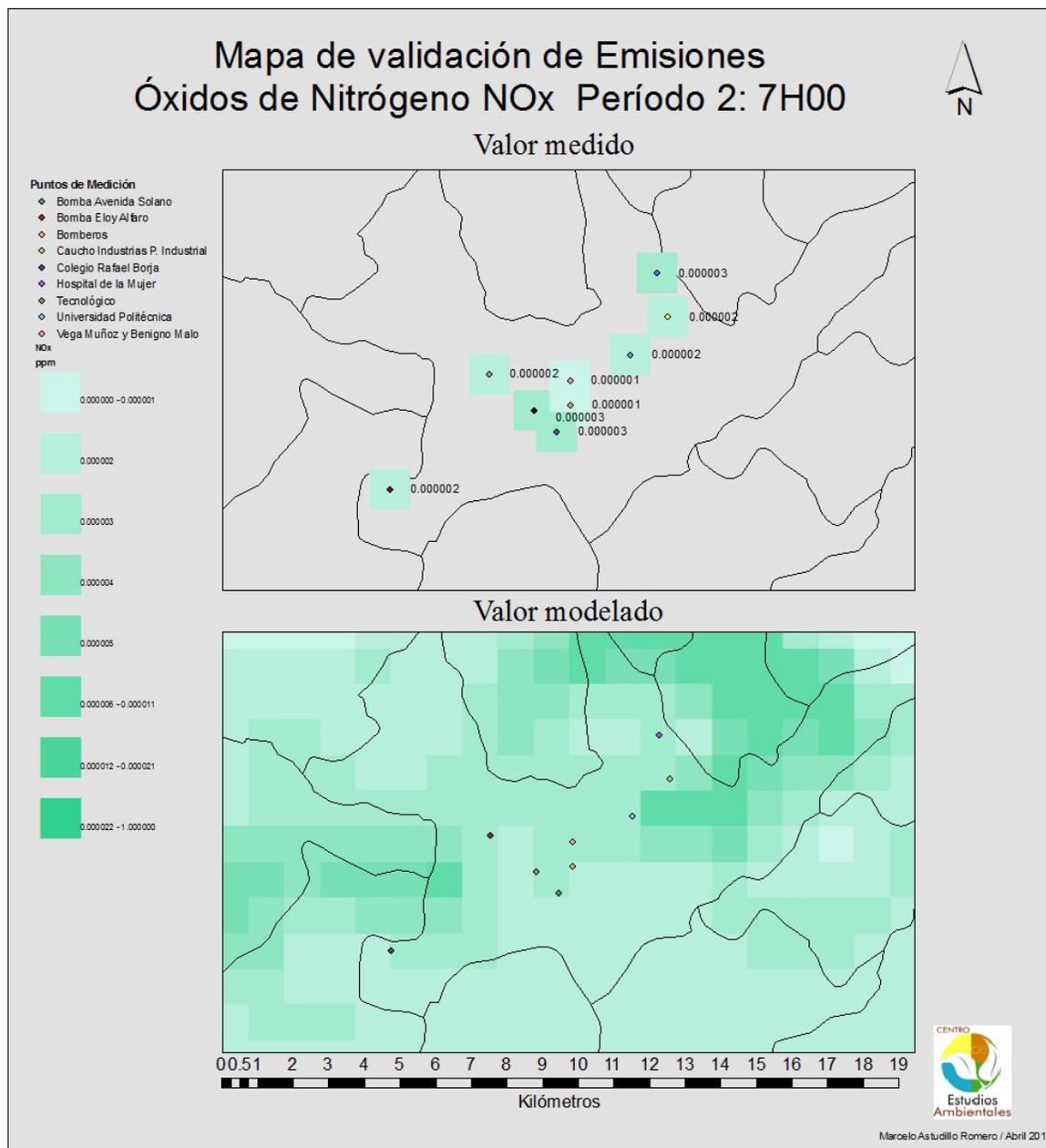
d. Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

En la Figura 46 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>x</sub>, para las 6H00:



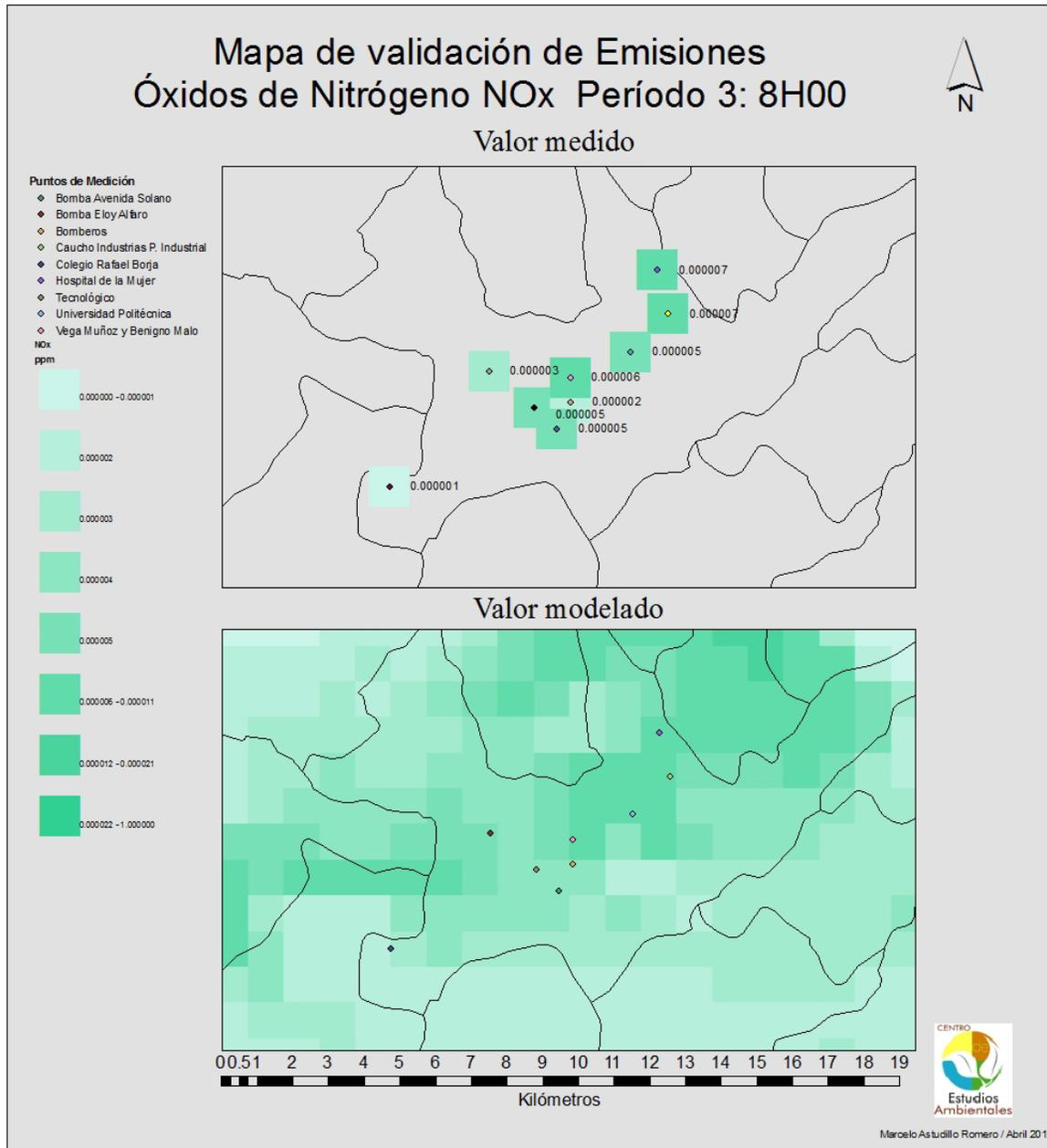
**Figura 46.** Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 1)

