



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN CON LA
COLECTIVIDAD

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y CONSTRUCCIÓN

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN
QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS
CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+

Tesis de grado

Autor: Álvarez Mendoza César Iván

Director: Padilla Almeida Oswaldo

Sangolquí, 2014

Certificación del Coordinador

Ing. Esthela Salazar

Certifican:

Que el trabajo titulado “ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+”, realizado por CÉSAR IVÁN ALVAREZ MENDOZA, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas en el Reglamento de Estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Debido a su importante aplicación se recomiendan su publicación.

Sangolquí, 2 de Mayo de 2014

Ing. Esthela Salazar

COORDINADORA

Autoría de Responsabilidad

CÉSAR IVÁN ALVAREZ MENDOZA

Declaro que:

El proyecto de grado denominado “ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mí autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Sangolquí, 2 de Mayo de 2014

CÉSAR IVÁN ALVAREZ MENDOZA

Autorización

Yo, CÉSAR IVÁN ALVAREZ MENDOZA

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del trabajo “ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 1 de Abril de 2014

CÉSAR IVÁN ALVAREZ MENDOZA

Dedicatoria

Dedicado este logro primeramente a Dios por ser un ser supremo que nos llena de paciencia para lograr el éxito, a mis hermosas nenas mi Pauly y mi Naty gracias en verdad por todo por ser la alegría de mi vida y estar junto a mí las amo con toda mi alma. A mis padres y a mi hermano porque siempre me apoyaron y supieron guiarme por el camino correcto del estudio. A mis compañeros de la maestría que entre todas las cosas siempre estuvimos unidos y se superó varias cosas que se nos pusieron adversas.

César Iván Álvarez Mendoza

Agradecimiento

Agradezco a la empresa Geoint Cia. Ltda. por su aporte con la ayuda para generación de esta tesis con la prestación de las licencias de software aplicado, a mi director de tesis el Ing. Oswaldo Padilla por transmitirme su conocimiento para el desarrollo de la investigación, a mis familia y amigos por tener paciencia en los momentos de desarrollo de tesis, a Hernán Martínez por brindarme el tiempo para poder continuar con este logro, a Marco mi pana del alma que me ayudo en la contribución de ciertos aspectos técnicos.

ÍNDICE

	Pág.
Introducción	1

1. CAPITULO I

1.1 ASPECTOS GENERALES

1.1.1	Antecedentes	2
1.1.2	Justificación.....	2
1.1.3	Identificación del problema.....	3
1.1.4	Descripción del área de estudio	4
1.1.4.1	Ubicación geográfica	4
1.1.4.2	Área de influencia	5
1.1.5	Objetivo general	7
1.1.6	Objetivos específicos	7

2. CAPITULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1	Sensores Remotos	8
2.1.1.1	Imágenes Satelitales	8
2.1.1.2	Inicios.....	8
2.1.1.3	Resoluciones	9
2.1.1.4	Principios de captura de datos.....	12
2.1.1.5	Componentes.....	12
2.1.1.6	Usos.....	14
2.1.2	Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+.....	14
2.1.2.1	Características	15
2.1.2.2	Bandas Térmicas	16

2.1.2.3	Correcciones en imágenes satelitales	19
2.1.3	Índices ambientales	23
2.1.3.1	NDVI.....	24
2.1.3.2	LWCI	24
2.1.3.3	TB.....	25
2.1.3.4	SAVI	25
2.1.3.5	NSI	25
2.1.3.6	Algoritmo Landsat ETM+ PM10.....	26
2.1.3.7	Casos de Estudio de determinación de PM10 en base Landsat	26
2.1.4	Contaminación del aire	29
2.1.4.1	Material Particulado PM10	30
2.1.4.2	Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito	30

3. CAPITULO III

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1	Metodología aplicada.....	34
3.1.2	Hardware empleado	35
3.1.3	Software empleado.....	35
3.1.4	Imágenes satelitales Landsat 7 utilizadas en el proyecto.....	35
3.1.5	Datos de referencia de PM10 tomados en campo	36
3.1.6	Procesamiento digital de imágenes	36
3.1.6.1	Corrección topográfica.....	36
3.1.6.2	Corrección geométrica	37
3.1.6.3	Corrección radiométrica.....	39
3.1.6.4	Corrección atmosférica	39
3.1.6.5	Cálculo de Índices ambientales.....	40
3.1.6.5.1	NDVI.....	41
3.1.6.5.2	LWCI	43
3.1.6.5.3	TB.....	45

	viii
3.1.6.5.4 SAVI	47
3.1.6.5.5 NSI	49
3.1.6.5.6 Algoritmo Landsat ETM+ PM10	51
3.1.6.6 Mediciones de PM10 mediante la Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito.....	53
3.1.6.7 Correlación entre puntos de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito y datos procesados Landsat ETM+	54

4.1 CAPITULO IV

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1 Resultados	59
------------------------	----

5. CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1 Conclusiones	69
5.1.2 Recomendaciones.....	70
<i>Bibliografía</i>	71
<i>Glosario</i>	73
<i>Anexos</i>	75
Anexo 1: Corrección radiométrica en bandas multiespectrales mediante ENVI...	75
Anexo 2: Corrección atmosférica en bandas multiespectrales mediante ENVI	78
Anexo 3: Corrección atmosférica y radiométrica en bandas térmicas ENVI	82
Anexo 4: Cálculo de Índices Ambientales en ENVI.....	87
Anexo 5: Mapas resultados	90

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Ubicación del área de estudio en el Ecuador.	5
<i>Figura 2.</i> Ubicación de áreas de influencia.	6
<i>Figura 3.</i> Representación de la resolución espacial.....	9
<i>Figura 4.</i> Resolución espacial frente a tiempo de revisita o resolución temporal para diferentes sensores.	10
<i>Figura 5.</i> Representación de los tipos de órbitas para los satélites artificiales.	10
<i>Figura 6.</i> Representación de cuatro imágenes del mismo sector con diferente resolución radiométrica.	11
<i>Figura 7.</i> Espectro electromagnético, relacionada con el número de bandas y la Longitud de onda en micrómetros.....	12
<i>Figura 8.</i> Proceso de captura de datos en Teledetección.	13
<i>Figura 9.</i> Cobertura histórica de los satélites Landsat.....	14
<i>Figura 10.</i> Resoluciones y características de las bandas del Landsat 7 ETM+. ...	15
<i>Figura 11.</i> Diferencias de saturación entre Ganancia Alta (High Gain) y Ganancia Baja (Low Gain) en el sensor Landsat ETM+.	17
<i>Figura 12.</i> Uso durante el mes de Junio de las diferentes ganancias en las bandas en el sensor Landsat ETM+.	18
<i>Figura 13.</i> Comportamiento espacial del índice de calidad ambiental en Cali obtenido a partir del modelamiento con imágenes satelitales.....	27
<i>Figura 14.</i> Gráfico de mediciones de PM10 calculado a partir de imágenes satelitales vs Mediciones en campo en Makkah, Mina y Arafah (Arabia Saudita) el 19 de enero de 2009.....	28
<i>Figura 15.</i> Mapa de PM10 obtenido a partir de imágenes satelitales en Makkah, Mina y Arafah (Arabia Saudita) el 19 de enero de 2009.	29
<i>Figura 16.</i> Mediciones de PM10 en las estaciones de monitoreo de calidad de aire durante el 2012 en Quito.....	31
<i>Figura 17.</i> Composición de material particulado en Quito.....	32
<i>Figura 18.</i> Esquema metodológico del proyecto.	34

<i>Figura 19.</i> Comparación corrección geométrica y topográfica nivel L1T Landsat ETM+ imagen Julio 2005, con datos vectoriales escala 1:50000 del IGM.	37
<i>Figura 20.</i> Comparación corrección geométrica y topográfica nivel L1T Landsat ETM+ imagen Julio 2008, con datos vectoriales escala 1:50000 del IGM.	38
<i>Figura 21.</i> Comparación corrección geométrica y topográfica nivel L1T Landsat ETM+ imagen Junio 2011, con datos vectoriales escala 1:50000 del IGM.	38
<i>Figura 22.</i> NDVI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2005..	41
<i>Figura 23.</i> NDVI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2008..	42
<i>Figura 24.</i> NDVI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2011..	42
<i>Figura 25.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2005..	43
<i>Figura 26.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2008.	44
<i>Figura 27.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2011.	44
<i>Figura 28.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2005.	45
<i>Figura 29.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2008.	46
<i>Figura 30.</i> LWCI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2011.	46
<i>Figura 31.</i> TB para la zona de influencia directa en la imagen del año 2005.	47
<i>Figura 32.</i> TB para la zona de influencia directa en la imagen del año 2008.	48
<i>Figura 33.</i> TB para la zona de influencia directa en la imagen del año 2011.	48
<i>Figura 34.</i> NSI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2005.	49
<i>Figura 35.</i> NSI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2008.	50
<i>Figura 36.</i> NSI para la zona de influencia directa en la imagen del año 2011.	50
<i>Figura 37.</i> PM10 Calculado para la z. de influencia directa año 2005.	52
<i>Figura 38.</i> PM10 Calculado para la z. de influencia directa año 2008.	52
<i>Figura 39.</i> PM10 Calculado para la z. de influencia directa año 2011.	53
<i>Figura 40.</i> Ubicación de estaciones semiautomáticas con datos de PM10 en los años 2005, 2008 y 2011.	55
<i>Figura 41.</i> Categorías para la clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en los años 2005, 2008 y 2011.	60

<i>Figura 42.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2005.	61
<i>Figura 43.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2005 en la Zona de San Antonio de Pichincha.	62
<i>Figura 44.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2005 en la Zona de Tabacundo.	63
<i>Figura 45.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2005 en la Zona de Zambiza.	64
<i>Figura 46.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2008.	65
<i>Figura 47.</i> Clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2011.	66
<i>Figura 48.</i> Categorías para la clasificación de PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste de manera normalizada en porcentajes. ...	67
<i>Figura 49.</i> Normalización PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2005.	67
<i>Figura 50.</i> Normalización PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2008.	68
<i>Figura 51.</i> Normalización PM10 calculados a partir de los modelos con mejor ajuste en el año 2011.	68

