



**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO**

**COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**Estimación de las Emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> por Resuspensión Eólica en  
Ecuador durante el Año 2010**

**María Elisa Sánchez Garcés**

**René Parra, Ph. D., Director de Tesis**

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniera  
Ambiental

Quito, mayo de 2013

**Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Ciencias e Ingeniería**

**HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS**

**Estimación de las Emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por Resuspensión Eólica en  
Ecuador durante el Año 2010**

**María Elisa Sánchez Garcés**

René Parra, Ph. D.  
Director de Tesis y Miembro del Comité de Tesis

María del Carmen Cazorla, Ph. D.  
Miembro del Comité de Tesis

Dr. Ing. Ródney Peñafiel  
Miembro del Comité de Tesis

Ximena M. Córdova Vallejo, Ph. D.  
Decana de la Escuela de Ingeniería  
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, mayo de 2013

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma:

-----

Nombre: María Elisa Sánchez Garcés

C. I.: 1714264601

Fecha: Quito, mayo de 2013

## **Agradecimientos**

Dr. René Parra por su ayuda, paciencia, apertura y guía a lo largo del proyecto.

Esteban Suárez profesor de la USFQ, por sus útiles consejos para el desarrollo del proyecto.

Manuel Peralvo y Edwin Ortiz de CONDESAN, por la apertura y la información brindada.

Carlos Naranjo y Mario Tobar, del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, por los registros meteorológicos proporcionados.

UNIGIS-USFQ por compartir información de cartografía base y unidades espaciales del Catálogo Ecuador.

## Resumen

El material particulado afecta a la salud de los seres humanos; tiene efectos sobre el balance energético de la atmósfera, los ecosistemas, el ciclo hidrológico e inclusive la producción agrícola. El polvo resuspendido eólicamente representa una buena parte de las emisiones totales de material particulado en los Inventarios de Emisiones registrados para Quito y Cuenca. Se estimaron las emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por resuspensión eólica en el territorio continental ecuatoriano durante el año 2010, para las categorías de uso de suelo: afloramiento rocoso – mina – grava, vegetación geliturbada, áreas erosionadas, zonas eriales, suelo desnudo, plantaciones de maíz y pajonal. Se aplicó el modelo de emisiones basado en literatura internacional, que considera la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie, la velocidad umbral de fricción, la longitud de rugosidad aerodinámica y la precipitación como parámetros de influencia. Se determinaron los perfiles medios horarios de potencial de emisiones de  $PM_{10}$ , así como las emisiones mensuales y anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Los resultados se presentan en mapas georeferenciados. Las emisiones totales de  $PM_{10}$  ascienden a  $9279.27 \text{ t año}^{-1}$ , de las cuales 42% se emitió en el mes de agosto. Las emisiones de  $PM_{2.5}$  corresponden al 15% del  $PM_{10}$ . Las mayores emisiones se localizan en las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha, sumando entre las tres el 71% del total. Esta estimación posiblemente constituye la primera cuantificación de las emisiones por resuspensión eólica en el Ecuador y aporta información valiosa para el desarrollo de inventarios nacionales de contaminantes de aire así como para la estimación de concentraciones mediante modelos de dispersión.

## Abstract

Particulate matter affects human health; has effects on the atmosphere's energetic balance, ecosystems, hydrological cycles and agricultural production. Windblown dust represents a big part of the total particulate matter emissions estimated in the Emission Inventories registered for Quito and Cuenca.  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  windblown emissions were estimated over the Ecuadorian continental territory during the year 2010, for the land use categories: rock outcrops - mine - gravel, periglacial vegetation, eroded areas, wastelands, bare land, corn crops and Andean grassland. The emission model was based on international literature; it considered the wind speed 10 m above the surface, the threshold friction velocity, aerodynamic roughness length and precipitation as influence parameters. The mean hourly profiles for emission potential of  $PM_{10}$  were determined, as well as the month and annual emissions for  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ . The results are shown in georeferenced maps. The total emissions of  $PM_{10}$  are  $9279.27 \text{ t year}^{-1}$ , 42% of which were emitted during August. The  $PM_{2.5}$  emissions represent the 15% of the  $PM_{10}$ 's. The greatest emissions are located in the Carchi, Imbabura and Pichincha provinces, adding the 71% of the total. This estimation possibly constitutes the first quantification of windblown emissions in Ecuador and provides valuable information for the concentration estimation by chemical transport models.

## Tabla de contenido

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Material Particulado y Emisiones Fugitivas .....	14
1.1.2 Efectos del PM sobre la Salud .....	15
1.1.3 Efectos de PM sobre el Clima, Ecosistemas y Agricultura.....	16
1.1.4 Estimación de Emisiones de Material Particulado en Ecuador.....	18
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>23</b>
1.2.1 Objetivo General.....	23
1.2.2 Objetivos Específicos.....	23
<b>2. MARCO LEGAL Y GUÍAS.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1 Texto Unificado Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2 Guías y Normativas Internacionales .....</b>	<b>27</b>
<b>3. FUNDAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 Emisiones de polvo fugitivo.....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 Reservorios .....</b>	<b>36</b>
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>37</b>
<b>4.1 Software .....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 Categorías de interés .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3 Modelo de Emisiones .....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Vientos.....</b>	<b>54</b>
<b>4.5 Precipitación.....</b>	<b>58</b>
4.5.1 Asignación de número de perturbaciones a celdas de interés .....	63
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 Vientos.....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 Emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>.....</b>	<b>75</b>
<b>6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>93</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>98</b>
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>100</b>
<b>9. ANEXO A.....</b>	<b>104</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Valores de emisiones de PM anuales y porcentaje de emisión debido a erosión eólica en la Malla de Inventario del DMQ (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009) y (Secretaría de Ambiente, 2013) .....	19
Tabla 1.2: Valores de emisiones de PM10 anuales y porcentaje de emisión debido a erosión eólica en el cantón Cuenca (EMOV, 2011) y (Fundación Natura-Cuencaire-CGA, 2009).....	21
Tabla 2.1: Valores según la NCAA para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> (Secretaría de Ambiente, 2012)....	26
Tabla 2.2: Concentraciones de PM que definen los estados de Alerta, Alarma y Emergencia (Secretaría de Ambiente, 2012).....	27
Tabla 2.3: Guías presentadas por la OMS para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> (WHO, 2005) .....	28
Tabla 2.4: Estándares de calidad de aire ambiente para PM10 y PM2.5 EPA (USEPA, 2012) .....	29
Tabla 3.1: Emisiones Primarias y Secundarias de PM (NARSTO, 2004) .....	30
Tabla 3.2: Longitud de rugosidad aerodinámica z <sub>0</sub> típicos para diferentes usos de suelo (ENVIRON, 2006).....	34
Tabla 4.1: Ecosistemas de páramo, paleta del mapa de ecosistemas de páramo del Ecuador (Beltrán et al., 2009).....	42
Tabla 4.2: Descripción de los sistemas ecológicos relevantes para el estudio (Beltrán et al., 2009) .....	43
Tabla 4.3: Velocidad de fricción umbral promedio para las categorías de interés .....	53
Tabla 4.4: Pruebas de interpolación de velocidad de viento utilizando el método IDW .....	57
Tabla 4.5: Pruebas de interpolación de velocidad de viento utilizando el método Spline ..	58
Tabla 4.6: Nombres de estaciones del INAMHI consideradas en el estudio y su ubicación .....	60
Tabla 4.7: Valores de días de emisión o número de perturbaciones por mes para cada estación para el año 2010.....	62
Tabla 5.1: Velocidad de viento máxima mensual para el año 2010 en el territorio ecuatoriano .....	65
Tabla 5.2: Emisiones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el Ecuador, año 2010 .....	79
Tabla 5.3: Emisiones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> año 2010 por categoría de interés .....	89
Tabla 5.4: Emisiones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> año 2010 por provincia .....	89
Tabla 5.5: Matriz de calificación de la estimación de las emisiones (CORPAIRE, 2006). 91	
Tabla 5.6: Valoración cualitativa de incertidumbre de los atributos de emisiones de PM <sub>10</sub> y Pm <sub>2.5</sub> en el Ecuador para el año 2010.....	92
Tabla 5.7: Valoración cualitativa de incertidumbre de los factores de emisión de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en el Ecuador para el año 2010 .....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Composición del PM (NARSTO, 2004).....	15
Figura 1.2: Malla de Inventario del DMQ (CORPAIRE, 2006).....	18
Figura 1.3: Mapa de distribución de material sedimentable en el DMQ y sus alrededores para el año 2010 (Secretaría de Ambiente, 2013).....	20
Figura 1.4: Mapa de ubicación del cantón Cuenca (EMOV, 2011).....	21
Figura 1.5: Mapa de emisiones de PM10 t año-1 en el cantón Cuenca para el año 2009 (EMOV, 2011).....	22
Figura 3.1: Fuerzas que intervienen en el movimiento de partículas .....	33
Figura 3.2: Movimientos de suspensión, saltación y arrastre de las partículas .....	35
Figura 4.1: Mapa de usos de suelo del Ecuador (MAGAP, 2012).....	38
Figura 4.2: Árbol de decisión para selección de categorías de interés del mapa del MAGAP .....	39
Figura 4.3: Mapa de ecosistemas de páramo del Ecuador (Beltrán et al., 2009) .....	41
Figura 4.4: Categorías de interés, región sierra Norte .....	47
Figura 4.5: Categorías de interés, región sierra centro-Sur .....	48
Figura 4.6: Categorías de interés, región sierra Sur.....	49
Figura 4.7: Categorías de interés región costa .....	50
Figura 4.8: Dominios de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador (Parra, 2012).....	55
Figura 4.9: Ubicación espacial de las estaciones del INAMHI consideradas en el estudio	60
Figura 4.10: Asignación de información de estaciones INAMHI a categorías de interés por secciones de territorio (división territorial por cuencas hidrográficas) .....	64
Figura 5.1: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, enero a abril año 2010 .....	66
Figura 5.2: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, mayo a agosto año 2010.....	67
Figura 5.3: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, septiembre a diciembre año 2010.....	68
Figura 5.4: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 01:00 hasta 04:00 año 2010.....	69
Figura 5.5: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 05:00 hasta 08:00 año 2010.....	70
Figura 5.6: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 09:00 hasta 12:00 año 2010.....	71
Figura 5.7: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 13:00 hasta 16:00 año 2010.....	72
Figura 5.8: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 17:00 hasta 20:00 año 2010.....	73
Figura 5.9: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 05:00 hasta 08:00 año 2010.....	74

Figura 5.10: Perfiles medios de potencial de emisión de $PM_{10}$ mensuales de enero y febrero .....	75
Figura 5.11: Perfiles medios de potencial de emisión de $PM_{10}$ mensual de marzo a mayo	76
Figura 5.12: Perfiles medios de potencial de emisión de $PM_{10}$ mensual de junio a agosto	77
Figura 5.13: Perfiles medios de potencial de emisión de $PM_{10}$ mensual de septiembre a noviembre .....	78
Figura 5.14: Perfiles medios de potencial de emisión mensual de $PM_{10}$ de diciembre.....	79
Figura 5.15: Emisiones de $PM_{10}$ en Ecuador por mes, año 2010 .....	80
Figura 5.16: Emisiones totales $PM_{10}$ para el año 2010 sierra Norte.....	81
Figura 5.17: Emisiones totales $PM_{10}$ para el año 2010 sierra centro-Sur.....	82
Figura 5.18: Emisiones totales $PM_{10}$ para el año 2010 sierra Sur .....	83
Figura 5.19: Sector correspondiente a la sierra Norte.....	84
Figura 5.20: Evolución de las emisiones promedio por mes de $PM_{10}$ de Enero a Abril.....	85
Figura 5.21: Evolución de las emisiones promedio por mes de $PM_{10}$ de Mayo a Agosto ..	86
Figura 5.22: Evolución de las emisiones promedio por mes de $PM_{10}$ de Enero a Abril.....	87
Figura 5.23: Sector correspondiente a la sierra centro-Sur.....	88
Figura 5.24: Emisiones de $PM_{10}$ promedio mes de Agosto sector Sierra Centro-Sur .....	88

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes

El aire limpio es considerado un requerimiento básico para la salud y bienestar humano. La gestión de la calidad del aire resulta importante tanto en países desarrollados como aquellos en vías de desarrollo e implica tres procesos importantes (Parra, 2012):

1. La comprensión de la relación entre la calidad de aire y la emisión de contaminantes.
2. El desarrollo de inventarios de emisiones.
3. El modelamiento del transporte de los contaminantes del aire.

La cuantificación de las emisiones es esencial para desarrollar planes a largo plazo que permitan prevenir o disminuir la contaminación del aire; sin embargo, esta actividad puede resultar muy compleja dadas las interacciones entre diferentes factores que presentan comportamiento complejo como la meteorología.

El monitoreo y estimación de las emisiones de contaminantes del aire se realiza en el Ecuador desde hace pocos años. Para el Distrito Metropolitano de Quito, DMQ, existe la Red de Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, REMMAQ, que recolecta datos sobre la concentración de contaminantes atmosféricos en el territorio del DMQ, con el objetivo de mejorar la calidad de aire y difundir la información a la población en general. La REMMAQ cuenta con un total de 35 estaciones de monitoreo automático y pasivo. La manera de informar a la ciudadanía sobre la calidad del aire ambiente es a partir del Índice Quiteño de la Calidad de Aire, IQCA, que consiste en una escala numérica entre 0 y 500, con rangos intermedios expresados en diferentes colores y mientras más alto es el valor de IQCA, más alto es el nivel de contaminación atmosférica (Secretaría de Ambiente, 2013). A partir de los datos que se colectan en la REMMAQ se han realizado anualmente

Informes de Calidad de Aire desde el año 2005 hasta el 2011. Además se han realizado Inventarios de Emisiones para los años 2003, 2005, 2007 y existe el borrador para el año 2009. Los datos recolectados en esta red de monitoreo muestran que la mayoría de valores promedio anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  exceden la Norma Ecuatoriana de Calidad de Aire, NCCA.

En la ciudad de Cuenca la Empresa Municipal de Movilidad, EMOV, controla la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Cuenca que cuenta con 19 estaciones de monitoreo. A partir de la información que se recolecta en estas estaciones se ha realizado un Informe de Calidad de Aire para el año 2011; además se desarrollaron dos Inventarios de Emisiones para los años 2007 y 2009 (EMOV, 2011). Los datos del informe de calidad de aire del año 2011 indican, de manera general, que la concentración media anual de material particulado fino supera el valor establecido por la NCCA.

El Ministerio del Ambiente del Ecuador, MAE, en colaboración con Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, COSUDE, realizaron el Plan Nacional de Calidad del Aire, PNCA en el año 2010, con el objetivo de contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población ecuatoriana. Uno de los proyectos del PNCA es el desarrollo del inventario nacional de emisiones para cantones con población mayor a 150 000 habitantes. Como actividad específica se menciona la evaluación de emisiones de áreas erosionadas o sin cobertura vegetal generadoras de material particulado  $PM_{10}$  (Ministerio del Ambiente, 2010). En la actualidad no existe ningún inventario de emisiones a nivel nacional.

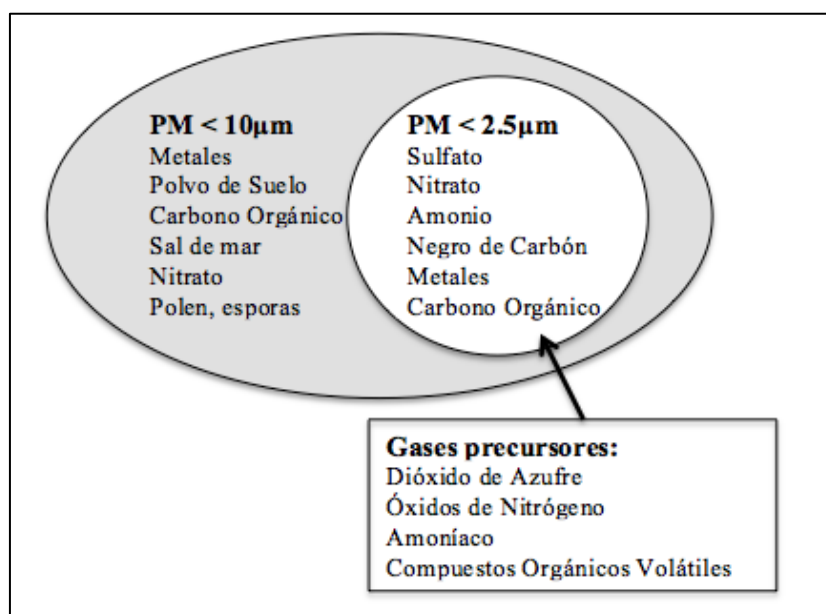
El material particulado, también conocido como contaminación particulada o sencillamente PM (por sus siglas en inglés) es una mezcla compleja de partículas muy pequeñas y gotas de líquido (o fase condensada). Contiene varios componentes como minerales, nitratos, sulfatos, compuestos orgánicos, metales, polen, partículas de suelo, carbón orgánico y polvo (USEPA, 2012). Resulta de la quema de combustibles fósiles, la

erosión eólica, circulación de vehículos y maquinaria, actividades de construcción, incendios forestales, entre otros (Secretaría de Ambiente, 2012).

La contaminación del aire ambiente tiene un efecto directo sobre el estado de salud de las personas y los ecosistemas. En el año 2005 se registraron en el Ecuador 991 744 casos de infecciones respiratorias agudas, muchas de ellas podrían deberse a la calidad de aire de las zonas urbanas (Ministerio del Ambiente, 2010). Según la Organización Panamericana de la Salud, se estima que cada año mueren 500 personas en el Ecuador debido a la contaminación del aire (OPS, 2010). Existe evidencia que indica que el PM produce efectos adversos a la salud sobre todo en poblaciones urbanas tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. Toda la población es afectada, pero la susceptibilidad a la contaminación puede variar según el estado de salud de las personas y/o la edad. Los efectos adversos observados en estos estudios son amplios, pero comúnmente son de naturaleza cardiovascular y respiratoria (NARSTO, 2004) y (WHO, 2005).

### **1.1.1 Material Particulado y Emisiones Fugitivas**

Los contaminantes principales que forman el PM son las partículas sedimentables (diámetro de partícula mayor a  $10\mu\text{m}$ ), el  $\text{PM}_{10}$  (diámetro de partícula menor a  $10\mu\text{m}$ ) y el  $\text{PM}_{2.5}$  (diámetro de partícula menor a  $2.5\mu\text{m}$ ). El  $\text{PM}_{2.5}$  es parte del  $\text{PM}_{10}$ , como se observa en la Figura 1.1. Las emisiones de  $\text{PM}_{10}$  son principalmente primarias, mientras que las emisiones de  $\text{PM}_{2.5}$  pueden ser secundarias, es decir que se forman en la atmósfera por condensación de los gases precursores. Existen dos factores importantes en la formación de PM secundario: la radiación solar y la presencia de radicales OH. El  $\text{PM}_{2.5}$  puede ser sólido o estar conformado por aerosoles de dos tipos: inorgánicos y/o secundarios orgánicos. Los aerosoles son una mezcla de PM y su medio de suspensión gaseosa (NARSTO, 2004).



**Figura 1.1: Composición del PM (NARSTO, 2004)**

Gran parte del polvo que se encuentra en la atmósfera se levanta por la perturbación mecánica de material granulado que está expuesto al aire (USEPA, 1995). El polvo que se genera de estas fuentes abiertas es llamado fugitivo o polvo aerotransportado. Se entiende por emisiones debido a resuspensión eólica aquella contaminación por material particulado primario que ha sido levantado por acción del viento. La contaminación por resuspensión eólica depende de varios factores como la velocidad del viento, las características del suelo, la humedad y las condiciones meteorológicas. Según la REMMAQ alrededor del 45% de las emisiones de PM<sub>10</sub> en el DMQ y sus alrededores tienen como fuente la resuspensión eólica (Secretaría de Ambiente, 2013) y, según la EMOV alrededor el 15% de las emisiones de PM<sub>10</sub> en el cantón Cuenca se deben a erosión eólica (EMOV, 2011).

### **1.1.2 Efectos del PM sobre la Salud**

La contaminación atmosférica causa alrededor de 2 millones de muertes prematuras al año en todo el mundo, específicamente la contaminación urbana causa un total de 1.2 millones de muertes al año (WHO, 2009). La disminución de la calidad de la salud de las personas y

su exposición a emisiones de PM están estrechamente relacionadas. Se han realizado estudios epidemiológicos en grandes poblaciones por períodos de tiempo largos, los cuales indican un aumento del riesgo a presentar enfermedades relacionadas a la exposición a PM. Existen efectos adversos después de exposiciones tanto a corto como a largo plazo, pero se ha demostrado mejoras en la salud con la disminución de la exposición a PM (NARSTO, 2004). La exposición continua a altas concentraciones de PM causa irritación de garganta y mucosas y agrava el asma. El PM con un diámetro menor a  $2.5\mu\text{m}$  tiene la capacidad de ingresar al espacio alveolar o al torrente sanguíneo lo que puede causar cáncer o muerte prematura (WHO, 2005). Se ha demostrado que el riesgo de estos efectos aumenta con la exposición y no existe evidencia que sugiera un valor umbral bajo el cual no existan efectos adversos. El extremo más bajo del rango de concentraciones a las cuales se muestran efectos adversos no es mayor que la concentración en la troposfera remota o limpia (WHO, 2005).

### **1.1.3 Efectos de PM sobre el Clima, Ecosistemas y Agricultura**

La interacción del material particulado con ciertas variables meteorológicas produce una gran cantidad de impactos sobre los ecosistemas, el clima, el ciclo hidrológico y la agricultura. Los impactos sobre los ecosistemas se deben principalmente a que los nutrientes que se depositan con el polvo, como el fósforo o el hierro, son limitantes para la productividad tanto de ecosistemas oceánicos como terrestres. La deposición de polvo en los ecosistemas terrestres y oceánicos estimula la productividad, y por ende afecta los ciclos biogeoquímicos de carbono y nitrógeno. Existen hipótesis que mencionan que los cambios globales en deposición de polvo sobre los ecosistemas contribuyeron a modificaciones en las concentraciones de dióxido de carbono en el último siglo, estas



modificaciones podrían jugar un rol importante en futuros cambios climáticos (Kok et al., 2012).

El material particulado puede afectar el ciclo hidrológico de varias maneras. Primero, redistribuye la energía por dispersión y absorbe tanto la radiación solar como la terrestre (IPCC, 2007). El efecto del material particulado en el balance de energía de la atmósfera depende principalmente del tamaño de las partículas y no tanto de la concentración de las mismas. Las partículas grandes y oscuras absorben luz y suman al calentamiento de la atmósfera. Las partículas pequeñas, sin importar su color, dispersan la luz incidente y aumentan el albedo de la atmósfera (Girard, 2005). Es por esto que se dice que el material particulado emitido actúa para modificar las propiedades radiativas de la atmósfera, principalmente por retrodispersión de la radiación solar (Marticorena et al., 1997). Segundo, el material particulado sirve como núcleo de condensación del agua en fases líquidas y sólidas. Las reacciones que resultan son muy complejas y pueden aumentar la reflectividad de las nubes así como su tiempo de vida (IPCC, 2007), (Kok et al., 2012) y (Wallace & Hobbs, 2006). La deposición de partículas de carbón elemental sobre glaciares; un componente del material particulado fino, disminuye el albedo de dichas superficies, por lo que se le atribuye un forzamiento radiativo positivo<sup>1</sup>. Se cree que el forzamiento radiativo que resulta de estos cambios en el ciclo del material particulado amplificó los cambios climáticos experimentados en los últimos años (Kok et al., 2012).

Además de los impactos sobre el clima, ecosistemas y ciclo hidrológico, el material particulado reduce la productividad agrícola ya que la emisión de polvo disminuye la fertilidad del suelo debido a la remoción de partículas ricas en nutrientes y materia

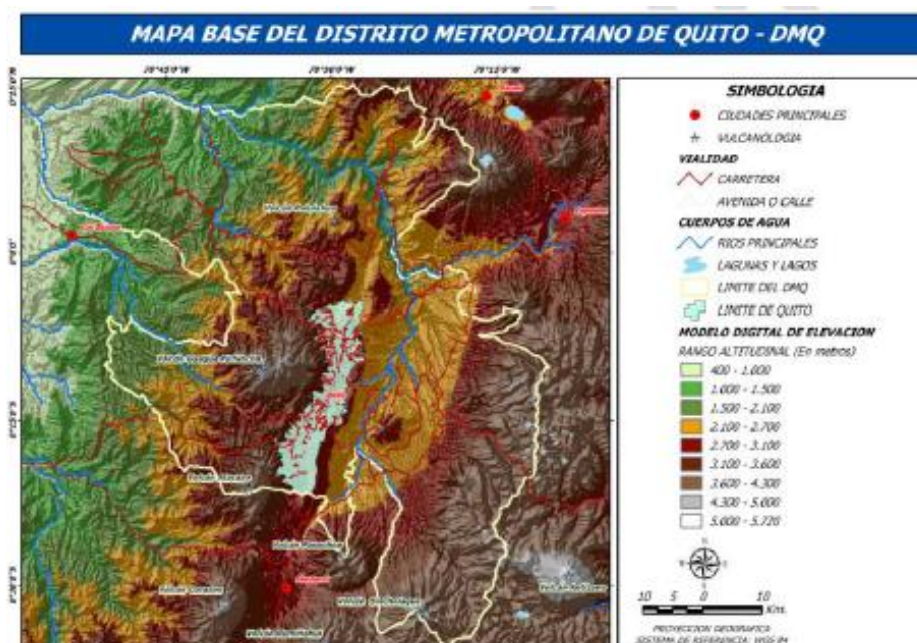
---

<sup>1</sup> El forzamiento radiativo se define como el cambio neto de la irradiación en la tropopausa después de que la temperatura estratosférica se ha reajustado a una nueva condición de equilibrio radiativo. Un forzamiento radiativo positivo promueve el incremento de la temperatura en superficie. Un forzamiento radiativo negativo implica un descenso en la temperatura en superficie (IPCC, 2007).

orgánica (Kok et al., 2012). Por otro lado, las partículas suspendidas en el aire interfieren en la transmisión de la luz en la atmósfera. La dispersión o absorción de la luz resulta en la disminución de la visibilidad, es decir una disminución tanto de la distancia a la cual una persona puede ver como del contraste y color de los objetos (NARSTO, 2004).

#### 1.1.4 Estimación de Emisiones de Material Particulado en Ecuador

Los inventarios de emisiones para el DMQ presentan información de una malla base que representa el DMQ y sus alrededores como se muestra la Figura 1.2:



**Figura 1.2: Malla de Inventario del DMQ (CORPAIRE, 2006)**

En la Tabla 1.1 se resumen los valores relevantes de emisión de PM para la malla de inventario del DMQ presentados en los Inventarios de Emisiones para los años 2003, 2005, 2007 y 2009 (borrador).

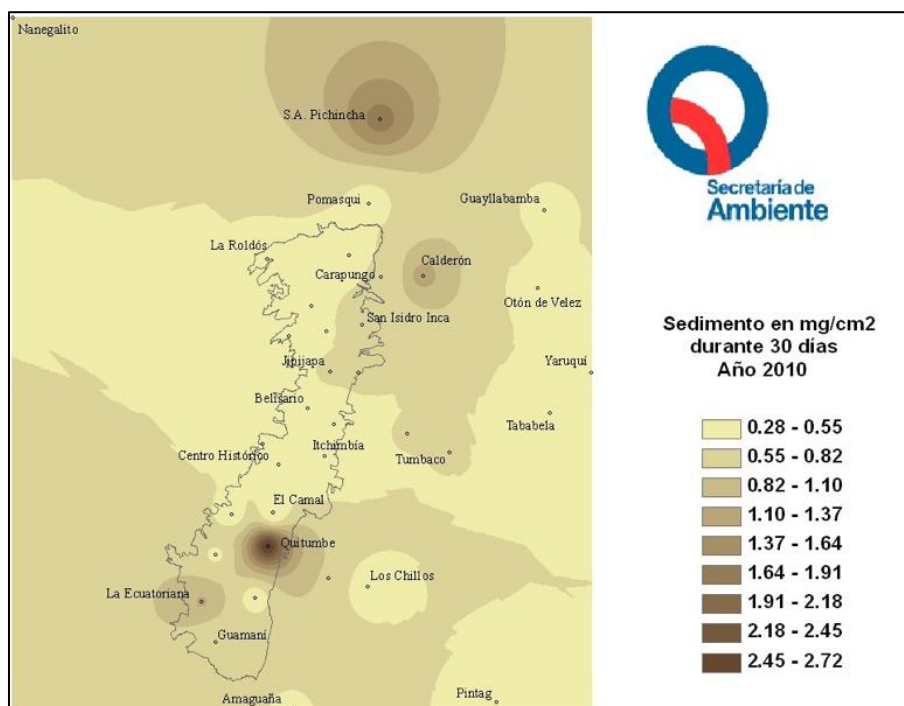
**Tabla 1.1: Valores de emisiones de PM anuales y porcentaje de emisión debido a erosión eólica en la Malla de Inventario del DMQ (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009) y (Secretaría de Ambiente, 2013)**

<b>Inventario Año</b>	<b>Emisiones Anuales totales PM<sub>10</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>Emisiones Anuales totales PM<sub>2.5</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>% de emisión PM<sub>10</sub> debido a erosión eólica</b>	<b>% de emisión PM<sub>2.5</sub> debido a erosión eólica</b>
<b>2003</b>	7994	3742	4.9	2.1
<b>2005</b>	9873	3726	16.2	9.5
<b>2007</b>	7230	2571	11.7	2.8
<b>2009</b>	9048	2809	30.7	9.9

Los cuatro inventarios presentados hasta el momento coinciden en dos aspectos muy importantes sobre las emisiones de PM:

1. La distribución mensual de emisión de PM tiene un pico en los meses de verano, marcado por el incremento de las emisiones de área como son la erosión de suelos, canteras y resuspensión de vías. Las emisiones horarias tienen un pico que coincide con las horas de mayor velocidad de viento.
2. El polvo de la erosión eólica y resuspensión se origina en la zona de San Antonio, Guayllabamba, Pomasqui y Calderón

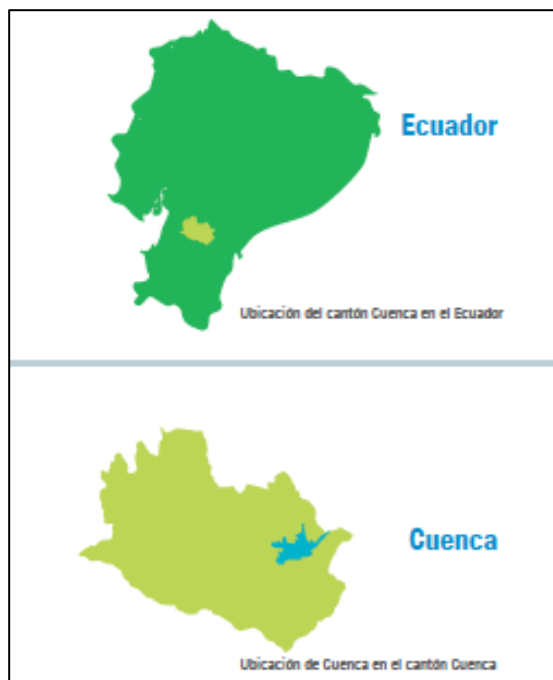
En la Figura 1.3 se presenta un mapa de la distribución de emisiones del material sedimentable en el DMQ para el año 2010, se observa mayor cantidad de emisiones en la zona de Quitumbe, La Ecuatoriana, Calderón y San Antonio de Pichincha.



**Figura 1.3: Mapa de distribución de material sedimentable en el DMQ y sus alrededores para el año 2010 (Secretaría de Ambiente, 2013)**

La REMMAQ en el Informe de la Calidad de Aire para el año 2010 presenta que existen picos en los valores de partículas sedimentables en al menos una estación por mes. Los puntos con valores más altos durante el año fueron en Quitumbe, San Antonio de Pichincha, Calderón y San Isidro del Inca; todos superando la NCA. En cuanto a los promedios anuales de PM<sub>10</sub> todas las estaciones de la red automática superan la guía de la Organización Mundial de la Salud, OMS; sin embargo, se encuentran bajo el valor de la NCA de 50  $\mu\text{m m}^{-3}$ .

La Figura 1.4 muestra el mapa del cantón Cuenca, zona en la cual se realizaron los inventarios de emisiones de los años 2007 y 2009.



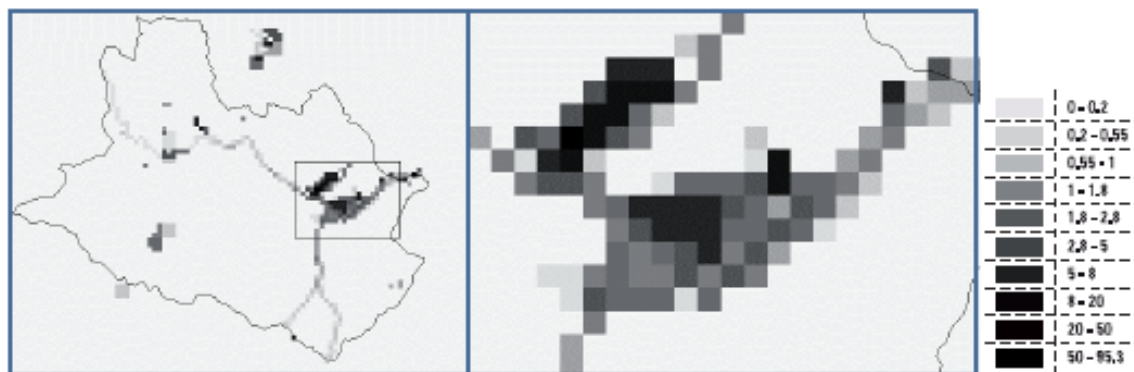
**Figura 1.4: Mapa de ubicación del cantón Cuenca (EMOV, 2011)**

En la **Tabla 1.2** se resumen los valores relevantes de emisión de PM para el cantón Cuenca presentados en los Inventarios de Emisiones para los años 2007 y 2009.

**Tabla 1.2: Valores de emisiones de PM10 anuales y porcentaje de emisión debido a erosión eólica en el cantón Cuenca (EMOV, 2011) y (Fundación Natura-Cuencaire-CGA, 2009)**

<b>Inventario Año</b>	<b>Emisiones Anuales totales PM<sub>10</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>% de emisión PM<sub>10</sub> debido a erosión eólica</b>
<b>2007</b>	789	16.1
<b>2009</b>	1099	14.3

El inventario del año 2009 presenta como resultados de la estimación de emisiones de PM<sub>10</sub> el mapa de la Figura 1.5; resaltan emisiones por tráfico vehicular, erosión eólica, ladrilleras, sector industrial y térmicas.



**Figura 1.5: Mapa de emisiones de PM10 t año-1 en el cantón Cuenca para el año 2009 (EMOV, 2011)**

El Informe de Calidad de Aire de Cuenca muestra que los valores medios anuales (desde 2008 hasta 2011) para partículas sedimentables se encuentran dentro de la NCAA de  $1 \text{ mg cm}^{-2}$  durante 30 días. Por otro lado el valor promedio anual de  $\text{PM}_{10}$  es mayor a  $30 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ , se encuentra dentro de la NCAA; sin embargo, supera el valor guía de la OMS de  $20 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ . El valor promedio anual de  $\text{PM}_{2,5}$  es de  $17 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$  lo que supera tanto la NCAA y la guía de la OMS (EMOV, 2011).

La Secretaría de Ambiente reporta datos para la ciudad de Riobamba y sus alrededores en el marco del convenio suscrito entre el Municipio de Quito, el Municipio de Riobamba y CORPAIRE. Los datos para el año 2010 muestran que, para la zona Norte y Centro de Riobamba así como para Penipe se supera el valor de  $1 \text{ mg cm}^{-2}$  establecido en la NCAA para partículas sedimentables. Los datos recolectados de  $\text{PM}_{10}$  diarios muestran picos de alrededor de  $90 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ , muy cercanos al límite de la NCAA, pero por encima de la guía de la OMS. Estos picos podrían deberse a la presencia de ceniza debido a episodios de erupción del volcán Tungurahua (Secretaría de Ambiente, 2013).