En la Figura 47 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>x</sub>, para las 7H00:



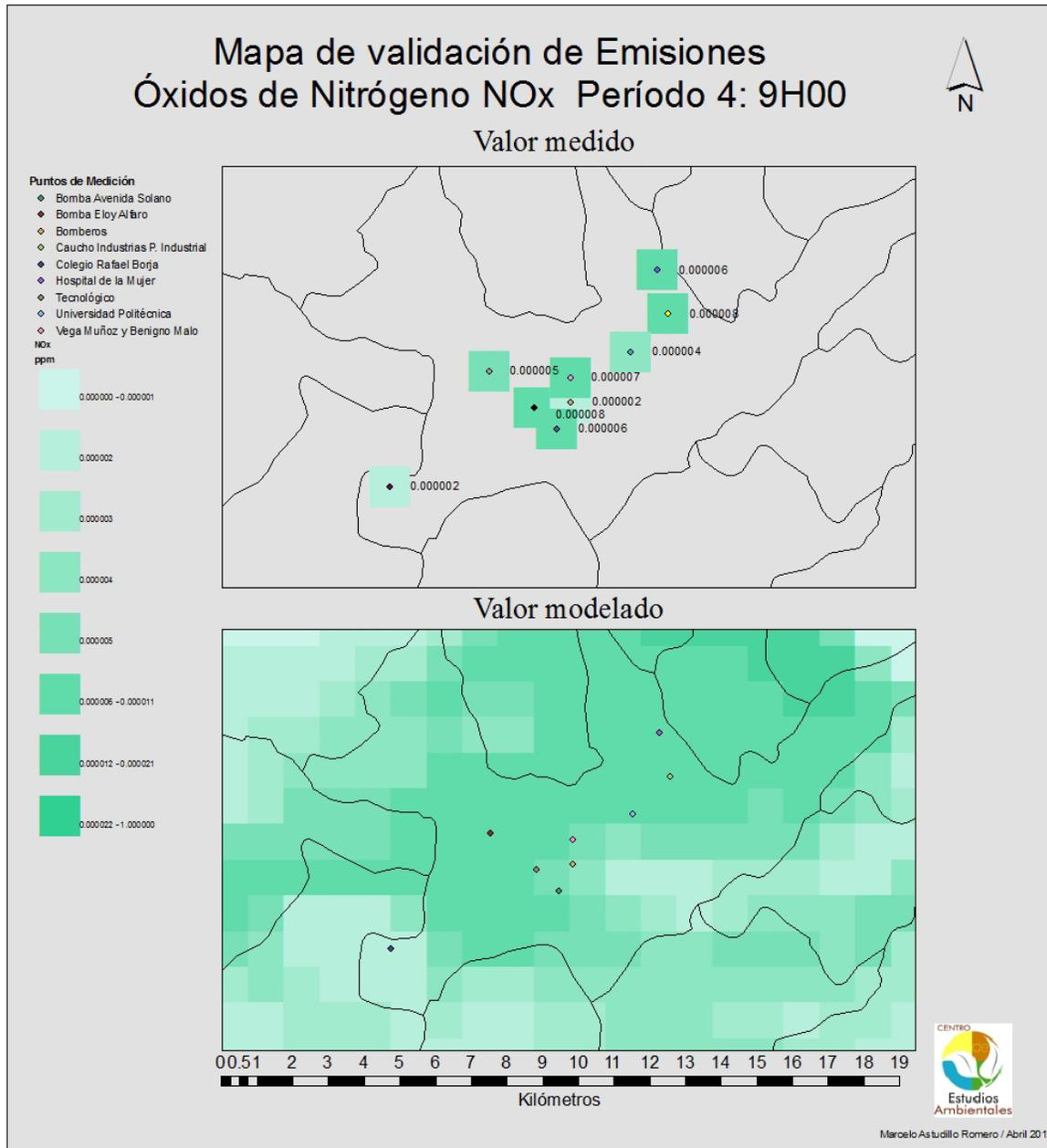
**Figura 47.** Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 2)

En la Figura 48 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>x</sub>, para las 8H00:



**Figura 48.** Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 3)

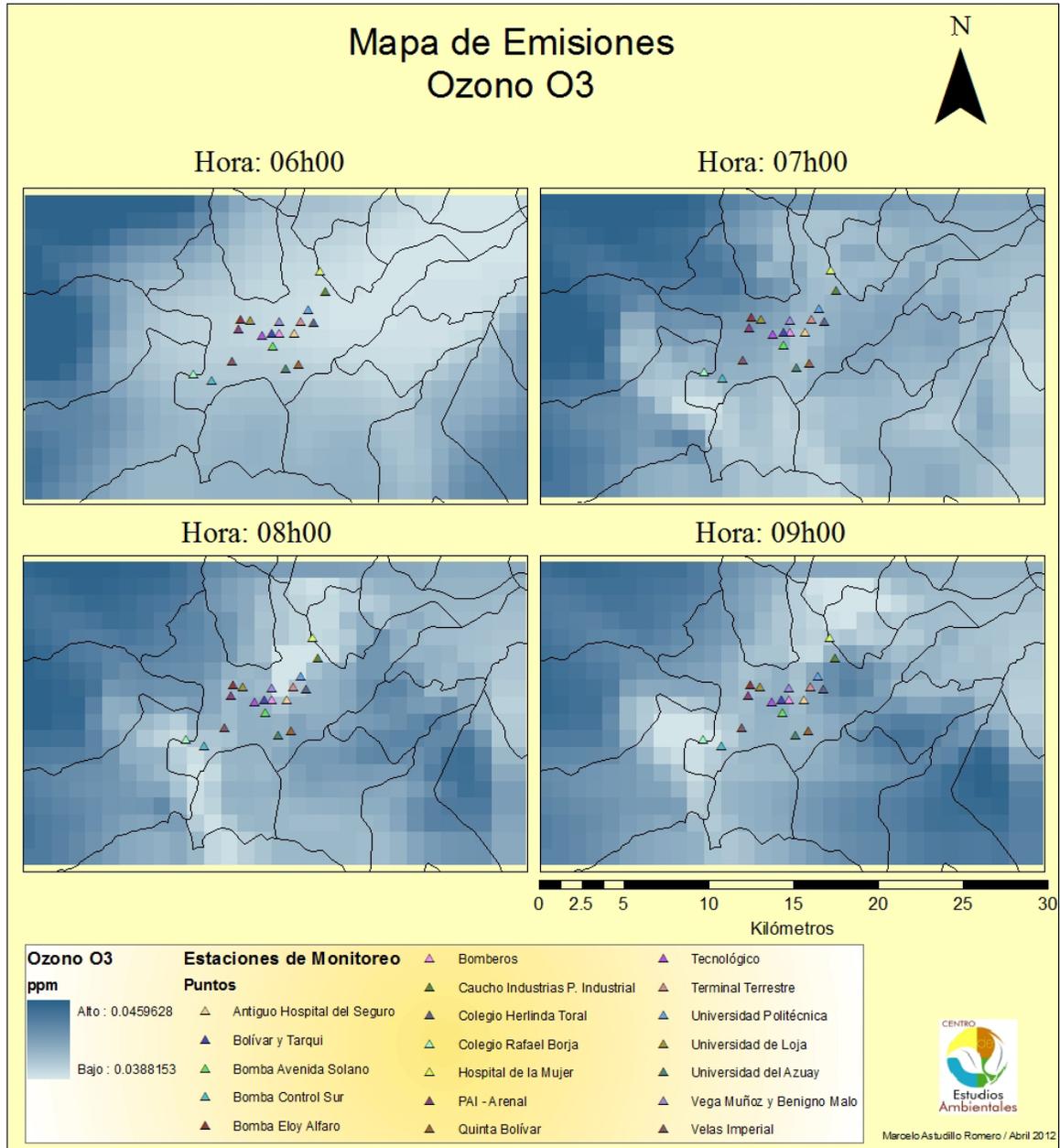
En la Figura 49 se muestra el mapa comparativo entre los valores medidos y los valores modelados del contaminante NO<sub>x</sub>, para las 9H00:



**Figura 49.** Mapa de validación de Óxidos de Nitrógeno (Período 4)

e. Ozono (O<sub>3</sub>)

En la Figura 50 se muestra el mapa comparativo horario de dispersión del contaminante Ozono, junto con los puntos de medición:



**Figura 50.** Mapa horario de Ozono

## Gráficos comparativos de datos modelados y medidos

### a. Dióxido de Azufre

En la Figura 51 se muestra el gráfico comparativo entre los datos modelados y medidos para el contaminante SO<sub>2</sub> en los 4 períodos de estudio:

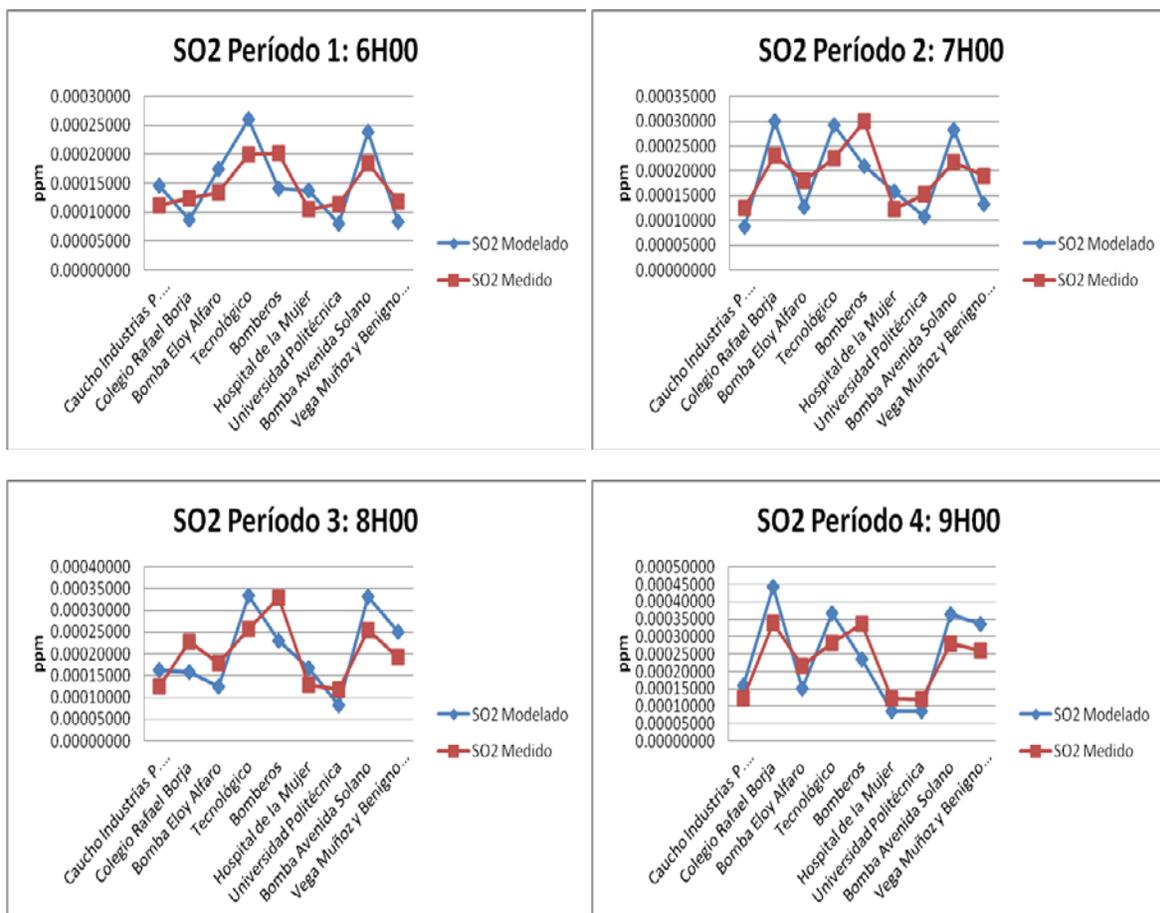


Figura 51. Cuadro comparativo para SO<sub>2</sub>

b. Monóxido de Carbono

En la Figura 52 se muestra el gráfico comparativo entre los datos modelados y medidos para el contaminante CO en los 4 períodos de estudio:

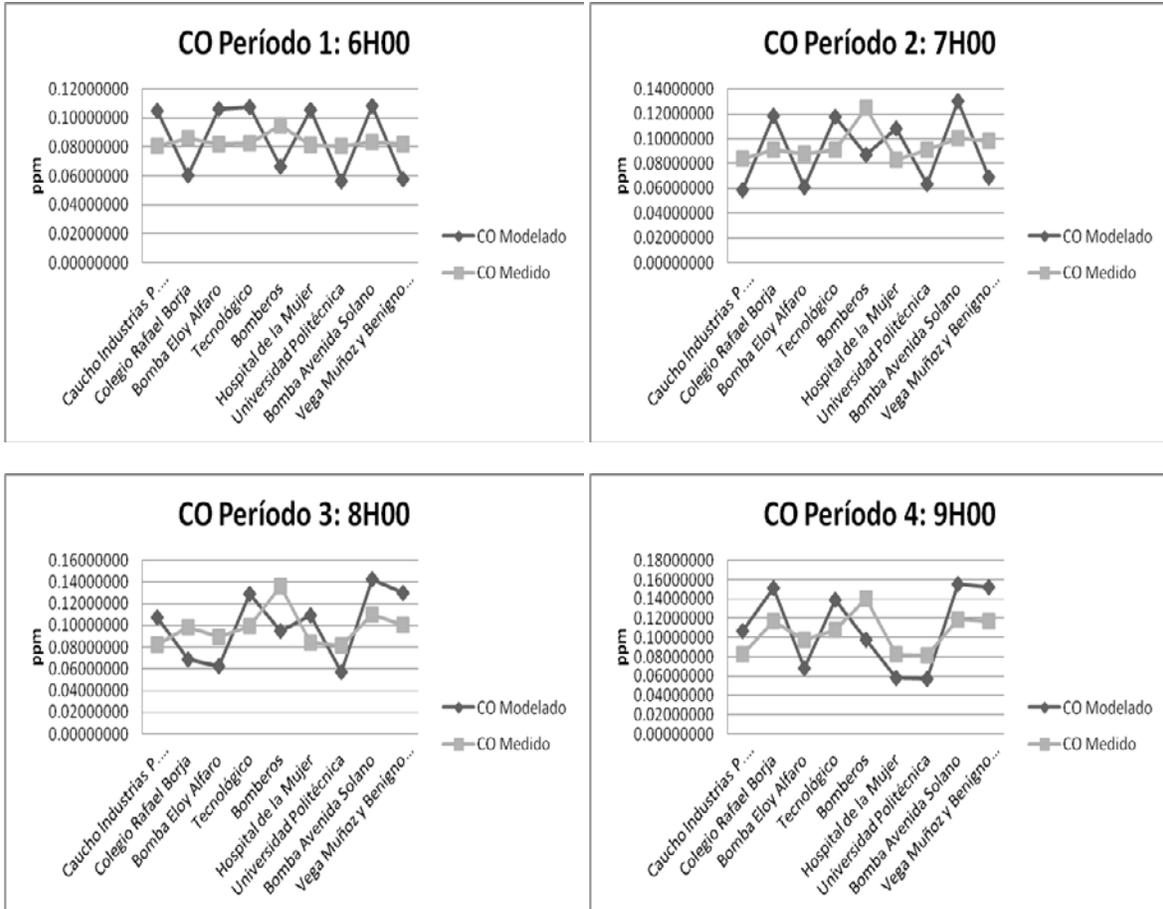


Figura 52. Cuadro comparativo para CO

c. Dióxido de Nitrógeno

En la Figura 53 se muestra el gráfico comparativo entre los datos modelados y medidos para el contaminante NO<sub>2</sub> en los 4 períodos de estudio:

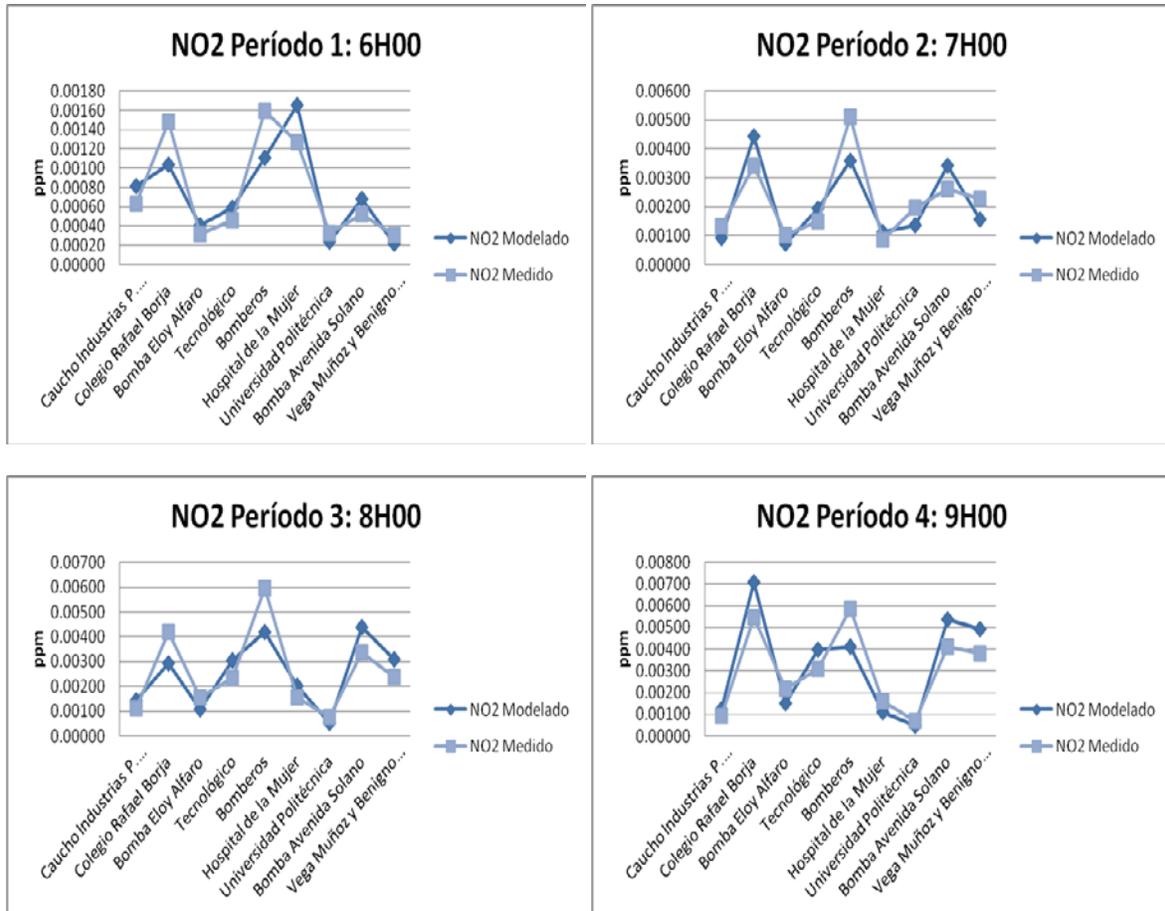


Figura 53. Cuadro comparativo para NO<sub>2</sub>

d. Óxidos de Nitrógeno

En la Figura 54 se muestra el gráfico comparativo entre los datos modelados y medidos para el contaminante NO<sub>x</sub> en los 4 períodos de estudio:

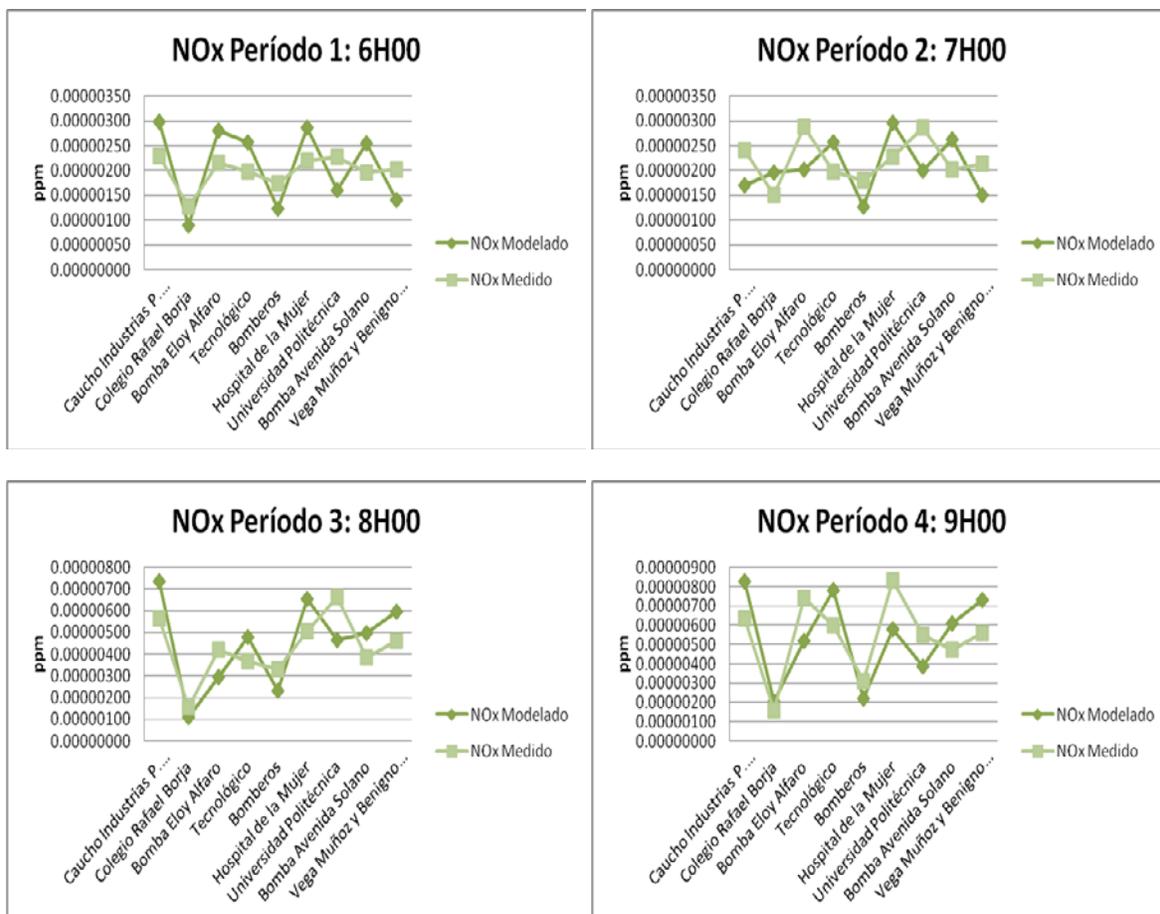


Figura 54. Cuadro comparativo para NO<sub>x</sub>

## Discusión

Los resultados obtenidos muestran la relevancia que tienen los Sistemas de Información Geográfica en diversos ámbitos, como lo es en este caso, un estudio de calidad de aire de la zona urbana del Cantón Cuenca.

En primera instancia, los mapas de definición de dominio (Figuras 6, 7), así como de ubicación de las estaciones de monitoreo, dan una idea precisa de la zona de estudio, proporcionando información que puede ser claramente comprendida. Se puede verificar que las estaciones de monitoreo se encuentran distribuidas en la zona urbana (Figuras 8, 9), aunque dicha distribución parecería no obedecer a una metodología clara y sistematizada, sino más bien, según la información que se tiene, al historial de monitoreo en los diversos puntos de la ciudad, aquí cabe la inquietud de si sería entonces recomendable, hacer una reevaluación de los sitios de monitoreo en función de un dominio definido y una diagramación de la ciudad, con la finalidad de tener puntos equidistantes que podrían dar una información más certera en una modelación.

Los diferentes mapas que se han elaborado como son: altitudes, usos de suelo, fracción vegetal, reflectividad del suelo, presión atmosférica, permiten caracterizar de forma precisa la zona de estudio en sus diversos parámetros, con la finalidad de tener una mayor comprensión del fenómeno de transporte de especies químicas en el aire. Así mismo resulta imprescindible tener una caracterización meteorológica, lo cual se ha conseguido a través de los respectivos mapas (Figura 15-29) en los tres dominios. Siendo quizá los mapas del dominio 03 los que ameritan un mayor análisis por tratarse de la zona geográfica específica en la que se hace el estudio, sin ser menos cierto el hecho de que no se puede poner un límite específico a la zona de influencia, ya que está comprobado, que los contaminantes se pueden trasladar a grandes distancias.

### Dispersión de contaminantes

El análisis de la dispersión de contaminantes es fundamental para aquellos que se dedican al estudio y evaluación de la calidad de aire. Dicha dispersión está determinada por una serie de factores que influyen en mayor o menor medida. En el caso de la ciudad de Cuenca, el hecho de contar con calles angostas que constituyen más bien corredores en el Centro histórico probablemente no permite una rápida dispersión, mientras que zonas abiertas con amplia ventilación, favorecerán la migración de contaminantes. Estos hechos se evidencian en los mapas de dispersión que se han elaborado para los diversos contaminantes.