Lista de tablas

Tabla 1. Coordenadas de la Ubicación Geográfica del área de estudio (Influencia Indirecta)	4
Tabla 2. Tipos de Orbita en satélites	11
Tabla 3. Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire.	33
Tabla 4. Valores mínimos de histograma en las bandas de las imágenes satelitales a utilizar en el método de Chávez de corrección atmosférica solicitados en la Ecuación 6 como ρ_{TOAmin} , k.....	40
Tabla 5. Parámetros requeridos en la Ecuación 7	40

Tabla 6. Valores máximos en NIR (Banda 4) y SWIR (Banda 5)	43
Tabla 7. Datos PM10 Monitoreo Semiautomático en Quito.....	54
Tabla 8. Valores de NDVI en los puntos de toma de datos en campo de PM10 ...	56
Tabla 9. Valores de LWCI en los puntos de toma de datos en campo de PM10 ...	56
Tabla 10. Valores de TB en los puntos de toma de datos en campo de PM10	56
Tabla 11. Valores de SAVI en los puntos de toma de datos en campo de PM10 ..	57
Tabla 12. Valores de NSI en los puntos de toma de datos en campo de PM10.....	57
Tabla 13. Coeficiente de determinación R^2 para los diferentes modelos de regresión simple en los índices ambientales.....	57
Tabla 14. Valores de Significancia y R^2 para el modelo de PM10 calculado.....	58
Tabla 15. Coeficiente de determinación R^2 para los dos modelos de regresión que mejor se ajustan para determinar PM10 a partir de índices ambientales.	59
Tabla 16. Ecuaciones finales del modelo PM10 calculado que mejor se ajusta a cada año con las imágenes Landsat definidas.....	60

RESUMEN

El proyecto define la estimación de la calidad de aire y presencia de un contaminante que afecta a la ciudad de Quito como el PM10. El contexto del documento está establecido en base a estudios realizados en otros países, donde se ha tenido un buen porcentaje de estimación aceptable.

Para el proyecto se ha considerado la división del contenido en 5 partes, donde la primera parte abarca básicamente aspectos generales detallando objetivos, ubicación, metas, entre otros aspectos de ámbito general.

En segundo lugar se ubica el marco teórico con sus conceptos.

Como tercer ítem se ha colocado la metodología a aplicarse, en este punto se detalla la metodología a utilizar para comparación de índices y obtención del índice más óptimo para la zona de estudio, así con este capítulo a futuro se puede seguir la secuencia de metodología para aplicación en otras zonas con similares características en el Ecuador que requieran un estudio preliminar de la calidad de su aire.

Posteriormente se detalla el análisis de resultados, donde se identifica la situación del proyecto en base al seguimiento correcto de la metodología, dándose así la información necesaria para conocer un estimador de PM10.

Finalmente las conclusiones y recomendaciones como quinto capítulo darán finiquito al proyecto.

Palabras Clave: IMAGEN SATELITAL, LANDSAT, PM10, ESTACIÓN PASIVAS, MODELO ESPACIAL.

ABSTRACT

The project defines the estimation of air quality and the presence of a contaminant that affects the city of Quito as PM10. The context is established based on studies conducted in other countries, where it has had a good percentage of acceptable estimate.

For the project has been considered the division of content into 5 parts, where the first part covers general aspects basically detailing objectives , location , goals, and other aspects of general scope .

Secondly the theoretical framework, which defines the tools used to perform the project is located.

The third item is placed on the methodology applied, at this point the detailed methodology used to compare rates and obtaining optimal index for the study area, and with this chapter future can follow the sequence of methodology for application in other areas with similar characteristics in Ecuador requiring a preliminary study of the quality of their air.

Later analysis results, where the status of the project is identified based on the correct monitoring methodology and giving the information needed for an estimate of PM10 in the study area with a percentage of detailed correlation.

Finally, conclusions and recommendations as fifth chapter.

Key words: SATELLITE IMAGE, LANDSAT, PM10, PASSIVE STATIONS, AIR POLLUTION

ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO
DETERMINADO POR ÍNDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON
IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+

Este documento busca establecer como el modelo de Estimación de contaminante PM10 puede ser obtenido a partir de imágenes satelitales, siendo comprobado con otros modelos propios a partir de índices ambientales. Los modelos atmosféricos en imágenes satelitales resultan ser obtenidos a partir de años de investigaciones y estudios, pero la mayoría de veces dichos modelos quedan solamente como investigación, sin ser una manera práctica de solventar la obtención de información como PM10. A partir de un modelo de PM10 probado en el país como lo muestra esta investigación, adicional de haber sido comparado con otros índices ambientales, se puede ya establecer de manera general en conjunto con una imagen satelital índices de calidad de aire en las diferentes ciudades que a pesar de no contar con datos de estaciones de monitoreo atmosférico, con una pequeña muestra a partir de estaciones móviles se podría ya determinar este factor y donde es el lugar donde existe más cantidad de este contaminante para en el mismo poder realizar una correcta Gestión Ambiental a sus fuentes fijas o móviles y establecer normas para mejorar la cantidad de material particulado en los diferentes focos de emisión.

1. CAPITULO I

1.1 ASPECTOS GENERALES

1.1.1 Antecedentes

En el país no ha existido aún una política y sobre todo interés de investigación en la parte ambiental y más profundamente en la utilización de herramientas tecnológicas para definir un buen marco de gestión al cuidado del entorno, solamente se habla de manera general de la contaminación del agua, suelo y aire, siendo esta última una de las menos estudiadas y profundizadas.

Las imágenes satelitales son herramientas que han ayudado en el tiempo a ubicar y dar una perspectiva alta de la forma del territorio como de sus diferentes accidentes geográficos, así mismo gracias a su aspecto de percepción remota de parte del espectro electromagnético se ha podido identificar fenómenos mediante

1.1.2 Justificación

El proyecto se realiza en base a que existen técnicas que pueden resultar más económicas, eficientes y factibles de aplicar en el país para determinar contaminantes en el aire, esto facilitará a que muchos municipios empiecen a optimizar y estimar su calidad de aire de acuerdo a este tipo de técnicas como las imágenes satelitales que uno encuentra para investigación de manera gratuita que poseen una banda térmica como Landsat TM, así el uso de estaciones pasivas y automáticas quedará a un lado para el paso de inicio de una estimación de manera indirecta con esta metodología

que llevará a contemplar mejores posibilidades para que cada uno de los municipios del país empiece a estimar su calidad de aire en función de la cantidad de contaminantes que se tiene, así a futuro se podrá estimar de manera general un índice de calidad de aire para el país en un mapa, para poder cumplir con el estudio se inició la localización del sector en base a una zona como la parte urbana de la ciudad de Quito que posee datos de material particulado (PM10), entre otras concentraciones de contaminantes y cobertura de imágenes satelitales en diferentes años para demostrar cómo ha afectado la contaminación en la ciudad y como con este tipo de estudio se podría igual contemplar una comparación multitemporal de contaminación de aire en las ciudades del país.

1.1.3 Identificación del problema

En la mayoría de ciudades del país no existen equipos de monitoreo para contaminantes del aire ya que programas de este tipo resultan costosos para el presupuesto de los diferentes municipios del país. Solamente en ciertas ciudades del Ecuador como Cuenca y Quito tiene estaciones de monitoreo de aire pasivas, semiautomáticas y automáticas que permiten acceder a esta información y llevar a un control y a una buena gestión ambiental para evitar la contaminación del aire, es por eso que se ha seleccionado la ciudad de Quito para generar esta investigación donde índices ambientales y algoritmos utilizados por otros científicos han determinado la viabilidad del método de uso de imágenes satelitales Landsat para determinar contaminación en el aire.

1.1.4 Descripción del área de estudio

1.1.4.1 Ubicación geográfica

El área de estudio en su mayoría cubre lo que es la Zona Urbana de Quito y parte de los cantones Pedro Moncayo, Rumiñahui y Mejía.

La ciudad de Quito, capital de la Provincia de Pichincha y del país se encuentra ubicado en el sector norte del Ecuador, atravesado por la línea ecuatorial, esta área constituye el lugar donde en su mayoría se realiza la investigación para la realización del proyecto (Tabla 1), debido a que en el lugar existen estaciones de monitoreo de calidad del aire automáticas, pasivas y semiautomáticas, las cuales ayudaron a la realización del proyecto.

Tabla 1.

Coordenadas de la Ubicación Geográfica del área de estudio (Influencia Indirecta)

ID Punto	Latitud	Longitud
I1	00°16'04" N	78°34'06" W
I2	00°09'51" N	78°34'10" W
I3	00°34'31" S	78°19'21" W
I4	00°27'40" S	78°44'36" W

Nota. Coordenadas geodésicas de referencia en grados, minutos y segundos, del área donde se realizará la investigación bajo el sistema de referencia WGS84.

La Zona Urbana de Quito se encuentra limitado por el cantón Pedro Moncayo al Norte, al Este con el cantón Cayambe y la Provincia de Napo, al Sur con los cantones Mejía y Rumiñahui y al Oeste con el cantón San Miguel De Los Bancos y Pedro Vicente Maldonado (Figura 1), cubriendo así la mayor parte de la provincia de Pichincha.