Los datos reportados para Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsáchilas, en el marco de una investigación de corrosión a cargo de la Universidad Politécnica Nacional, auspiciada por CORPAIRE, muestran que para el año 2010 los valores de emisiones de material sedimentable superan con más de  $4 \text{ mg cm}^{-2}$  la NCAA (Secretaría de Ambiente,

2013).

El material particulado resulta perjudicial para la salud, tiene efectos directos sobre el balance radiativo de la atmósfera, el clima, los ecosistemas y la agricultura. No existe una estimación de las emisiones de material particulado por resuspensión eólica en el Ecuador, por lo tanto es necesario identificar las principales fuentes de emisión y de cuantificar las emisiones a nivel nacional. Si bien existen ciudades como Cuenca y Quito que realizan inventarios de emisiones, es importante conocer la situación en otros centros urbanos donde la calidad del aire puede verse afectada por la resuspensión eólica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Realizar una estimación de las emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por resuspensión eólica en el Ecuador continental utilizando como base el año 2010.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar mediante un mapa de uso del suelo y de ecosistemas en el Ecuador las principales zonas de potencial emisión por resuspensión eólica.
- Analizar el comportamiento de los principales factores meteorológicos que influyen en la emisión de material particulado por resuspensión eólica.
- Definir y aplicar el modelo matemático adecuado para determinar las emisiones por resuspensión eólica en el Ecuador, mediante revisión de modelos propuestos en literatura internacional.
- Generar mapas en un Sistema de Información Geográfico que combinen las variables meteorológicas con las emisiones por resuspensión eólica.
- Identificar las potenciales zonas de afectación por resuspensión eólica mediante mapas realizados en un Sistema de Información Geográfico.

- Realizar un análisis de incertidumbre de los resultados.
- Recomendar posibles técnicas de control para prevenir o disminuir la contaminación por resuspensión eólica en las zonas de mayor afectación por la misma.
- Establecer recomendaciones para la mejora de la estimación de las emisiones.



## 2. MARCO LEGAL Y GUÍAS

### 2.1 Texto Unificado Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente

La legislación Ecuatoriana de manera general tiene como objetivo principal la preservación de la salud de las personas, la calidad ambiental y el bienestar de los ecosistemas. El Texto Unificado Legislación Ambiental Secundaria del Ministerio de Ambiente llamado TULSMA consta de 9 libros. El Libro VI De la Calidad Ambiental se divide en 7 Anexos. El Anexo 4 es llamado Norma de Calidad de Aire Ambiente (NCAA), consiste en una norma técnica dictada bajo el amparo de la Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. Esta norma es de aplicación obligatoria y rige a nivel nacional, fue revisada y reformada en el año 2011 (Secretaría de Ambiente, 2012).

El TULSMA, específicamente la NCAA define como contaminante del aire a cualquier sustancia o material emitido a la atmósfera, sea por actividad humana o por procesos naturales, y que afecta adversamente al hombre o al ambiente (Presidencia de la República, 2003). Específicamente sobre el material particulado se dice que está constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera en condiciones normales. Se designa como  $PM_{2.5}$  al material particulado con diámetro aerodinámico menor a  $2.5 \mu m$ . Por otro lado se designa como  $PM_{10}$  al material particulado de diámetro aerodinámico menor a  $10 \mu m$ . Sobre las partículas sedimentables se explica que consisten en material particulado, sólido o líquido, en general de tamaño mayor a  $10 \mu m$ , y que es capaz de permanecer en suspensión temporal en el aire ambiente. El  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y Partículas Sedimentables se encuentran

dentro del grupo de contaminantes comunes del aire ambiente (Presidencia de la República, 2003).

La norma establece un valor límite máximo permisible de concentración, a nivel del suelo de un contaminante del aire durante un tiempo promedio de muestreo determinado. Para estos contaminantes se establecen las siguientes concentraciones máximas permitidas:

**Tabla 2.1: Valores según la NCAA para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> (Secretaría de Ambiente, 2012)**

Contaminante	Media anual $\mu\text{g m}^{-3}$	Media 24 horas $\mu\text{g m}^{-3}$
PM <sub>2.5</sub>	15	50
PM <sub>10</sub>	50	100

Por otro lado, la norma nacional indica que el límite para el depósito de partículas sedimentables es de  $1 \text{ mg cm}^{-2}$  durante 30 días (Secretaría de Ambiente, 2012).

La NCAA determina que la Autoridad Ambiental de Aplicación Responsable acreditada ante el Sistema Único de Manejo Ambiental establecerá un Plan de Alerta, de Alarma y de Emergencia ante Situaciones Críticas de Contaminación del Aire basado en el establecimiento de tres niveles de concentración de contaminantes y la existencia de los estados de Alerta, Alarma y Emergencia. Cuando la concentración PM<sub>10</sub> o PM<sub>2.5</sub> en 24 h exceda la concentración establecida en la Tabla 2.2, o cuando se espere que las condiciones atmosféricas sean desfavorables en las siguientes 24 horas se declarará uno de los tres estados mencionados (Presidencia de la República, 2003).

**Tabla 2.2: Concentraciones de PM que definen los estados de Alerta, Alarma y Emergencia (Secretaría de Ambiente, 2012)**

<b>Contaminante y período de emisión</b>	<b>Alerta</b>	<b>Alarma</b>	<b>Emergencia</b>
PM <sub>10</sub> $\mu\text{g m}^{-3}$ Concentración en 24h	250	400	500
PM <sub>2.5</sub> $\mu\text{g m}^{-3}$ Concentración en 24h	150	250	350

La Entidad Ambiental de Control puede proceder a la ejecución de las ciertas actividades para cada estado las que incluyen informar al público, restringir o prohibir la circulación de vehículos, limitar actividades de fuentes fijas de combustión, suspender y combatir quemas a cielo abierto (Presidencia de la República, 2003).

## **2.2 Guías y Normativas Internacionales**

La Organización Mundial de la Salud OMS diseña guías como pauta para reducir los impactos a la salud por contaminación del aire. Estas guías tienen el carácter de recomendaciones y han sido desarrolladas de forma que se apoye acciones para lograr una calidad de aire que proteja la salud pública en cualquier contexto. Se reconoce que los estándares determinados por cada país varían de acuerdo al acercamiento adoptado para balancear riesgos a la salud, factibilidad y consideraciones económicas y sociales (WHO, 2005).

El informe de la OMS del año 2005 *Guías para la Calidad de Aire* reconoce que existen riesgos a la salud en concentraciones de material particulado encontradas actualmente en muchas ciudades de países desarrollados. Además, reconoce que la investigación no ha identificado valores umbrales bajo los cuales no ocurren efectos

adversos, de forma que las guías propuestas no pueden proteger completamente la salud humana (WHO, 2005). El informe de la OMS de Guías para la Calidad de Aire de Europa plantea que la información disponible actualmente para exposición a corto y largo plazo a  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  no permite realizar un juicio sobre las concentraciones bajo las cuales no se esperará efectos (WHO, 2000).

En el Informe de la OMS 2005 se establecen valores guía para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  con el objetivo primordial de proveer una base para la protección de la salud pública y los ecosistemas así como reducir al mínimo la exposición a los contaminantes. Se presenta la Tabla 2.3 con estos valores guía,

**Tabla 2.3: Guías presentadas por la OMS para  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  (WHO, 2005)**

<b>Contaminante</b>	<b>Media anual <math>\mu\text{g m}^{-3}</math></b>	<b>Media 24 horas <math>\mu\text{g m}^{-3}</math></b>
$PM_{2.5}$	10	25
$PM_{10}$	20	50

En Estados Unidos existe el Estatuto para el Aire Limpio llamado *Clean Air Act* que asigna a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) establecer los Estándares de Calidad de Aire Ambiente Nacionales (NAAQS por sus siglas en inglés) para contaminantes considerados peligrosos a la salud pública y el ambiente. El *Clean Air Act* identifica dos tipos de estándares de calidad de aire ambiente: Estándares Primarios y Secundarios. Los primarios proveen protección a la salud pública incluyendo población sensible como niños y ancianos. Los secundarios proveen protección al bienestar público incluyendo protección contra la disminución de visibilidad, daño a animales, sembríos, vegetación y edificios (USEPA, 2012).

Se han determinado estándares de calidad de aire para seis contaminantes principales, uno de los cuales es el material particulado, dividido en  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ . Así, como se observa en la Tabla 2.4 los estándares son los siguientes:

**Tabla 2.4: Estándares de calidad de aire ambiente para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  EPA (USEPA, 2012)**

	<b>Primaria / Secundaria</b>	<b>Tiempo promedio</b>	<b>Nivel</b>	<b>Modo</b>
<b><math>PM_{2.5}</math></b>	Primaria	Anual	$12 \mu\text{g m}^{-3}$	Media anual promediada en 3 años
	Secundaria	Anual	$15 \mu\text{g m}^{-3}$	Media anual promediada en 3 años
	Primaria y Secundaria	24 h	$35 \mu\text{g m}^{-3}$	Percentil 98, promediado en 3 años
<b><math>PM_{10}</math></b>	Primaria y Secundaria	24 h	$150 \mu\text{g m}^{-3}$	No puede ser excedida mas de una vez por año en promedio de 3 años

Existen distintas leyes, normativas y guías las cuales controlan la emisión del material particulado. A su vez estas guías apuntan a la disminución de la contaminación y la reducción de la exposición a contaminantes. En el Ecuador la legislación vigente está regida a las normas técnicas del TULSMA, aunque en el control y monitoreo de contaminantes se toma en cuenta las guías de la OMS como un ejercicio de mejora.

### 3. FUNDAMENTO TEÓRICO

El material particulado puede ser dividido en dos grupos principales en función del tipo de emisión: el material particulado primario y secundario, como se observa en la Tabla 3.1. Las partículas que son emitidas directamente a la atmósfera son llamadas primarias. Las partículas secundarias resultan de la condensación y deposición de precursores gaseosos a una fase particulada.

**Tabla 3.1: Emisiones Primarias y Secundarias de PM (NARSTO, 2004)**

	<b>Emisiones</b>	<b>Tipos de Fuentes Generales</b>
<b>Primarias</b>	Polvo de suelo/polvo de carreteras	Caminos pavimentados y no pavimentados, desgaste de llantas y frenos de vehículos, construcción, operaciones agrícolas y forestales, eventos de fuertes vientos e incendios.
	Sal (NaCl)	Océanos, lechos de lagos secos, minas de sal.
	Material Biogénico	Polen, esporas y ceras de plantas.
	Metales	Procesos industriales y transporte.
	Negro de Carbón	Quema de combustibles fósiles (especialmente motores a diesel)
<b>Secundarias</b>	Compuestos orgánicos semi-volátiles (condensación directa de vapores orgánicos a condiciones ambiente) y compuestos orgánicos no-volátiles	Quema de combustibles fósiles, solventes y revestimiento de superficies, cocinas y procesos industriales. Incendios forestales y quema de biomasa.
	Compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles (que forman aerosoles orgánicos secundarios)	
	Dióxido de azufre (que forma partículas de sulfato)	Empresas eléctricas, transporte, minería y fundición, procesos industriales.
	Amoníaco (contribuye a la formación de sulfato de amonio y nitrato de amonio)	Agricultura y ganadería, con contribuciones mínimas de procesos industriales y transporte
	Óxidos de nitrógeno (que forman nitrato de amonio con el amoníaco)	Quema de todo tipo de combustibles fósiles y en menor grado procesos microbiológicos en suelos

La Figura 1.1 muestra que existen gases precursores que colaboran en la formación de PM<sub>2.5</sub>. Las partículas secundarias son generadas en reacciones atmosféricas por emisiones de gases precursores como dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) (NARSTO, 2004). Estos compuestos experimentan cambios continuos entre las fases gaseosas y condensadas lo que

resulta en un cambio de la composición del PM a lo largo del tiempo, pueden neutralizarse y formar sales como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Las sales de amonio formadas representan una parte significativa del material particulado fino<sup>2</sup> y ultrafino<sup>3</sup> (Kim et al., 2012).

La erosión por viento, el transporte y la deposición de partículas ocurre sobre más de un tercio de la superficie terrestre (Nordstrom & Hotta, 2004). Las partículas con diámetros mayores a  $10\ \mu\text{m}$  (es decir las partículas sedimentables) se depositan por efectos de la gravedad entre 1 y 2 días. Las partículas que se encuentran entre  $1$  y  $10\ \mu\text{m}$  se mantienen en suspensión por varios días. Las partículas finas pueden quedarse en la tropósfera durante algunas semanas, y en la estratósfera hasta 5 años. Estas partículas finas pueden ser transportadas grandes distancias por vientos antes de depositarse en el suelo o ser lavadas por lluvia o nieve (Girard, 2005).

### **3.1 Emisiones de polvo fugitivo**

Es de interés del estudio la estimación de las emisiones de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ . Específicamente se estudia el fenómeno de resuspensión de dichas partículas a la atmósfera en forma de polvo fugitivo. El Foro de Emisiones de Polvo (DEJF), realizado en el año 2004, definió al polvo fugitivo como material particulado que está o puede ser suspendido en la atmósfera como resultado de suspensión mecánica, explosiva o de viento de sólidos sintéticos, orgánicos o geológicos y no incluye el material particulado emitido por procesos de combustión (Countess Environmental, 2006). El polvo fugitivo en el aire ambiente esta compuesto principalmente de  $\text{PM}_{10}$ , y una parte menor la compone el  $\text{PM}_{2.5}$  (Pace, 2005).

---

<sup>2</sup> Diámetro menor a  $2.5\ \mu\text{m}$

<sup>3</sup> Diámetro menor a  $0.1\ \mu\text{m}$

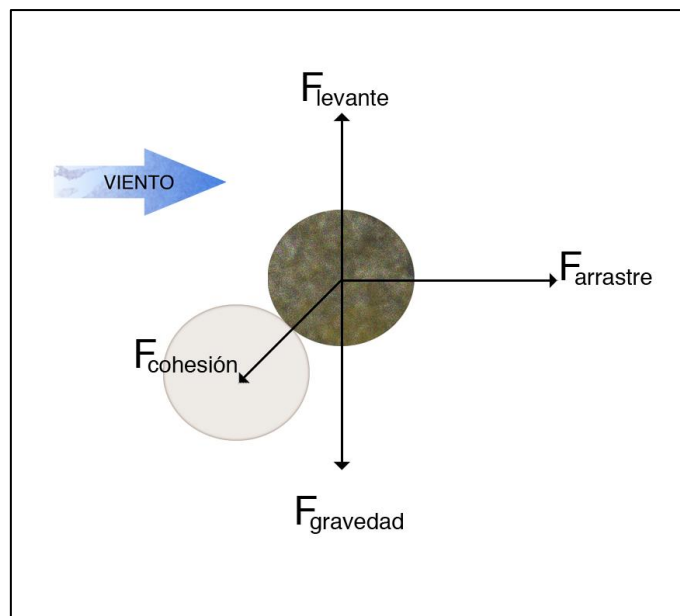
Las fuentes de polvo fugitivo se dividen en dos grandes categorías: fuentes de procesos y fuentes de polvo en zonas abiertas. Las fuentes de procesos están asociadas a operaciones industriales como demolición de rocas, acción que altera las características de un material determinado. Por otro lado las fuentes de polvo en zonas abiertas son las que generan emisiones por viento o maquinaria que está actuando sobre material expuesto (Countess Environmental, 2006). Estas últimas están asociadas al transporte, almacenamiento, transferencia de materiales de construcción como grava o cemento; además existen emisiones debido a la presencia de caminos no asfaltados, parqueaderos, grandes actividades de construcción y preparación de la tierra para la siembra. El manual *WRAP Fugitive Dust Handbook* divide a las fuentes de polvo en zonas abiertas en 9 categorías genéricas, (Countess Environmental, 2006):

1. Labrado y cosecha agrícola
2. Construcción y Demolición
3. Manejo de materiales
4. Carreteras pavimentadas
5. Carreteras no pavimentadas
6. Industria de Productos Minerales
7. Chorro abrasivo
8. Cría de ganado
9. Erosión eólica de áreas expuestas (Campos agrícolas, áreas abiertas, pilas de almacenamiento de materiales)

Los factores que controlan la erosionabilidad del suelo cambian con el tiempo, dependen del clima, del manejo y características del suelo (Hagen, 2010). El movimiento de partículas iniciado por el viento está controlado por las fuerzas que actúan sobre ellas.



Para una partícula en reposo, las fuerzas presentes son la gravedad (peso), la cohesión entre partículas y el esfuerzo cortante del viento sobre la superficie (Marticorena & Bergametti, 1995) y (Shao & Lu, 2000), como se observa en la Figura 3.1. El esfuerzo cortante está relacionado tanto a la fuerza de arrastre aerodinámico y la de levante aerodinámico (Shao & Lu, 2000). El peso y la cohesión entre partículas dependen del tamaño de la partícula y el esfuerzo cortante depende de la transferencia de la energía del viento hacia la superficie erosionable. Estas fuerzas son función de la velocidad de fricción en superficie llamada  $u^*$ .



**Figura 3.1: Fuerzas que intervienen en el movimiento de partículas**

Se define a la velocidad umbral de fricción  $u^*_t$  como la velocidad mínima requerida para iniciar el movimiento de partículas (Marticorena & Bergametti, 1995), o como la capacidad de una superficie a resistir la erosión eólica (Shao & Lu, 2000). Cuando  $u^* = u^*_t$ , las fuerzas aerodinámicas (viento) son superiores a las fuerzas retardantes (el peso y la cohesión) y se inicia el movimiento de partículas. La velocidad umbral de fricción está influenciada por una gran cantidad de factores como la textura, humedad, contenido de sales del suelo y la distribución de la vegetación, corteza y rugosidad de la superficie.

Bajo condiciones ideales,  $u^*_t$  puede ser expresado solamente en función del tamaño de partícula, esta relación es importante puesto que define el límite inferior de  $u^*_t$  para un determinado tipo de suelo (Shao & Lu, 2000). De manera general, para superficies sueltas y perturbadas  $u^*_t$  está controlada por la longitud de rugosidad aerodinámica local del suelo llamada  $z_0$ , que, a su vez, está en función de los elementos rugosos en la superficie como se presenta en la Ecuación 5 en el Capítulo IV sección 4.3 (Ginoux, 2004). La Tabla 3.2 presenta el  $z_0$  promedio para ciertos usos de suelo; es bajo para suelos descubiertos con gran potencial de erosión, mientras que para zonas boscosas es alto.

**Tabla 3.2: Longitud de rugosidad aerodinámica  $z_0$  típicos para diferentes usos de suelo (ENVIRON, 2006)**

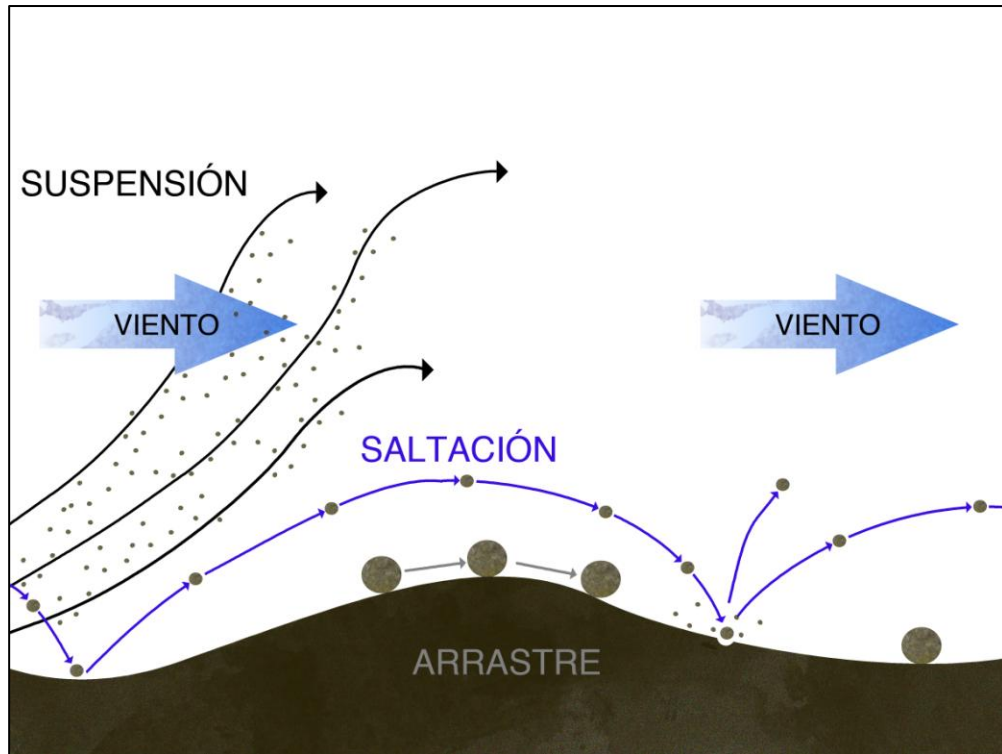
<b>Uso de suelo</b>	<b>Longitud de rugosidad aerodinámica <math>z_0</math> cm</b>
<b>Dunas de arena</b>	0.007
<b>Pasto</b>	2.3
<b>Plantaciones agrícolas</b>	2-4
<b>Bosques deciduos</b>	100-600
<b>Zona urbana</b>	100

Una vez que la partícula deja el reposo existen tres modos de movimiento presentados en la Figura 3.2 (Marticorena & Bergametti, 1995) y (Ginoux, 2004):

1. Suspensión: (partículas menores a 50  $\mu\text{m}$ ) Las partículas son transportadas hacia arriba por turbulencias.
2. Saltación: (partículas entre 50 y 500  $\mu\text{m}$ ) Las partículas saltan, se levantan de la superficie a determinada altura, pero debido a que el arrastre no es lo suficientemente fuerte para exceder el peso son llevadas de vuelta a la superficie.

La altura máxima de la capa de saltación es de alrededor de 1m.

3. Arrastre: (partículas de un tamaño mayor a  $500\ \mu\text{m}$ ) Son partículas muy pesadas para ser levantadas de la superficie. Ruedan y se arrastran a lo largo de la superficie.



**Figura 3.2: Movimientos de suspensión, saltación y arrastre de las partículas**

Las partículas que realizan el movimiento de saltación hacen hoyos en las superficies con partículas sueltas y una parte de ese material es propulsado hacia el flujo de partículas. Existen observaciones tanto en campo como en laboratorio que muestran que la concentración de polvo incrementa en presencia de saltación y que, sin las colisiones por saltación las superficies son bastante estables (Ginoux, 2004). Con esta evidencia se puede afirmar que el levantamiento de polvo sucede principalmente debido al movimiento de saltación (Ginoux, 2004), (Shao Y. , 2000) y (Marticorena & Bergametti, 1995). La cantidad total de material en movimiento está localizado cerca de la superficie en la capa de saltación y está representado por el flujo horizontal. Las partículas finas suspendidas

constituyen el flujo de polvo llamado flujo vertical, cuyo valor es estimado a partir del flujo horizontal (Marticorena & Bergametti, 1995).

### **3.2 Reservorios**

La resuspensión de material particulado en zonas abiertas está limitada por la cantidad de suelo erosionable disponible. Adicionalmente a la estabilidad y textura del suelo y los factores climatológicos, la cantidad de suelo presente tiene una gran influencia en el potencial de emisión de material particulado (Hagen, 2010) y (ENVIRON, 2006). La cantidad de suelo disponible en un espacio de tierra determinado es llamado *reservorio* y es clasificado como limitado o ilimitado. Esta división se debe principalmente al tiempo que toma a un reservorio en recargarse para que exista emisión durante un episodio de vientos.

Los reservorios se clasifican en términos del tipo de suelo, profundidad de la capa de suelo, el contenido de humedad y los parámetros meteorológicos como episodios de lluvia o nieve (ENVIRON, 2006). Para los reservorios limitados, la cantidad de material erosionable no estará disponible siempre, como sucede en una pila de almacenamiento de materiales de construcción. Para los reservorios ilimitados, la cantidad de material erosionable está disponible siempre, como sucede en zonas erosionadas o arenales. Se considera que la lluvia es el principal generador de perturbaciones: cada episodio de lluvia determina la cantidad de tiempo que le tomará al reservorio en recargarse (ENVIRON, 2006).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Software

El software que se utilizó en el proyecto como sistema de información geográfica es ArcView 3.2. Los mapas fueron procesados con una proyección geográfica en grados.

### 4.2 Categorías de interés

Para determinar las zonas de potencial erosión eólica se utilizó como base dos mapas de uso de suelo y división de ecosistemas: El primero se encuentra en el Geoportal del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, MAGAP, llamado *Uso de la Tierra y Cobertura Natural* en formato shapefile escala 1:250 000 del año 2008 (se observa en la Figura 4.1). El segundo mapa fue generado en el estudio *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador* y fue proporcionado por técnicos del Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, CONDESAN, en formato shapefile escala 1:100 000 (presentado en la Figura 4.3 y Tabla 4.1)

El mapa del MAGAP divide al territorio ecuatoriano en alrededor de 170 categorías de uso y cobertura de la tierra. En la Figura 4.1 se observa el mapa del MAGAP con las categorías sintetizadas (MAGAP, 2012). Se utilizó el árbol de decisión presentado en la Figura 4.2 para concluir si cada categoría de uso de suelo del mapa del MAGAP es o no sujeta a la estimación de las emisiones.

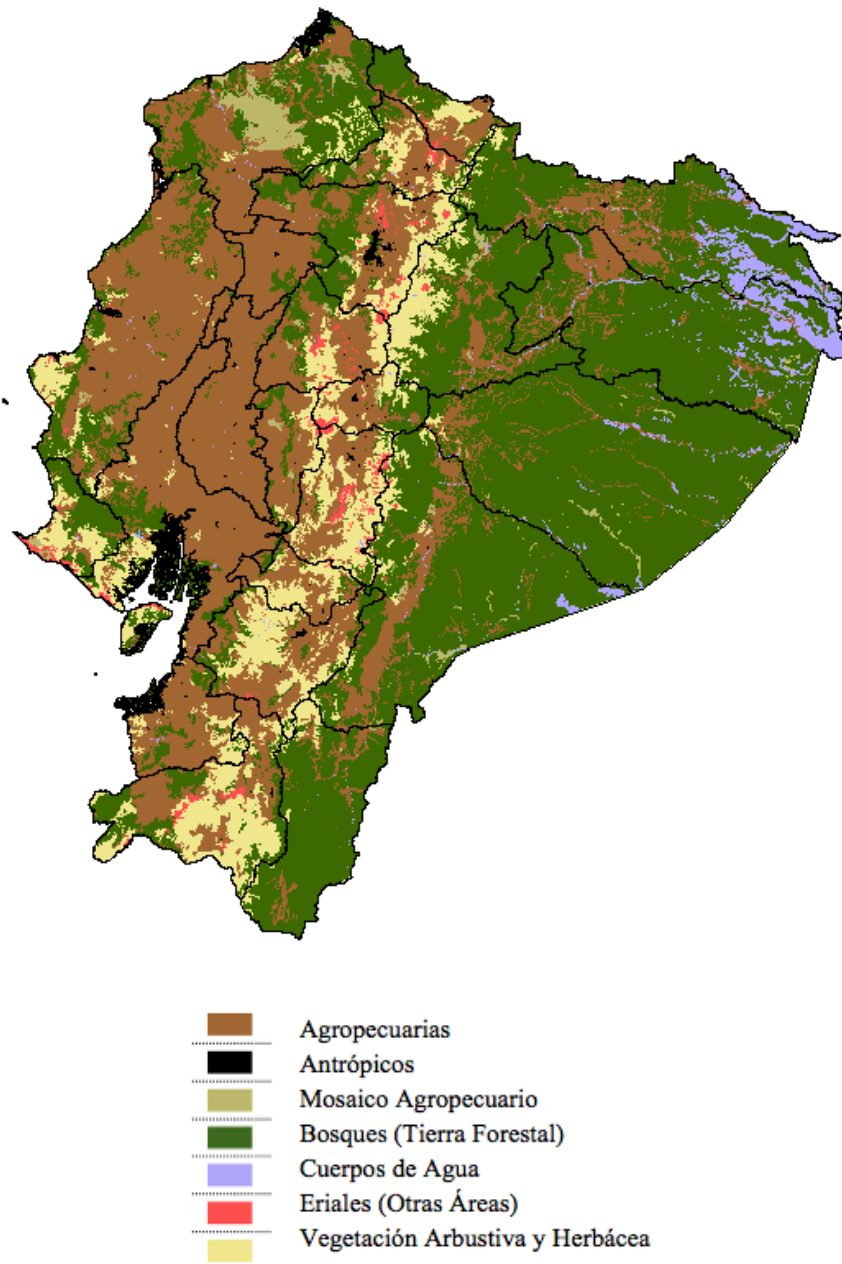
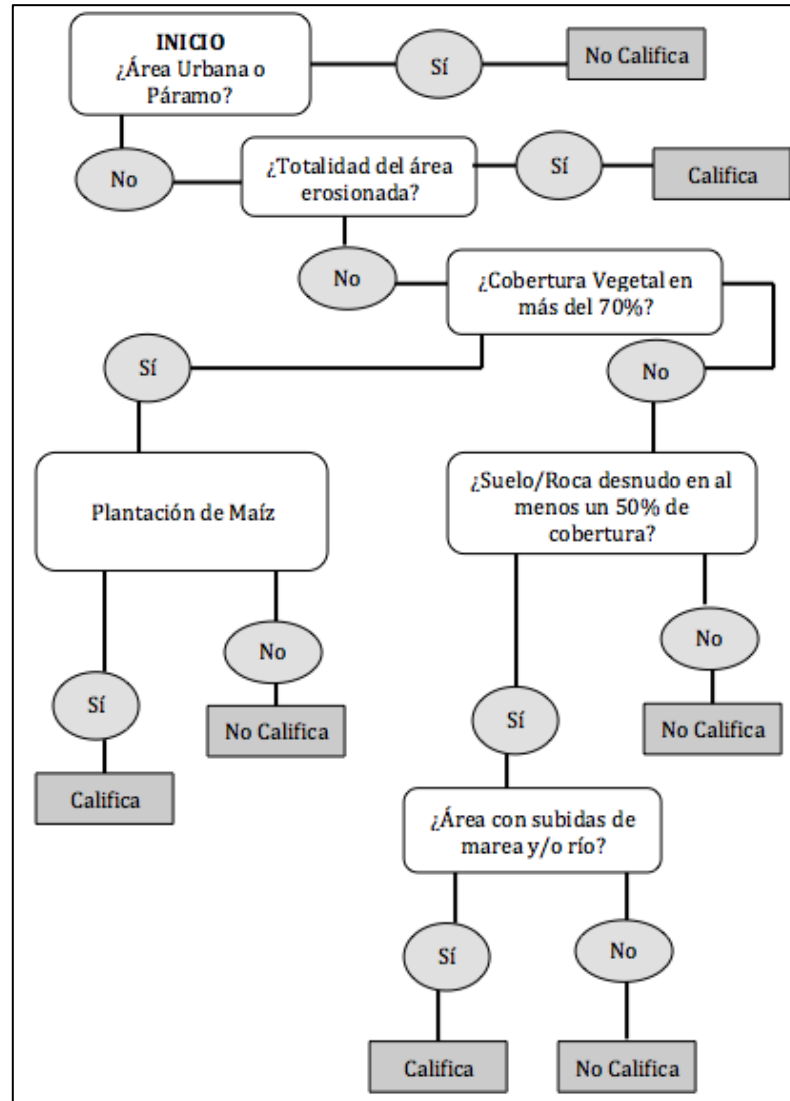


Figura 4.1: Mapa de usos de suelo del Ecuador (MAGAP, 2012)



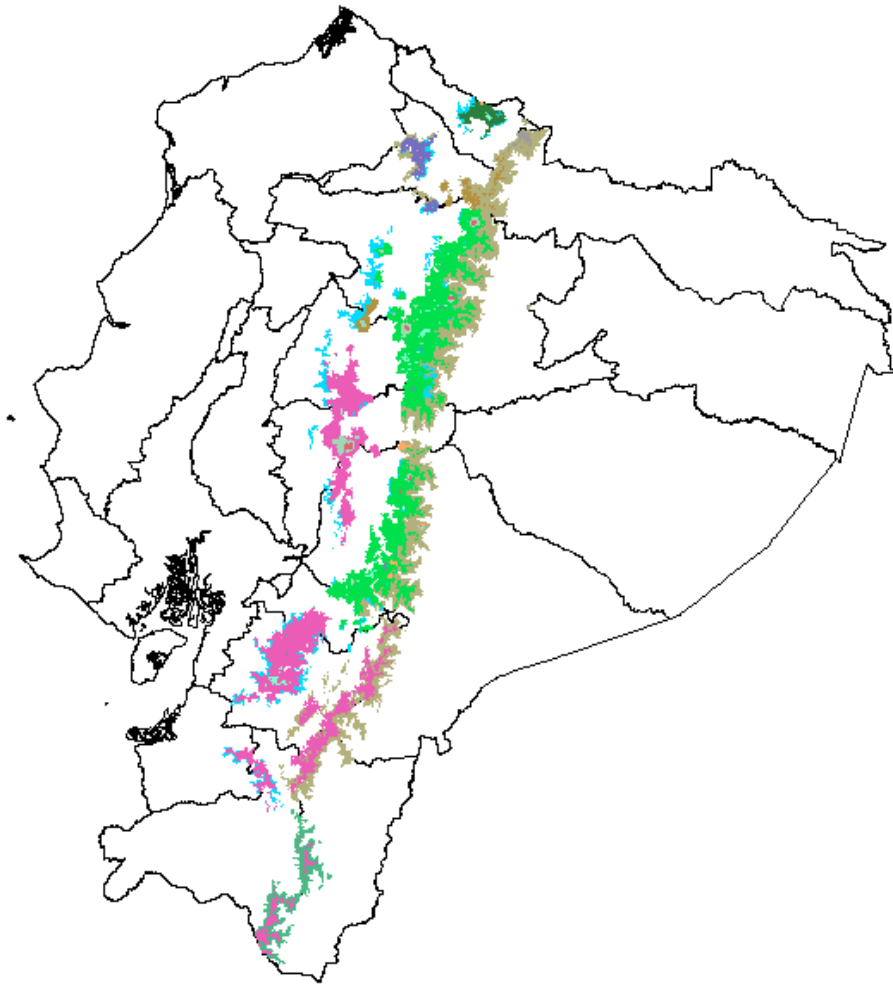
**Figura 4.2: Árbol de decisión para selección de categorías de interés del mapa del MAGAP**

El árbol de decisión toma en cuenta solamente las plantaciones de maíz, se dejó de lado otras plantaciones de cultivos andinos como la papa. El periodo de siembra de maíz sucede desde mediados de septiembre hasta noviembre y la cosecha se realiza alrededor de 225 días después, por lo que existe un periodo de 140 días de suelo desnudo (Caviedes, 2007). Se revisó la tabla de Biomasa Foliar de Especies Vegetales citada en la tesis de Viteri (2012), en donde se corrobora la información proporcionada por Caviedes (2007), y se especifica que la densidad de biomasa foliar en  $\text{g m}^{-2}$  es cero para los meses de abril, mayo, junio y julio para maíz lo que implica una ausencia de plantaciones en dichos meses

(Viteri, 2012). De acuerdo a estas dos fuentes se determinó que mayo, junio, julio y agosto son meses en los cuales los campos de maíz están descubiertos y serán tratados como suelo desnudo.


Toda la zona clasificada como páramo en el mapa de uso de suelo del MAGAP no fue considerada ya que se utilizó la clasificación específica presentada en el mapa del CONDESAN, en la Figura 4.3 y Tabla 4.1 se presenta el mapa con su división de ecosistemas. El presente estudio divide al páramo del Ecuador en 18 categorías, llamadas sistemas ecológicos y el principal parámetro de clasificación es la cobertura vegetal de los páramos. Los ecosistemas de páramo son mayoritariamente mixtos, por lo que en la leyenda para su representación cartográfica existen ecosistemas con “/” que representan a aquellos que predominan en términos de área sobre los otros, mientras que los representados con “-” significa que están presentes, pero se desconoce en que proporción de área (Beltrán et al., 2009). Los sistemas ecológicos que presentan características relevantes para la estimación de las emisiones se muestran en la Tabla 4.2.