En los mapas de CO (Figura 30) las concentraciones oscilan entre 0.079ppm y 0.17 ppm, se evidencia, que a las 6:00h en la mayoría de los puntos de monitoreo los valores de monóxido de carbono están en el mínimo, lo cual tiene coherencia con el hecho de que el tráfico vehicular a esa hora es muy bajo, sin embargo a las 7:00h y 8:00h esos puntos registran los niveles máximos de CO, y a las 9:00h se observa un ligero descenso. En la zona que corresponde al Hospital de la Mujer, en ningún momento se registra aumento de CO, manteniéndose siempre los valores más bajos.

En el caso del NO<sub>2</sub>, a las 6:00h se registran valores mínimos en todas las estaciones, Situación que empieza a cambiar notablemente a las 7:00h en que se registra un aumento de niveles de NO<sub>2</sub>, y a

las 9:00h, se puede ver que hay niveles altos en la zona del centro histórico con una tendencia de dispersión hacia el sur de la ciudad.

Los valores de dióxido de nitrógeno (Figura 31) se mantienen en un rango entre 0.0093ppm y  $3.29 \times 10^{-5}$  ppm. Mientras que los de NOx son mucho más bajos  $7.78 \times 10^{-9}$ ppm y  $1.31 \times 10^{-5}$ ppm

En cuanto al dióxido de azufre (Figura 33) los valores se mueven entre  $9.77 \times 10^{-5}$ ppm y 0.00034ppm, se presentan máximos en todos los puntos de monitoreo, y la tendencia de dispersión es evidentemente la misma que en el caso del NO<sub>2</sub>, es así que en el punto ubicado en el Hospital de la mujer, los valores son mínimos en las cuatro horas de modelación. Las mayores concentraciones están en el Centro Histórico (se explica esto, por el hecho de que el centro histórico cuenta con calles angostas que no permiten una rápida dispersión) y la tendencia de dispersión es hacia el sur de la ciudad.

En lo referente al ozono, que es un contaminante secundario, es decir, producto de la reactividad de contaminantes primarios, en el mapa de emisiones (Figura 50) se observan valores entre 0.038ppm y 0.045 ppm, con tendencia a concentrarse al noreste de la ciudad.

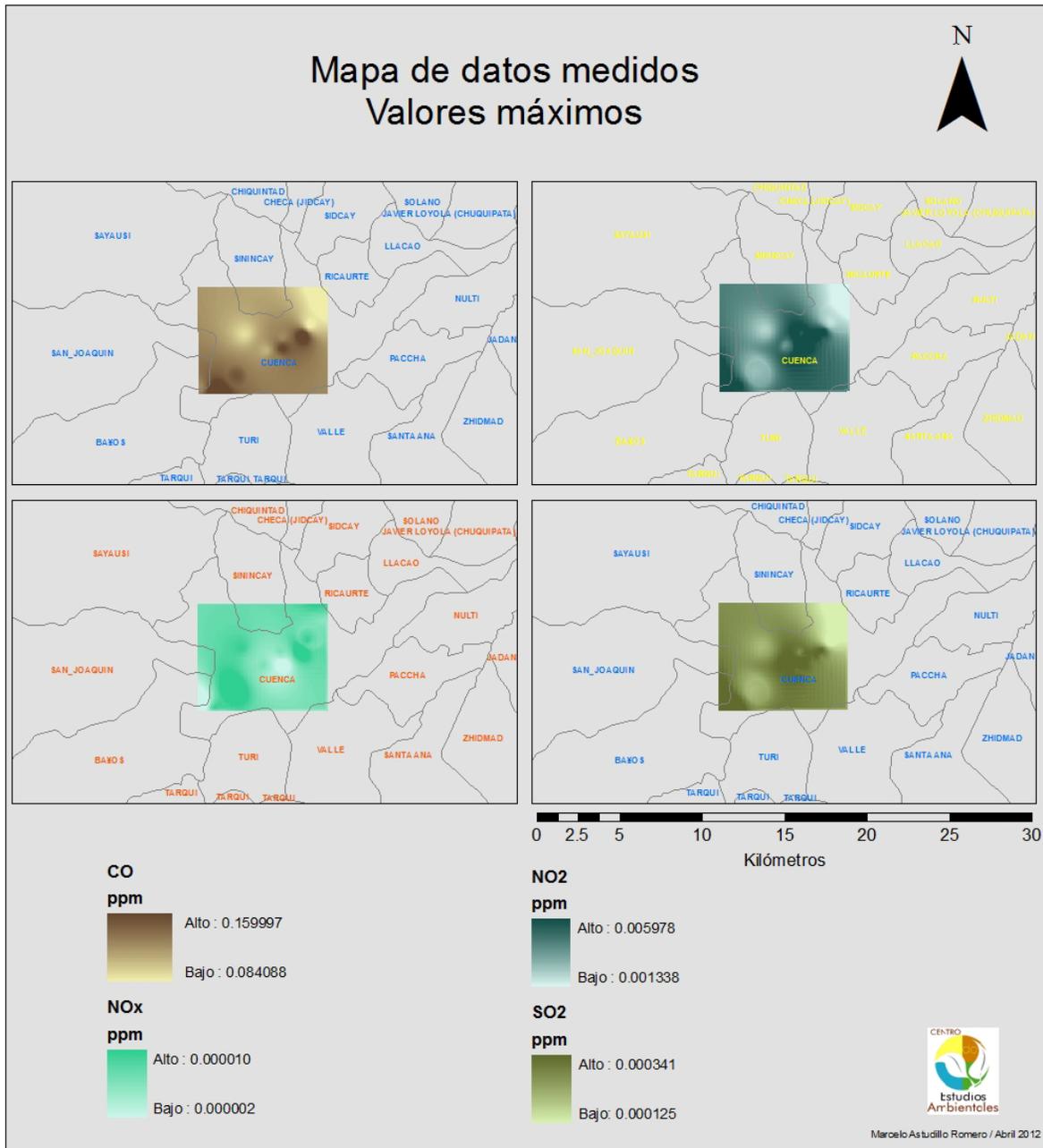
En las Figuras 34 a 49 se muestran los mapas de validación de los valores obtenidos por modelación y los registrados mediante mediciones con equipos automáticos para aire ambiente. En las Figuras 51-54, se hace una comparación entre los datos modelados y los medidos, en cada hora en el período de tiempo de 6:00 a 9:00h. En el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno, y en el NOx, las curvas presentan una tendencia bastante aproximada a los respectivos valores modelados, pero en el caso del monóxido de carbono hay una mayor distancia entre datos, En general se observa que hay variabilidad de los valores, en algunos casos los valores resultan muy próximos entre los medidos y los modelados, en otros casos podría decirse que son distantes, esto no significa que haya una falla en la modelación, muy al contrario, lo que evidencia es una necesidad de un monitoreo intensivo con equipos automáticos con una etapa de validación que se piensa no debería ser menor a seis meses, solo de esta manera se podrá llegar a establecer incluso estadísticamente, cual es el nivel de aproximación que tiene el modelo WRF CHEM.