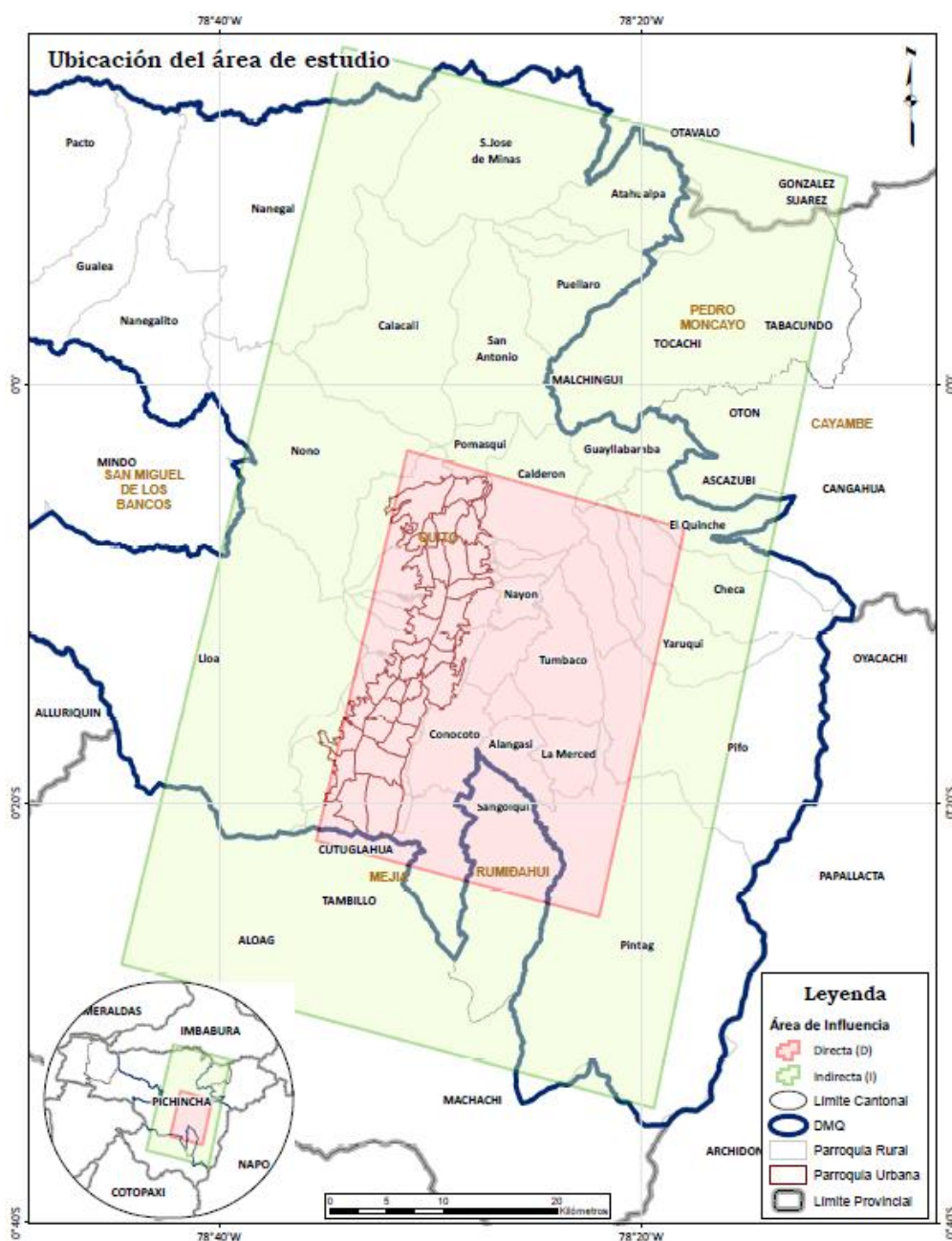


FIGURA 1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL ECUADOR.

Fuente: Cartografía INEC, 2014.

1.1.4.2 Área de influencia

El área de influencia directa a marcar estará delimitada por la ciudad de Quito y los sectores donde existe la presencia de estaciones semiautomáticas de monitoreo de calidad del aire, específicamente en sectores donde se haya realizado mediciones de

PM10, mientras el área de influencia indirecta estará marcada por la cobertura de la imagen satelital sobre la zona urbana de Quito (Figura 2).

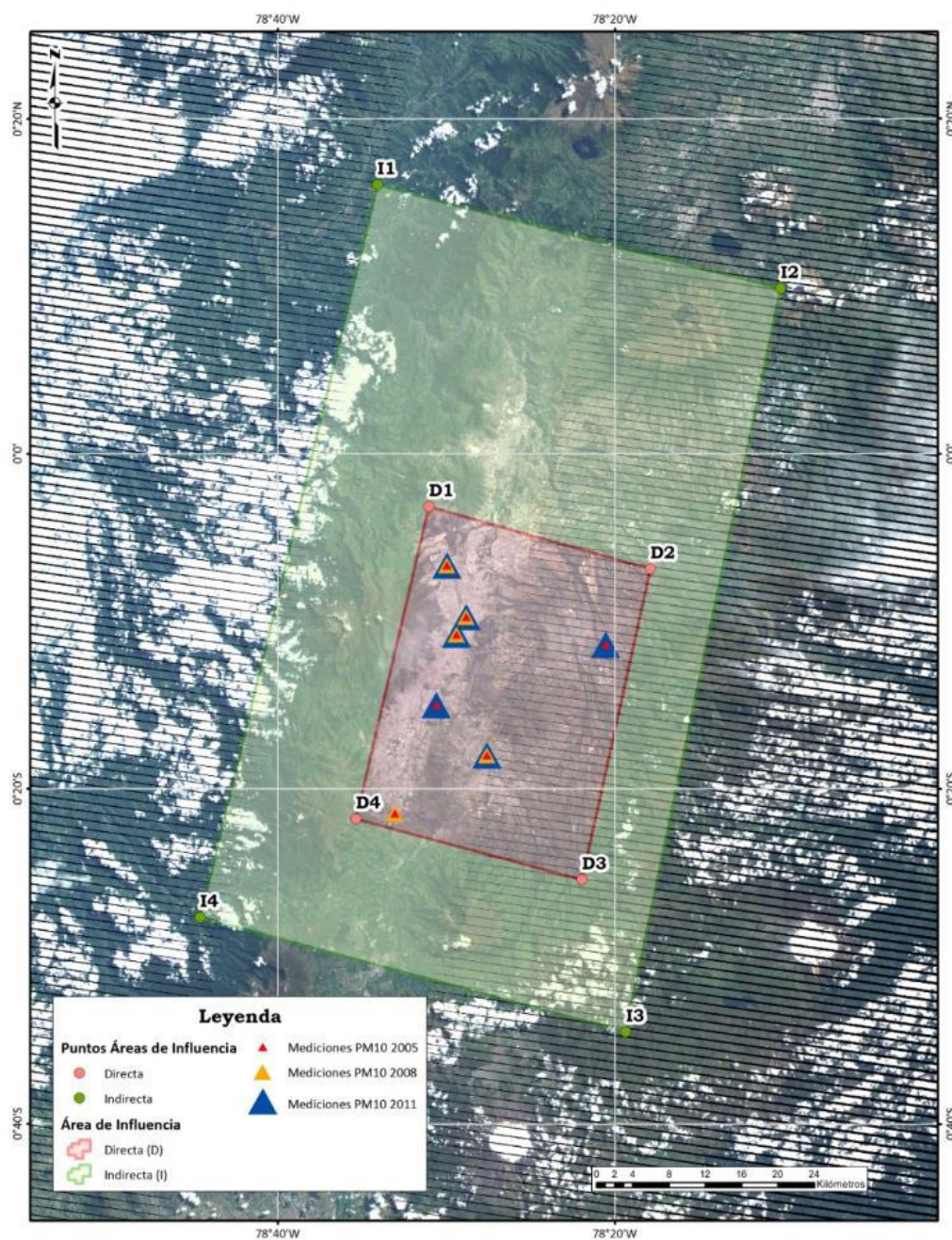


FIGURA 2. UBICACIÓN DE ÁREAS DE INFLUENCIA.

Fuente: NASA, Imagen Landsat (2011), Path 10, Row 60, ID LE70100602011159ASN00.

1.1.5 Objetivo general

Estimar los niveles de concentración de PM10 en el aire para el Distrito Metropolitano de Quito en al cálculo de índices ambientales mediante imágenes satelitales.

1.1.6 Objetivos específicos

Realizar correcciones radiométricas, topográficas y geométricas de las imágenes Landsat ETM+ para poder generar los procedimientos de obtención de información.

Calcular los índices NDVI, LWCI, TS, SAVI, NSI y PM10 a partir de las imágenes satelitales Landsat ETM+ de los años 2003, 2005 y 2011 de Quito

Contemplar la importancia del uso de la banda térmica y otras bandas de las imágenes satelitales Landsat para la determinación de concentración de PM10 en la zona urbana de Quito.

Generar modelos para determinar PM10 utilizando los índices ambientales y parámetros en campo de la ciudad de Quito mediante la ecuación que mejor se ajuste de mínimos cuadrados.

Obtener la ecuación con mejor correlación como modelo para determinación de PM10 en la zona urbana de Quito y generalización para otras zonas urbanas de similares características.

Localizar las zonas con mayores cambios de concentración de PM10 en la ciudad de Quito en los últimos años.

2. CAPITULO II

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Sensores Remotos

Los sensores remotos son una forma de adquirir información desde un objeto o fenómeno sin el contacto físico con ellos. En términos generales sensores remotos es un sinónimo de sensores con tecnología aérea para la detección y clasificación de objetos terrestres mediante la propagación de sus señales, por ejemplo una imagen satelital es considerada un sensor remoto por el hecho de emitir señales electromagnéticas hacia la superficie terrestre desde un sensor colocado sobre un satélite.

2.1.1.1 Imágenes Satelitales: Una imagen satelital es producto de uso de sensores remotos aerotransportados sobre satélites, las cuales consisten en tener imágenes de la superficie terrestre bajo ciertas características dependiendo del satélite y sensor que se utilice para la obtención de la información.

2.1.1.2 Inicios: Los inicios de las imágenes satelitales detallan sus orígenes en el año 1959, donde la primera imagen adquirida de la Tierra fue por parte del satélite Explorer 6. Posterior Estados Unidos comenzó con el programa exitoso Landsat en el año 1972, este programa es el mayor programa de satélites de observación espacial en el mundo.

Ya trasladándose a la actualidad se encuentran satélites con sensores de mayor tecnología, que permiten hacer análisis digital más puntual, a diferencia de otros satélites.

2.1.1.3 Resoluciones: Los sensores que se encuentran en los satélites tienen parámetros o características propias clasificadas dentro de la tecnología de sensores remotos como resoluciones, estas son 4, detalladas de la siguiente manera:

- Resolución espacial: La resolución espacial se relaciona con el mínimo objeto visible en una imagen satelital, esta depende del sensor y es especificada en metros (Figura 3).