**Figura 4.3:** Mapa de ecosistemas de páramo del Ecuador (Beltrán et al., 2009)

**Tabla 4.1: Ecosistemas de páramo, paleta del mapa de ecosistemas de páramo del Ecuador (Beltrán et al., 2009)**

	Bofedales Altimontanos Paramunos
	Bofedales Altimontanos Paramunos – Bofedales Altoandinos Paramunos
	Bosques Altimontanos Norte Andinos Siempreverdes – Bosques Montanos Pluviales de los Andes del Norte
	Bosques Altimontanos Norte Andinos Siempreverdes – Bosques Montanos Pluviales de los Andes del Norte/Bosques Altimontanos Norte Andinos de Polylepis
	Bosques Altimontanos Norte Andinos Siempreverdes / Bosques Altimontanos Norte Andinos de Polylepis
	Eriales
	Intervención
	Suelo Desnudo
	Cuerpo de Agua
	Nieve-Glaciares
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Arbustales y Frailejonales Altimontanos Paramunos
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos -Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Arbustales y Frailejonales Altimontanos Paramunos
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Pajonal Edafoixerófilo Altimontano Paramuno – Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
	Pajonal Altimontano y Montano Paramuno – Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Pajonal Edafoixerófilo Altimontano Paramuno – Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos – Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
	Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno – Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
	Vegetación Geliturbada y Edafoixerófila Subnival Paramuna
	Vegetación Geliturbada y Edafoixerófila Subnival Paramuna – Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos

**Tabla 4.2: Descripción de los sistemas ecológicos relevantes para el estudio (Beltrán et al., 2009)**

<b>Sistema Ecológico</b>	<b>Descripción</b>
Eriales	Zonas de alta erosión, incluyen rocas y lahares de volcanes
Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos	La vegetación crece en laderas escarpadas con suelos erosionados arenosos pedregosos y en zonas de deslizamientos. La vegetación es condicionada edáficamente por la erosión.
Vegetación Geliturbada y Edafoixerófila Subnival Paramuna	La vegetación crece en laderas abruptas cubiertas por depósitos coluvionares y con suelos geliturbados, entre 50 y 90% de suelo desnudo. El sustrato puede ser estable rocoso o inestable de gravas no consolidadas. “Esta zona es considerada como arenal” (Ortiz, 2012)
Suelo desnudo	Suelo completamente desnudo que descarta intervención (Ortiz, 2012)

El pajonal tiene secciones en las cuales la vegetación está caracterizada por estar expuesta a una erosión natural intensa y crece en laderas montañosas con suelos arenopedregosos o rocosos (Beltrán et al., 2009), además existen zonas particulares que reciben vientos fuertes de poca humedad que generan la zona llamada arenal (Podwojewski & Poulénard, 2000); sin embargo, el suelo del páramo es de baja erosividad como coinciden algunos estudios (Poulénard, J. et al., 2001), (Podwojewski, 1999) y (Josse, 2000).

Dado que la zona de pajonal es predominantemente mixta (esto se evidencia en la clasificación de sistemas ecológicos en donde no existe una sola categoría compuesta por un único sistema como se observa en la Figura 4.3) es difícil determinar qué sección de pajonal es de interés para el estudio. Se utilizó una cota de altura para la zona de pajonal tomando en cuenta las divisiones en forma de cinturones que se dan al páramo (Suárez, 2013).

La vegetación del páramo puede ser dividida en tres cinturones (Podwojewski & Poulenard, 2004):

1. Súper páramo (4200 – 4800 msnm)
2. Páramo propiamente dicho (3500 - 4200 msnm)
3. Sub páramo (3200 - 3500 msnm)

Varios científicos coinciden en esta división como (Jorgensen & Ulloa, 1994) y describen al súper páramo como una región de transición o ecotono, un ambiente periglacial, con vegetación que crece esparcida o en pequeños grupos sobre suelos rocosos, gruesos y arenosos entre la región de las nieves perpetuas y el páramo (León-Yáñez, 2000). Estas especies están adaptadas a heladas nocturnas, suelos pobres y alta radiación solar (Podwojewski & Poulenard, 2004).

Para seleccionar todo pajonal que se encuentre dentro del cinturón de súper páramo, se procedió a tomar una cota de altura de 4200 msnm. Todo pajonal que se encuentre por debajo de los 4200 msnm no fue considerado para la estimación.

Una vez seleccionadas las zonas de interés tanto del mapa MAGAP como del CONDESAN, se juntaron ambos mapas. Se utilizó una malla base o dominio de 640 000 celdas, 800 filas y 800 columnas con celdas de 1 km de lado, que cubren el territorio continental ecuatoriano (ver Figura 4.8 en la sección 4.4), a cada celda se le asignó la categoría de ecosistema proveniente de los mapas MAGAP y CONDESAN, además de otros parámetros como la división política por provincias y la altura.

Los usos de suelo y ecosistemas que serán considerados en el presente estudio se muestran a continuación tal como son nombrados tanto en el mapa de *Uso de la Tierra y Cobertura Natural* del MAGAP como en el mapa de *Distribución Espacial y Sistemas Ecológicos* del CONDESAN:

- Área Erosionada

- Afloramiento Rocoso – Mina – Grava
- Maíz
- Maíz en áreas con fuertes procesos erosivos
- Maíz en áreas en proceso de erosión
- Maíz en áreas erosionadas
- Suelo Desnudo
- Zonas Eriales
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno - Arbustales y Frailejonales Altimontanos Paramunos
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno - Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno - Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno - Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno - Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos - Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno-Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno - Arbustales y Frailejonales Altimontanos Paramunos
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno - Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno-Pajonal Edafoixerófilo Altimontano Paramuno - Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
- Pajonal Altimontano y Montano Paramuno-Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno - Pajonal Edafoixerófilo Altimontano Paramuno - Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos - Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
- Pajonal Arbustivo Altimontano Paramuno - Arbustales Bajos y Matorrales Altoandinos Paramunos
- Vegetación Geliturbada y Edafoixerófila Subnival Paramuna
- Vegetación Geliturbada y Edafoixerófila Subnival Paramuna – Matorrales Edafoixerófilos en Cojín Altoandinos Paramunos

Para simplificar la nomenclatura cartográfica y otros parámetros del modelo de emisiones, ciertas categorías de interés fueron juntadas y llamadas de la forma presentada en las Figuras 4.4 – 4.7. Las categorías de interés se encuentran mayoritariamente en la

sierra, con excepción de la zona erosionada en la provincia de Santa Elena y las plantaciones de maíz en Guayas. Los afloramientos rocosos se encuentran cerca de nevados y montañas importantes, corresponden a zonas conocidas como arenales y coinciden en cercanía con la vegetación geliturbada y de pajonal, estas zonas son características por tener ambientes periglaciares de páramo, vegetación escasa y arenales por encima de los 4200 msnm (Jorgensen & Ulloa, 1994), (León-Yáñez, 2000) y (Podwojewski & Poulenard, 2004). Las zonas erosionadas al norte de Imbabura y sur de Carchi corresponden a los pueblos de Ambuquí hasta Pimampiro, entre Ibarra y Mira. Al norte de Pichincha existen zonas erosionadas en San Antonio de Pichincha, Tabacundo y Guayllabamba; para el centro de Cotopaxi estas corresponden a Pujilí, Latacunga y los alrededores del Quilotoa. Las zonas erosionadas en Riobamba corresponden al callejón entre Guamote, Palmira y Alausí. Las plantaciones de maíz coinciden en zonas agrícolas andinas, así como costeras. La zona llamada eriales, coincide con las faldas de los volcanes Tungurahua y Sangay, donde existe gran cantidad de ceniza debido a erupciones constantes.

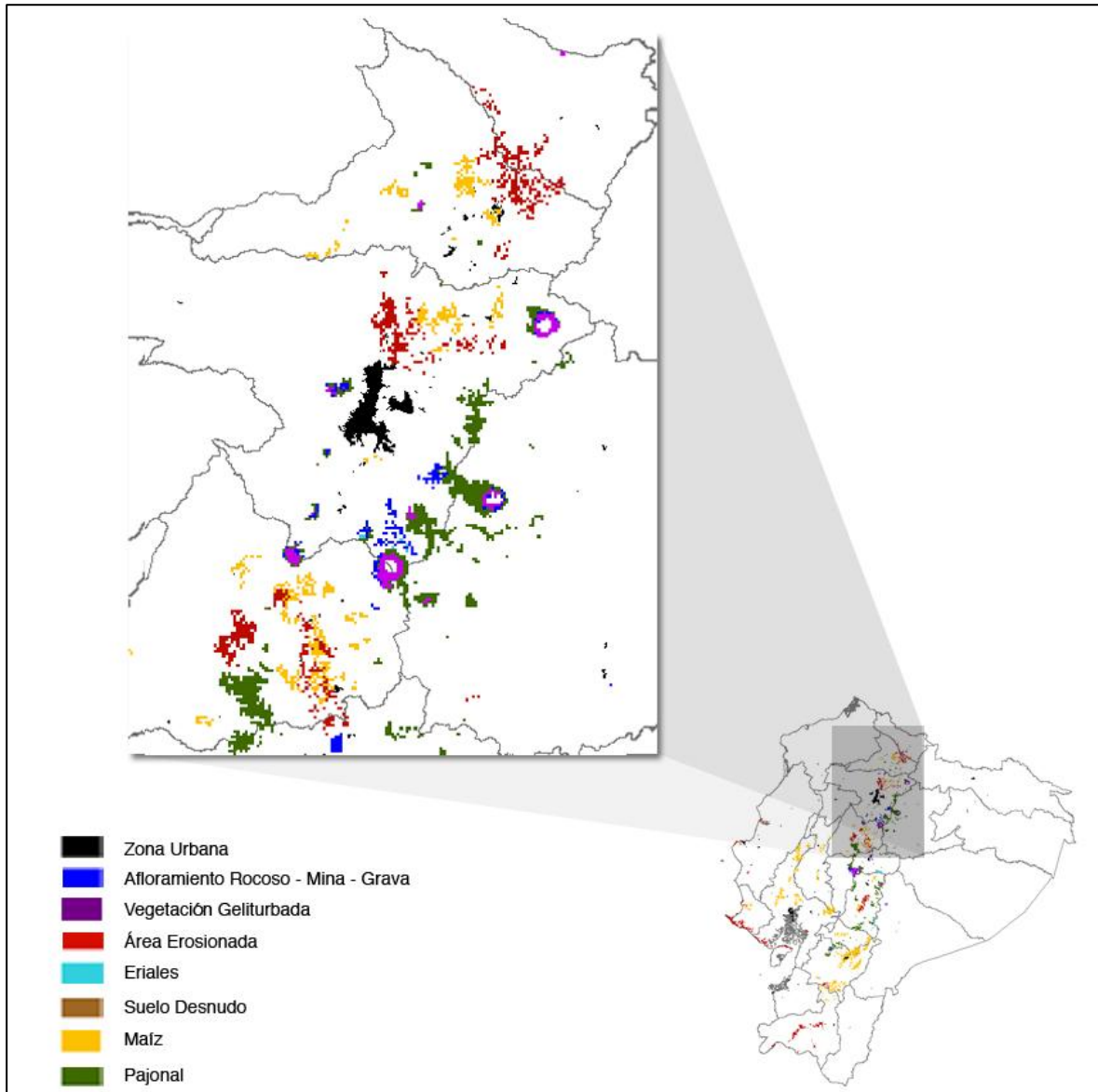
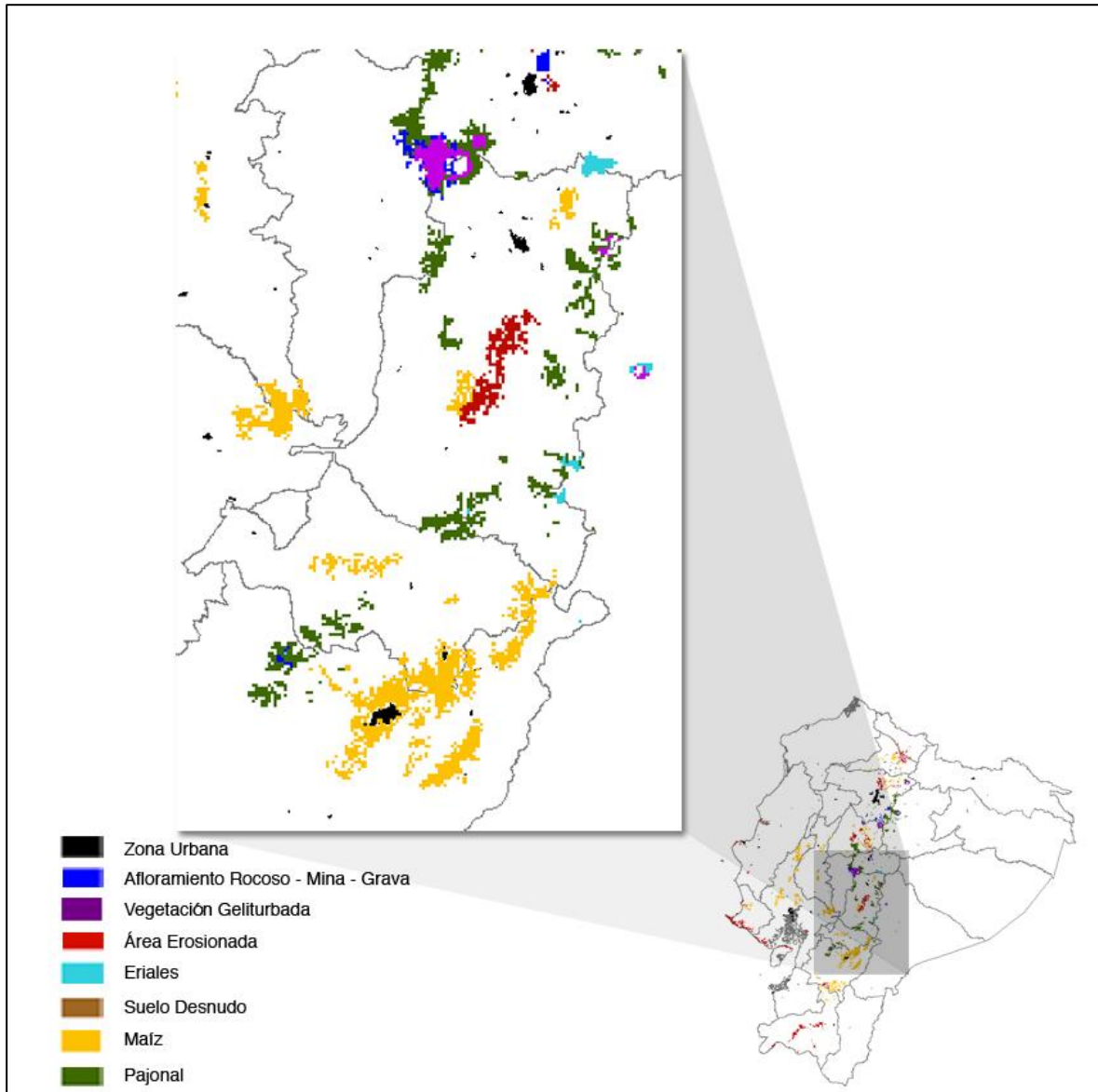
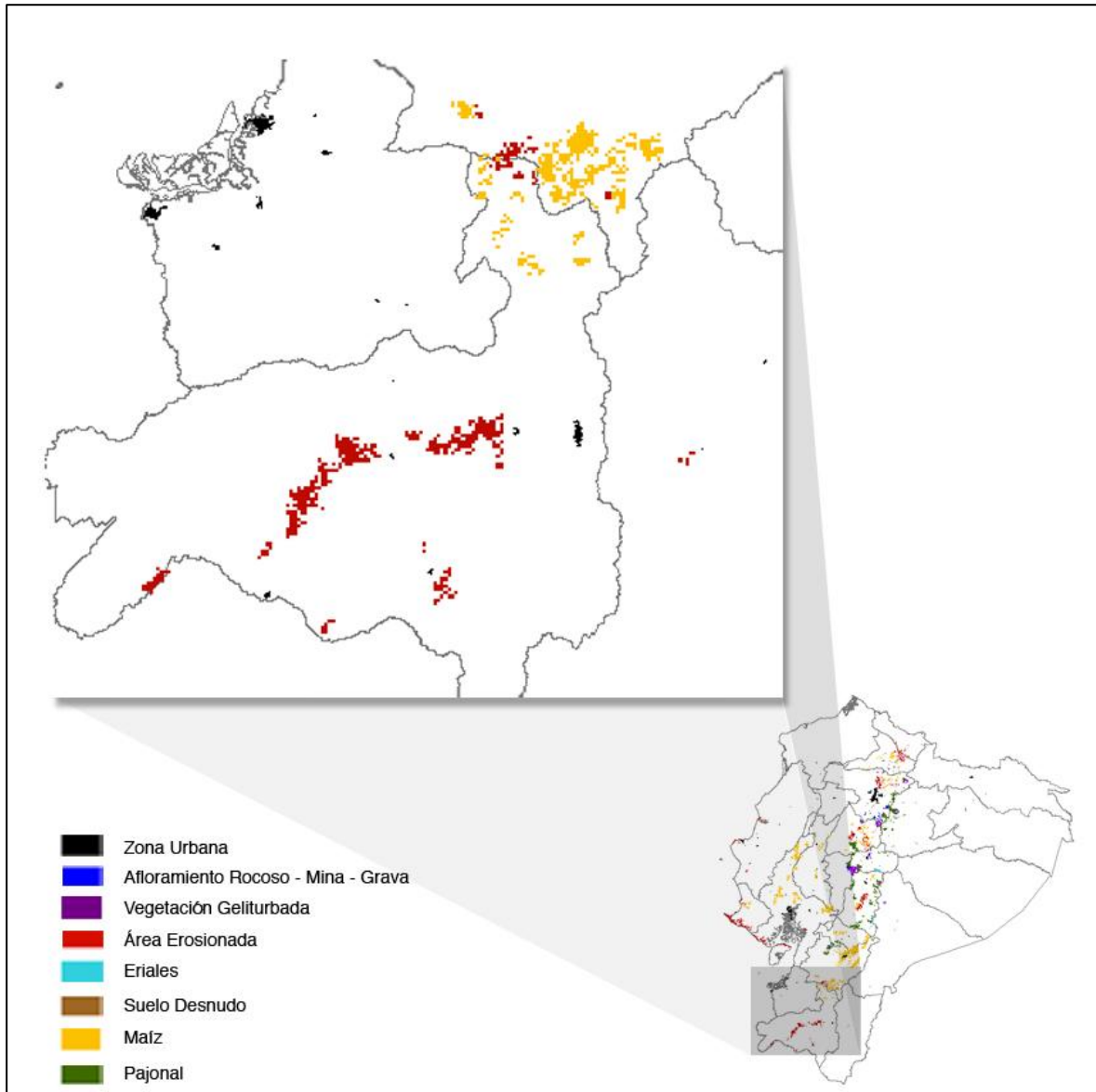


Figura 4.4: Categorías de interés, región sierra Norte

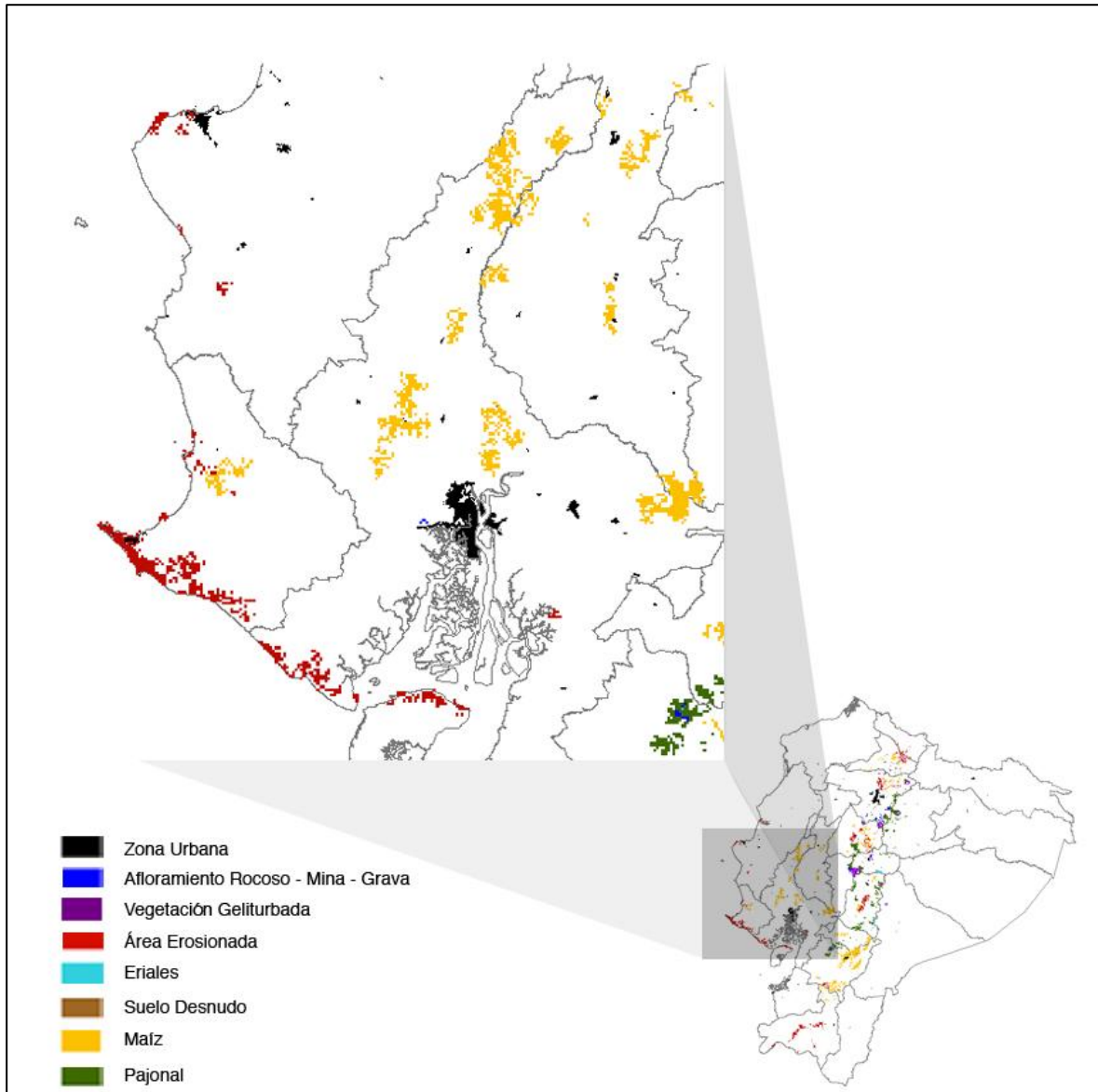


**Figura 4.5: Categorías de interés, región sierra centro-Sur**





**Figura 4.6: Categorías de interés, región sierra Sur**



**Figura 4.7: Categorías de interés región costa**

### 4.3 Modelo de Emisiones

El modelo de emisiones está basado en aquel presentado en el informe *WRAP Fugitive Dust Handbook* (Countess Environmental, 2006) que a su vez está adaptado a partir de la sección 13.2.5, de la Compilación de la U. S. EPA de *Factores de Emisión de Contaminantes del Aire (AP-42)* (USEPA, 1995). Existen secciones del modelo basadas tanto en el informe *Fugitive Wind Blown Dust Emissions and Model Performance Phase II* realizado por ENVIRON (2006) como en el modelo presentado en el inventario de emisiones para Cuenca (EMOV, 2011).

Las emisiones mensuales de  $PM_{10}$  de un determinado mes se estiman mediante la Ecuación 1 (EMOV, 2011):

$$E_m^k = PM_{10}FE \times \text{Área} \quad (1)$$

Donde,

$E_m^k$  = Emisión mensual de  $PM_{10}$  en la celda k expresada en  $g \text{ mes}^{-1}$

k = celda del dominio

m = mes del año

$PM_{10}FE$  = flujo de emisión de  $PM_{10}$  expresado en  $g \text{ m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$

Área = área de la celda del dominio de emisiones  $1 \text{ km}^2$

El factor de emisión de  $PM_{10}$  generado por viento a partir de una mezcla de material superficial erosionable y no erosionable se estima mediante la Ecuación 2 de la siguiente manera (Countess Environmental, 2006):

$$PM_{10}FE = 0,5 \sum_{i=1}^N P_i \quad (2)$$

Donde,

$PM_{10}FE$  = factor de emisión para material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$  medido en  $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$

$N$  = número de perturbaciones por mes

$P_i$  = potencial de erosión correspondiente a la milla más rápida para el período  $i$  entre perturbaciones expresado en  $\text{g m}^{-2}$

El potencial de erosión para una superficie seca y expuesta se puede definir mediante la Ecuación 3 (Countess Environmental, 2006):

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*) \quad (3)$$

Donde,

$P$  = potencial de erosión expresado en  $\text{g m}^{-2}$        $P = 0$  para  $u^* \leq u_t^*$

$u^*$  = velocidad de fricción expresada en  $\text{m s}^{-1}$

$u_t^*$  = velocidad umbral de fricción expresada en  $\text{m s}^{-1}$

58 = factor empírico expresado en  $\text{g s}^2 \text{m}^{-4}$

25 = factor empírico expresado en  $\text{g s m}^{-3}$

La información de velocidad umbral de fricción  $u_t^*$  se obtuvo a partir de la Tabla 2-1 del informe (ENVIRON, 2006), la Tabla 4.3 presenta los valores de velocidad de fricción umbral promedio asumido para las categorías de interés,

**Tabla 4.3: Velocidad de fricción umbral promedio para las categorías de interés**

<b>Zona</b>	<b><math>u^*_t</math> m s<sup>-1</sup></b>
<b>Área Erosionada</b>	0.32
<b>Afloramiento Rocoso</b>	0.382
<b>Eriales</b>	0.32
<b>Maíz</b>	0.55
<b>Maíz en áreas erosionadas</b>	0.366
<b>Maíz en áreas con fuertes procesos erosivos</b>	0.412
<b>Maíz en áreas en proceso de erosión</b>	0.435
<b>Pajonal</b>	0.412
<b>Vegetación Geliturbada</b>	0.382
<b>Suelo Desnudo</b>	0.32

El perfil de la velocidad del viento en la capa límite superficial tiene una distribución logarítmica, como se indica en la Ecuación 4 (Marticorena et al., 1997):

$$u^* = \frac{\kappa u(z)}{\ln z - \ln z_0} \quad (4)$$

Donde,

$\kappa$  = Constante de von Karman 0.4

$u(z)$  = velocidad del viento expresada en m s<sup>-1</sup> para la altura  $z$

$u^*$  = velocidad de fricción del esfuerzo cortante del viento en la superficie expresada en m s<sup>-1</sup>

$z$  = altura por encima de la superficie de estudio: 10 m

$z_0$  = altura de rugosidad expuesta a la superficie expresada en m

Este modelo matemático requiere utilizar *la milla más rápida*, para  $u(z)$ , que representa la velocidad de viento correspondiente a toda una milla de movimiento del viento que ha pasado por el anemómetro de contacto (USEPA, 2006). Debido a la ausencia

de datos sobre la milla más rápida, se utilizaron los datos de velocidad promedio de viento disponibles.

La altura de rugosidad expuesta a la superficie  $z_0$  puede ser calculada mediante la Ecuación 5 (ENVIRON, 2006):

$$z_0 = \frac{\ln u^*_{*t} - \ln 0.3}{7.22} \quad (5)$$

Donde,

$z_0$  = altura de rugosidad expuesta a la superficie cm

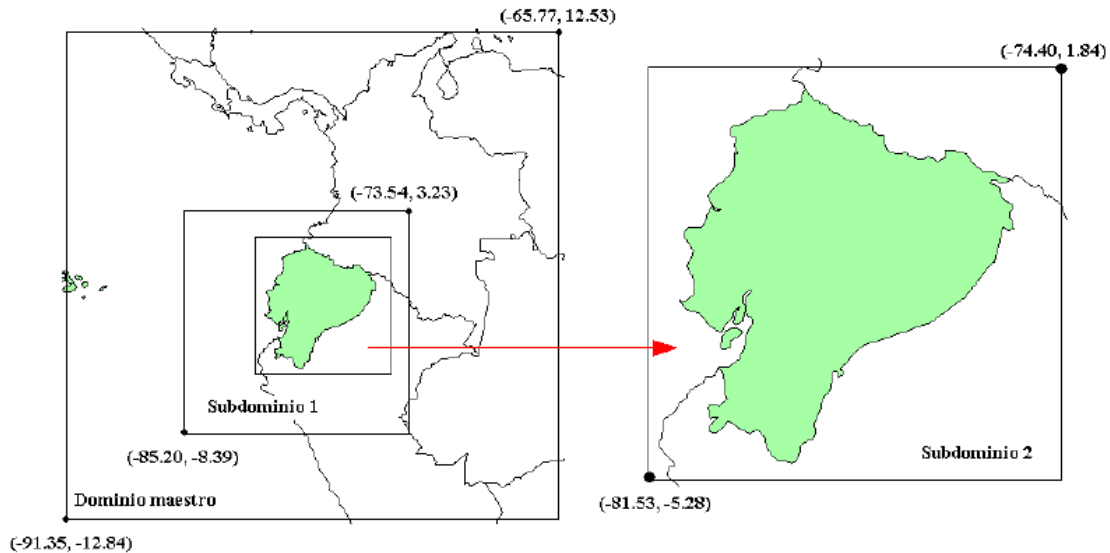
Se introdujo la Ecuación 5 en la Ecuación del perfil de velocidad de viento 4. Una vez obtenido el valor de  $u^*$  y  $u^*_{*t}$  se procedió a reemplazar en las Ecuaciones 3, 2 y 1 en ese orden. En la Ecuación 2 el número de perturbaciones al año considera solamente perturbaciones por precipitación, ver sección 4.5 Precipitación.

De acuerdo con el informe WRAP Fugitive Dust Handbook la relación entre  $PM_{2.5}/PM_{10}$  para emisiones fugitivas por viento es de 0.15. Por lo que se asumió que las emisiones de  $PM_{2.5}$  son el 15% del  $PM_{10}$  (Countess Environmental, 2006).

#### 4.4 Vientos

La información velocidad de viento a 10 m sobre la superficie del territorio ecuatoriano utilizada en este estudio, fue aquella generada como parte del estudio *Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF)* por Parra (2012). En el estudio realizado por Parra (2012) se realizaron simulaciones para el año 2010, utilizando el modelo Advanced Research WRF (ARW) versión 3.2, con un dominio maestro y dos subdominios anidados. En el segundo dominio, se incluyó a todo el territorio continental

del Ecuador y se formó una malla de 199 filas y 199 columnas con celdas de 4 km de lado como se presenta en la Figura 4.8 (Parra, 2012).



**Figura 4.8: Dominios de simulación meteorológica para el territorio continental del Ecuador (Parra, 2012)**

La velocidad de viento a 10 m sobre la superficie se obtuvo a partir de los vectores  $u$  y  $v$  para la malla de 4 km, mediante la Ecuación 6,

$$M = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

Donde,

$M$ = Magnitud del viento expresada en  $\text{m s}^{-1}$

$u$ = velocidad del viento en el eje  $x$

$v$ = velocidad del viento en el eje  $y$

El presente estudio requiere la información de velocidad de viento en celdas de 1km. Para el cálculo de las emisiones se afinaron los resultados de la velocidad de viento, realizando una interpolación de los valores y trabajando con una malla de 800 x 800

celdas, que tienen 1 km de lado. Los métodos de interpolación que ofrece Arcview 3.2, son el IDW y Spline.

IDW (Inverse Distance Weight) es un método determinístico que genera superficies en base al grado de similaridad de las celdas. Es conocido también como método de ponderación por distancia, donde el valor en un punto específico se calcula mediante una media ponderada de los puntos de influencia seleccionados. Este método no genera datos que se encuentren fuera del rango de valores de los datos de entrada y crea mapas aterrazados, es decir que el cambio entre polígonos de diferente valor es bastante radical y no suavizado. La superficie generada por este tipo de interpolación no pasa por ninguno de los puntos de datos de entrada (Olaya, 2010) y (Childs, 2004).

El método Spline es un método determinístico al igual que el IDW (Childs, 2004). La interpolación con Spline consiste en la aproximación de una función por medio de series de polinomios sobre intervalos o tramos adyacentes con derivadas continuas en el punto final de dichos tramos. La interpolación se desarrolla por un proceso iterativo, y toma en cuenta dos consideraciones sobre la superficie (Naoum & Tsanis, 2004):

1. Debe pasar exactamente por los datos de entrada
2. Debe tener una mínima curvatura.

Este método puede ser utilizado cuando los cambios en la superficie dentro de una distancia horizontal corta no son grandes, porque de ser así los valores estimados rebasarían los valores de entrada (Childs, 2004).

Para escoger el método adecuado de interpolación de los datos de velocidad de viento se utilizaron los datos de viento para celdas de 4 km<sup>2</sup> obtenidos para las 10:00 del día medio de agosto, que corresponde a la hora y mes en el que se obtuvo el valor mayor de velocidad de viento en el año. Se realizaron pruebas consecutivas utilizando los métodos IDW y Spline, se tomó nota de todas las características de interpolación y



posteriormente se comparó la celda de mayor velocidad de viento en los datos originales (malla de 4 km<sup>2</sup>) y con la celda de mayor velocidad de viento en la superficie interpolada.

Los criterios para escoger el método fueron:

1. La celda con mayor velocidad de viento de la superficie interpolada se debe aproximar tanto en distancia como en magnitud a aquella del valor original.
2. Todas las celdas deben tener valores entre 0 y 16.57 m s<sup>-1</sup>. Es decir que no existan valores negativos ni mayores al valor máximo de los datos de entrada.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se detallan las pruebas realizadas, con sus respectivos datos de entrada.

**Tabla 4.4: Pruebas de interpolación de velocidad de viento utilizando el método IDW**

<b>Prueba</b>	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>
<b>Número de Vecinos</b>	12	12
<b>Poder</b>	3	2
<b>Barreras</b>	No	No
<b>Intervalo de contornos</b>	0.1	0.1
<b>Resultado</b>	Tiempo de cálculo mucho mayor a 15 minutos	Punto con mayor velocidad ligeramente diferente a aquel de los datos de entrada de la malla de 4 km <sup>2</sup> . No valores negativos.

**Tabla 4.5: Pruebas de interpolación de velocidad de viento utilizando el método Spline**

<b>Prueba</b>	<b>Prueba 3</b>	<b>Prueba 4</b>
<b>Peso</b>	0.1	0.1
<b>Número de Puntos</b>	12	12
<b>Tipo</b>	Regularizado	Tensión
<b>Intervalo de contornos</b>	0.1	0.1
<b>Resultado</b>	Punto con mayor velocidad 16.5 m s <sup>-1</sup> , que coincide en ubicación con el punto máximo de los datos de entrada de la malla de 4 km <sup>2</sup> . Se obtienen valores negativos para ciertas celdas.	Punto con mayor velocidad 16.2 m s <sup>-1</sup> no coincide en ubicación con el punto máximo de los datos de entrada de la malla de 4 km <sup>2</sup> . Se obtienen valores negativos para ciertas celdas.

Se escogió la opción utilizada en la Prueba 2 por cumplir con los criterios para escoger el método adecuado de interpolación.