Como resultado final, se presentan 2 mapas que reflejan los valores máximos de cada contaminante. Se debe aclarar que debido a que las estaciones de monitoreo están ubicadas dentro de la zona de las parroquias urbanas de Cuenca, el análisis de los resultados sólo incluye esta zona.

Para obtener estos mapas (Figura 55 y Figura 56), se ha utilizado la herramienta de análisis espacial de ArcGIS 9.3 (ESRI, 2011), en la que se extraen los valores máximos de cada contaminante mediante el uso de álgebra de mapas.

Para los datos medidos además se ejecutó una interpolación con la herramienta de geoprocésamiento para obtener el formato raster adecuado para efectuar los cálculos con el álgebra de mapas.

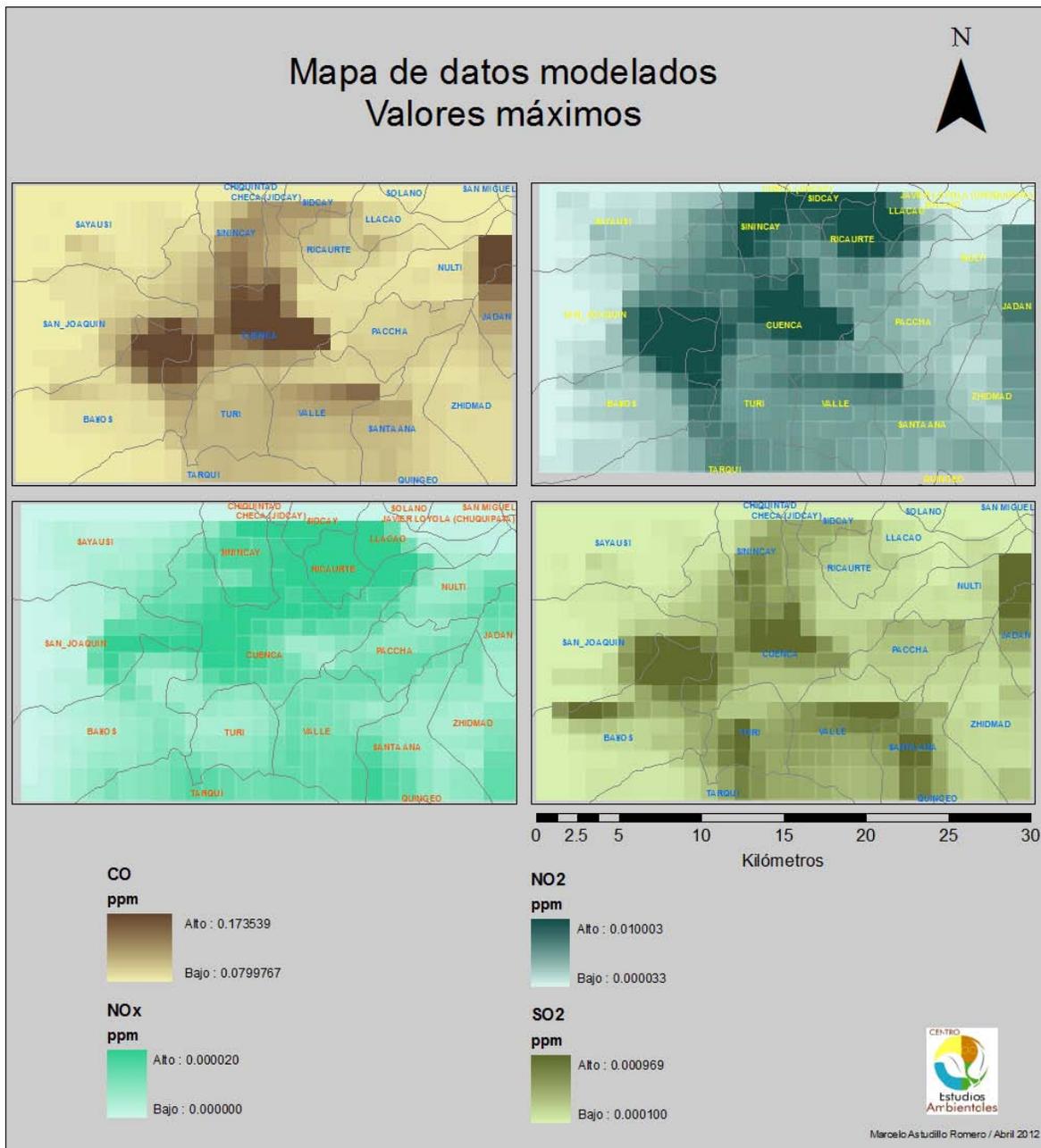
En la Figura 55, se muestra el mapa de valores máximos para los datos medidos de cada uno de los contaminantes estudiados:



**Figura 55.** Valores máximos para valores medidos

Se puede apreciar que la mayor parte de contaminantes se ubican en el centro histórico de la ciudad, a excepción del NO<sub>x</sub>, que tiene un comportamiento totalmente diferente. En todos los casos también hay un desplazamiento hacia la zona sur-este. Aquí se aprecia lo que se había anotado anteriormente que debido a que las estaciones de monitoreo están ubicadas en la zona urbana, en las otras zonas no hay información.

En la Figura 56, se muestra el mapa de valores máximos para los datos modelados de cada uno de los contaminantes estudiados:



**Figura 56.** Valores máximos para datos modelados

Se puede observar claramente que los valores más altos de contaminante, se ubican en la parte central del área de estudio, especialmente para los elementos CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, el área referida corresponde al centro histórico de la ciudad. El elemento NO<sub>x</sub> tiene una distribución un poco más homogénea en el área de estudio, pero se ve claramente que se desliza hacia el norte.

En la ciudad de Cuenca, estos son los primeros estudios de modelación que se están llevando a cabo, pero este modelo ha sido aplicado en otros países con resultados exitosos, y por tanto a través de este trabajo de tesis, se ha aportado significativamente al avance de este tema, por tanto, la discusión de los resultados en cuanto a calidad de información obtenida no es el tema más relevante ya que no se dispone de datos lo suficientemente confiables para la generación del modelo fotoquímico. Si es importante en cambio, relatar los resultados obtenidos en cuanto al valor de las herramientas utilizadas en este estudio:

Uno de los resultados importantes es la implementación del modelo fotoquímico WRF CHEM y la capacitación a los técnicos del CEA en su manejo. A partir de ahora el CEA cuenta con una herramienta de última tecnología que facilitará la modelación de los contaminantes del aire, y se integrará al proyecto de gestión de calidad del aire.