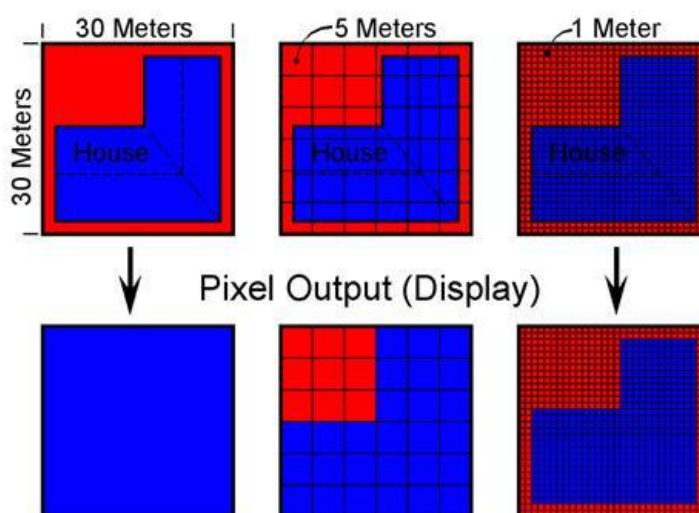


FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL.

Fuente: Satimagingcorp. (2012) Characterization of Satellite Remote Sensing Systems [On line]. Disponible en: <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>

Resolución temporal: La resolución temporal determina la frecuencia con la que un satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada región o sector, adicionalmente también es denominada como intervalo de revisita (Figura 4).

Muchas de las veces la resolución temporal depende del tipo de órbita en la cual esté dispuesta el satélite, donde está influenciando la altura de la órbita como la velocidad con la que la recorre el satélite, así existen algunos tipos de órbitas (Tabla 1).

Generalmente los satélites de observación de la tierra utilizan órbitas heliosincrónicas (Figura 5).

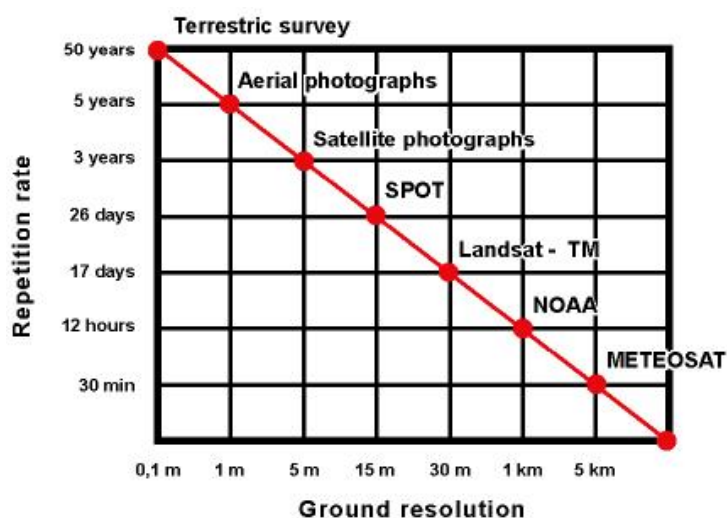


FIGURA 4. RESOLUCIÓN ESPACIAL FRENTE A TIEMPO DE REVISITA O RESOLUCIÓN TEMPORAL PARA DIFERENTES SENSORES.

Fuente: Satimagingcorp. (2012) Characterization of Satellite Remote Sensing Systems [On line]. Disponible en: <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>



FIGURA 5. REPRESENTACIÓN DE LOS TIPOS DE ÓRBITAS PARA LOS SATÉLITES ARTIFICIALES.

Fuente: Universidad Politécnica de Valencia. (2010) Tipos de Órbita [Online]. Disponible en: http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo12_99.00/orbitas.htm

Tabla 2.

Tipos de Órbita en satélites

Tipo de Órbita	Altura (km)	Descripción	Usos
Polar	200 - 1000	Pasa sobre la zona polar de la Tierra, gira de polo a polo.	Aplicaciones meteorológicas y observación de la Tierra.
Heliosincrónica	700 - 800	Órbita polar sincronizada con el Sol.	Estudios del sol, meteorología y observación de la Tierra.
Geoestacionaria	36000	El satélite gira a la velocidad de la Tierra, por lo tanto siempre está en el mismo punto.	Telecomunicaciones y meteorología.
Transferencia geoestacionaria	36000	Órbita elíptica sirve para transferir el satélite a una órbita Geoestacionaria.	Un motor inyecta al satélite en la órbita geoestacionaria.
Baja (LEO - Low Earth Orbits)	< 1000	Circulan la Tierra en aproximadamente 90 minutos	Observación de la Tierra con propósitos militares y vuelos tripulados.
Media (MEO - Medium Earth Orbit)	1000	Giran a 7.3 km/s	Son adecuadas para constelaciones de satélites para telecomunicaciones.

Nota. Detalles generales de cada una de las órbitas existentes donde recorren los satélites artificiales alrededor de la Tierra. Fuente: Adaptado de Universidad Politécnica de Valencia. (2010) Tipos de Órbita [Online]. Disponible en: http://www.upv.es/satelite/trabajos/Grupo12_99.00/orbitas.htm

Resolución radiométrica: Se refiere directamente a la cantidad de niveles de grises en la cual la radiación recibida se divide para ser almacenada y procesada. Es representada directamente por el número de bits, así por ejemplo una imagen de 8 bits tendrá una gama de colores de 2^8 o 256 niveles de grises, que irán entre 0 a 255 (Figura 6).

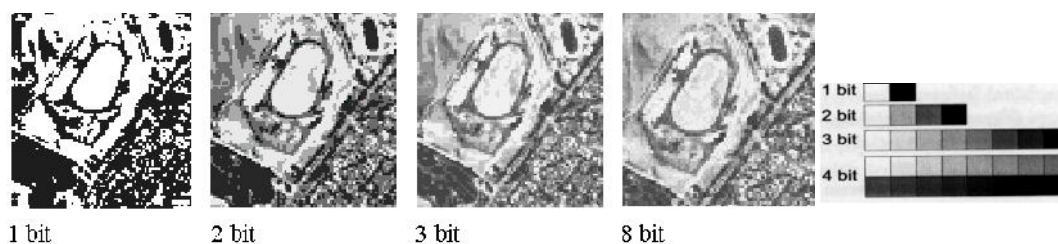


FIGURA 6. REPRESENTACIÓN DE CUATRO IMÁGENES DEL MISMO SECTOR CON DIFERENTE RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA.

Fuente: IHCM Public Maps. (2014) Resolución Radiométrica [Online]. Disponible en: <http://cmapspublic.ihmc.us>

Resolución espectral: La resolución espectral viene de acuerdo al número de canales espectrales o bandas que es capaz de captar un sensor desde el espectro electromagnético (Figura 7). Viene también relacionado con el número de bandas.

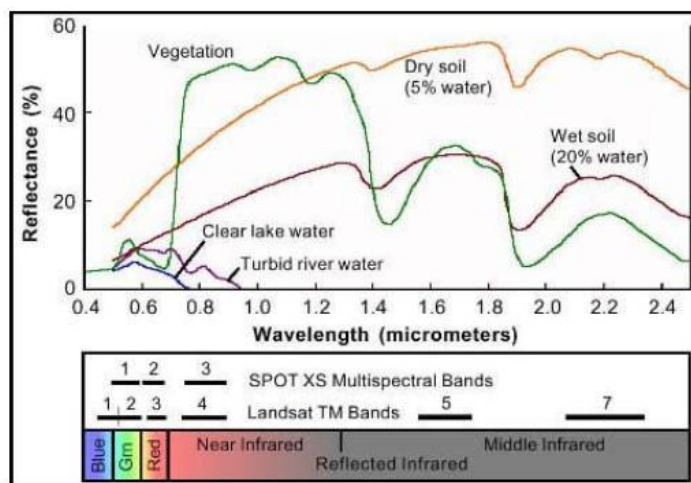


FIGURA 7. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO DONDE SE INDICA LA RESOLUCIÓN ESPECTRAL DE DIFERENTES SATÉLITES, RELACIONADA CON EL NÚMERO DE BANDAS Y LA LONGITUD DE ONDA EN MICRÓMETROS.

Fuente: Satimagingcorp. (2012) Characterization of Satellite Remote Sensing Systems [On line]. Disponible en: <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>

2.1.1.4 Principios de captura de datos: La captura de datos en la Teledetección inicia con la emisión de luz por parte del Sol hacia la superficie terrestre, posterior a esto el sensor que está sobre el satélite recibe esta información que pasa por todas las capas atmosféricas, luego esta información es transmitida a una antena de recepción, donde en un centro de procesamiento se procesan los datos y se convierte en generar la información respectiva, es decir la imagen satelital lista para poder generar aplicaciones geomáticas (Figura 8).

2.1.1.5 Componentes: Los componentes de la Teledetección principalmente son la fuente de energía, el objeto de donde se obtendrá la energía, la plataforma que es en

sí formado por el vehículo de transporte que puede ser un satélite o un avión por ejemplo más el sensor que lleva, la atmósfera que interviene en el proceso de captura de información, la recepción y tratamiento formado por las antenas y el centro de procesamiento de imágenes, análisis digital compuesto por software y hardware de procesamiento e interacción de información para generar el producto final al usuario, usuario aquel que genera subproductos en base a las imágenes satélites y análisis visual donde se analizan los subproductos generados a partir de las imágenes satelitales (Figura 8).