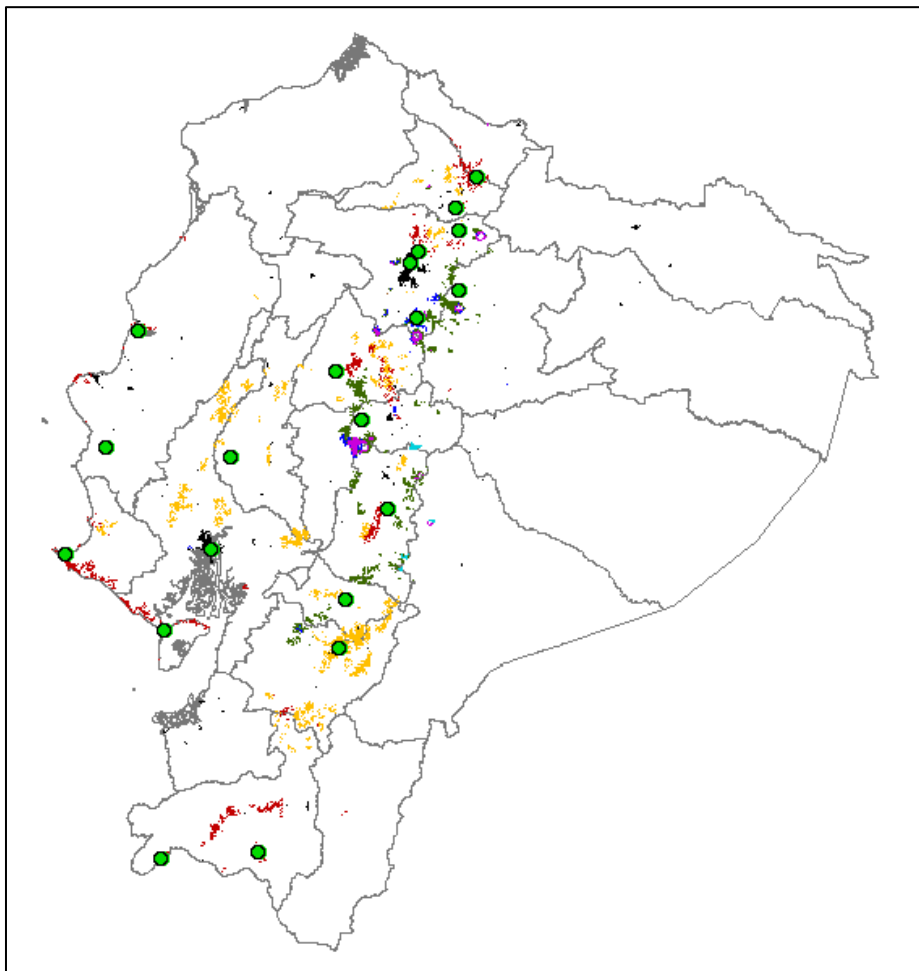
Una vez definida la alternativa de interpolación, se desarrollaron 24 interpolaciones que corresponden a las 24 horas del día típico representativo de cada mes. En total se desarrollaron 288 interpolaciones. El procesamiento se realizó en 4 estaciones de trabajo y cada interpolación tomó alrededor de 20 minutos.

## 4.5 Precipitación

La acción erosiva del viento depende de su velocidad; sin embargo, la humedad de la superficie afecta a la velocidad umbral de fricción, factor del que depende el potencial de erosión. La velocidad umbral de fricción disminuye en suelos secos y aumenta en suelos

húmedos. Estos cambios se deben a la presencia o ausencia de puentes líquidos, y por las fuerzas de cohesión entre partículas debido a capilaridad (Ravi et al., 2006). Existen modelos que analizan a nivel de partícula la cohesión debido a la presencia de humedad; sin embargo, resulta muy complejo incorporar la influencia de la lluvia y riego en el modelo de emisiones.

El estudio de ENVIRON (2006) presenta una manera bastante pragmática de obtener los días de emisión simplificando la clasificación del reservorio. Los datos básicos para definir el número de días de emisión corresponden a la precipitación diaria durante el año 2010. Se realizó el pedido de dicha información al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI, entidad que posee datos meteorológicos de una red de alrededor de 260 estaciones a nivel nacional. La información provista consistió en valores de precipitación diarios para el año 2010 para 20 estaciones repartidas de manera homogénea sobre las áreas de cálculo de emisión por resuspensión eólica, como se observa en la Figura 4.9. En la Tabla 4.6 se presentan los nombres de las estaciones con sus respectivas provincias.



**Figura 4.9: Ubicación espacial de las estaciones del INAMHI consideradas en el estudio**

**Tabla 4.6: Nombres de estaciones del INAMHI consideradas en el estudio y su ubicación**

<b>Nombre</b>	<b>Provincia</b>	<b>Nombre</b>	<b>Provincia</b>
Ambuqui	Imbabura	Cañar	Cañar
Topo-Imbabura	Imbabura	Aeropuerto Lamar Cuenca	Azuay
Cayambe	Pichincha	Cariamanga	Loja
Calderón	Pichincha	Zapotillo	Loja
INAMH-Q	Pichincha	Julcuy	Manabí
Papallacta	Napo	Vinces	Los Ríos
Loreto Pedregal	Cotopaxi	PUCE-Bahía	Manabí
Pilaló	Cotopaxi	Guayaquil (U. Estatal)	Guayas
Calamaca	Tungurahua	Santa Elena	Santa Elena
Cebadas	Chimborazo	Isla Puná	Guayas

De las 20 estaciones con las que se trabajó, 8 no tienen información de hasta dos meses del año 2010 y la estación del Aeropuerto Mariscal Lamar en Cuenca contiene información del año 2011 en su totalidad. Para el caso de las 8 estaciones se utilizó la información del año 2011 de los meses o días ausentes del 2010. La información de la estación meteorológica del Aeropuerto Lamar se obtuvo gracias a la Dirección Nacional de Aviación Civil (DGAC) (información proporcionada para otro estudio de la Universidad San Francisco de Quito).

El criterio para determinar el número de días de emisión por mes está definido en ENVIRON (2006) (a partir de la Tabla 3-1 y 3-2 en dicho informe), se utilizó un promedio del número de días para primavera/otoño para cada tipo de suelo. Se asume un valor de 4 días para episodios de lluvia mayores a 50.8 mm y de 2 días para episodios de lluvia menores a 50.8 mm (Barnard, 2003).

En base a esta premisa se procedió a determinar el número de días de emisión para cada mes. Por ejemplo, si un día tiene 0 mm de lluvia cuenta como día de emisión, si un día tiene 15 mm de lluvia entonces se debe esperar 2 días hasta contarlos de nuevo como días de emisión. Si es que un día tiene 60 mm de lluvia y los días siguientes no presentan lluvia entonces se debe esperar 4 días para contar otro día como emisión, a pesar de que dichos días no hayan presentado episodios de lluvia. A continuación se presenta la Tabla 4.7 con los resultados de días de emisión por mes para cada estación con una suma de los valores anuales.

**Tabla 4.7: Valores de días de emisión o número de perturbaciones por mes para cada estación para el año 2010**

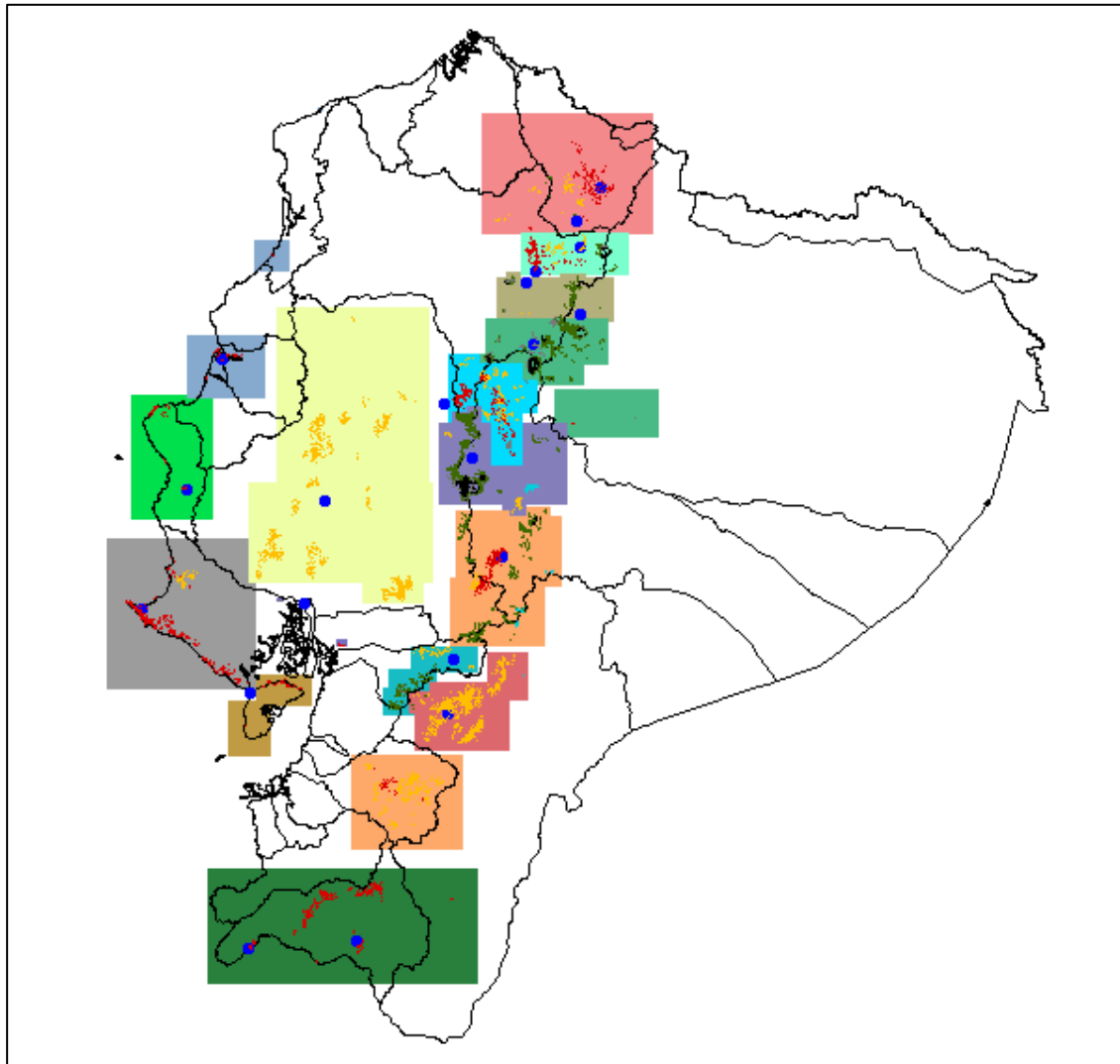
Nombre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total Anual
Pilaló	0	0	0	0	3	5	5	20	5	3	11	1	53
Papallacta	11	5	6	1	6	1	3	4	5	6	3	9	60
Aeropuerto Lamar Cuenca	7	3	7	0	6	2	2	13	3	10	9	0	62
Calamaca	13	4	8	10	6	2	8	4	13	15	5	4	92
Cañar	21	4	5	1	8	4	7	6	9	12	14	4	95
INAMHI Q	21	8	10	4	11	6	9	16	3	8	8	8	112
Topo-Imbabura	22	20	21	1	7	8	11	9	9	8	0	0	116
Loreto Pedregal	23	6	12	4	13	7	11	22	11	9	4	0	122
Cebadas	28	16	12	6	8	1	10	12	11	14	14	2	134
Cayambe	28	18	20	4	18	9	12	25	12	9	4	6	165
Calderón	27	18	15	6	16	17	15	20	4	22	9	8	177
Vinces	3	0	0	2	26	19	20	28	26	31	18	6	179
Bahía PUCE	9	0	3	0	19	17	18	27	28	29	27	9	186
Guayaquil UEstatal	5	1	0	4	24	18	17	27	30	31	27	9	193
Cariamanga	10	7	7	6	14	20	25	31	17	20	23	16	196
Ambuqui	25	18	21	8	15	14	23	27	17	15	4	15	202
Julcuy	5	2	1	7	20	30	27	28	28	30	24	8	210
Zapotillo	7	8	0	9	20	27	29	31	30	28	30	20	239
Santa Elena	28	8	13	14	30	25	20	22	26	25	22	22	255
Isla Puná	31	7	11	11	31	30	31	31	30	31	27	31	302
<b>Promedio</b>	<b>16.2</b>	<b>7.65</b>	<b>8.6</b>	<b>4.9</b>	<b>15.05</b>	<b>13.1</b>	<b>15.15</b>	<b>20.15</b>	<b>15.85</b>	<b>17.8</b>	<b>14.15</b>	<b>8.9</b>	<b>157.5</b>

Existe coherencia espacial y temporal en los resultados obtenidos de días de emisión o número de perturbaciones. Las estaciones que presentan mayor cantidad de días de emisión son: Isla Puná, Santa Elena, Zapotillo, Cariamanga y Julcuy, zonas conocidas por ser secas en la mayor parte del año. Por otro lado, las estaciones con menos días de emisión son: Papallacta, Pilaló y Cuenca, zonas conocidas por tener muchos episodios de lluvia al año.

#### **4.5.1 Asignación de número de perturbaciones a celdas de interés**

Las celdas de interés, como fueron descritas anteriormente, son aquellas donde el suelo es mayoritariamente desnudo, erosionado con potencial de erosión eólica. Las estaciones del INAMHI de las que se dispone información se encuentran cerca de las categorías de interés. A continuación se presenta el método realizado para asignar los días de emisión o número de perturbaciones a cada celda de emisiones:

En el software ArcView 3.2 se desplegó la información de zonas de interés, la ubicación de las estaciones y la división espacial de las cuencas del Ecuador. Se identificó 16 secciones de territorio con características comunes –zona erosionada, pajonal etc- con cercanía a una o dos estaciones meteorológicas; y que se encuentren en la misma cuenca hidrográfica. Para cada sección de territorio se tomó el valor de la estación presente y, en el caso de que hubiera varias estaciones se tomó el valor promedio de las mismas. La Figura 4.10 presenta la distribución de las secciones de territorio y estaciones correspondientes.



1	Ambuquí + Topo Imbabura
2	Cayambe + Calderón
3	Inamhi Q + Papallacta
4	Loreto Pedregal
5	Pilalo
6	Calamaca
7	Cebadas
8	Cañar
9	Aeropuerto Lamar
10	Zapotillo + Cariamanga
11	Isla Puná
12	Guayas U. Estatal
13	Santa Elena + Isla Puná
14	Vinces
15	Julcuy
16	Bahía PUCE

**Figura 4.10: Asignación de información de estaciones INAMHI a categorías de interés por secciones de territorio (división territorial por cuencas hidrográficas)**



## 5. RESULTADOS

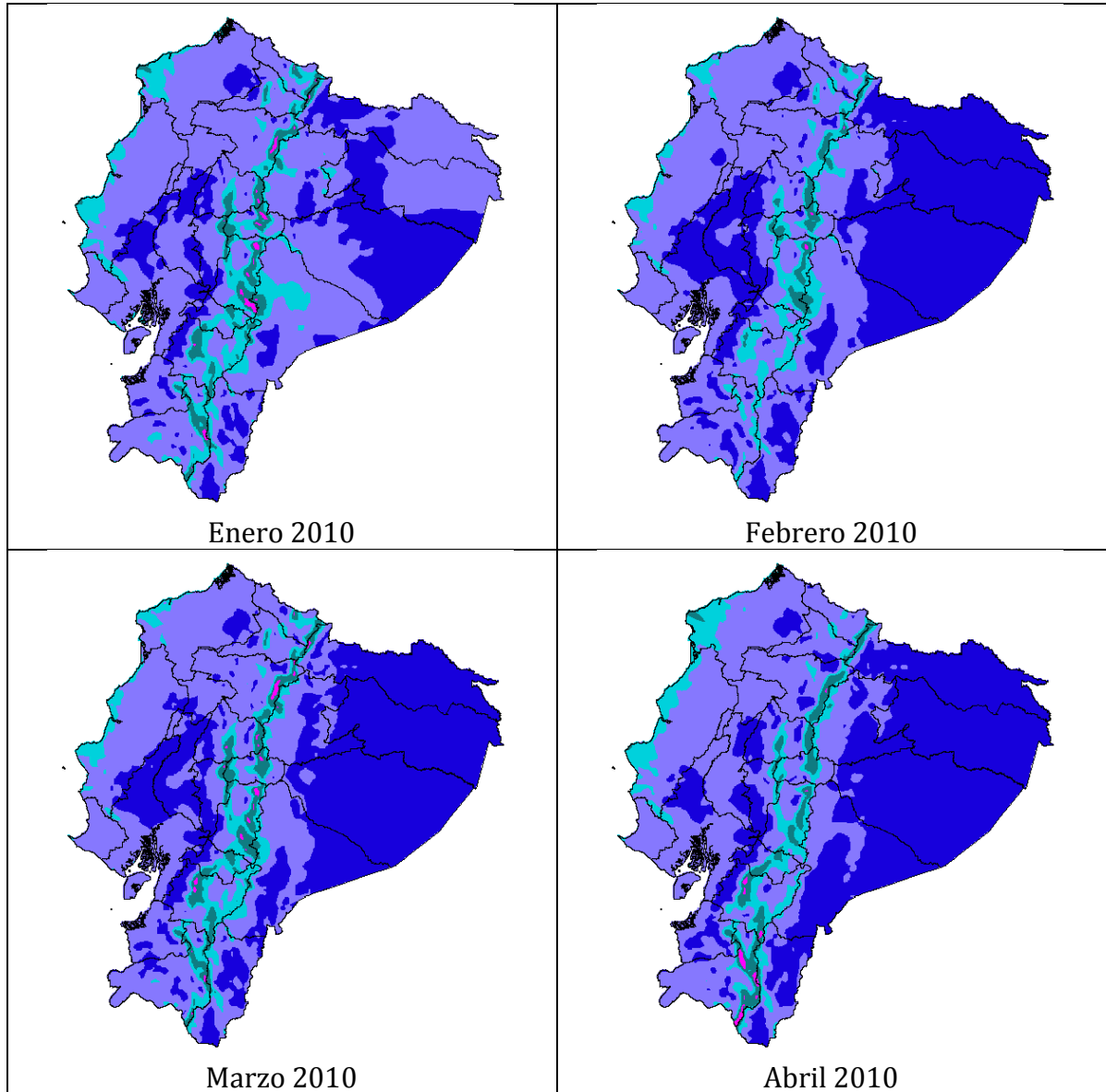
### 5.1 Vientos







En la Tabla 5.1 se presenta la velocidad de viento máxima por mes, con una variación entre  $10.5 \text{ m s}^{-1}$  y  $15.5 \text{ m s}^{-1}$ . Las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, presentan la variación de velocidad de viento durante el año 2010 para un día promedio de cada mes (ver también Anexo A). Se observan velocidades altas para las cadenas montañosas de la sierra. Existen velocidades predominantemente bajas para el oriente ecuatoriano durante todo el año.

Las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6, presentan la variación de la velocidad de viento horaria para el día promedio de agosto 2010.

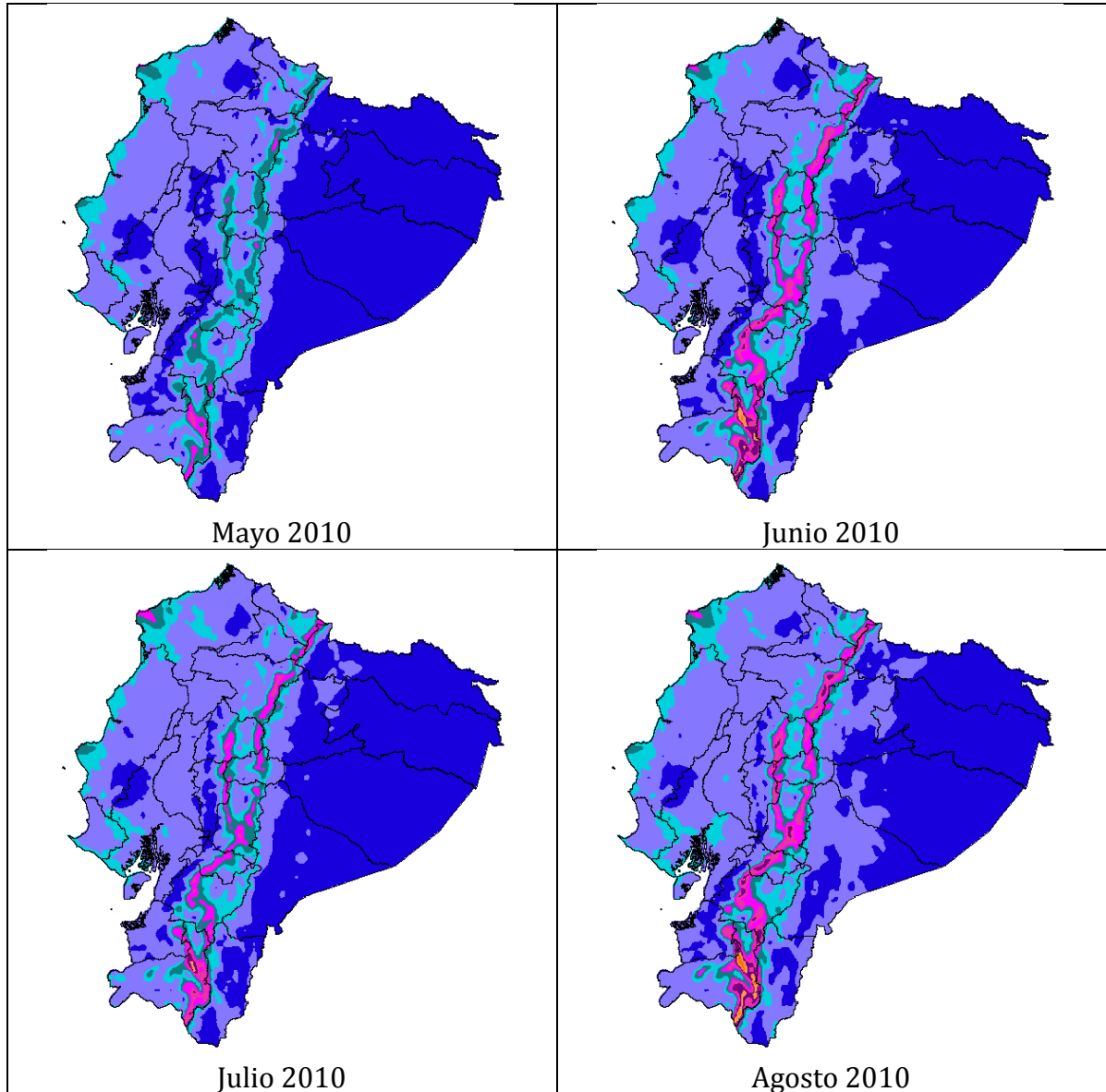
**Tabla 5.1: Velocidad de viento máxima mensual para el año 2010 en el territorio ecuatoriano**





Mes	Velocidad de Viento $\text{m s}^{-1}$	
	Hora	Valor
Enero	13:00	10.7
Febrero	15:00	10.8
Marzo	15:00	10.7
Abril	15:00	10.9
Mayo	12:00	10.5
Junio	11:00	14.5
Julio	10:00	14.1
Agosto	10:00	15.5
Septiembre	16:00	11
Octubre	15:00	11.4
Noviembre	15:00	11.4
Diciembre	15:00	11.5



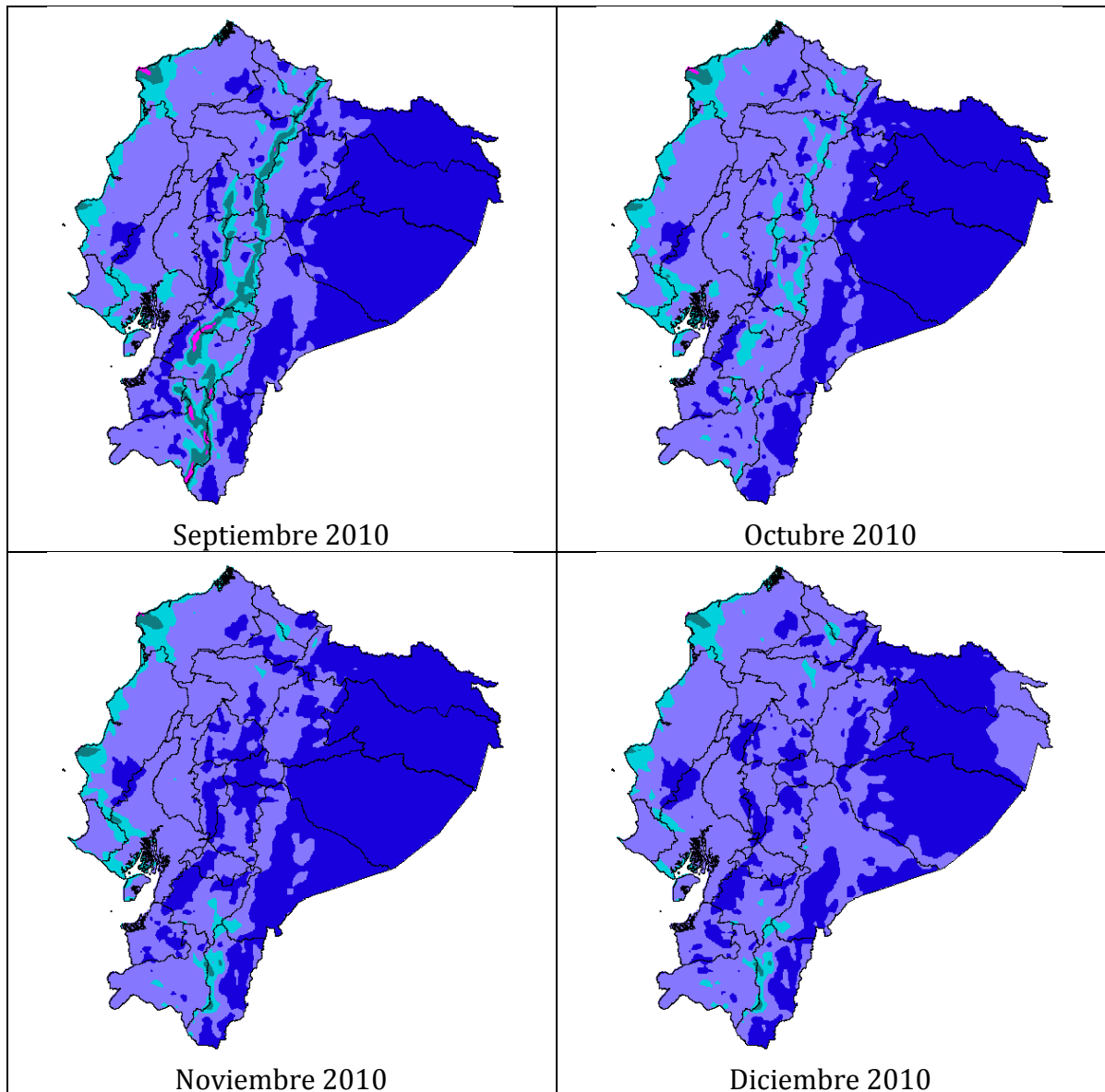
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15








**Figura 5.1: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, enero a abril año 2010**



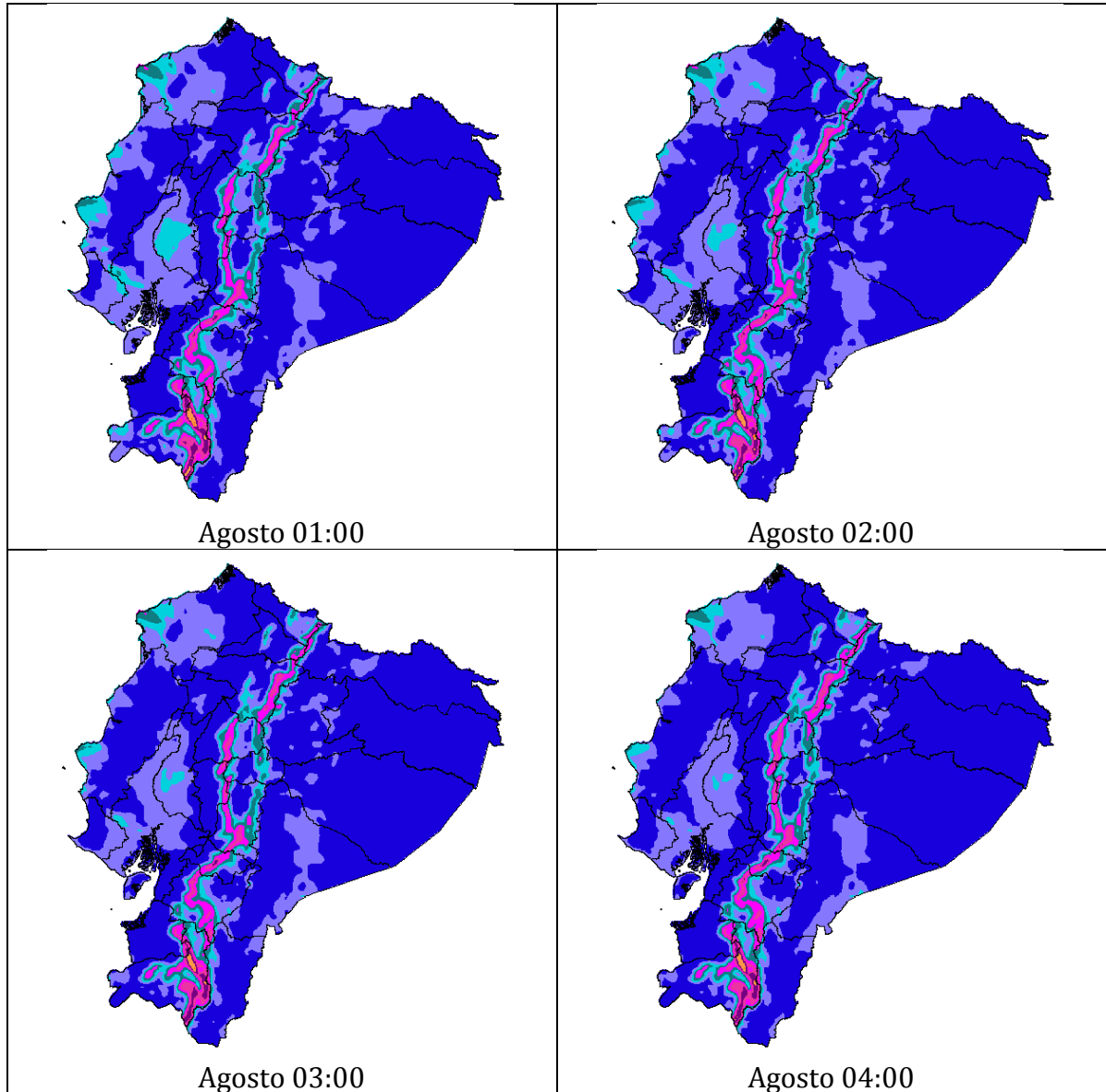
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15











**Figura 5.2: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, mayo a agosto año 2010**



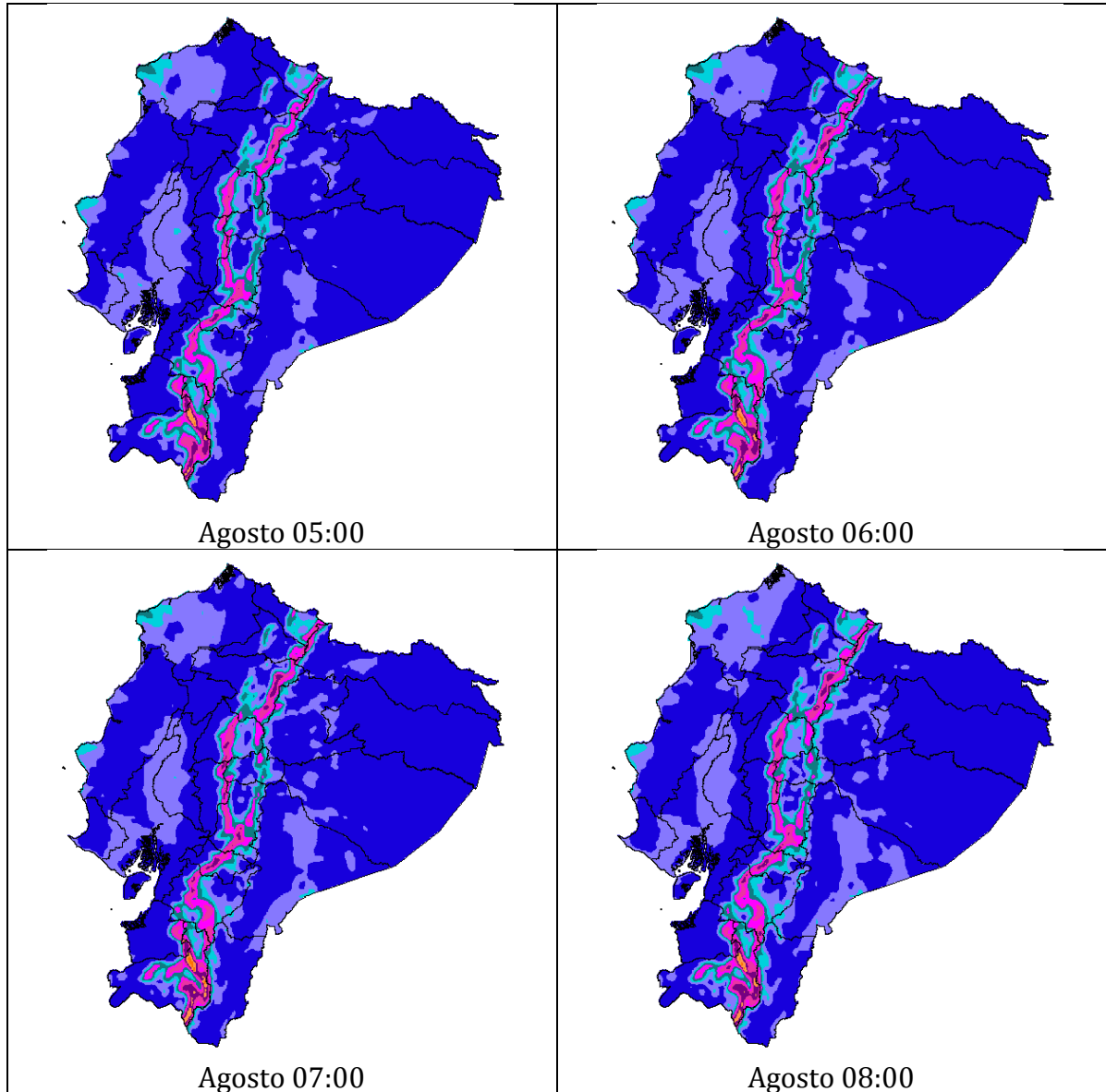
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15











**Figura 5.3: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio mensual interpolada a una malla de 1km, septiembre a diciembre año 2010**