Se ha desarrollado una herramienta para la gestión de datos científicos en formato NetCDF que permite el registro adecuado de la información meteorológica y química para su correcta aplicación en los modelos meteorológico y fotoquímico.

Se ha confirmado que la utilización de un sistema de información geográfico para la gestión del proyecto de calidad del aire que lleva adelante el CEA es fundamental para la obtención de información y resultados.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio, permiten visualizar de una forma gráfica la forma como se transportan los contaminantes del aire en la ciudad de Cuenca, si bien es cierto han existido algunas dificultades en cuanto a la obtención de los datos para reflejar de una forma concluyente el transporte de los contaminantes en el aire, no es menos cierto que este trabajo representa un esfuerzo muy grande para representar este fenómeno utilizando modelos matemáticos que ayuden en el estudio de la calidad del aire.

A partir de este estudio, es necesario que se establezcan metodologías de obtención de datos que representen de una mejor forma tanto los fenómenos meteorológicos como la emisión de contaminantes en el aire. Para la obtención de datos meteorológicos es indispensable que se obtengan los datos locales partiendo del uso de estaciones de meteorología que generen información en línea y que luego sean procesados y adecuados a los requerimientos del software de modelación. Para los datos de emisiones de igual forma es necesario la implementación de estaciones de monitoreo permanentes que al menos recojan información de un período amplio de tiempo, para luego utilizando el modelo obtener la información correspondiente sin necesidad de las estaciones de monitoreo, estableciendo eso sí procesos de validación que se realizarían cada cierto tiempo.

Es necesario también que se brinde mayor capacitación a los técnicos del CEA en cuanto a la modelación fotoquímica pues este tema es muy amplio y requiere de conocimientos técnicos en diversas áreas tales como meteorología, inventario de emisiones, química, etc.

Una de las debilidades del proyecto, está relacionado con la modelación fotoquímica ya que no se dispone de información actual y detallada del inventario de emisiones. La validación del modelo tuvo dificultades en cuanto a la medición de los compuestos orgánicos volátiles ya que el CEA no cuenta con un equipo para la medición de estos contaminantes de forma individual.

Los resultados obtenidos relacionados con la información meteorológica son los mejores ya que se ha conseguido modelar diversas variables meteorológicas cuyos valores están dentro de lo esperado. No se ha realizado un proceso de validación ya que la ciudad de Cuenca cuenta únicamente con dos estaciones meteorológicas que no permiten la validación más confiable dentro de la superficie de estudio considerada.

Uno de los objetivos fundamentales planteados dentro de este trabajo de tesis, ha sido la implementación de un sistema de información geográfica dentro del ámbito de la gestión de la calidad del aire, objetivo que se ha cumplido de forma concluyente de acuerdo a los resultados obtenidos.

## Bibliografía

OMS (2004) Guías para la Calidad del Aire. Resumen ejecutivo.

Rainer Schmitz, Mark Falvey, Martín Jacques Coper (2008) Implementación de un Modelo Fotoquímico de alta resolución para la Macrozona Central del País (Resumen ejecutivo), Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.

Universidad de Chile (2008) Modelos atmosféricos de Dispersión de Contaminantes, MI55D – Gestión Ambiental, clase auxiliar #3

EPA (2011). Categorías de modelos de dispersión de contaminantes. En: <http://www.epa.gov/> .Consultado el: 13/Octubre/2011.

UAM (Urban Airshed Model). En: [http://gcmd.nasa.gov/records/UAM-V\\_Model.html](http://gcmd.nasa.gov/records/UAM-V_Model.html) .Consultado el: 15/Octubre/2011.

National Center for Atmospheric Research (NCAR, EE.UU). En: <http://ncar.ucar.edu/> .Consultado el: 04/Noviembre/2011.

Modelo de dispersión de contaminantes CANARINA. En: [www.canarina.com/](http://www.canarina.com/) .Consultado el: 10/Julio/2011.

Modelo fotoquímico de dispersión de contaminantes WRF-CHEM. En: <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/> Consultado el: 21/Julio/2011.

Modelo de investigación y pronóstico meteorológico WRF. En: <http://www.wrf-model.org/index.php> Consultado el: 22/Junio/2011.

Modelos de pronósticos meteorológicos globales (GFS). En: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/> Consultado el: 07/Junio/2011.

Agencias que colaboraron con el desarrollo del modelo WRF. En: <http://www.wrf-model.org/index.php/> Consultado el: 11/Junio/2011.

WRF (2011). Modelo meteorológico WRF. En: <http://sites.google.com/site/energyforecasting/wrf> Consultado el: 05/Mayo/2011.

WRF-CHEM (2011). Modelo fotoquímico. En: <http://www.esrl.noaa.gov/search/publications/1276/> Consultado el: 16/Mayo/2011.

WRF-CHEM (2011). Estado del modelo. En: <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/status.htm> .Consultado el: 12/Mayo/2011.

GRIB-US (2012). Formato de datos GRIB. En: <http://www.grib.us/> .Consultado el: 17/Febrero 2012.

WRF (2012). Software para definición de dominios. En: <http://wrfportal.org/DomainWizard.html>. Consultado el: 03/Marzo 2012.

Wikipedia (2011). Datos generales de la ciudad de Cuenca En: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca\\_%28Ecuador%29#Urbanismo](http://es.wikipedia.org/wiki/Cuenca_%28Ecuador%29#Urbanismo) .Consultado el: 22/Noviembre/2011

NCAR Earth System Laboratory (NESL), Mesoscale & Microscale Meteorology Division. Datos geográficos para el modelo WRF. En: [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps\\_files/geog.tar.gz](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/wps_files/geog.tar.gz) .Consultado el: 22/Mayo/2011.

GFS (2011). Datos de pronóstico meteorológico global. En: <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/matrix.html/> .Consultado el: 02/Junio/2011.

ESRI (2011). Software para sistemas de Información Geográfica ArcGIS 9.3. En: <http://www.esri.com/software/arcgis/index.html/> .Consultado el: 15/Enero/2011.

Centro de Estudios Ambientales CEA (2011). Informe de Calidad del Aire

Comisión Nacional de Medio Ambiente Región de la Araucanía (2008) Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en las comunas de Temuco y Padre Las Casas, informe final

INE (2011). Estimación de emisiones mediante factores de emisión. En: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/457/estimacion3.pdf> .Consultado el: 15/Enero/2012.

EPA (2011). Factores de emisión para óxidos de nitrógeno. En: <http://cfpub.epa.gov/webfire/> .Consultado el: 15/Enero/2012.

UNIDATA (2011). Formato de datos NetCDF. En: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/> .Consultado el: 21/Agosto/2011.