1. Fuente de Energía

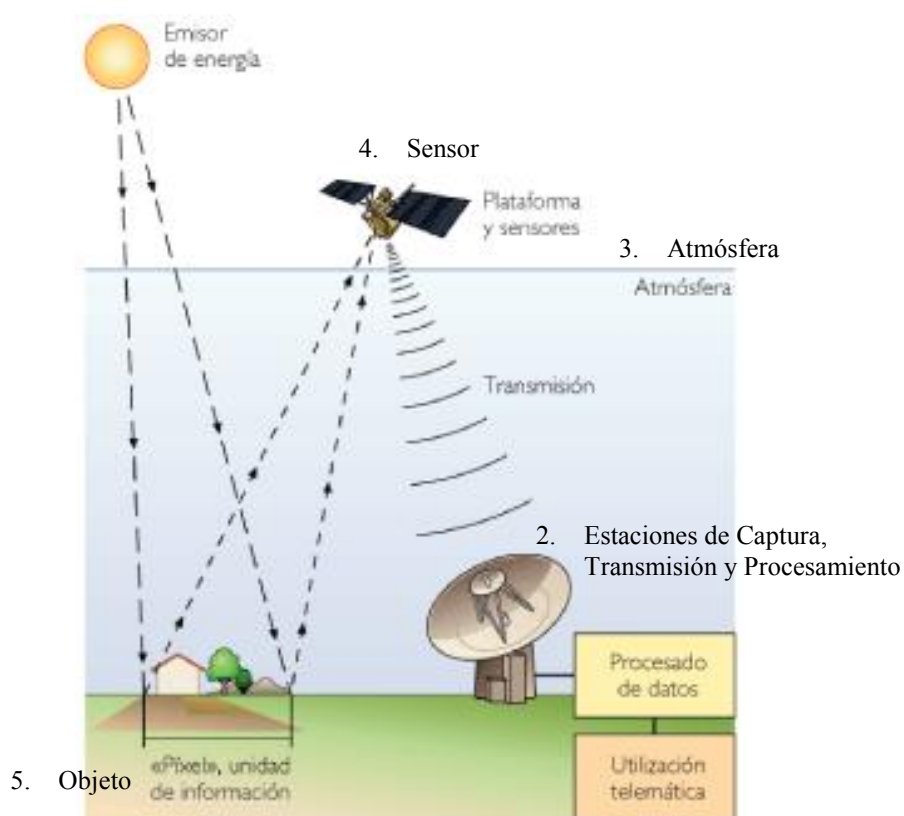


FIGURA 8. PROCESO DE CAPTURA DE DATOS EN TELEDETECCIÓN.

Fuente: Gobierno del Principado de Asturias. (2011) Estudio piloto para la discriminación y seguimiento de las masas arbóreas de castaño afectadas por chancro mediante técnicas de teledetección [Online]. Disponible en: <http://www.serida.org/publicacionesdetalle.php?id=4981>

2.1.1.6 Usos: El principal campo de aplicación de las imágenes satelitales se ajustan a la gestión territorial en la parte de cartografía, meteorología y análisis espacial, donde uno de los campos donde ha surgido en los últimos años es en el ambiental, identificando mediante estos componentes diferentes contaminantes o problemas ambientales que puedan surgir en ese espacio de territorio o cambios significativos realizando estudios multitemporales.

2.1.2 Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+

Landsat es un programa de satélites definidos para la observación de la Tierra. Aparece en el año de 1972 con el lanzamiento del satélite ERTS, posteriormente renombrado a Landsat 1. Desde esta fecha se han enviado 8 satélites al espacio, de los cuales en la actualidad quedan presentes el Landsat 7 y Landsat 8 como último lanzado en el año 2013 (Figura 9).

El programa Landsat es manejado en conjunto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la NASA.

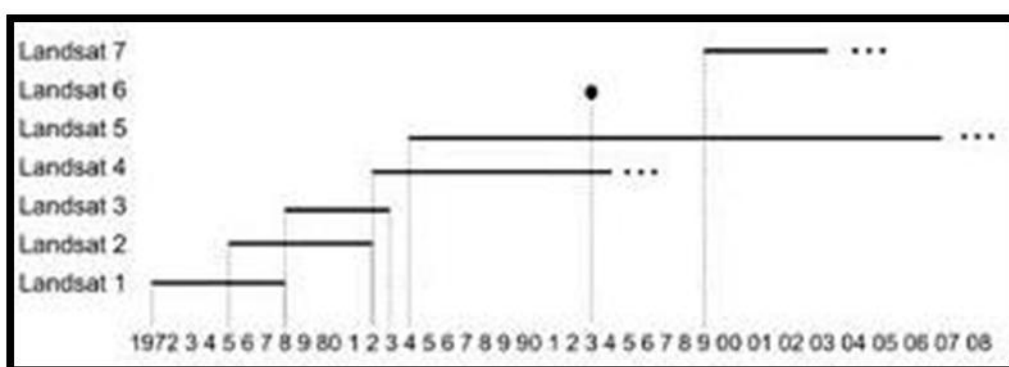


FIGURA 9. COBERTURA HISTÓRICA DE LOS SATÉLITES LANDSAT

Fuente: NASA. (2014) Landsat 7 Handbook. Background to the Landsat Program [On line]. Disponible en: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/program/>

2.1.2.1 Características

El satélite Landsat 7 está en órbita a partir del 15 de Abril de 1999. Las características principales se muestran en las resoluciones que posee el Landsat 7 (Figura 10), donde su resolución espacial es de 30 metros, posee 7 bandas multiespectrales y 1 pancromática, resolución radiométrica de 8 bits y temporal de 16 días para cada revisita por el mismo lugar, con una órbita heliosincrónica.

Tiene la particularidad de tener el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), el cual dentro de sus principales características es la banda del infrarrojo térmico.

Satellite	Sensor	Bandwidths	Resolution	Satellite	Sensor	Bandwidths	Resolution	
LANDSATs 1-2	RBV	(1) 0.48 to 0.57	80	LANDSATs 4-5	MSS	(4) 0.5 to 0.6	82	
		(2) 0.58 to 0.68	80			(5) 0.6 to 0.7	82	
		(3) 0.70 to 0.83	80			(6) 0.7 to 0.8	82	
	MSS	(4) 0.5 to 0.6	79			TM	(1) 0.45 to 0.52	30
		(5) 0.6 to 0.7	79				(2) 0.52 to 0.60	30
		(6) 0.7 to 0.8	79				(3) 0.63 to 0.69	30
		(7) 0.8 to 1.1	79				(4) 0.76 to 0.90	30
LANDSAT 3	RBV	(1) 0.505 to 0.75	40	(5) 1.55 to 1.75	30			
		(6) 10.4 to 12.5	120	(7) 2.08 to 2.35	30			
	MSS	(4) 0.5 to 0.6	79	LANDSAT 7	ETM ⁺		(1) 0.45 to 0.52	30
		(5) 0.6 to 0.7	79			(2) 0.52 to 0.60	30	
		(6) 0.7 to 0.8	79			(3) 0.63 to 0.69	30	
(7) 0.8 to 1.1	79	(4) 0.76 to 0.90	30					
(8) 10.4 to 12.6	240	(5) 1.55 to 1.75	30					
			(6) 10.4 to 12.5			60		
			(7) 2.08 to 2.35			30		
			PAN 0.50 to 0.90			15		

FIGURA 10. RESOLUCIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS DEL LANDSAT 7 ETM+.

Fuente: NASA. (2014) Landsat 7 Handbook. Background to the Landsat Program [On line]. Disponible en: <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/program/>

Algo muy importante que se debe considerar es que el sensor del Landsat 7 tiene un problema a partir del 31 de Mayo de 2003, cuando el Scan Line Corretor (SLC) se averió. A consecuencia de este fallo las imágenes a partir de esa fecha tienen gaps a manera de diagonal, pero estas imágenes aún se pueden usar para los distintos

análisis y mantienen las mismas correcciones radiométricas y geométricas en los píxeles donde si se tiene datos.

2.1.2.2 Bandas Térmicas

Uno de los puntos importantes de las imágenes Landsat 7 ETM+ es la ganancia que presentan en cada una de las bandas. Estas imágenes presentan justamente dos tipos de ganancia, ganancia alta (High H) y ganancia baja (Low L) en cada una de sus bandas.

La ganancia no es más que un parámetro ajustable que permite al Centro de Operaciones de la Misión Landsat (MOC) maximizar la resolución radiométrica de los instrumentos para cada banda sin saturar los detectores, es decir el objetivo científico es maximizar el instrumento a una resolución radiométrica de 8 bits sin saturar los sensores.

Generalmente la adquisición de escenas en baja ganancia permite un rango dinámico muy alto con menos riesgo de saturación sobre áreas brillantes, es decir se toma en consideración cuando existen superficies muy brillantes. Por otro lado la adquisición de ganancia alta ofrece mayor resolución radiométrica o sensibilidad en superficies de brillo bajo (Figura 11).

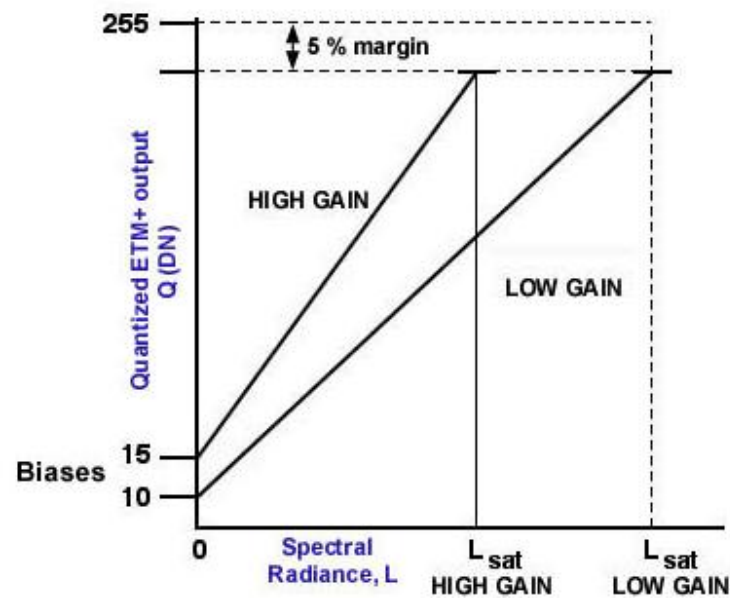


FIGURA 11. DIFERENCIAS DE SATURACIÓN ENTRE GANANCIA ALTA (HIGH GAIN) Y GANANCIA BAJA (LOW GAIN) EN EL SENSOR LANDSAT ETM+.