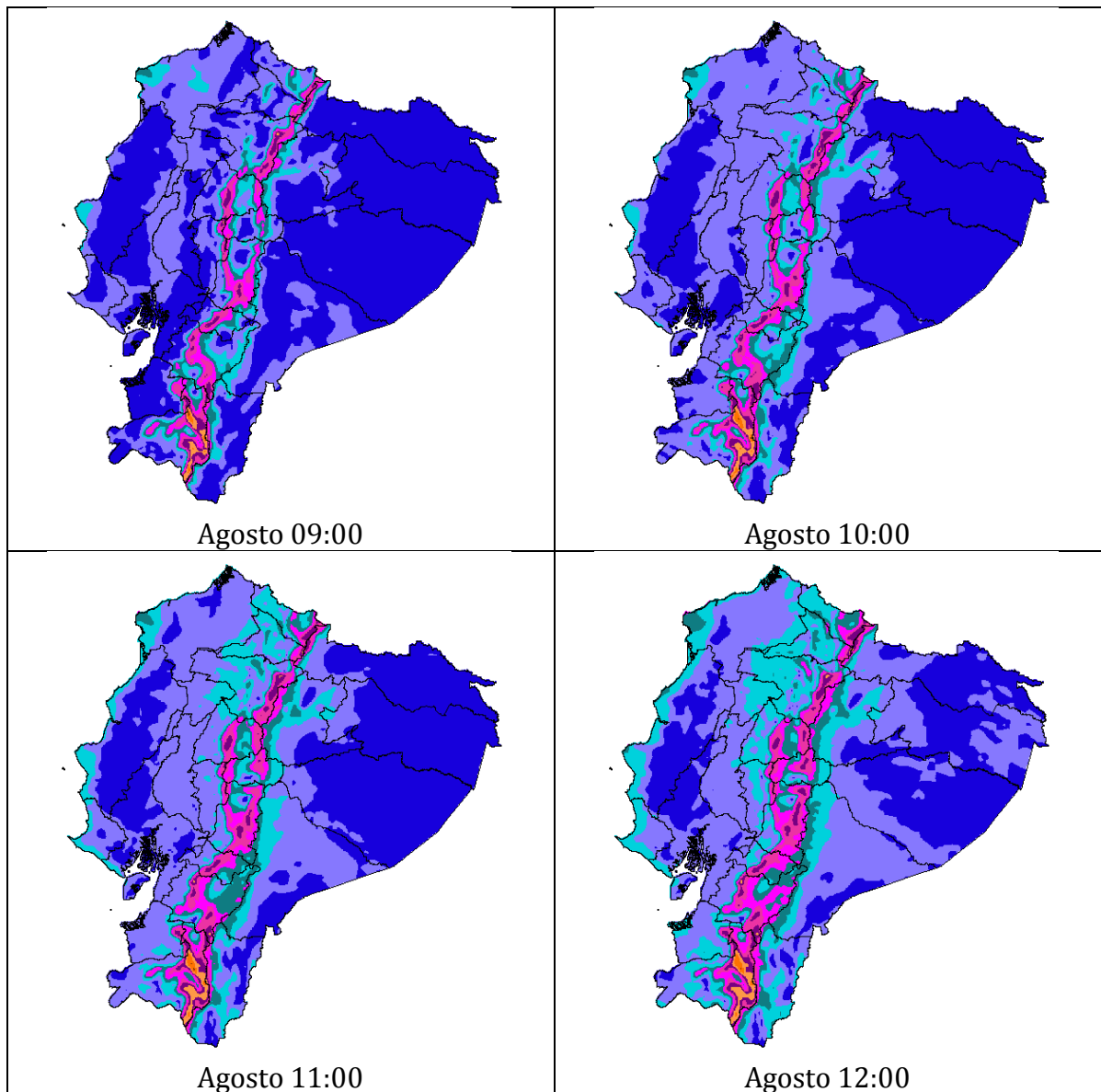
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.6		8 - 9.6
	1.6 - 3.2		9.6 - 11.2
	3.2 - 4.8		11.2 - 12.8
	4.8 - 6.4		12.8 - 14.4
	6.4 - 8		14.4 - 16











**Figura 5.4: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 01:00 hasta 04:00 año 2010**



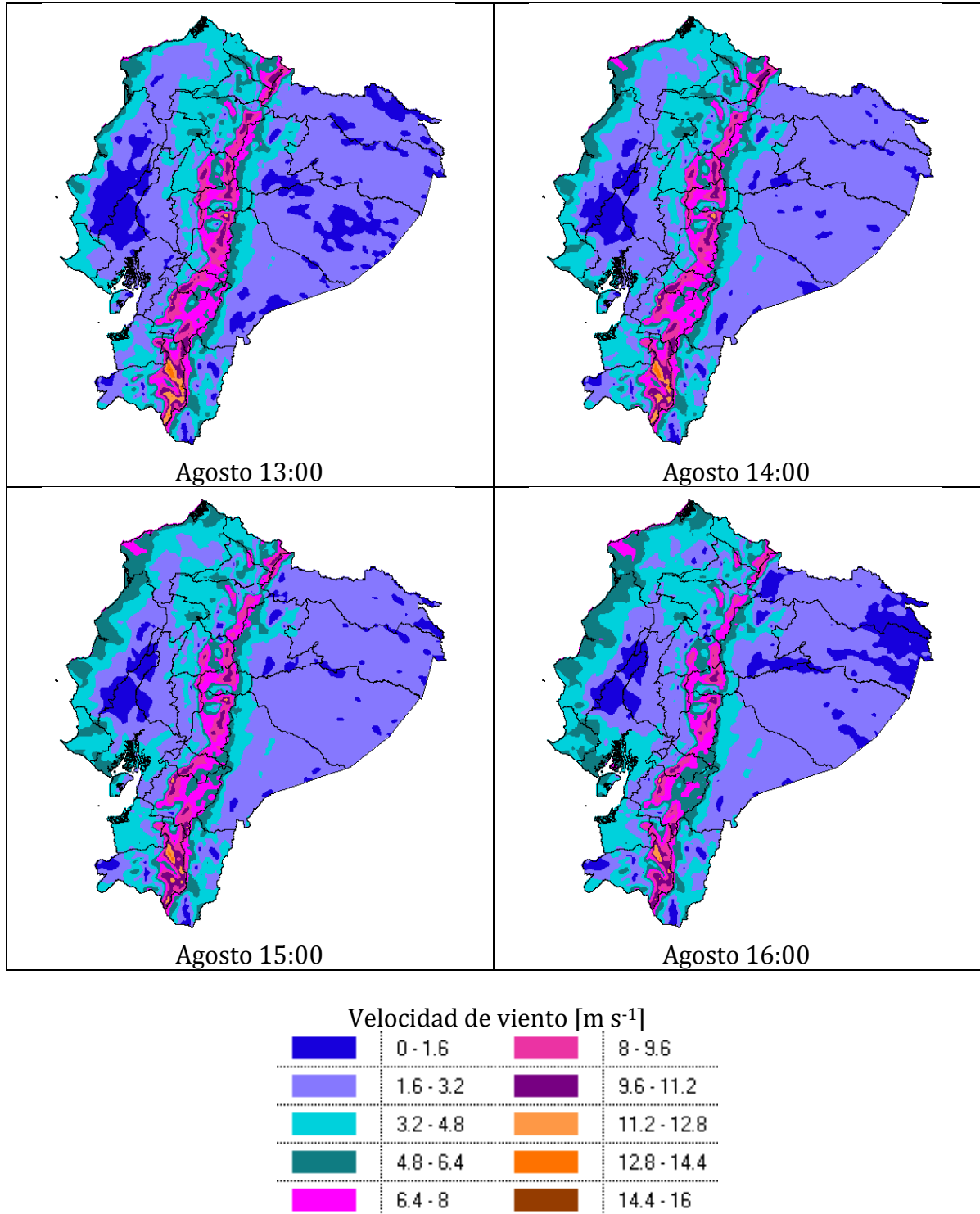
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.6		8 - 9.6
	1.6 - 3.2		9.6 - 11.2
	3.2 - 4.8		11.2 - 12.8
	4.8 - 6.4		12.8 - 14.4
	6.4 - 8		14.4 - 16

**Figura 5.5: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 05:00 hasta 08:00 año 2010**



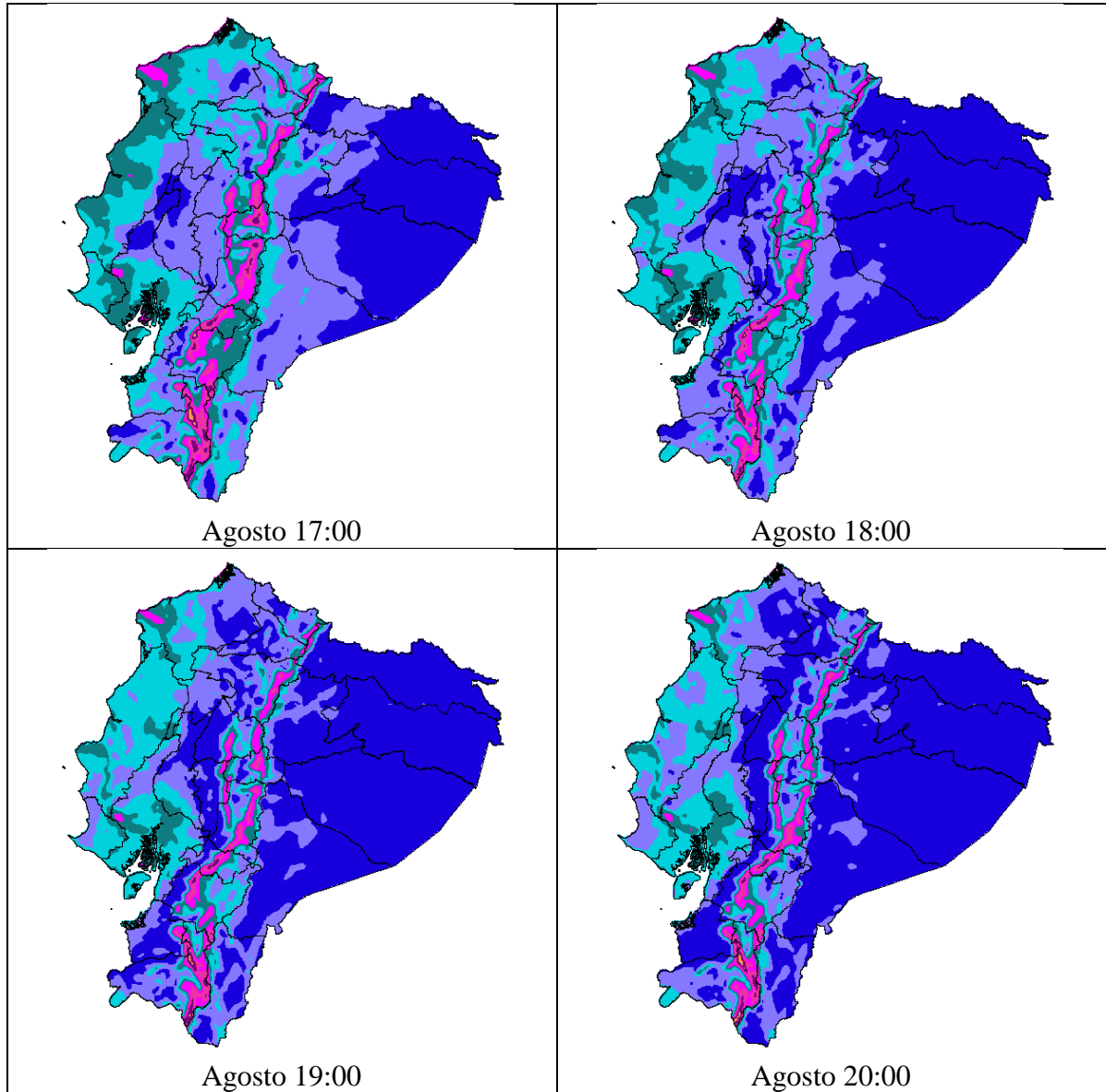
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.6		8 - 9.6
	1.6 - 3.2		9.6 - 11.2
	3.2 - 4.8		11.2 - 12.8
	4.8 - 6.4		12.8 - 14.4
	6.4 - 8		14.4 - 16











**Figura 5.6: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 09:00 hasta 12:00 año 2010**



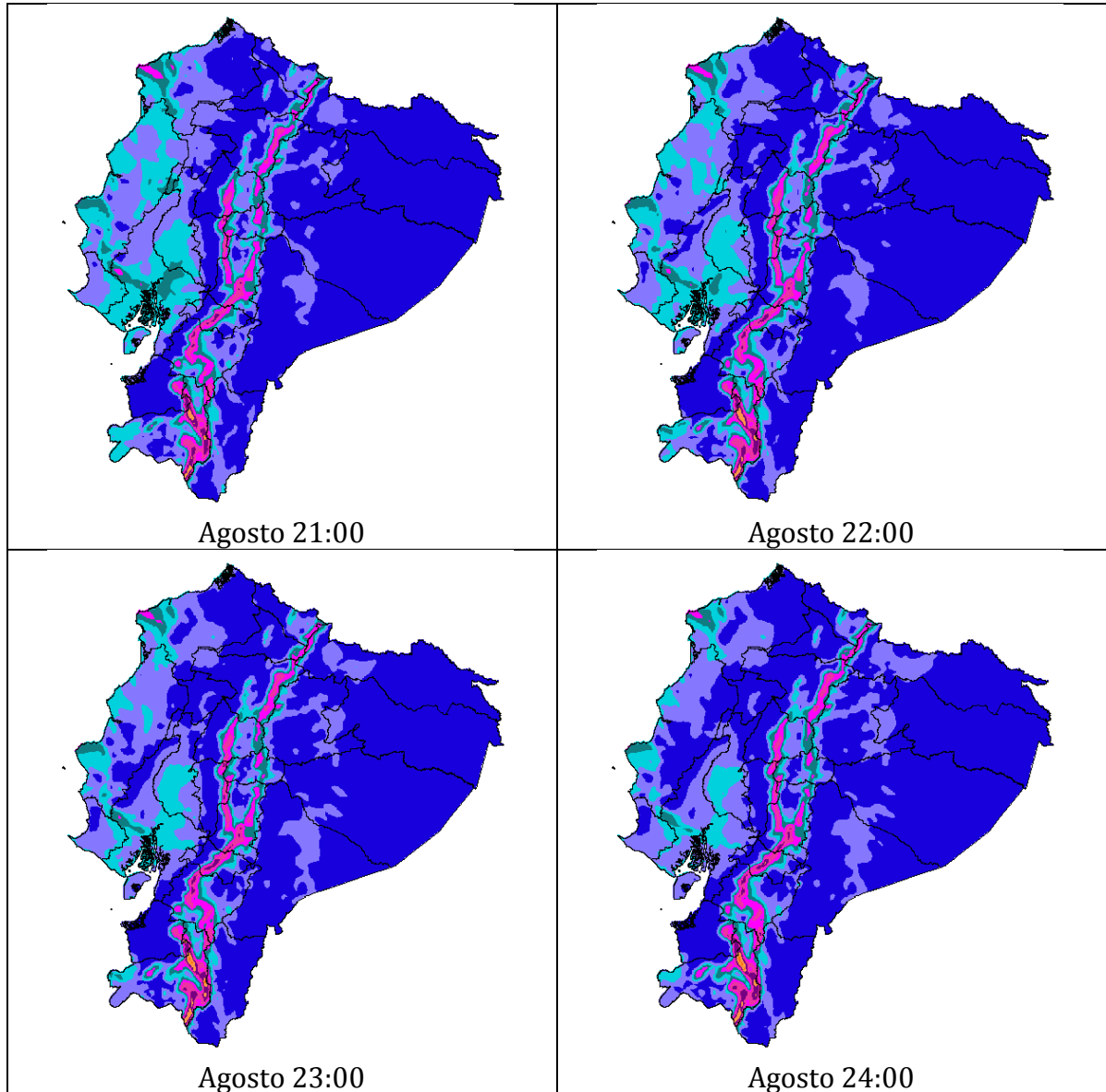
**Figura 5.7: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 13:00 hasta 16:00 año 2010**















Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.6		8 - 9.6
	1.6 - 3.2		9.6 - 11.2
	3.2 - 4.8		11.2 - 12.8
	4.8 - 6.4		12.8 - 14.4
	6.4 - 8		14.4 - 16

**Figura 5.8: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 17:00 hasta 20:00 año 2010**



Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]			
	0 - 1.6		8 - 9.6
	1.6 - 3.2		9.6 - 11.2
	3.2 - 4.8		11.2 - 12.8
	4.8 - 6.4		12.8 - 14.4
	6.4 - 8		14.4 - 16

**Figura 5.9: Velocidad de viento a 10m sobre la superficie promedio para cada hora del mes de agosto interpolada a una malla de 1km, desde 05:00 hasta 08:00 año 2010**

## 5.2 Emisiones de $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$

En las Figuras 5.10 – 5.14 se observan los perfiles horarios del potencial de erosión, para el día promedio de cada mes del año 2010. Se observa un aumento radical del potencial de emisión en agosto, cuando existe un potencial de emisión prácticamente en todas las horas del día.

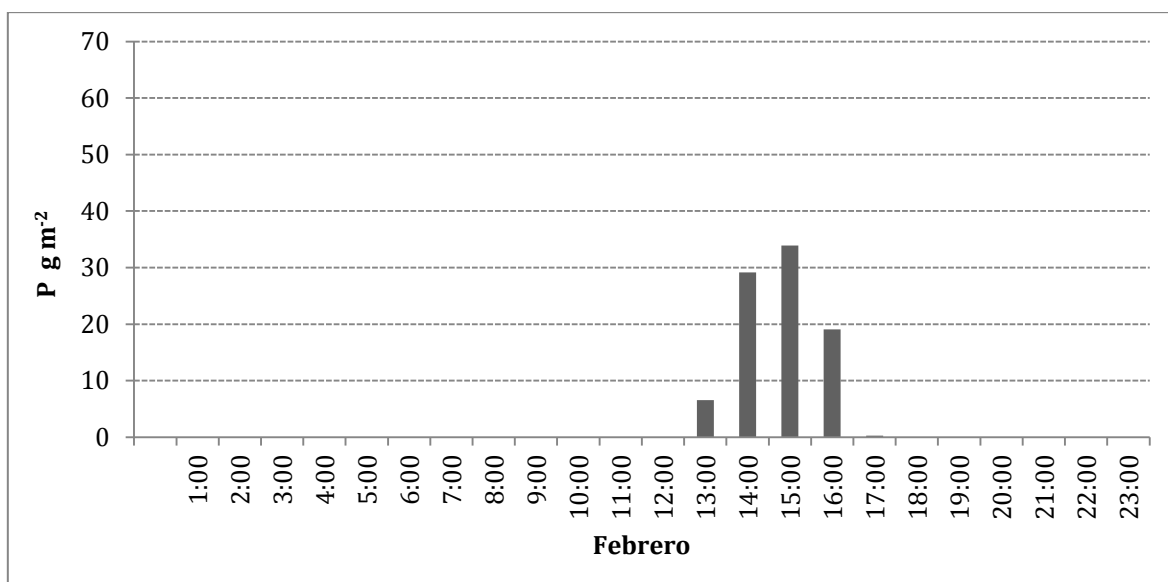
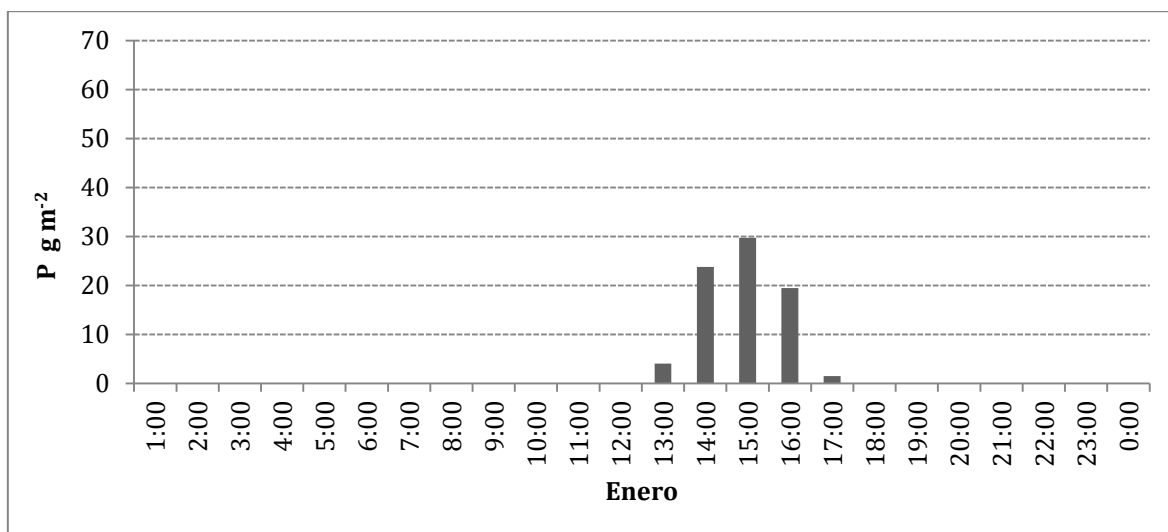
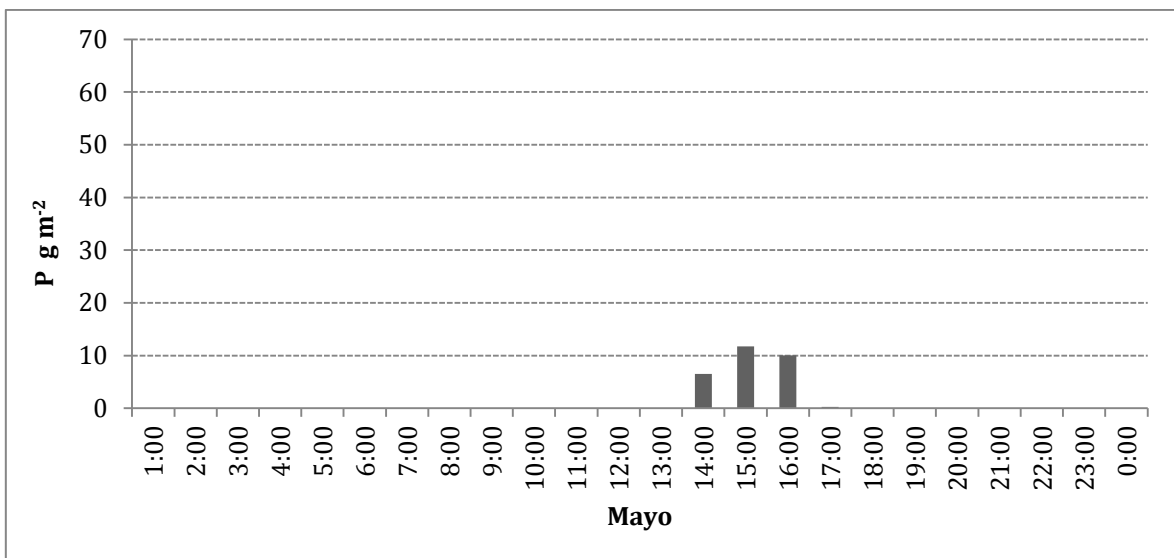
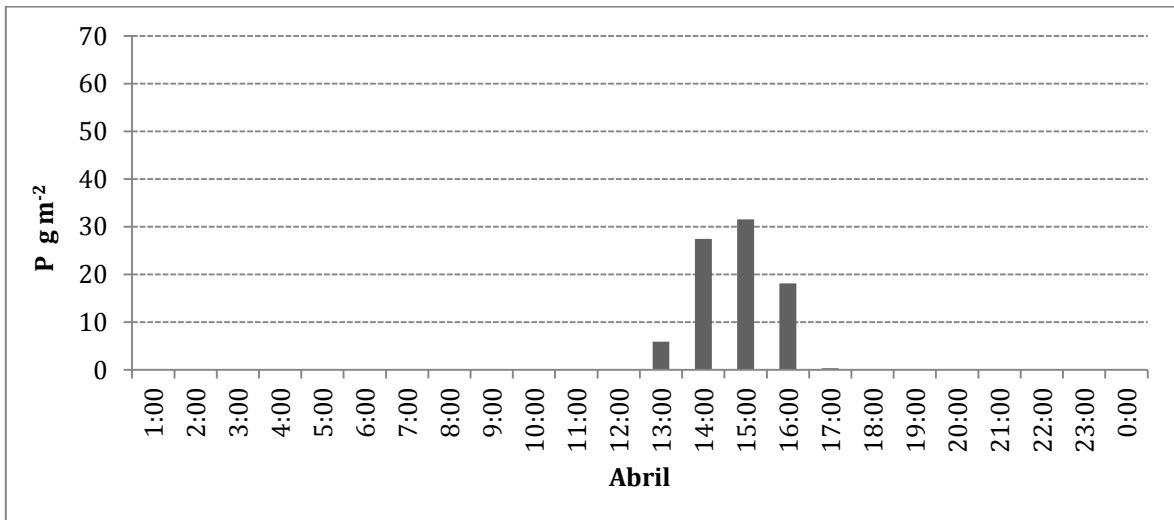
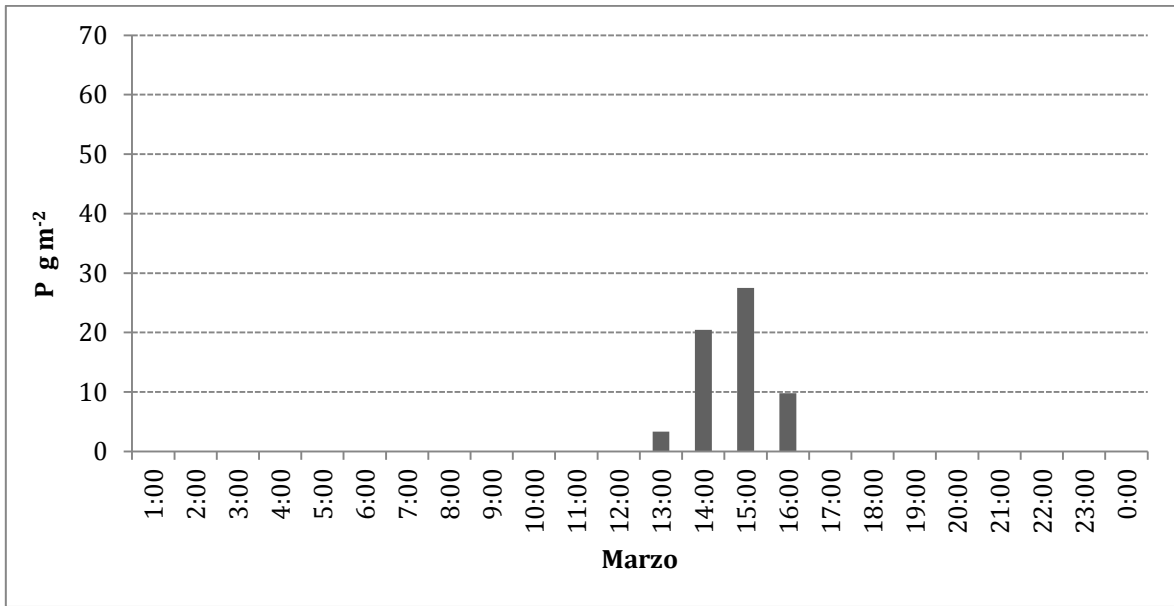


Figura 5.10: Perfiles medios de potencial de emisión de  $PM_{10}$  mensuales de enero y febrero



**Figura 5.11: Perfiles medios de potencial de emisión de PM<sub>10</sub> mensual de marzo a mayo**

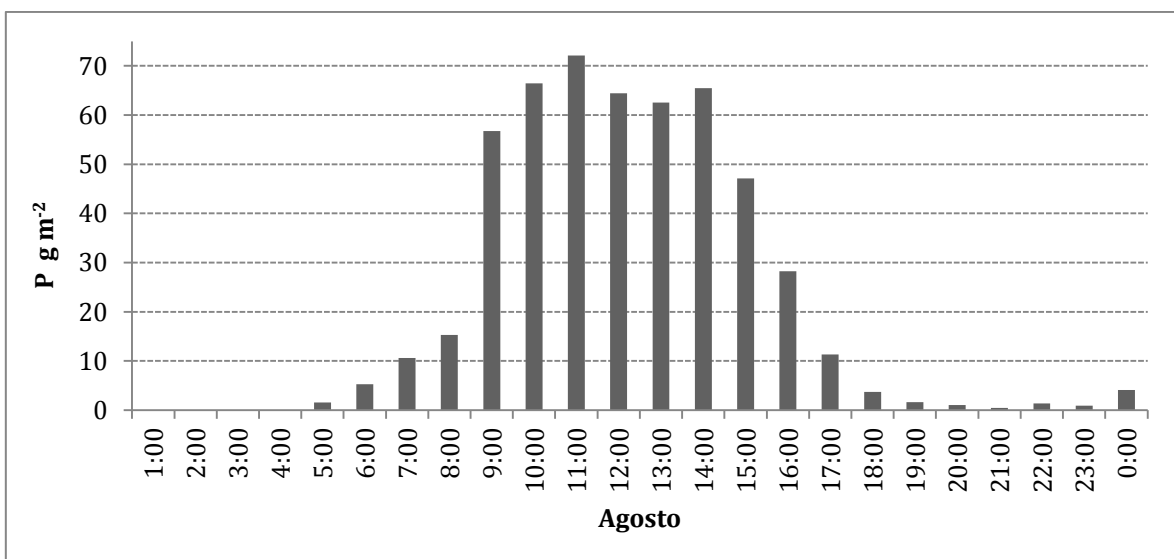
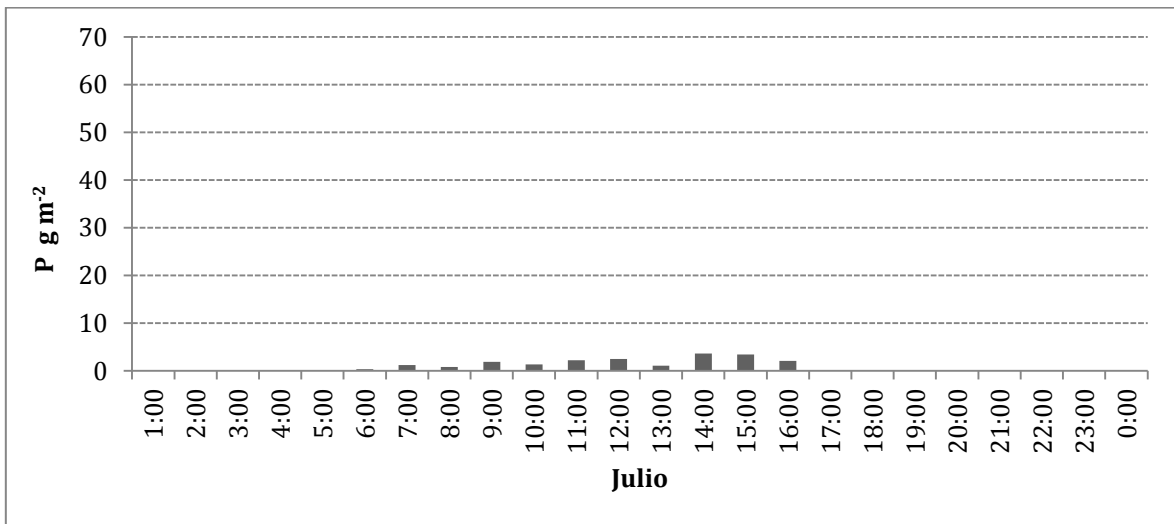
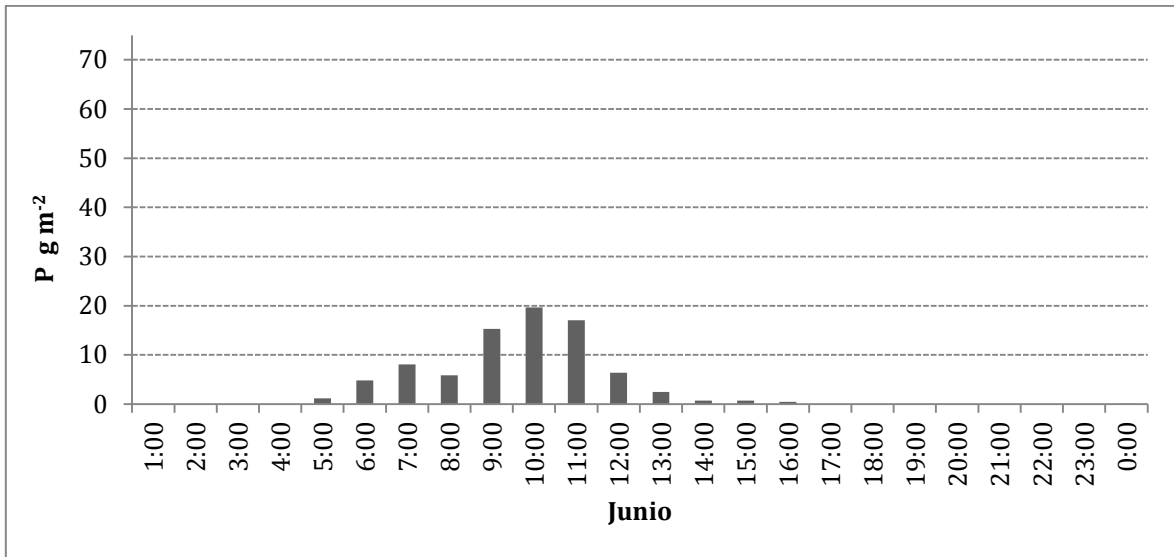


Figura 5.12: Perfiles medios de potencial de emisión de PM<sub>10</sub> mensual de junio a agosto