Fuente: NASA. (2014) Landsat 7 Handbook. Radiometric Characteristics [On line]. Disponible en: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_properties/

El uso de la ganancia alta o baja dependerá exclusivamente del brillo de la zona, muchas veces depende en sí de los elementos que existan en la superficie donde se tomó la imagen o la época del año (Figura 12).

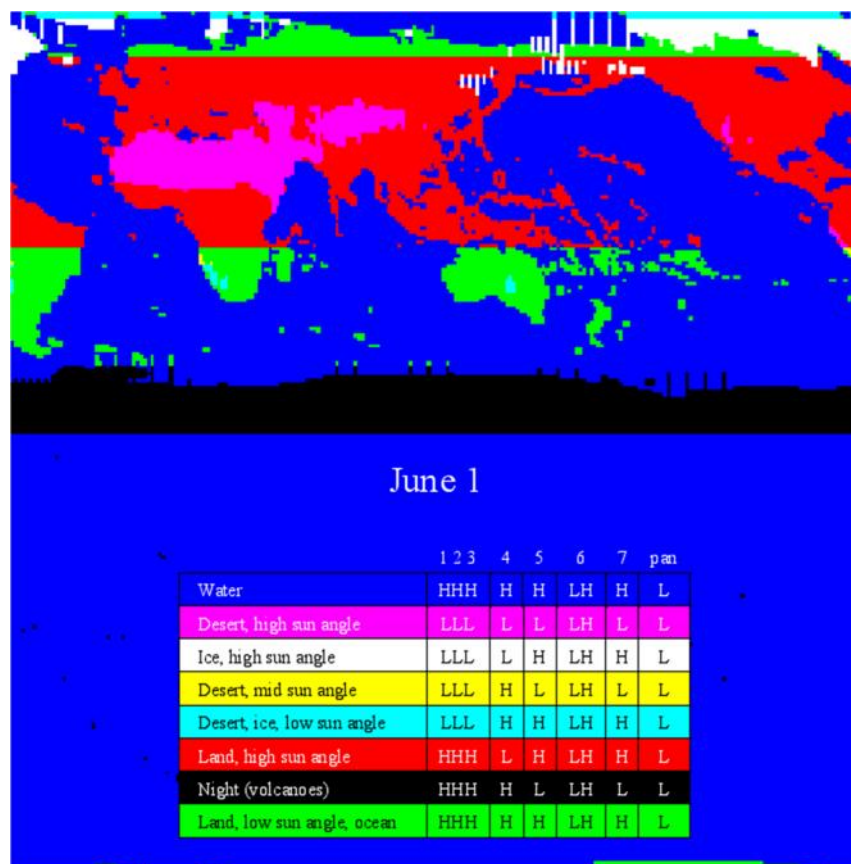


FIGURA 12. USO DURANTE EL MES DE JUNIO DE LAS DIFERENTES GANANCIAS EN LAS BANDAS EN EL SENSOR LANDSAT ETM+.

Fuente: NASA. (2014) Landsat 7 Handbook. Radiometric Characteristics [On line]. Disponible en: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_properties/

Para las bandas térmicas del Landsat 7 ETM+ corresponden a la banda 6L y 6H respectivamente, ambas ganancias se presentan a la hora de generar el archivo de la imagen, las cuales tienen una resolución espacial de 60 metros, pero tiene la particularidad que a partir del 25 de febrero de 2010 de que todos los productos Landsat ETM+ en la banda térmica han sido hecho un resampling de 30 metros por pixel.

Estas bandas tienen la importancia de contener información del infrarrojo térmico, el cual puede ayudar para estudios de temperatura, contaminación del aire,

entre otras aplicaciones. Depende del brillo de la superficie para la utilización del tipo de ganancia para algún procesamiento digital de imágenes.

2.1.2.3 Correcciones en imágenes satelitales

Las imágenes satelitales por ser insumos obtenidos mediante sensores remotos adquieren cierto tipo de perturbaciones al tener que traspasar los datos por diferentes medios como la atmósfera desde su de toma o el llamado objeto.

Para ese caso se puede eliminar en cierto rango las perturbaciones realizando ciertos tipos de correcciones, las cuales incluyen correcciones topográficas, geométricas, radiométricas y atmosféricas.

Corrección topográfica: Este tipo de corrección busca minimizar las posibles variaciones por influencias propias de la topografía del terreno, esto se corrige mediante la intercepción en el procesamiento de la imagen de un modelo digital de elevación (DTM) que tiene similar o mejor escala que la imagen.

Corrección geométrica: Cuando se realiza este tipo de correcciones se busca solucionar los errores que introduce la georeferenciación cuando existen cambios bruscos de altitud dentro de una imagen satelital. Para esto es preferible tener cartografía base bajo la misma escala con la que trabaja la imagen como puntos de control en campo.

La corrección geométrica se hace con un polinomio con Z como se muestra en la Ecuación 1.

$$\begin{aligned}x' &= a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy \\y' &= b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy\end{aligned}\quad (1)$$

Donde (x',y') y (x,y) son las coordenadas de los píxeles de la imagen corregida y sin corregir, respectivamente, adicional en este modelo se puede manejar deformaciones lineales como cambios de escala, desplazamiento, rotación, etc. Los 8 coeficientes de estas dos ecuaciones son calculados mediante un ajuste de mínimos cuadrados iterativo en el que se van descartando aquellos pares de puntos que contribuyen con más error al residuo del ajuste.

Vale la pena recalcar que las imágenes Landsat ya tienen ortorectificación y corrección geométrica en cierto nivel.

Corrección radiométrica: Las correcciones radiométricas permiten convertir la imagen original de niveles digitales (ND) a valores de reflectancia que debería ser el valor que capte el sensor, pero por diferentes procesos como efectos de dispersión o absorción causados por la presencia de partículas en la atmósfera, adicional a los ángulos de incidencia de la energía solar y la distancia Tierra – Sol no se puede utilizar directamente la imagen para realizar procesamiento multispectral, para esto el procedimiento se realiza convirtiendo primeramente los ND en valores de radiancia y posterior esta radiancia pasarla a valores de reflectancia aparente para los datos de bandas multispectrales y temperatura de superficie para los datos de bandas térmicas.

Para el paso de ND a radiancia se utiliza el método de ganancia y sesgo, el cual calcula la radiancia del pixel en una banda espectral específica y se calcula multiplicando la ganancia de dicha banda ("gain") por el valor del nivel digital (DN, en inglés) y luego adicionando el sesgo ("offset" o "bias") a dicho resultado como indica la Ecuación 2. Estos datos se encuentran generalmente en el archivo de

cabecera de los sensores, para el caso del Landsat se localiza en el archivo *.MTL. Las unidades en este método para la radiancia están en $W/(m^2 * sr * \mu m)$.

$$L_{\lambda} = Ganar * ND'_{i,j,k} + Offset \quad (2)$$

Posteriormente el siguiente paso es la conversión de Radiación en el sensor a reflectancia aparente en el caso de las bandas multiespectrales, pero en vista de que ya se ha realizado la corrección radiométrica, esta corrección se convierte en reflectancia atmosférica, para esto igualmente se requiere datos de la cabecera del sensor donde se identifique las ganancias, sesgos, radiancia solar, elevación solar y datos de fecha de adquisición definidos en los metadatos de la imagen, mostrado en la Ecuación 3.

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * \sin(\theta)} \quad (3)$$

Donde

ρ_{TOA} = Reflectancia aparente.

L_{λ} = Radiancia en unidades de $W/(m^2 * sr * \mu m)$, obtenida desde Ecuación 2.

d = Distancia Tierra – Sol en unidades astronómicas. Para su cálculo se puede utilizar.

$$d = 1 - 0.01672 * \cos\left(\frac{(0.9856 * (Dia\ Juliano - 4))}{180} * \pi\right) \quad (4)$$

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar en unidades $W/(m^2 * \mu m)$.

θ = Angulo solar de elevación en grados decimales.

Para las bandas térmicas se procede a convertir la radiancia en temperatura de brillo, que es lo que realmente el sensor debería captar. La temperatura de brillo se

calcula en base a los parámetros de Radiación del sensor y las constantes de calibración para el satélite Landsat 7, indicado en la Ecuación 5.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{CAT}+1\right)} \quad (5)$$

Donde

CAT = Radiancia con corrección atmosférica, obtenida desde Ecuación 7.

K1 y K2 = Constantes de calibración en grados kelvin para el Landsat 7.

Estos datos se leen desde el archivo de metadatos.

Corrección atmosférica: La corrección atmosférica trata de evaluar y eliminar las distorsiones que se generan por la atmósfera en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la información adquirida en la superficie terrestre.

Existen muchos métodos para generar correcciones atmosféricas en bandas multiespectrales, pero el más utilizado y con mayor éxito es el método de Chávez, el cual se basa en que áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad como agua o zonas de sombra, deberían presentar radiancia espectral cercana a cero, pero esto no sucede justamente debido a la presencia de dispersión atmosférica o dispersión de Rayleigh y Mie, así estas zonas presentan valores mayores a cero. Para esto mediante una ecuación simple se resta los valores mínimos que aparezcan en el histograma de cada banda que superen el umbral de los 200 pixeles y ese valor se considera como el valor mínimo a restar a cada banda como indica la Ecuación 6.

$$R_{atm_{i,j,k}} = \rho TOA_{i,j,k} - \rho TOA_{min,k} \quad (6)$$

Donde

$\rho\text{TOA}_{i,j,k}$ = Pixel con valor de reflectancia aparente, obtenido en Ecuación 3.

$\rho\text{TOA}_{min,k}$ = Valor mínimo de reflectancia aparente ubicado en el histograma para cada banda.

Para las bandas térmicas existen otros métodos de corrección atmosférica donde se incluyen datos propiamente del clima que ayudarán a realizar la corrección respectiva. Se utilizará el método de Coll et al (2010), mostrada en la Ecuación 3, donde obtiene datos meteorológicos de radiancia ascendente, descendente y transmitancia para su modelo calculados a partir de la NASA en la página web <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>.

$$CAT = \frac{L_{\lambda} - L_{\uparrow}}{\varepsilon\tau} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} L_{\downarrow} \quad (7)$$

Donde

CAT= Corrección atmosférica calculada con valores de radiancia.

L_{λ} = Valor de radiancia calculada del pixel, obtenida a partir de Ecuación 2.

L_{\uparrow} = Radiancia ascendente.

L_{\downarrow} = Radiancia descendente.

τ = Transmitancia.

ε = Emisividad (Típicamente 0.95)

2.1.3 Índices ambientales

Los índices ambientales generados a partir del análisis digital de imágenes con combinación de sus bandas permiten la identificación de ciertos parámetros importantes que se pueden generalizar en el territorio con la información de una imagen satelital. Cada uno de estos índices trata de resaltar alguna característica que

está sobre la imagen satelital. Cabe recalcar que para poder realizar el cálculo de índices ambientales las imágenes satelitales deben haber pasado por el proceso de corrección, es decir se utilizarán los valores de temperatura de brillo (T) en bandas térmicas y reflectancia atmosférica (R_{atm}) en bandas multispectrales, obtenidas a partir de las Ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

2.1.3.1 NDVI: Denominado Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) ha sido reconocido como uno de los indicadores más útiles para el estudio de características de la biosfera terrestre y su dinámica, a nivel global, regional y local (Chuvieco, 2002). El modelo se muestra en la Ecuación 8.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (8)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

R = Rojo Banda 3 en Landsat 7

2.1.3.2 LWCI: El índice de contenido de agua en hojas (LWCI), propuesto por Hunt et al. (1987) se basa en la interrelación entre las reflectividades en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y en el NIR. Fue obtenido aplicando la Ecuación 9.

$$LWCI = \frac{-\log(1-(NIR-SWIR))}{-\log(1-(NIRFT-SWIRFT))} \quad (9)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIR = Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

NIRFT = Valor máximo Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIRFT = Valor máximo Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

2.1.3.3 TB: La temperatura de brillo se obtiene a partir de corregir radiométricamente y atmosféricamente las bandas térmicas del Landsat y la radiancia espectral a nivel de sensor, de la banda térmica, usando la Ecuación 7 (Landsat Project Science Office, 2008) utilizada para la corrección atmosférica del térmico. Esta Temperatura a nivel de Sensor permitirá comparar con los valores que se requiere en la investigación.

2.1.3.4 SAVI: El Índice de vegetación ajustado al suelo o SAVI por sus siglas en inglés, propuesto por Huete (1988), es apropiado para regiones que tienen baja cubierta vegetal y consecuentemente alto porcentaje de reflectancia del suelo, aplicando la Ecuación 10.

$$SAVI = \left[\frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} \right] (1 + L) \quad (10)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

R = Rojo Banda 3 en Landsat 7

L = Coeficiente de ajuste de la vegetación, equivalente a 0,5, recomendado para densidades intermedias (Chuvienco, 2002).

2.1.3.5 NSI: El índice de diferencia normalizada de suelos (NSI), propuesto por Roger y Kearney (2004), destaca las áreas construidas y en suelo desnudo, dado a que estas superficies son más reflectivas en el SWIR que en el NIR. Se calcula mediante la Ecuación 11.

$$NSI = \frac{SWIR-NIR}{SWIR+NIR} \quad (11)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIR = Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

2.1.3.6 Algoritmo Landsat ETM+ PM10: Mediante algunos parámetros como correcciones radiométricas, valores de radiancia y reflectancia, valores de ganancia alta y baja de la banda térmica del sensor Landsat ETM+, entre otros, se ha logrado definir la siguiente ecuación para determinación de PM10 (Universiti Sains Malaysia, 2012), representado en la ecuación 12.

$$PM10_C = e_0 R_{atm1} + e_1 R_{atm2} + e_2 R_{atm3} \quad (12)$$

Donde,

$PM10_c$ = Concentración de partículas (PM10) calculado desde imágenes Landsat.

R_{atmi} = reflectancia atmosférica, $i = 1$ y 3 son el número de bandas, es decir la reflectancia atmosférica para la banda 1, 2 y 3, obtenidos a partir de Ecuación 6.

E_j = coeficientes algorítmicos, $j = 0, 1, 2$ y 3 , determinados empíricamente. Estos coeficientes se logran al realizar una regresión lineal multivariable con el método de mínimos cuadrados entre los valores de reflectancia atmosférica y PM10 obtenido en campo.

2.1.3.7 Casos de Estudio de determinación de PM10 en base a imágenes Landsat

Se han realizado algunos estudios para determinación de calidad de aire y contaminantes del aire. Por ejemplo en La Universidad del Valle de Colombia mediante el estudio de los índices ambientales establece para la ciudad de Cali un modelo con imágenes satelitales Landsat para definir la calidad ambiental de la ciudad por zonas (Figura 13).

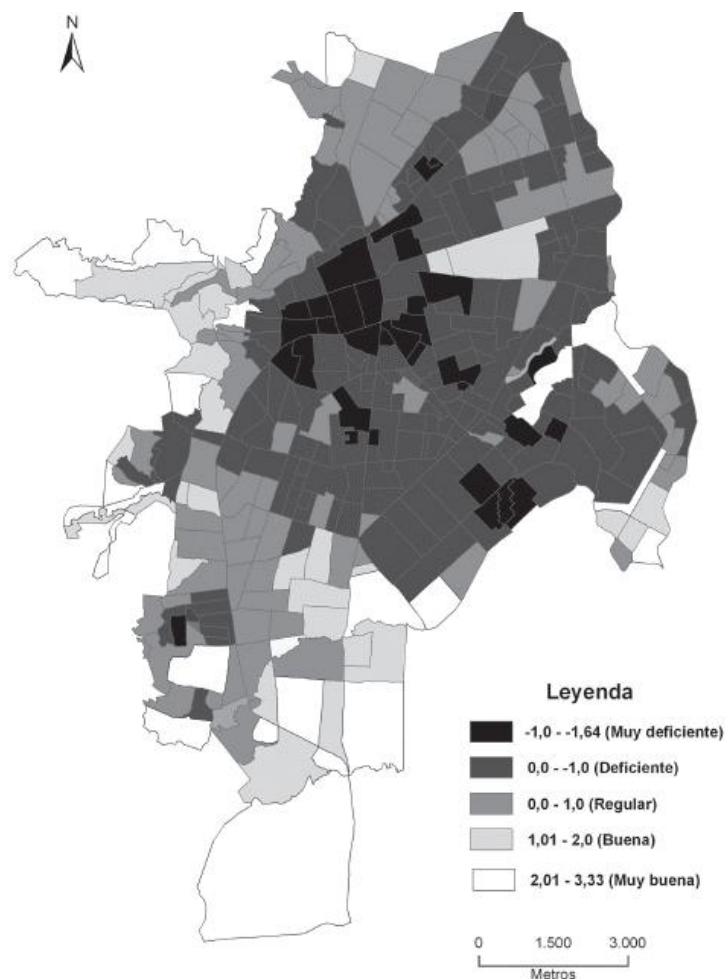


FIGURA 13. COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL EN CALI OBTENIDO A PARTIR DEL MODELAMIENTO CON IMÁGENES SATELITALES.

Fuente: Santana, L., Escobar, L., Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95.

Otro caso es la determinación de PM₁₀ mediante un modelo obtenido en estudios realizados por la Escuela de Física de la Universidad de Sains Malaysia, donde definen a partir de un modelo de regresión lineal multivariable, definido en la Ecuación 16, el comportamiento del PM₁₀ en una imagen satelital Landsat 7 comparando con datos de campo, donde los resultados son satisfactorios en vista de que se obtiene un coeficiente de correlación R de 0.888, que al combinar con las

medidas reales en campo se puede identificar su precisión (Figura 14) en las poblaciones de Makkah, Mina y Arafah en Arabia Saudita (Figura 15).

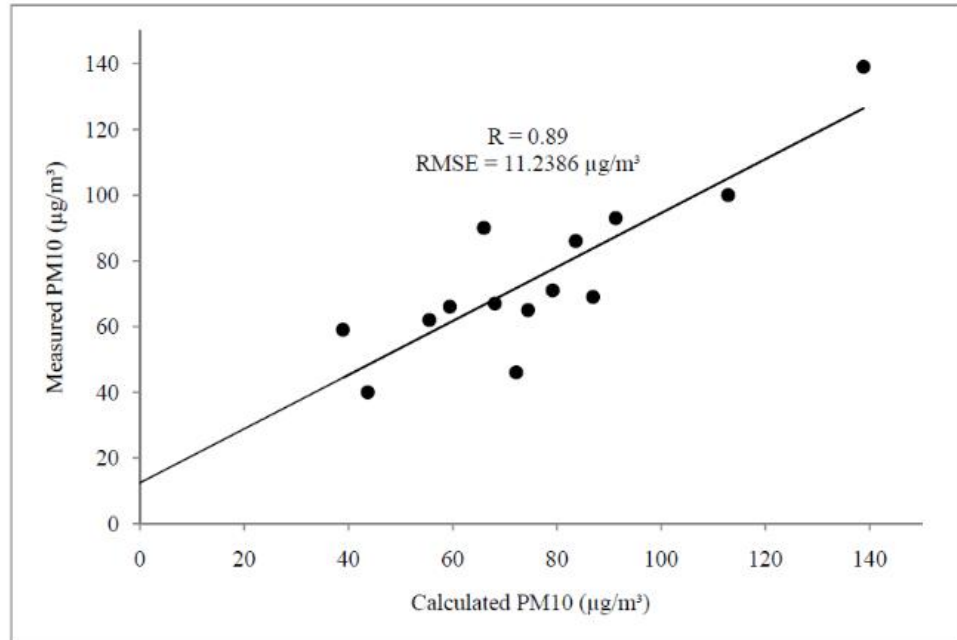


FIGURA 14. GRÁFICO DE MEDICIONES DE PM10 CALCULADO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES VS MEDICIONES EN CAMPO EN MAKKAH, MINA Y ARAFAH (ARABIA SAUDITA) EL 19 DE ENERO DE 2009.

Fuente: Othman, N., Mat, M., Hwee, L., (2010). Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah. *Modern Applied Science*, 4(11).