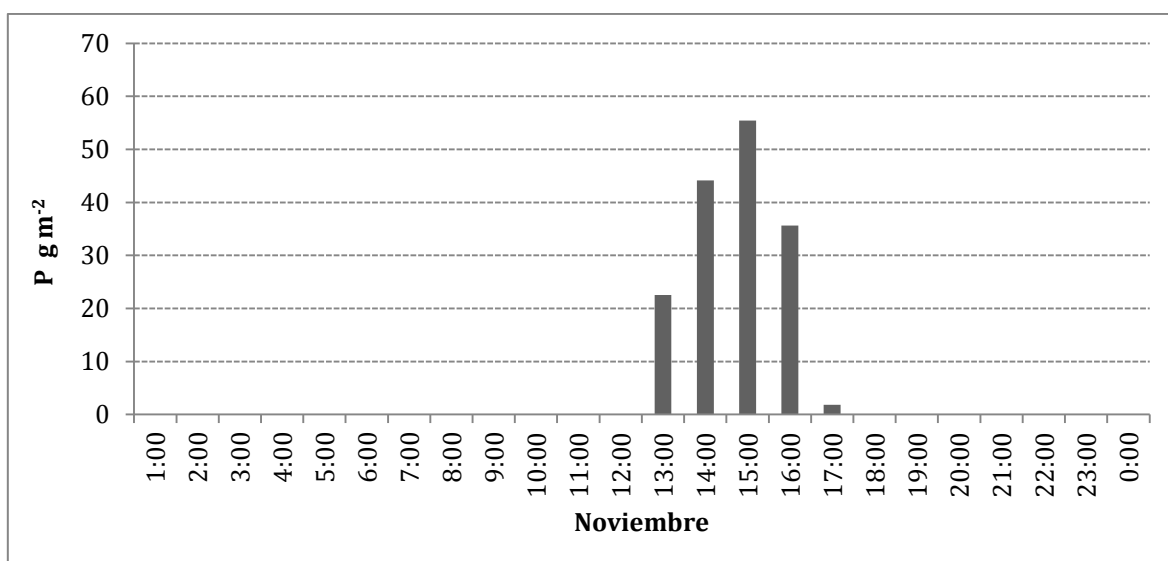
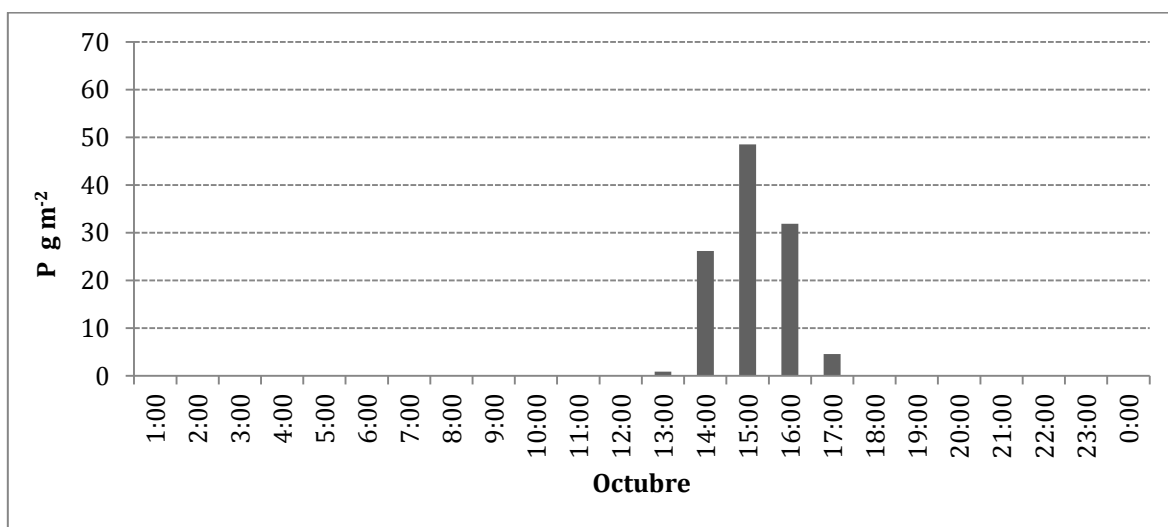
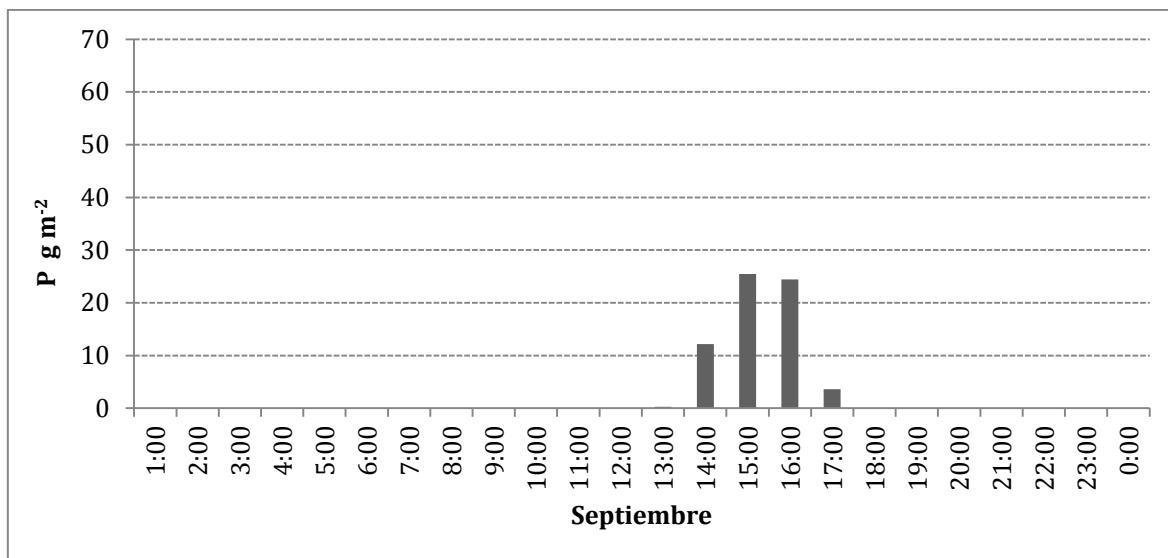
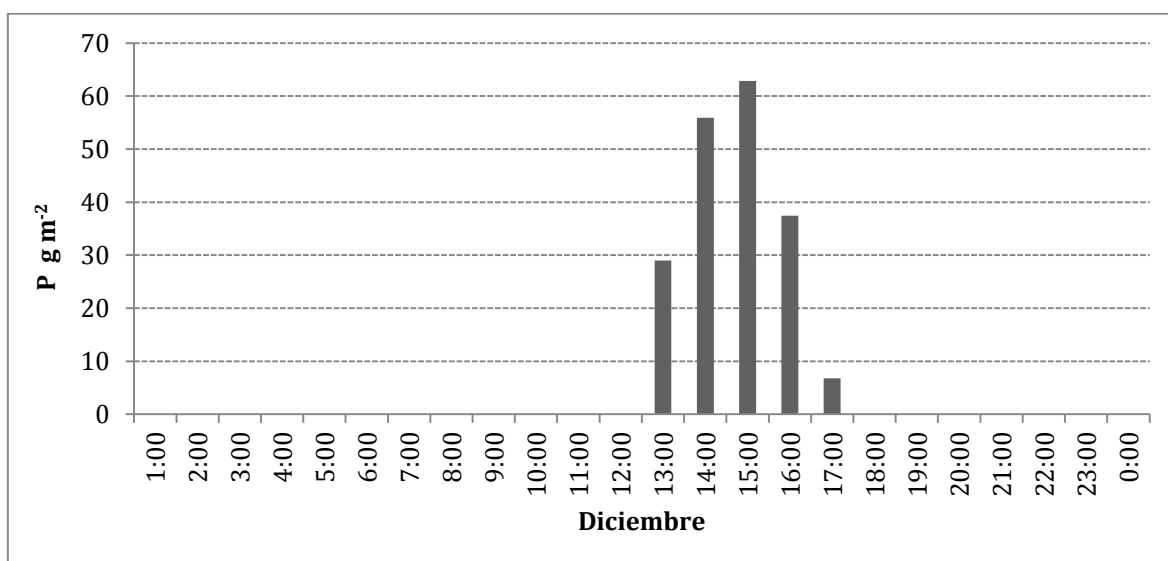


Figura 5.13: Perfiles medios de potencial de emisión de  $PM_{10}$  mensual de septiembre a noviembre

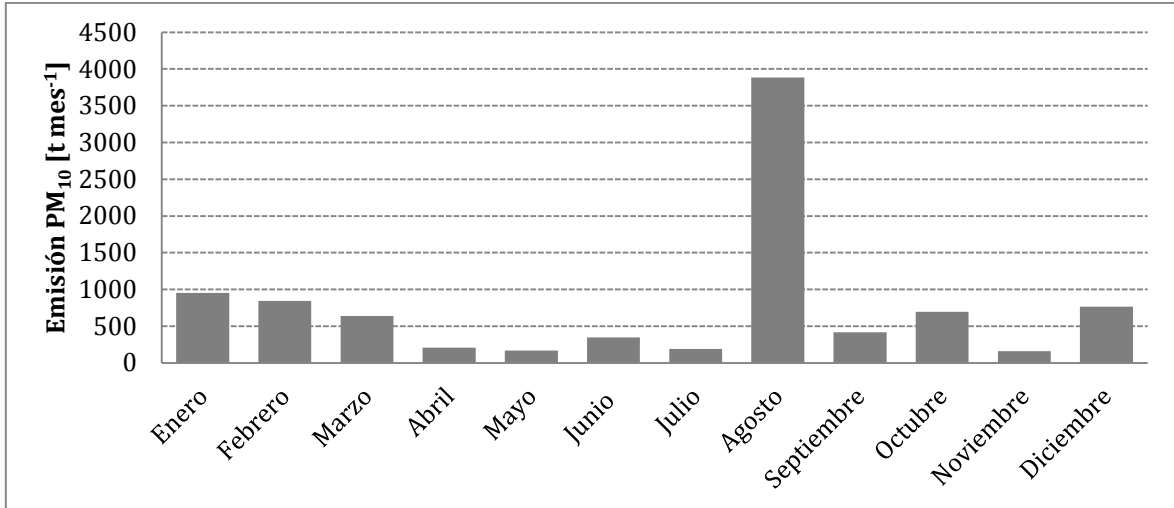


**Figura 5.14: Perfiles medios de potencial de emisión mensual de PM<sub>10</sub> de diciembre**

La Tabla 5.2 y la Figura 5.15 muestran el total mensual de emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>. Las emisiones totales para PM<sub>10</sub> para el año 2010 ascienden a 9279.27 t año<sup>-1</sup>, de las cuales el 42% se emitió en agosto. Las emisiones de PM<sub>2.5</sub> corresponden al 15% del PM<sub>10</sub>.

**Tabla 5.2: Emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el Ecuador, año 2010**

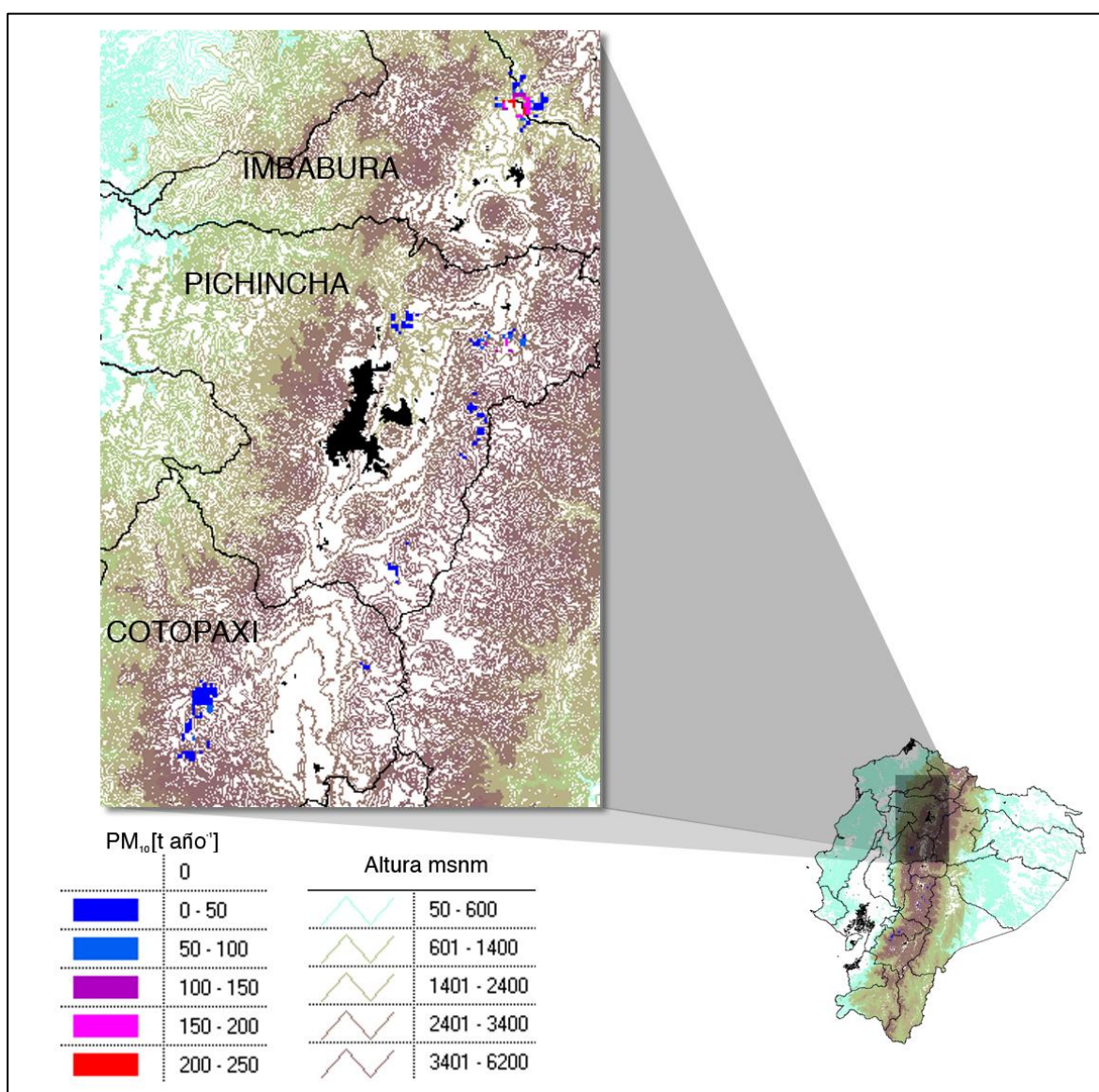
MES	PM <sub>10</sub> t	PM <sub>2.5</sub> t	%
Enero	952.08	142.81	10.26
Febrero	844.09	126.61	9.10
Marzo	641.10	96.16	6.91
Abril	208.47	31.27	2.25
Mayo	169.04	25.36	1.82
Junio	345.93	51.89	3.73
Julio	191.62	28.74	2.07
Agosto	3885.75	582.86	41.88
Septiembre	418.66	62.80	4.51
Octubre	696.64	104.50	7.51
Noviembre	159.80	23.97	1.72
Diciembre	766.09	114.91	8.26
<b>TOTAL</b>	<b>9279.27</b>	<b>1391.89</b>	<b>100.00</b>



**Figura 5.15: Emisiones de PM<sub>10</sub> en Ecuador por mes, año 2010**



El mapa de las emisiones totales de  $PM_{10}$  para el año 2010 se presenta en las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18, con detalles para tres sectores: Sierra Norte, Sierra Centro-Sur y Sierra Sur. Las zonas urbanas se muestran en color negro, se muestra además las curvas de nivel correspondientes a la topografía de la zona expresadas en msnm.



**Figura 5.16: Emisiones totales  $PM_{10}$  para el año 2010 sierra Norte**

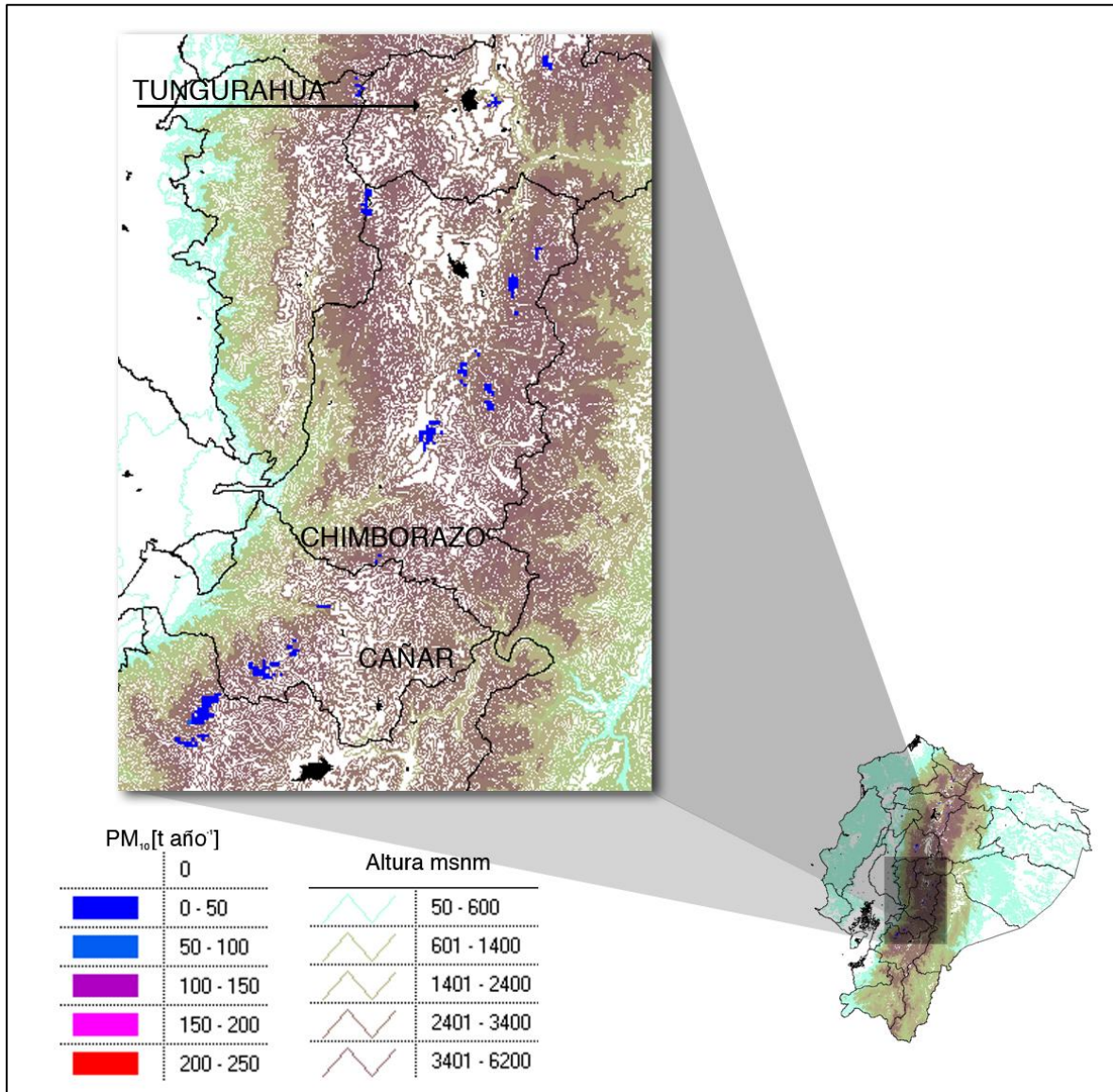


Figura 5.17: Emisiones totales  $PM_{10}$  para el año 2010 sierra centro-Sur



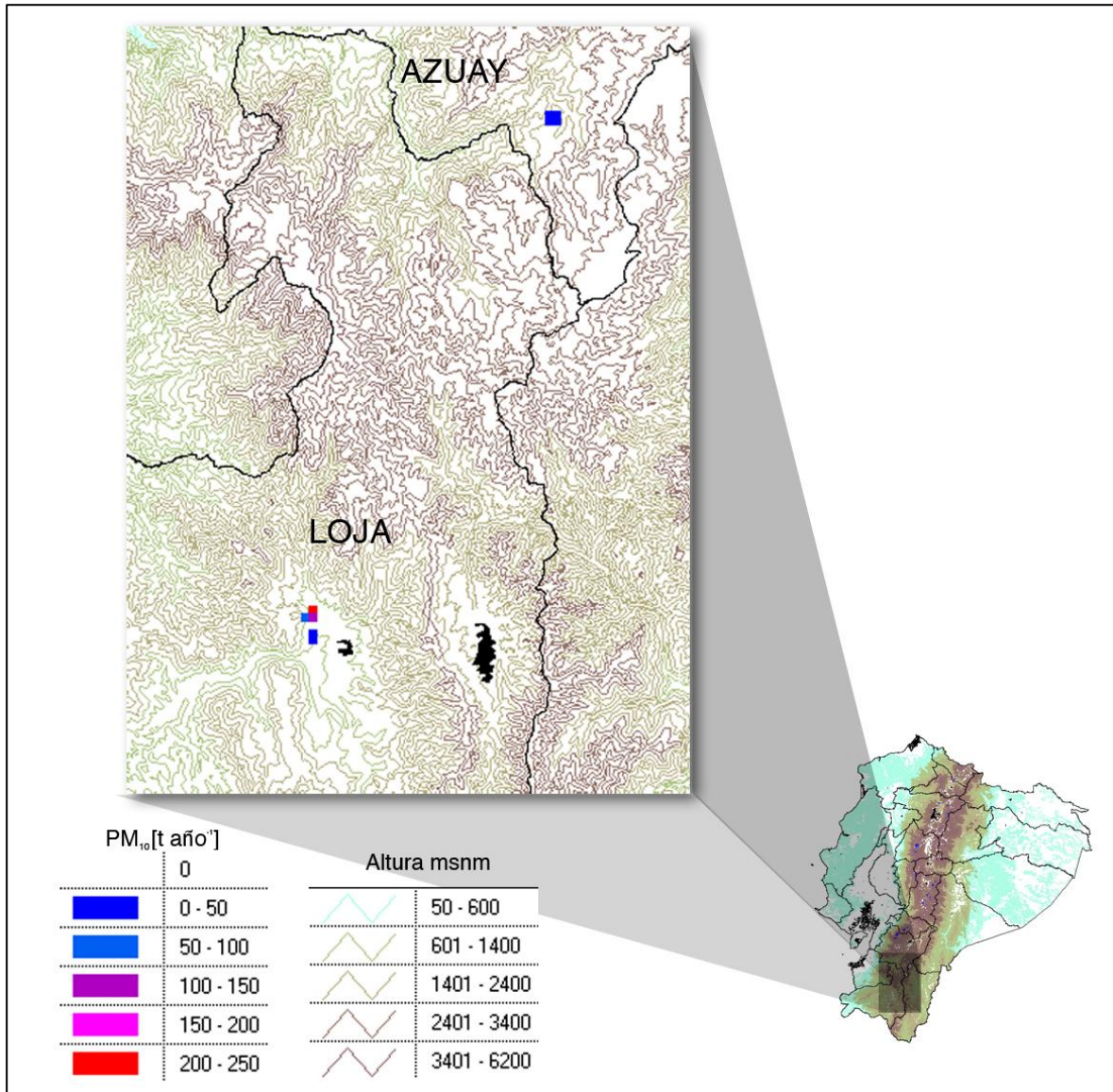
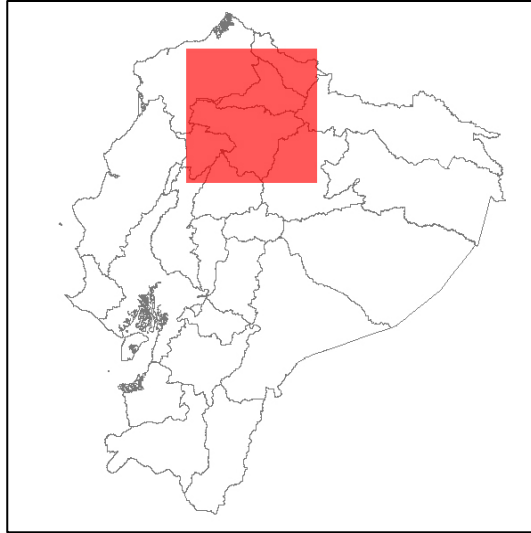
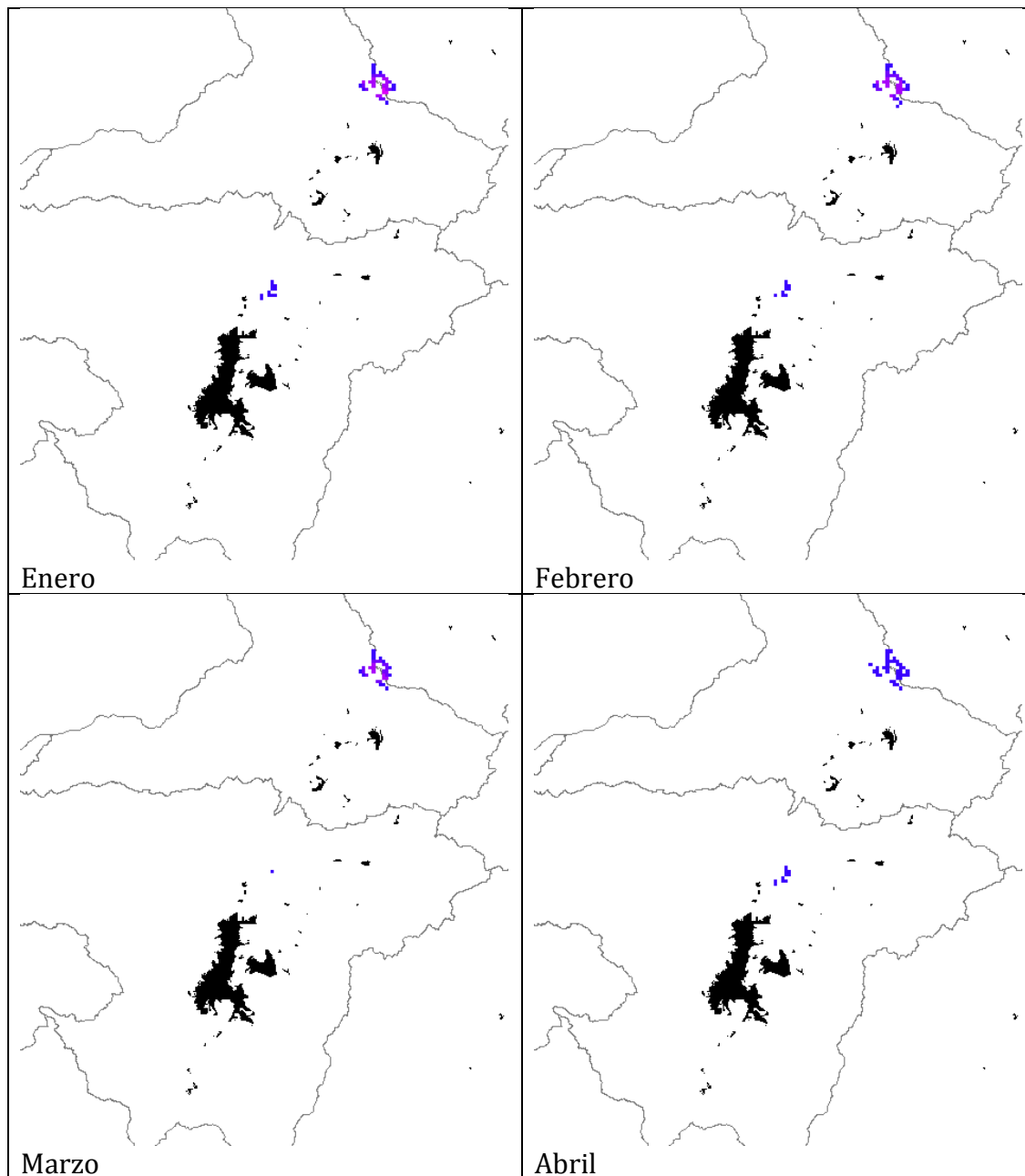


Figura 5.18: Emisiones totales PM<sub>10</sub> para el año 2010 sierra Sur

Las Figuras 5.20 a 5.22 presentan los mapas de emisión mensual para el sector mostrado en la Figura 5.19. Este sector incluye las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha que muestran emisiones en todos los meses del año.



**Figura 5.19: Sector correspondiente a la sierra Norte**













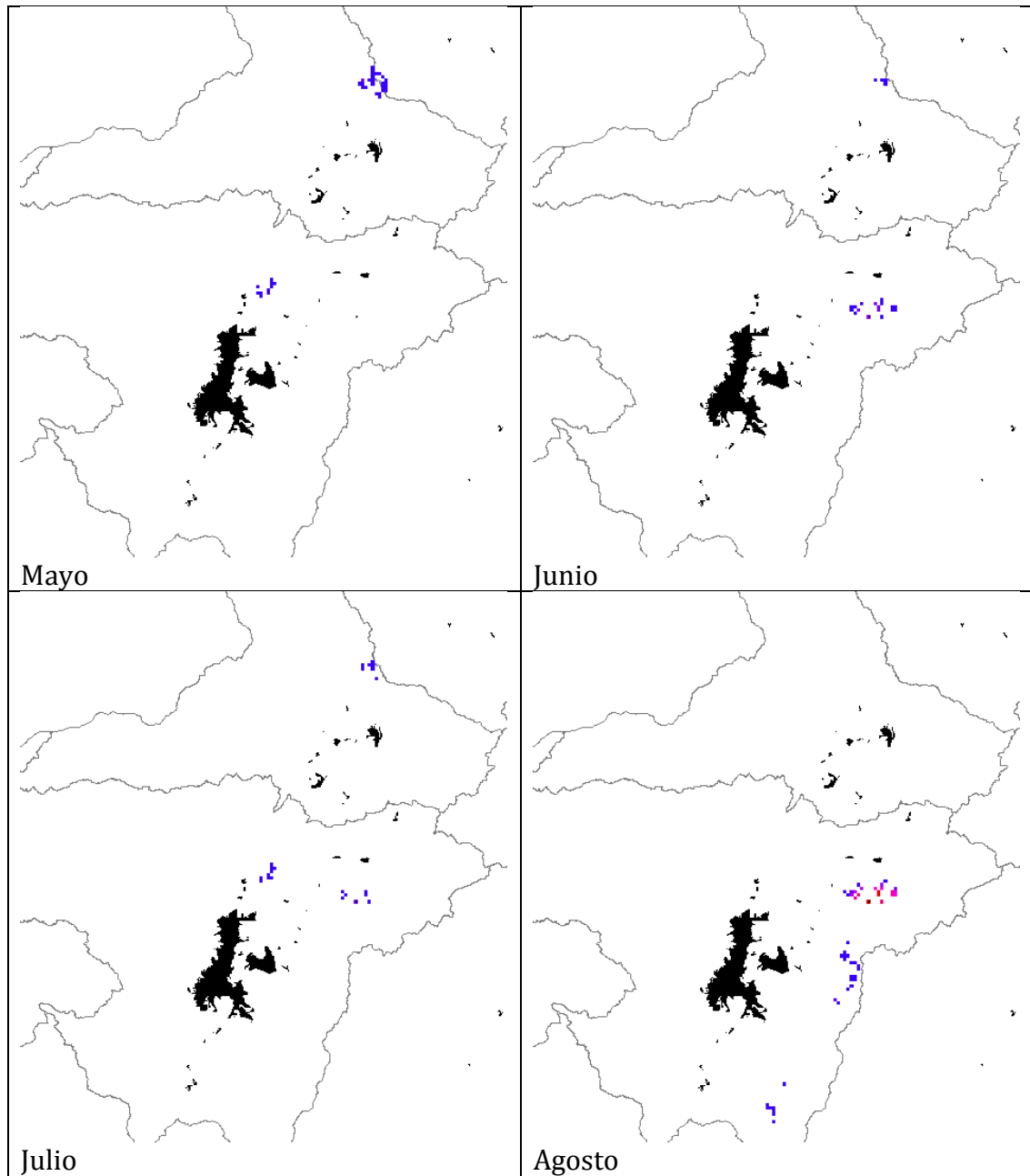
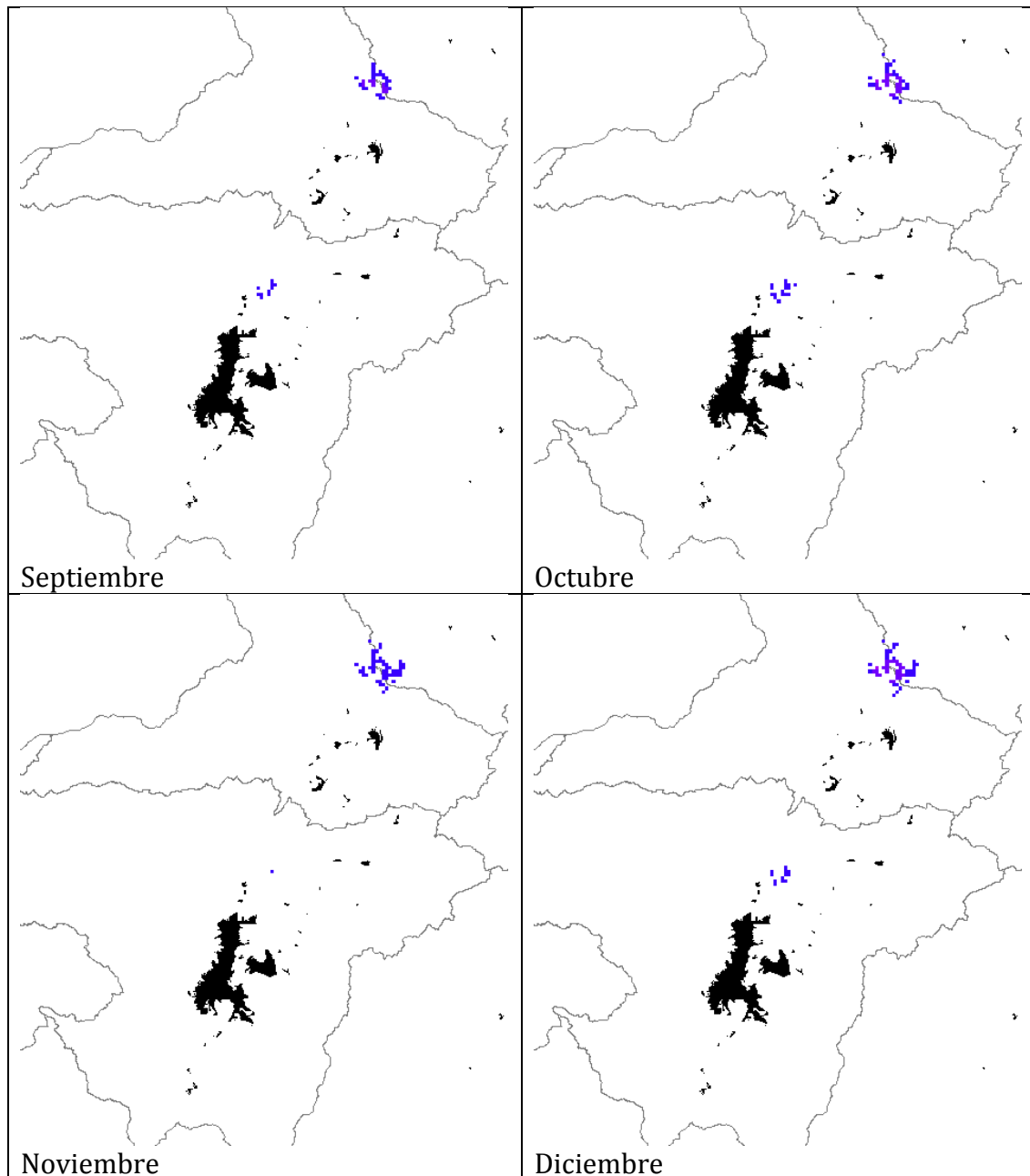
PM <sub>10</sub> [t mes <sup>-1</sup> ]			
0			
	0 - 15		75 - 90
	15 - 30		90 - 105
	30 - 45		105 - 120
	45 - 60		120 - 135
	60 - 75		135 - 150

Figura 5.20: Evolución de las emisiones promedio por mes de PM<sub>10</sub> de Enero a Abril



**Figura 5.21: Evolución de las emisiones promedio por mes de PM<sub>10</sub> de Mayo a Agosto**













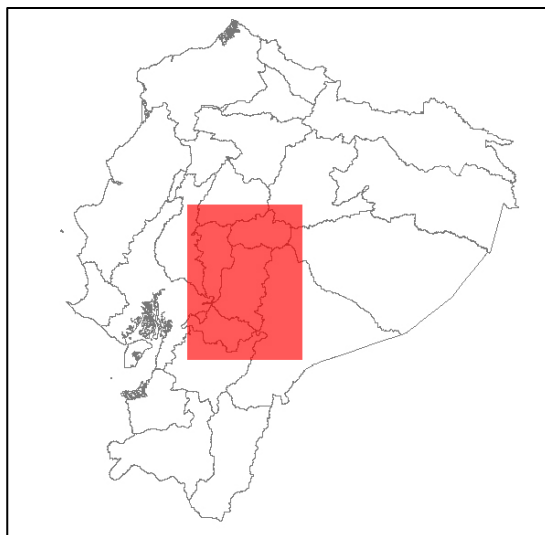
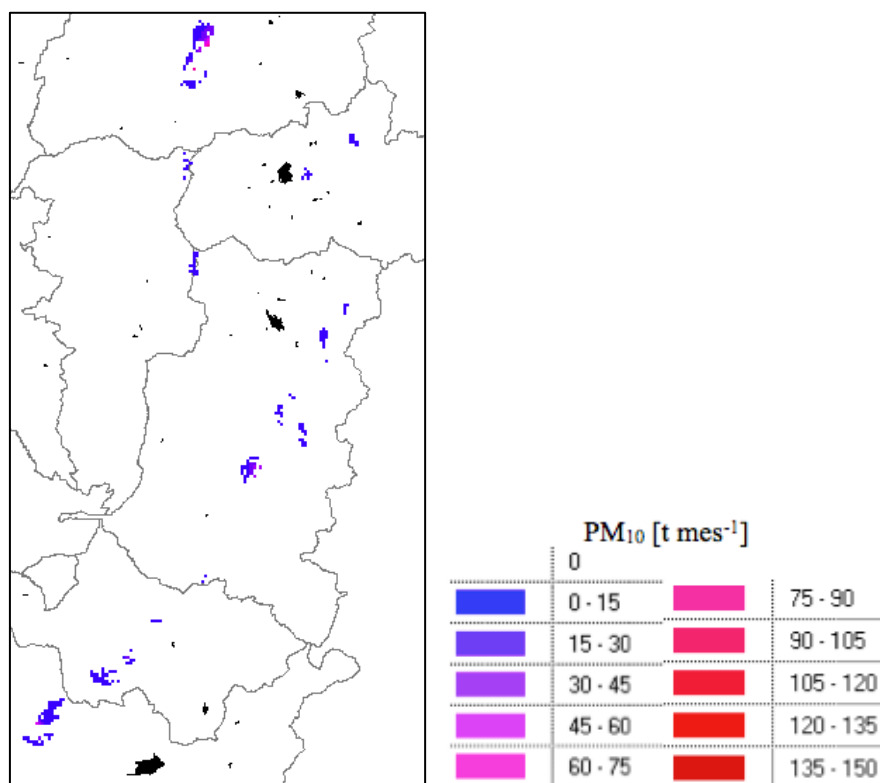
PM <sub>10</sub> [t mes <sup>-1</sup> ]			
0			
	0 - 15		75 - 90
	15 - 30		90 - 105
	30 - 45		105 - 120
	45 - 60		120 - 135
	60 - 75		135 - 150

Figura 5.22: Evolución de las emisiones promedio por mes de PM<sub>10</sub> de Enero a Abril

La Figura 5.24 presenta el mapa de emisión del mes de agosto para el sector mostrado en la Figura 5.23. Este sector incluye las provincias de Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar, Chimborazo, Cañar y el Norte de Azuay.



**Figura 5.23: Sector correspondiente a la sierra centro-Sur**



**Figura 5.24: Emisiones de PM<sub>10</sub> promedio mes de Agosto sector Sierra Centro-Sur**



Las Tablas 5.3 y 5.4 presentan los valores de emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> totales anuales para las categorías de interés y también por provincia. Las áreas erosionadas emiten el 92% de las emisiones totales anuales de PM<sub>10</sub>. El 71% de las emisiones anuales provienen de las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha.

**Tabla 5.3: Emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> año 2010 por categoría de interés**

<b>Zona</b>	<b>PM<sub>10</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>PM<sub>2.5</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>%</b>
Afloramiento Rocosó – Mina - Grava	96.83	14.52	1.04
Vegetación Geliturbada	5.5	0.83	0.06
Área Erosionada	8529.67	1279.45	91.92
Eriales	18.1	2.72	0.2
Suelo Desnudo	0	0	0
Maíz	3.11	0.47	0.03
Pajonal	626.06	93.91	6.75
<b>Total</b>	<b>9279.27</b>	<b>1391.89</b>	<b>100</b>

**Tabla 5.4: Emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> año 2010 por provincia**

<b>Provincia</b>	<b>PM<sub>10</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>PM<sub>2.5</sub> t año<sup>-1</sup></b>	<b>%</b>
Azuay	441.71	66.26	4.76
Bolívar	10.98	1.65	0.12
Cañar	178.71	26.81	1.93
Carchi	2366.55	354.98	25.5
Chimborazo	436.01	65.40	4.7
Cotopaxi	1115.80	167.37	12.02
Imbabura	2272.01	340.80	24.48
Loja	428.77	64.32	4.62
Pichincha	1981.55	297.23	21.35
Tungurahua	47.18	7.08	0.51
<b>Total</b>	<b>9279.27</b>	<b>1391.89</b>	<b>100</b>

## 6.1 Análisis de incertidumbre

La estimación de las emisiones de material particulado por erosión eólica resulta compleja. La cantidad de factores que influyen así como las asunciones de cálculo implican gran incertidumbre.

El método semicuantitativo de calificación para evaluar la calidad de los componentes de la estimación de emisiones es aquel utilizado en los Inventarios de Emisiones del DMQ para los años 2003, 2005 y 2007, y de Cuenca para los años 2007 y 2009. El método se basa en una calificación alfabética y colorimétrica del factor de emisión y las tasas de actividad, basada en criterios previamente definidos. La calificación compuesta se muestra en la Tabla 5.5 proporciona un indicador global de la calidad de la estimación (CORPAIRE, 2006).

Los criterios de calificación de los factores de emisión se basan en aquellos recomendados por la EPA para la evaluación semicuantitativa de incertidumbre según el *Data Attribute Rating System*. Existen dos pasos en la determinación de la calificación. El primero corresponde a la valoración de la calidad y confiabilidad de los datos; el segundo paso es una valoración del factor de emisión en sí.

La calificación de los datos de actividad se basa en el origen de los mismos, de forma que los datos de actividad medidos con exactitud y verificados de manera complementaria con otra información, reciben una calificación A; los datos de actividad extrapolados de alguna actividad medida en otro país o región reciben una calificación E.

Cada factor de emisión recibe una clasificación desde la A hasta la E, siendo A la mejor. Si un factor de emisión recibe una clasificación de A, quiere decir que es excelente y que los datos utilizados fueron recogidos de un número de fuentes suficientes para minimizar la variabilidad. Un factor de emisión con una calificación de E, quiere decir que

es pobre y que los datos utilizados son clasificados como C o D pues hay razones para sospechar que no representan una muestra aleatoria (CORPAIRE, 2006).

**Tabla 5.5: Matriz de calificación de la estimación de las emisiones (CORPAIRE, 2006)**

Actividad	Factor de Emisión				
	A	B	C	D	E
A	A	A	B	C	C
B	A	B	B	C	D
C	B	B	C	C	D
D	C	C	C	D	D
E	C	D	D	D	E

Donde:

- Categoría A: calidad muy alta. El detalle de la información es suficiente, la estimación es fiable.
- Categoría B: calidad alta. La estimación es fiable, pero se podrían tomar acciones para disminuir la incertidumbre.
- Categoría C: calidad media. La estimación es medianamente fiable y se podría mejorar, en función del nivel de las emisiones del sector calificado y su peso en relación al valor total de la estimación de las emisiones.
- Categoría D: calidad baja. La estimación es poco fiable y se recomienda mejorarla, en función del nivel de las emisiones del sector calificado y su peso en relación al total de la estimación de las emisiones.
- Categoría E: calidad muy baja. La estimación es muy poco fiable y se recomienda mejorarla, en función del nivel de las emisiones del sector calificado y su peso en relación al total del inventario de emisiones. La estimación no ha sido corroborada con mediciones.

En los Inventarios de Emisiones para el DMQ (2007) y Cuenca (2009) se asignan una calificación global de C y D respectivamente, a la estimación de emisiones de PM por erosión eólica (CORPAIRE, 2009) y (EMOV, 2011). En la Tabla 5.6 y Tabla 5.7 se presenta la valoración cuantitativa de incertidumbre de la estimación de emisiones por resuspensión eólica en el Ecuador durante el año 2010.

**Tabla 5.6: Valoración cualitativa de incertidumbre de los atributos de emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el Ecuador para el año 2010**

Atributo	Calificación	Observaciones
Vientos	B	Datos obtenidos de simulaciones adecuadas. Interpolación disminuye exactitud de los datos
Zonas de Interés	D	Suposición sobre pajonal por encima de los 4200 msnm. Información no actualizada de uso de suelo.
Número de días de emisión	D	Datos de pocas estaciones en el Ecuador. Ausencia de datos reales para 2010 en ciertas estaciones.
Promedio	C	

**Tabla 5.7: Valoración cualitativa de incertidumbre de los factores de emisión de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el Ecuador para el año 2010**

Factor de Emisión	Calificación	Observaciones
PM <sub>10</sub>	E	Asunciones realizadas a lo largo de la aplicación del modelo matemático. Valores de $u^*_t$ supuestos a partir de bibliografía.
PM <sub>2.5</sub>	E	Estimación a partir de PM <sub>10</sub> , cuya incertidumbre es alta. Discusión sobre la confiabilidad de cálculo a partir de la relación $PM_{2.5}/PM_{10} = 0.15$
Promedio	E	

Se obtiene una clasificación global de D, es importante tomar en cuenta que la clasificación y análisis de incertidumbre resulta bastante subjetivo y debe ser visto como una aproximación.

## 6. DISCUSIÓN

Los datos de interpolación de magnitud de viento muestran coherencia tanto espacial como temporal. Se observa una mayor velocidad de viento en el territorio correspondiente al callejón interandino, así como una magnitud de viento mucho menor y constante a lo largo del año para la zona del oriente ecuatoriano. Los datos de viento aumentan para el mes de agosto, época del año conocida por mostrar vientos fuertes y disminuyen para los meses de noviembre y diciembre. En el mes de agosto se observa además que la mayor velocidad de viento sucede a las 10:00 am, situación que no se repite en la mayoría de meses pues la mayor velocidad de viento se observa a las 15:00. Estos datos coinciden con el hecho de que para el mes de agosto el potencial de emisión aumente radicalmente. Para los meses de junio, julio y agosto se estima un potencial de emisión a partir de la hora 07:00, el resto de meses presentan potencial de emisión a partir de la hora 13:00. Este fenómeno se debe a que, durante los meses de junio julio y agosto los vientos fuertes comienzan muy temprano y para los demás meses los vientos fuertes comienzan por la tarde.

Es importante reconocer que en la malla de 4 km el punto con mayor velocidad de viento para el mes de agosto a las 10:00 es de  $16.5 \text{ m s}^{-1}$ , al realizar la interpolación a una malla de 1 km los puntos correspondientes a la zona muestran un máximo de  $15.5 \text{ m s}^{-1}$ . La velocidad de vientos disminuye para esta y muchas de las celdas debido al método de interpolación escogido. Si bien el método IDW no genera datos que se encuentren fuera del rango de valores de los datos de entrada (Olaya, 2010), la superficie generada por este tipo de interpolación no pasa por ninguno de los puntos de datos de entrada (Childs, 2004). Es por ello que se obtienen datos diferentes una vez hecha la interpolación.

Existe coherencia temporal en cuanto a los perfiles de potencial de emisión de  $\text{PM}_{10}$  mensuales, se observa claramente la estructura de un perfil diurno, lo que podría estar relacionado a la cantidad de radiación solar para esas horas. Los perfiles de todos los

meses, con excepción de junio y agosto, presentan un máximo en la hora 15:00. En los meses de junio y agosto los picos del perfil se dan a partir de la hora 10:00, lo que se explica por la evolución de los vientos en estos meses, ya que la velocidad de viento es alta a partir de la hora 07:00.

Hay coherencia en la cantidad de emisiones y su temporalidad para el año. El aumento de emisiones en agosto se explica tanto por las mayores velocidades del viento como por el mayor número de días de emisión que le corresponde. En enero, febrero y agosto se estiman emisiones de  $PM_{10}$  mayores a  $840 \text{ t mes}^{-1}$ , en conjunto estos tres meses suman el 61% del total de emisiones anuales. En marzo, octubre y diciembre se estiman emisiones de  $PM_{10}$  entre  $640$  y  $770 \text{ t mes}^{-1}$ , lo que en conjunto suma el 22% del total de emisiones anuales. Para los meses de enero, agosto y octubre los datos tanto de número de días de emisión promedio en todas las estaciones como de estimación de emisiones coinciden, son meses con valores altos en ambos parámetros.

Llama la atención la baja emisión de julio, a pesar de presentar más de 15 días de emisión promedio para todas las estaciones, el valor asciende a  $190 \text{ t mes}^{-1}$  (2% del total anual). De manera inversa, para febrero se estiman emisiones de  $844 \text{ t mes}^{-1}$  (9% del total anual); sin embargo, es uno de los meses con el menor número de días de emisión promedio para todas las estaciones. Las estaciones que presentan el mayor número de días de emisión (mas de 18) en el mes de febrero corresponden a Ambuqui, Topo-Imbabura, Calderón y Cayambe; todas ubicadas en la sierra-Norte del país.

La ubicación espacial correspondiente a las emisiones en el norte del Distrito Metropolitano de Quito coinciden con la información publicada en los Inventarios de Emisiones del DMQ para los años 2003, 2005, 2007 y 2009 donde se asegura que el polvo emitido por resuspensión eólica se origina en las zonas de San Antonio de Pichincha,

Calderón y Pomasqui (CORPAIRE, 2006), (CORPAIRE, 2008), (CORPAIRE, 2009) y (Secretaría de Ambiente, 2013).

Las zonas llamadas área erosionada y suelo desnudo son sitios con algún tipo de intervención humana (como el sobrepastoreo) o con características climáticas que las han generado, como baja precipitación y altas velocidades del viento. El sobrepastoreo y las modificaciones climáticas pueden cambiar drásticamente las emisiones de material particulado por erosión eólica a la atmósfera (Marticorena et al., 1997). La mayor cantidad de emisiones proviene de áreas erosionadas, que corresponden al 92% del total.

Para la plantación de maíz se estima una cantidad pequeña de emisiones por resuspensión eólica, a pesar de que es una zona extensa. Existen estudios que dan relevancia a las emisiones agrícolas debido a que la erosión eólica es uno de los problemas más serios de degradación del suelo en muchas de las regiones agrícolas del mundo (López et al., 1998). El hecho de que las emisiones para zonas de maíz sean tan pequeñas puede deberse a tres factores:

1. Toda la zona de costa que contiene plantaciones de maíz presenta velocidades de viento pequeñas.
2. El valor escogido de velocidad umbral de fricción,  $u^*_t$ , fue de alrededor de 0.45, valor que requiere velocidades de viento altas para producir emisiones, de acuerdo a la ecuación utilizada.
3. El modelo matemático no es específico para zonas agrícolas

Las 4 provincias con mayor cantidad de emisiones se ubican en la sierra Norte: Carchi, Imbabura, Pichincha y Cotopaxi. Estas provincias emiten anualmente alrededor del 80% de las emisiones totales anuales de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por resuspensión eólica en el Ecuador. En estas provincias hay la mayor presencia de áreas erosionadas. El factor de emisión para el área erosionada es alto ya que su longitud de rugosidad aerodinámica,  $z_0$ ,

es baja y su velocidad umbral de fricción,  $u^*_t$ , también, por lo que no se requiere vientos muy fuertes para levantar polvo. Bajo el mismo razonamiento se observa que, las emisiones de afloramiento rocoso y vegetación geliturbada no son importantes, esto puede deberse a la selección de un valor de velocidad umbral de fricción alto.

Las zonas urbanas que podrían verse afectadas por contaminación debido a emisiones de PM por erosión eólica son la ciudad de Ibarra, el norte de Distrito Metropolitano de Quito, la ciudad de Riobamba y la ciudad de Cuenca. Es importante notar que la topografía de ciertas zonas podría detener o propender la dispersión de las emisiones de PM. Para el caso de la zona de Ibarra las emisiones provenientes del sur de Carchi podrían detenerse debido a la presencia de montañas. Otras zonas como el norte de Quito o Cuenca no presentan formaciones montañosas importantes entre las fuentes de emisión y la ciudad, por lo tanto la dispersión de PM podría no interrumpirse.

Una de las asunciones del modelo de emisiones es utilizar la velocidad promedio por hora. El manual WRAP y el informe AP-42 de la EPA indican que los vientos promedio pueden no ser suficientes para mantener erosión en superficies planas. Mencionan que se debe utilizar la variable meteorológica llamada *milla más rápida* (que representa la velocidad de viento correspondiente a toda una milla de movimiento del viento que ha pasado por el anemómetro de contacto) valor más alto que el promedio horario, pero más bajo que la ráfaga de mayor velocidad. Dicha variable debe ser medida en el sitio (Countess Environmental, 2006) y (USEPA, 2006). Este es un elemento que indica que las emisiones estarían subvaloradas.

Según los analistas de calidad de aire, el impacto al ambiente por parte de las fuentes de polvo fugitivo es mucho menor de lo que los inventarios de emisiones sugieren. Los análisis muestran que el proceso de modelado puede sobreestimar el valor de  $PM_{2.5}$  de fuentes de polvo fugitivo hasta por un orden de magnitud (Pace, 2005). Es de preocupación



general en el ámbito científico el cálculo de  $PM_{2.5}$  a partir del valor estimado de  $PM_{10}$ . Existe un estudio que sugiere una revisión de la relación  $PM_{2.5}/PM_{10} = 0.15$  realizado por (Pace, 2005) quien determina valores diferentes de la relación dependiendo del tipo de superficie a analizar, concluye que un valor de 0.11 para la relación resultaría adecuado. Esto implica que los valores de  $PM_{2.5}$  obtenidos en la estimación son mayores a los reales.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se estimaron las emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  por resuspensión eólica para el Ecuador continental, para las categorías de uso de suelo: afloramiento rocoso – mina – grava, vegetación geliturbada, áreas erosionadas, eriales, suelo desnudo, plantación de maíz y pajonal. Se identificaron zonas de potencial afectación por exposición a emisiones de PM por resuspensión eólica. Esta estimación constituye posiblemente la primera cuantificación de las emisiones por resuspensión eólica en el Ecuador.

Las asunciones para el cálculo de emisiones y la complejidad del sistema modelado implican un alto nivel de incertidumbre en los resultados. El modelo aplicado resulta útil para conocer un valor aproximado real de emisiones.

El cálculo de emisiones representa una guía para futuros inventarios de emisiones a nivel nacional. La estimación de emisiones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  puede ser utilizada en modelos de dispersión de contaminantes. Los modelos de dispersión permitirían obtener valores de concentración de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en determinadas zonas del país, con el objetivo de conocer si estos valores son perjudiciales para la salud poblacional. Por otro lado esta estimación de emisiones puede servir como guía para la toma de decisiones sobre medidas de control y reducción de emisiones.

Si bien la bibliografía internacional es de gran ayuda para el cálculo de emisiones, el Ecuador es una zona muy particular, tanto por su meteorología como el relieve y los sistemas ecológicos, por lo tanto se debería hacer esfuerzos adicionales para mejorar los datos obtenidos y generar mayor cantidad de información de base. La estimación presentada representa el mejor esfuerzo que se puede realizar con la información disponible. Los aspectos que pueden ser considerados a futuro para disminuir el nivel de incertidumbre son los siguientes:

- Aplicar modelos de emisiones actualizados que sean adaptables para las zonas: modelos de emisión específicos para zonas agrícolas y carreteras no pavimentadas (las mayores fuentes de emisión de polvo fugitivo provienen de carreteras no pavimentadas (Pace, 2005)).
- Se recomienda realizar pruebas de campo para cada tipo de suelo específico, de manera que se obtenga valores experimentales de la velocidad umbral de fricción.
- Validar los valores de velocidad de viento con registros de estaciones meteorológicas.
- Analizar los datos de precipitación mensual para realizar mapas de lluvia en base a modelos climatológicos.

Se presentan como potenciales medidas de control para la disminución de emisiones de PM por resuspensión las siguientes:

- Es recomendable dejar la mayor cobertura de biomasa después de la época de plantación, cuando el suelo está desnudo (Countess Environmental, 2006)
- Regar agua sobre la superficie expuesta (Nordstrom & Hotta, 2004) y (Countess Environmental, 2006).
- En las zonas donde sea posible, se recomienda la reforestación o revegetación de plantas endémicas.
- Disminuir el ingreso de tráfico en zonas donde no existe camino, como sucede en el páramo, donde la erosión por ausencia de medidas de conservación determina el afloramiento de cenizas volcánicas antiguas endurecidas conocida como *cangahua* (Podwojewski, 1999).
- Por último se recomienda designar áreas determinadas para el pastoreo, sin que estas entren en zonas sensibles tanto de páramo como las conocidas por ser propensas a erosión eólica (Podwojewski et al., 2002).

## 8. Bibliografía

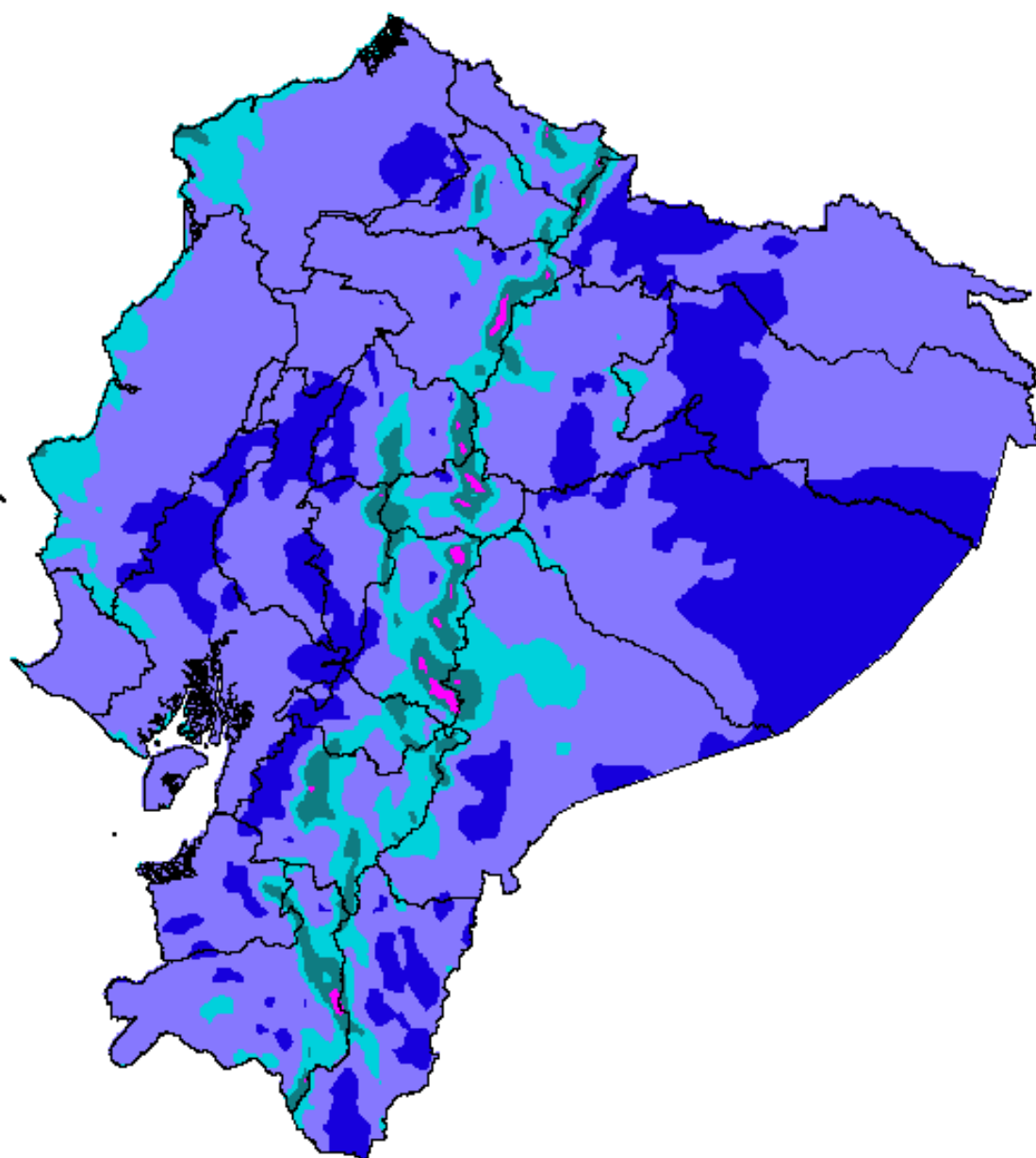
- Barnard, W. (Abril de 2003). Personal Communication with W. Barnard, MACTEC Engineering & Consulting.
- Beltrán et al. (2009). *Distribución espacial, sistemas ecológicos y caracterización florística de los páramos en el Ecuador*. Quito: EcoCiencia, Proyecto Páramo Andino y Herbario QCA.
- Caviedes, M. (2007). Clase Cultivos de la Sierra USFQ. *Cultivos de la Sierra* .
- Childs, C. (2004). *Interpolating Surfaces in ArcGis Spatial Analyst*. Recuperado el Noviembre de 2012, de ESRI Education Services: [www.esri.com](http://www.esri.com)
- CORPAIRE. (2008). *Inventario de Emisiones del DMQ 2005*.
- CORPAIRE. (2006). *Inventario de Emisiones del DMQ 2003*.
- CORPAIRE. (2009). *Inventario de Emisiones del DMQ 2007*.
- Countess Environmental. (2006). *WRAP Fugitive Dust Handbook*.
- Ebi, K., & McGregor, G. (2008). Climate Change, Tropospheric Ozone and Particulate Matter, and Health Impacts. *Environmental Health Perspectives* , 116 (11), 1449-1455.
- EMOV. (2011). *Informe de Calidad de Aire Cuenca*. Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Cuenca EMOV.
- EMOV. (2011). *Resumen del Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca Año 2009*. Red de Monitoreo de la Calidad de Aire de Cuenca EMOV.
- ENVIRON. (2006). *Fugitive Wind Blown Dust Emissions and Model Performance Evaluation Phase II*. ENVIRON International Corporation.
- Fundación Natura-Cuencaire-CGA. (2009). *Resumen del inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, año base 2007*. Cuenca.
- Ginoux, P. (2004). *Natural Emission: Mineral Dust Aerosols*. GEIA/ACCENT Workshop, Paris.
- Girard, J. (2005). *Principles of Environmental Chemistry*. US: Jones and Bartlett.
- Hagen, L. (2010). Erosion by Wind: Modeling. *Encyclopedia of Soil Science* , 1-4.
- INAMHI. (2012). *Anuario Meteorológico 2010. Versión Preliminar*. Quito: SIGHIM.
- IPCC. (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Press.

- Jorgensen, P., & Ulloa, C. (1994). Seed plants of the high Andes of Ecuador. A checklist. *AAU Reports* , 1-443.
- Josse, C. (2000). Introducción en Los Suelos del Páramo. *Serie Páramo 5* .
- Kim et al. (2012). A semi-continous measurement of gaseous ammonia and particulate ammonium concentrations in PM2.5 in the ambient atmosphere. *Journal of atmospheric Chemistry* .
- Kok et al. (2012). The physics of wind-blown sand and dust. *Reports on Progress in Physics* .
- Korcz, M., Fudala, J., & Klis, C. (2009). Estimation of Windblow dust emissions in Europe and its vicinity. *Atmospheric Environment* , 1410-1420.
- León-Yáñez, S. (2000). La flora de los páramos ecuatorianos. *Serie Páramo 7: Biodiversidad* .
- López et al. (1998). Tillage effects on soil surface conditions and dust emission by wind erosion in semiarid Aragón (NE Spain). *Soil and Tillage Research* , 91-105.
- MAGAP. (2012). *Inventario de recursos naturales, nivel nacional, escala 1:250000*. Recuperado el Septiembre de 2012, de Geoportal del Agro Ecuatoriano: <http://geoportal.magap.gob.ec/inventario.html>
- Marticorena, B., & Bergametti, G. (1995). Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme. *Journal of Geophysical Research*, 100 (D8), 16,415-16,430.
- Marticorena et al. (1997). Factors controlling threshold friction velocity in semiarid and arid areas of the United States. *Journal of Geophysical Research* , 102 (D19), 23277-23287.
- Ministerio de Agricultura Ganadería Acuacultura y Pesca. (2012). *Geoportal*. Recuperado el 20 de 08 de 2012, de Inventario de recursos naturales: <http://geoportal.magap.gob.ec/inventario.html>
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Plan Nacional de Calidad de Aire*.
- Naoum, S., & Tsanis, I. (2004). Ranking Spatial Interpolation Techniques Using a GIS-Based DSS. *Global Nest* , 6 (1), 1-20.
- NARSTO. (2004). *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*. (P. McMurry, M. Shepherd, & J. Vickery, Edits.) Cambridge: Cambridge University Press.
- Nordstrom, K., & Hotta, S. (2004). Wind erosion from cropland in the USA: a review of problems, solutions and prospects. *Geoderma* , 121, 157-167.





- Olaya, V. (2010). *Sistemas de Información Geográfica*. SextanteGIS.
- OPS. (2010). *Determinantes ambientales y sociales de la salud*. Organización Panamericana de la Salud.
- Ortiz, E. (Noviembre de 2012). Información mapa de sistemas ecológicos de páramo del Ecuador. (M. E. Sánchez, Entrevistador)
- Pace, T. (2005). *Examination of the Multiplier Used to Estimate PM<sub>2.5</sub> Fugitive Dust Emissions from PM<sub>10</sub>*. nd: nd.
- Parra, R. (2012). Evaluación preliminar de la temperatura media en superficie del Ecuador para el año 2010, obtenida mediante el modelo Weather Research Forecasting (WRF). *Avances en Ciencias e Ingeniería USFQ*, 4 (2), 27-35.
- Parra, R. (2012). *Taller de Inducción*. Inventario de emisiones en las ciudades de Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro. Año base 2010. Ministerio del Ambiente, Quito.
- Podwojewski, P. (1999). Los suelos de las altas tierras andinas: Los páramos del Ecuador. *Sociedad Ecuatoriana de la Ciencia del Suelo*, 9-14.
- Podwojewski, P., & Poulénard, J. (2000). Los suelos de los páramos de Ecuador. *Serie Páramo 5*.
- Podwojewski et al. (2002). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management* (18), 45-55.
- Podwojewski, P., & Poulénard, J. (2004). Paramos Soils. *Encyclopedia of Soil Science*.
- Poulénard, J. et al. (2001). Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. *Catena*, 45, 185-207.
- Presidencia de la República. (2003). *Norma de Calidad de Aire Ambiente*.
- Ravi et al. (2006). On the effect of moisture bonding forces in air-dry soils on threshold friction velocity of wind erosion. *Sedimentology* (53), 597-609.
- Secretaría de Ambiente. (2012). *Informe Anual 2011 Calidad del Aire*. Distrito Metropolitano de Quito, Quito.
- Secretaría de Ambiente. (2013). *Inventario de Emisiones del DMQ 2009*.
- Secretaría de Ambiente. (2013). *Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito*. Recuperado el Abril de 2013, de [http://190.152.144.75/ecoficinas/index\\_11.html](http://190.152.144.75/ecoficinas/index_11.html)

- Shao, Y., & Lu, H. (2000). A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D17), 22,437-22,443.
- Shao, Y. (2000). *Physics and modelling of wind erosion*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Suárez, E. (Enero de 2013). Información sobre suelos de Páramo. (M. E. Sánchez, Entrevistador)
- USEPA. (Enero de 1995). Recuperado el 20 de Agosto de 2012, de Compilation of Air Pollutant Emission Factors AP-42 Volume 1: Stationary Point and Area Sources: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>
- USEPA. (Noviembre de 2006). *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*. Recuperado el Abril de 2013, de Technology Transfer Network Clearinghouse for inventories & emissions factors: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/>
- USEPA. (2012). *Air and Radiation. NAAQS*. Recuperado el Abril de 2013, de EPA: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>
- USEPA. (2012). Recuperado el 20 de Agosto de 2012, de Particulate Matter: <http://www.epa.gov/airquality/particlepollution/>
- USEPA. (2012 de Abril de 2012). Recuperado el 20 de Agosto de 2012, de Six Common Pollutants: <http://www.epa.gov/airquality/urbanair/>
- Viteri, R. (2012). *Estimación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles de la vegetación del Ecuador durante el año 2010*. Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- Wallace, J., & Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science* (2a edición ed.). Canada: Elsevier.
- WHO. (2000). *Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition*. Copenhagen.
- WHO. (2005). *World Health Organization*. Recuperado el 24 de 08 de 2012, de Air quality guidelines, global update 2005: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair\\_aqg/en/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/en/)
- WHO. (2009). *Health and Environment Linkages Initiative*. Recuperado el Abril de 2013, de The Urban Environment: <http://www.who.int/heli/risks/urban/urbanenv/en/>

## 9. ANEXO A

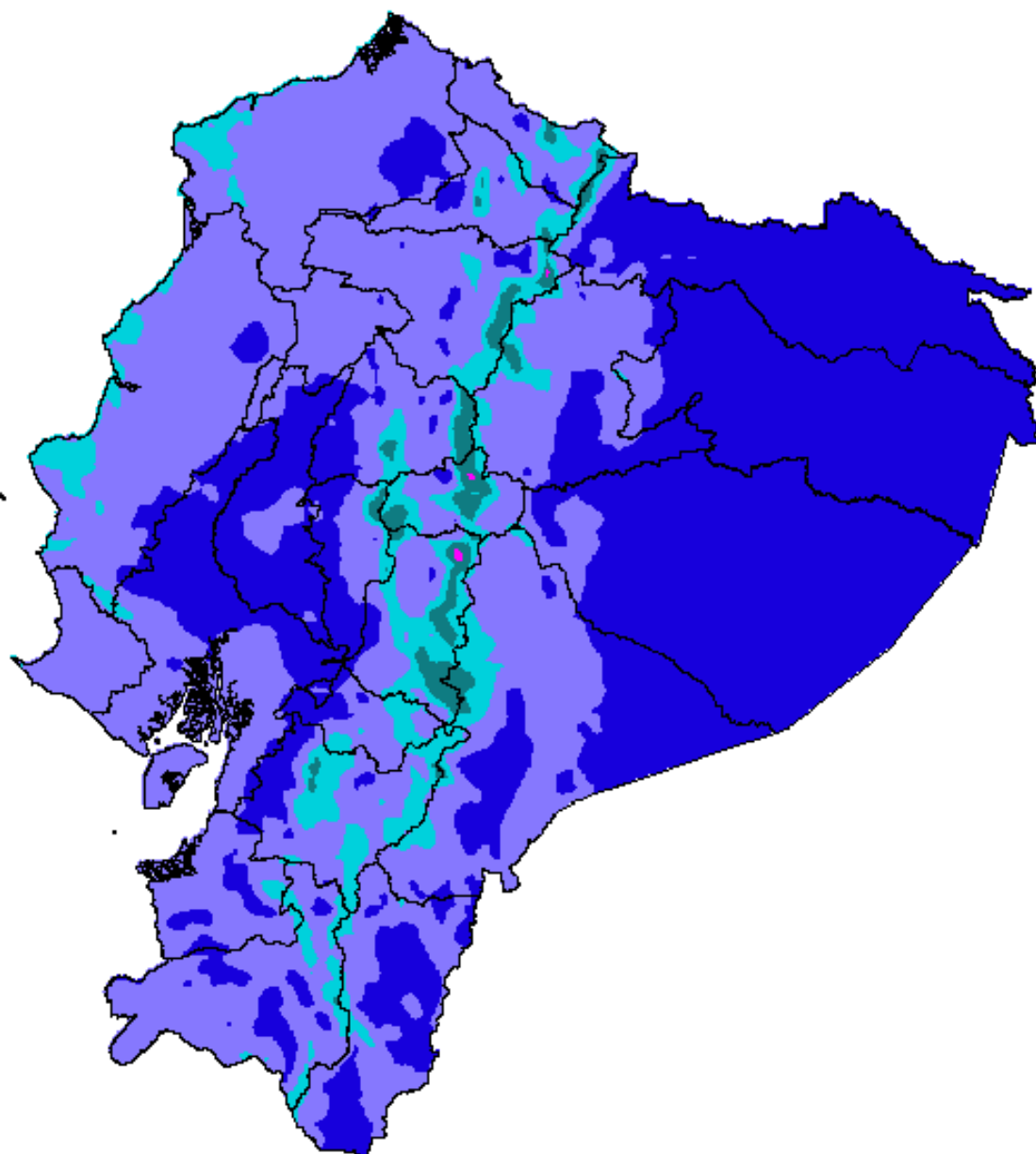


Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para enero 2010

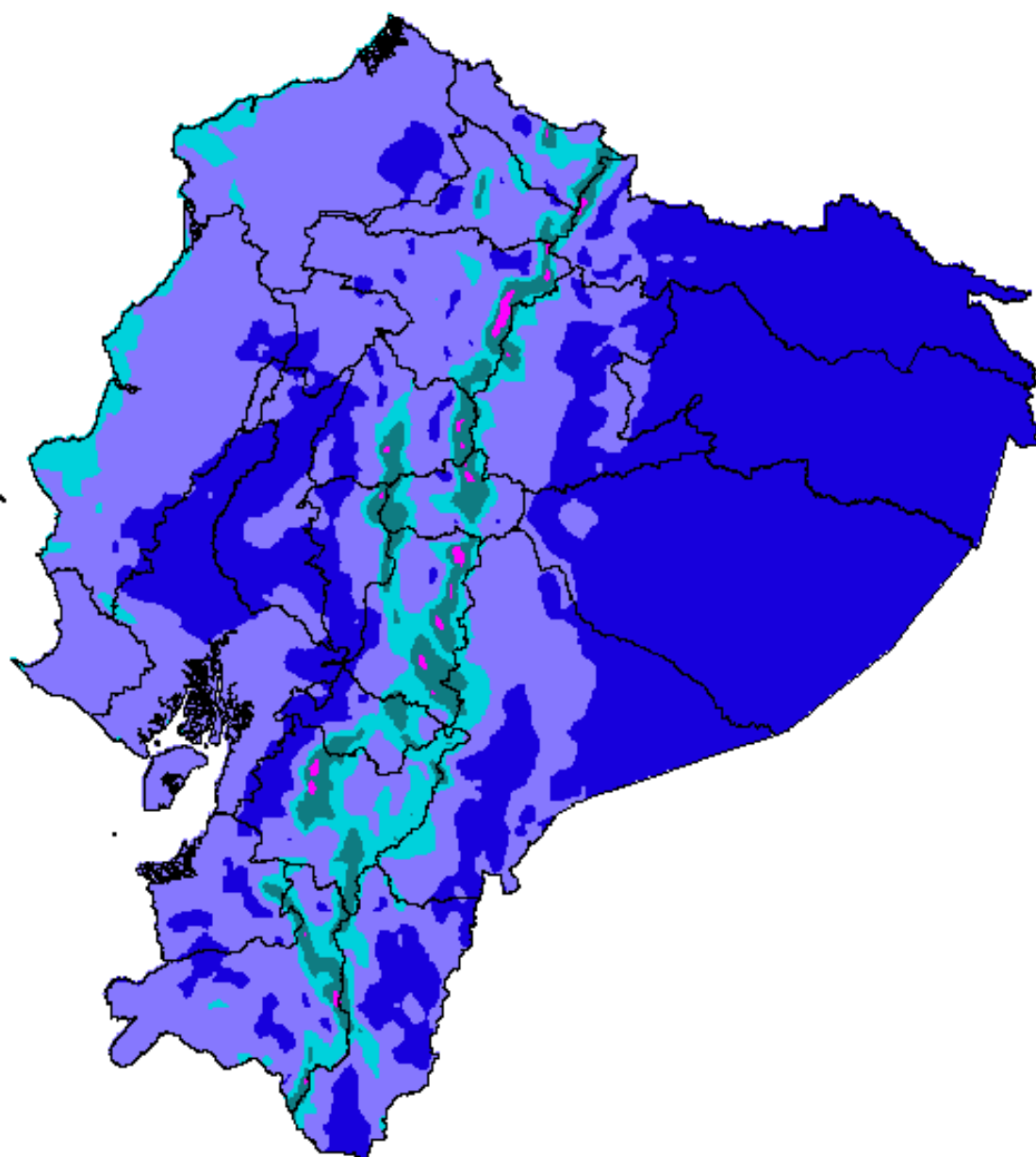




Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

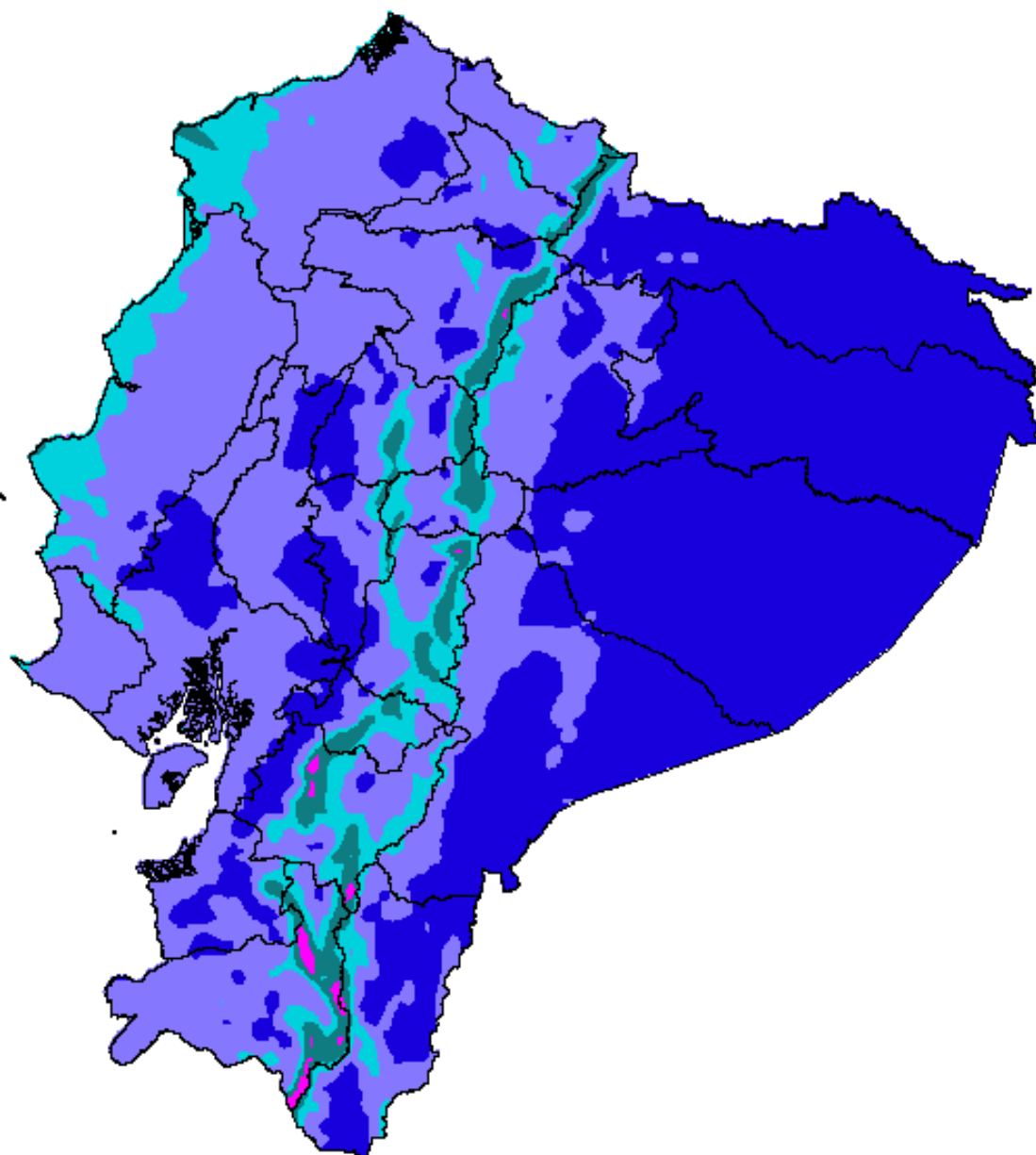
Mapa de velocidad de viento promedio para febrero 2010




Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

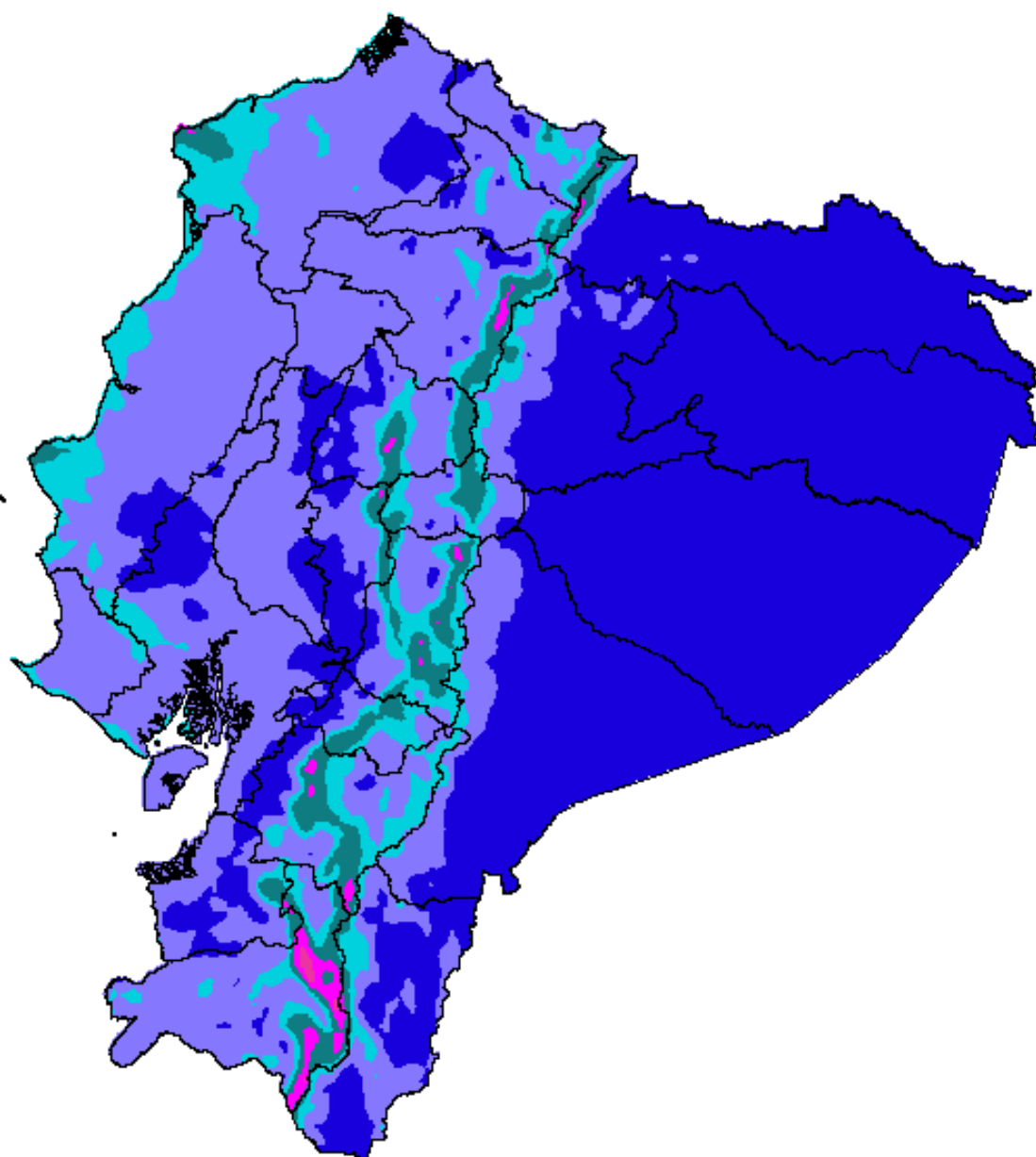
Mapa de velocidad de viento promedio para marzo 2010



Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

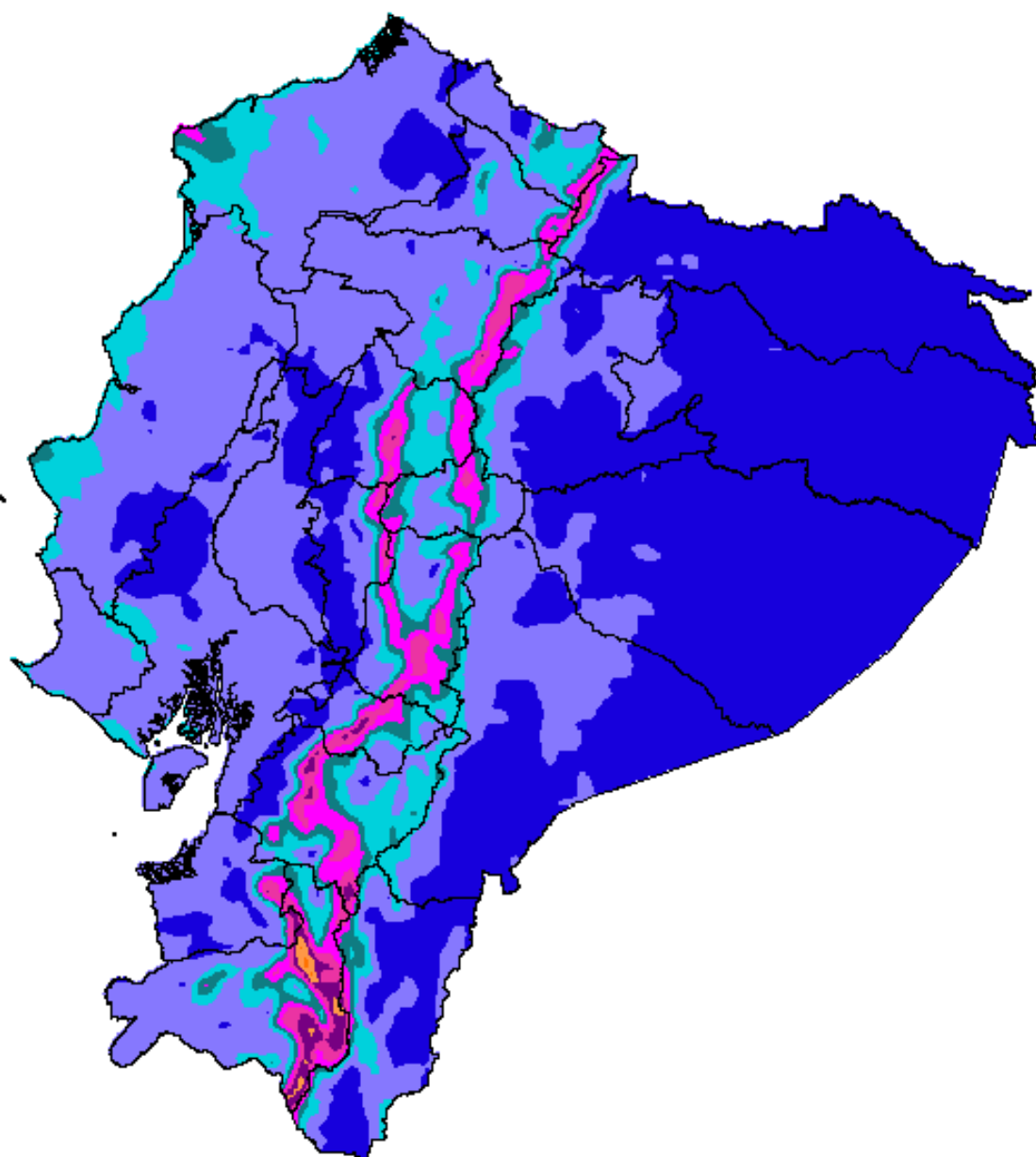
Mapa de velocidad de viento promedio para abril 2010



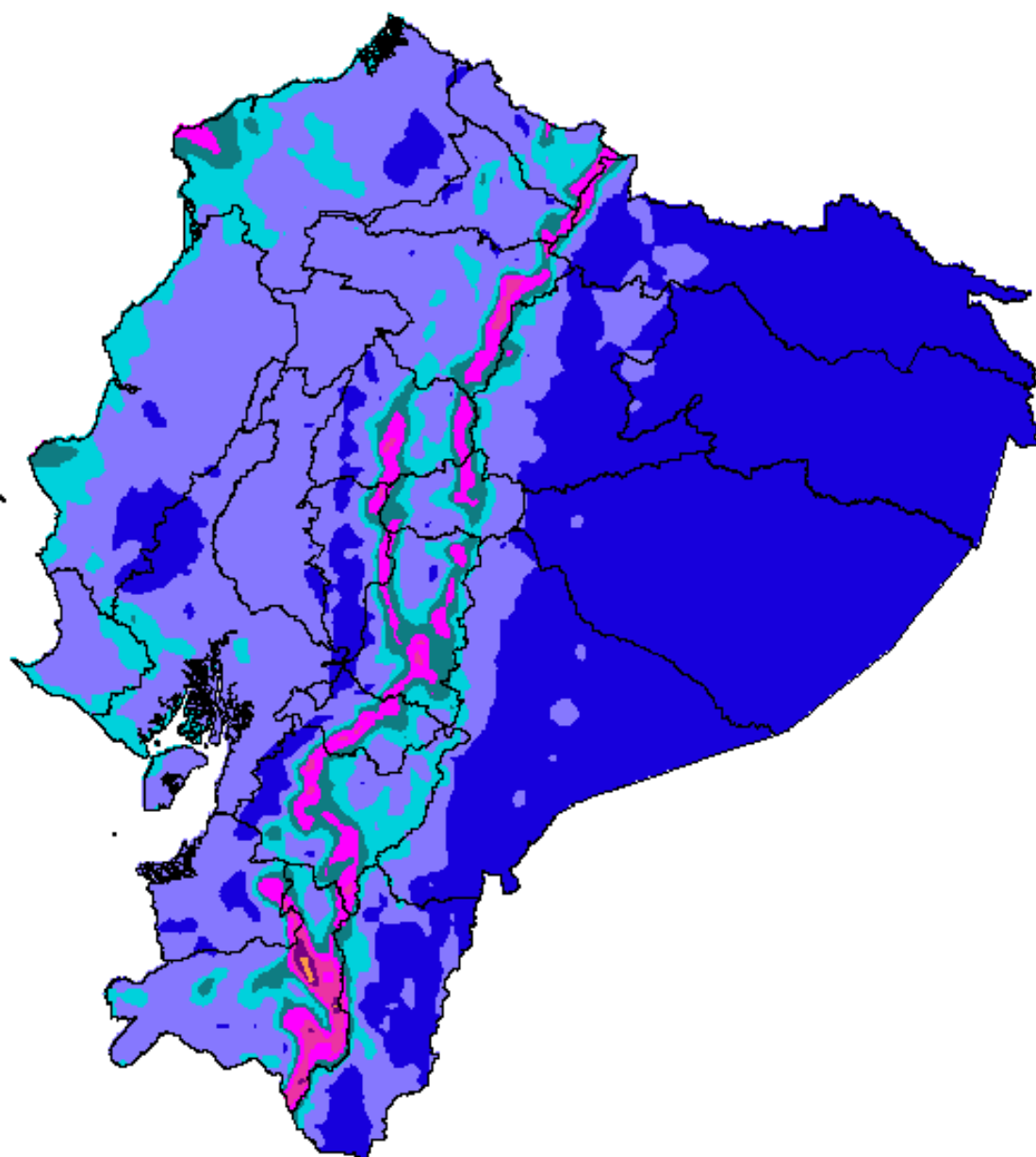
Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para mayo 2010



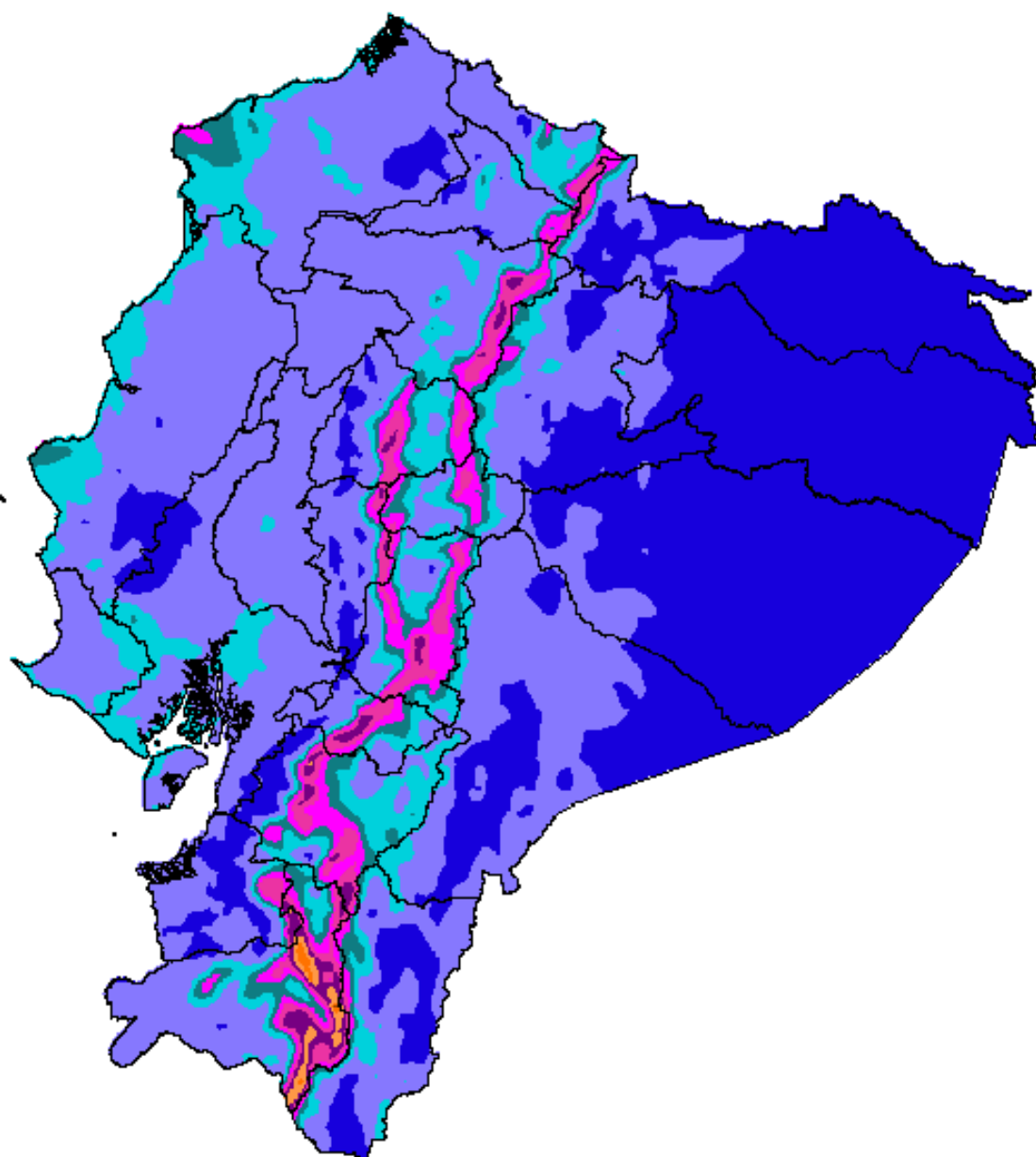
Mapa de velocidad de viento promedio para junio 2010





Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

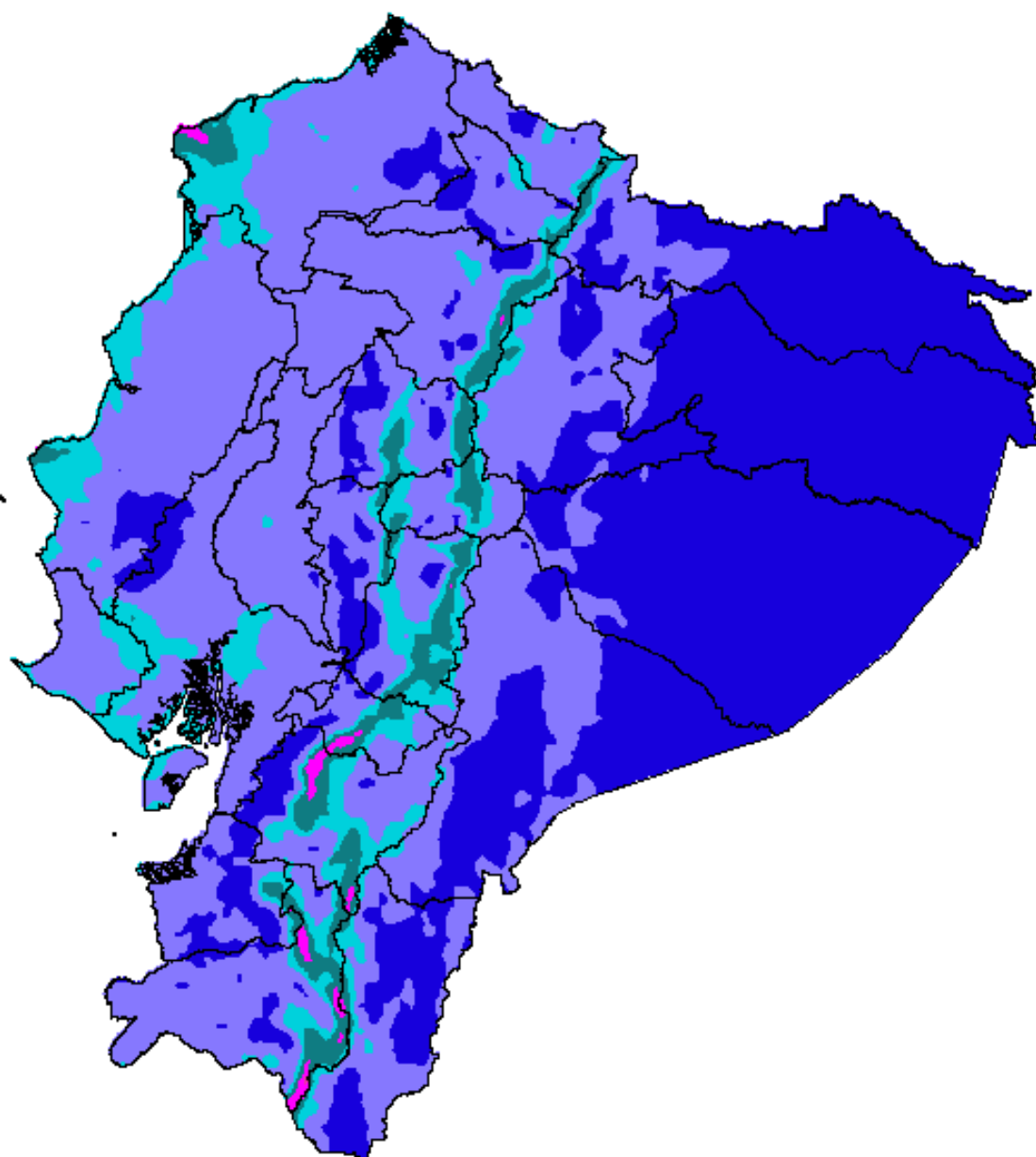
Mapa de velocidad de viento promedio para julio 2010




Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para agosto 2010

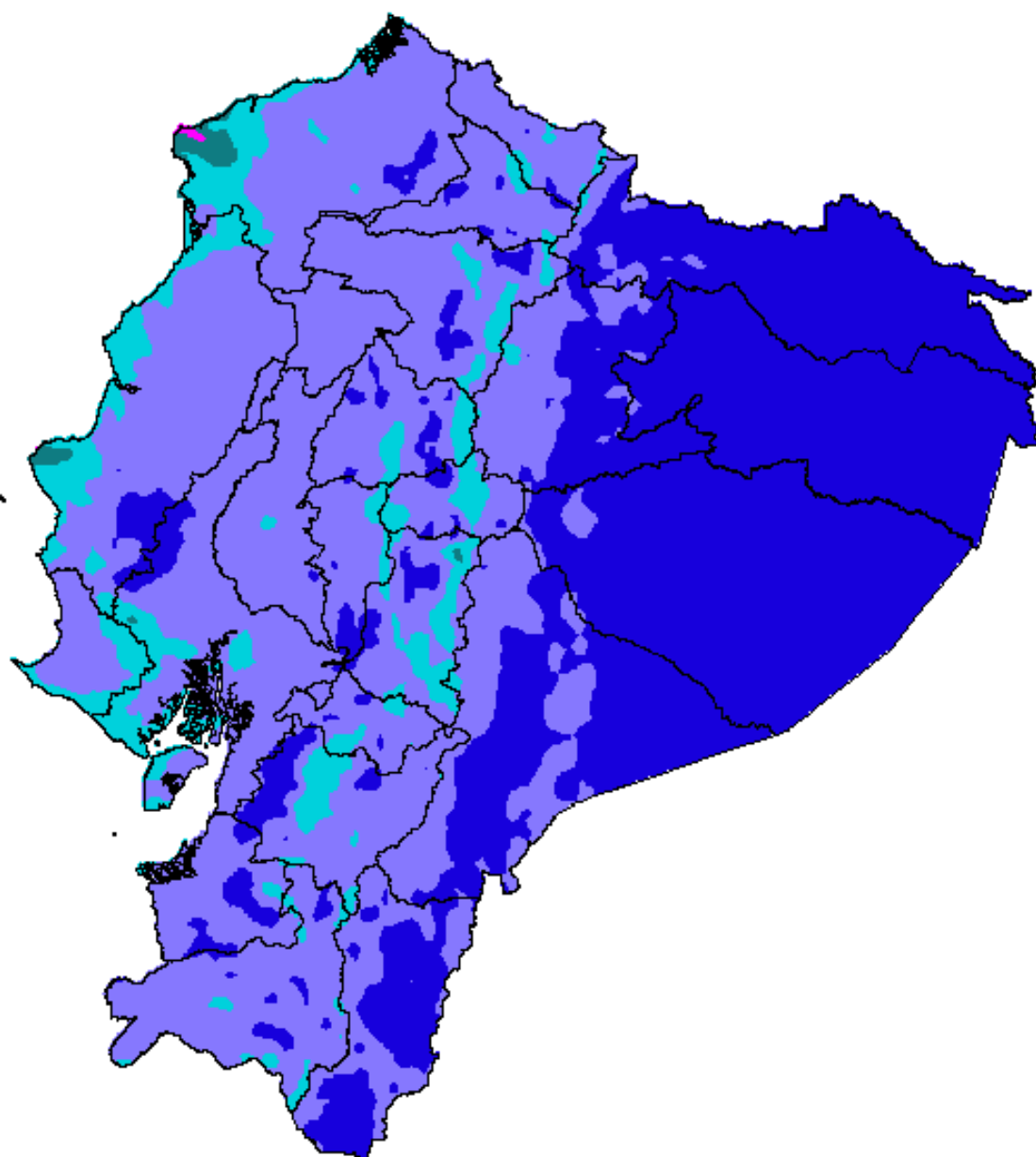


Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]


	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para septiembre 2010

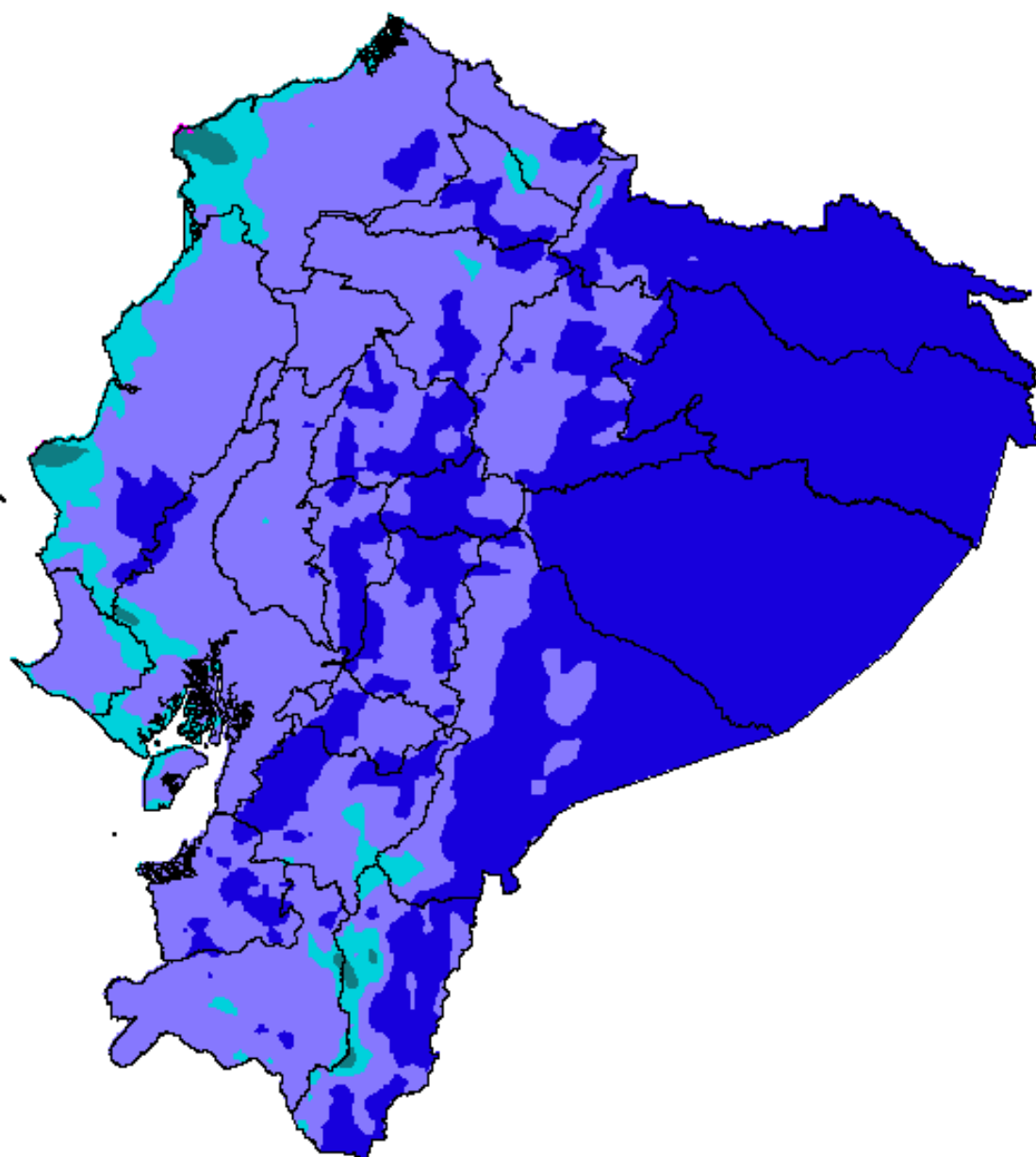





Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

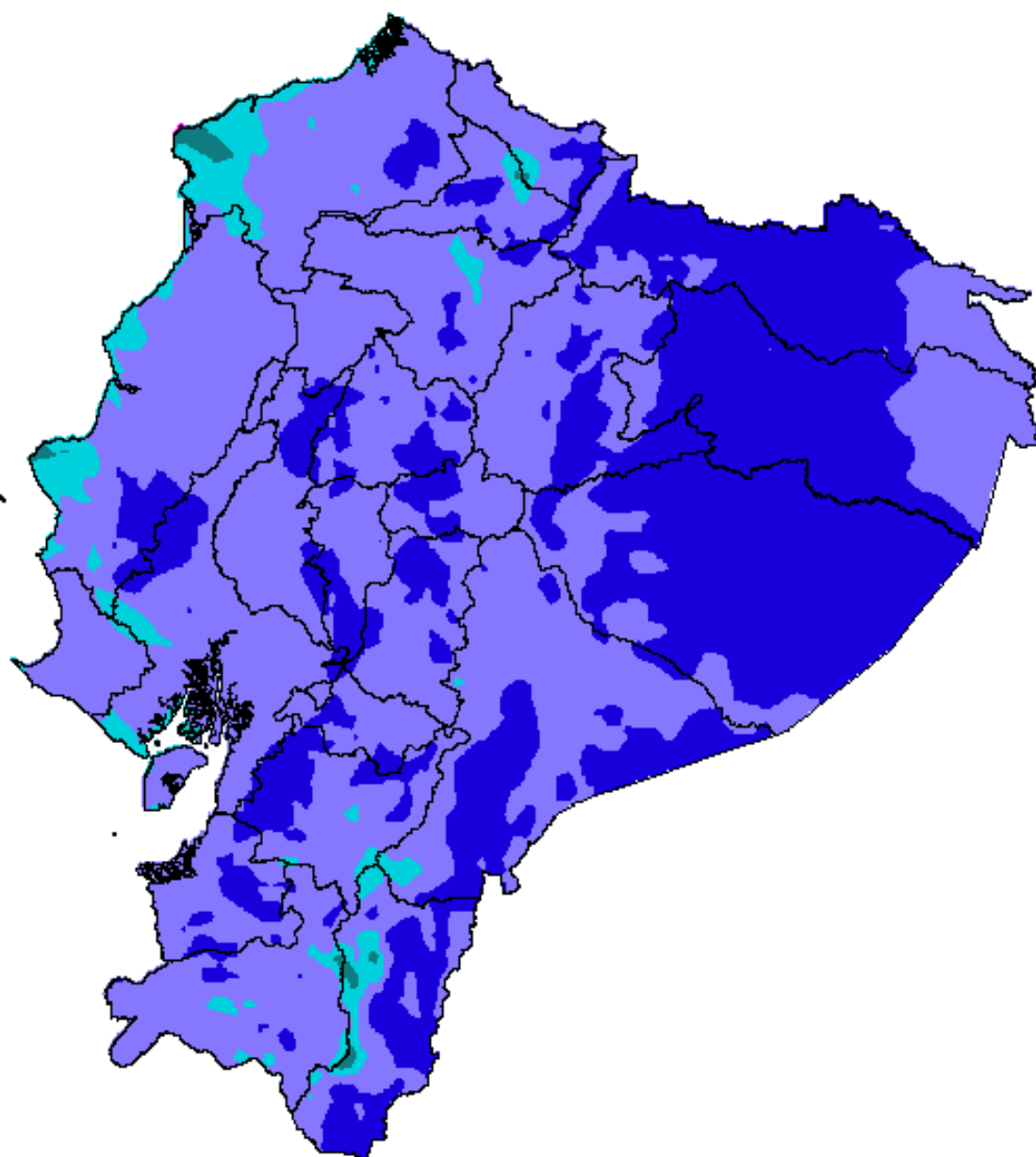
Mapa de velocidad de viento promedio para octubre 2010



Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para noviembre 2010



Velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ]

	0 - 1.5		7.5 - 9
	1.5 - 3		9 - 10.5
	3 - 4.5		10.5 - 12
	4.5 - 6		12 - 13.5
	6 - 7.5		13.5 - 15

Mapa de velocidad de viento promedio para diciembre 2010