Disponible en: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/download/6363/6063>

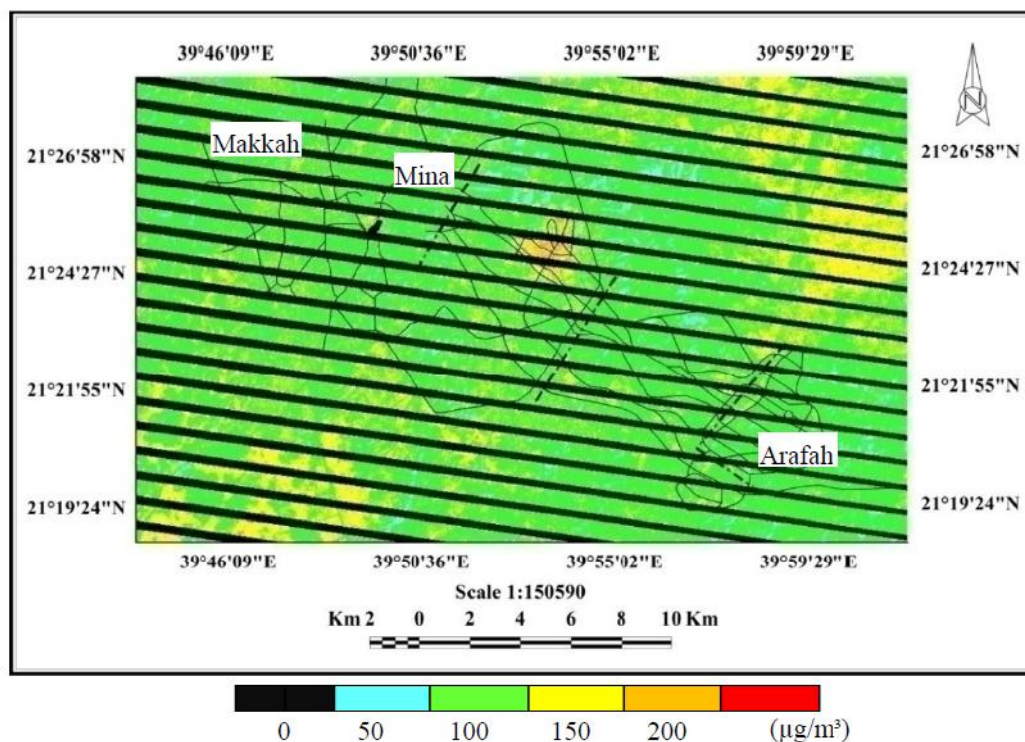


FIGURA 15. MAPA DE PM10 OBTENIDO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES EN MAKKAH, MINA Y ARAFAH (ARABIA SAUDITA) EL 19 DE ENERO DE 2009.

Fuente: Othman, N., Mat, M., Hwee, L., (2010). Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah. *Modern Applied Science*, 4(11).

Disponible en: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/download/6363/6063>

2.1.4 Contaminación del aire

La contaminación atmosférica o contaminación del aire se da a consecuencia de emisión de sustancias tóxicas de diferentes fuentes. Dichas sustancias tóxicas generalmente son emitidas en mayor cantidad y concentración en las zonas urbanas. Dentro de los principales contaminantes del aire se encuentra el CO, CO₂, CFC, HAP, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}.

2.1.4.1 Material Particulado PM10

Las partículas en suspensión en el aire son un tipo de contaminación que afecta comúnmente la salud de las personas. Las partículas pueden diferenciarse en su tamaño, así las llamadas más grandes pueden medir entre 2.5 a 10 micrómetros, estas partículas son denominadas PM10.

Generalmente este tipo de partículas se presenta por la presencia de humo, tierra y polvo tóxico de las fábricas, construcciones, caminos, vehículos, incendios, aplastamiento de rocas, canteras, entre otras actividades.

Las partículas de PM10 son demasiado pequeñas, lo cual hace que sean inhaladas y acumulables en el sistema respiratorio, especialmente produciendo enfermedades cardiovasculares (Husar et al., 1981; Ball & Robinson, 1982).

2.1.4.2 Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito

La Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) tiene como punto inicial de funcionamiento entre los años 2003 e inicios del 2004, esta red actualmente es manejada por la Secretaria de Ambiente del Municipio de Quito.

La REMMAQ tiene como objetivo la medición de datos confiables sobre la concentración de contaminantes atmosférico en Quito, los cuales sirven para diferentes análisis y estudios con respecto a la Calidad de Aire de la ciudad.

Para medir PM10 se han implementado una serie de estaciones automáticas, semiautomáticas y manuales dentro de la REMMAQ, donde se puede definir el PM10 existente en diferentes puntos de la ciudad (Figura 16) que se encuentran georeferenciados.

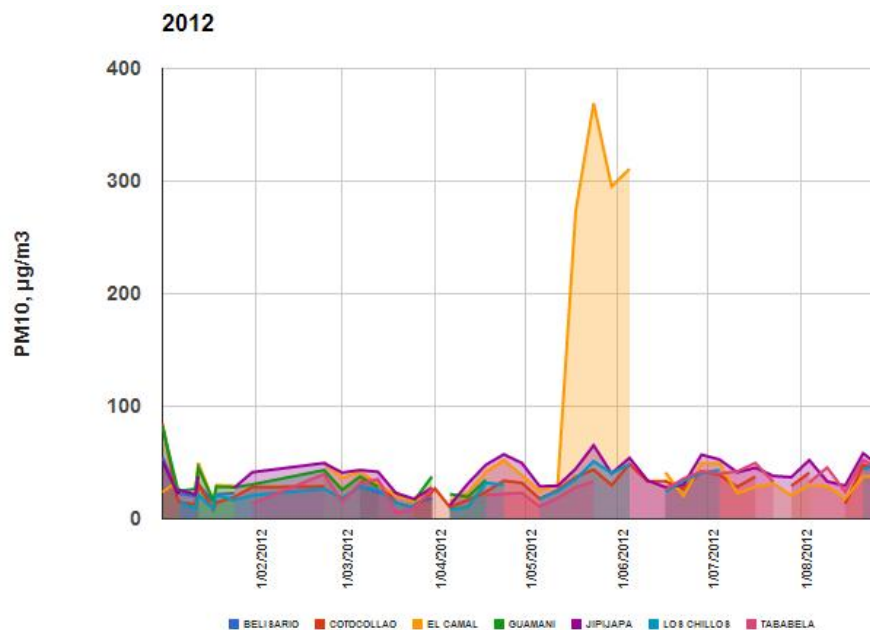


FIGURA 16. MEDICIONES DE PM10 EN LAS ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE DURANTE EL 2012 EN QUITO.

Fuente: Secretaria de Ambiente dQuito (2014). Caracterización física y química del material particulado MP10. Disponible en: <https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>

Existe información aproximadamente mensual de PM10 a lo largo de la ciudad desde el año 2004 donde se puso a funcionamiento la REMMAQ hasta el presente de manera gratuita dentro de la página de la Secretaria de Ambiente de la zona urbana de Quito.

Para la medición del PM10 se utiliza el método gravimétrico, es decir se espera en un tiempo de 24 horas que el material particulado caiga sobre el sector donde se ubica la estación que toma la muestra, para este cálculo se utiliza la Ecuación 13.

$$MF = \frac{m_f - m_i}{Q \cdot t} \quad (13)$$

Donde,

MP = concentración ambiental [µg/m3]

m_f = masa final del filtro luego el muestreo [μg]

m_i = masa inicial del filtro antes del muestreo [μg]

Q = caudal [m^3/min]

t = tiempo de muestreo (24horas) [min]

Vale recalcar que el material particulado de la ciudad de Quito al ser analizado contiene en su mayor parte Polvo de Ciudad específicamente y Materia Orgánica (Figura 17).

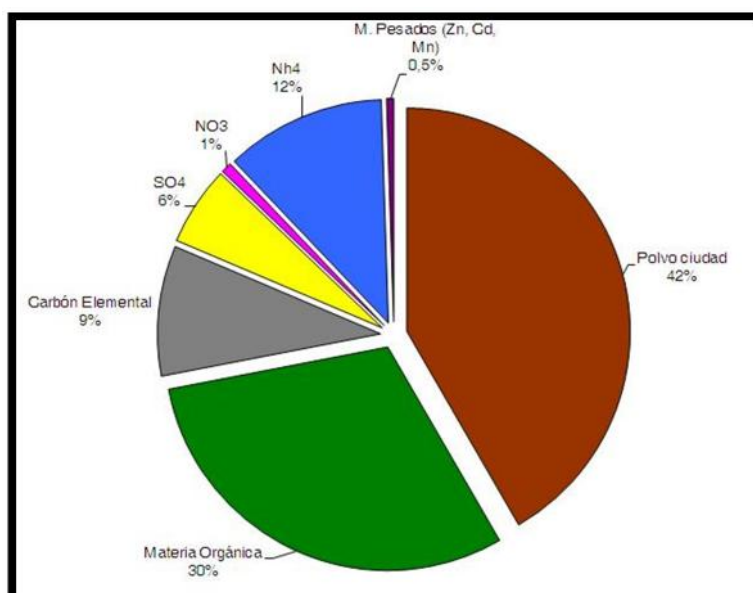


FIGURA 17. COMPOSICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN QUITO.

Fuente: Secretaria de Ambiente dQuito (2014). Caracterización física y química del material particulado MP10. Disponible en:

<https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>

Dentro del Ecuador la normativa en la que está basado el índice de contaminación por PM10 y otros contaminantes del Aire es el Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiente (TULSMA) que regula a través del Ministerio del Ambiente que exista el control adecuado de contaminantes del aire.

En el caso de PM10 existe dentro del TULSMA artículo definidos en el libro VI, Anexo 4 de la Norma de Calidad del Aire, donde se define que:

“Material particulado menor a 10 micrones (PM10).- El promedio aritmético de la concentración de PM10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 µg/m³). La concentración máxima en 24 horas, de todas las muestras colectadas, no deberá exceder ciento cincuenta microgramos por metro cúbico (150 µg/m³), valor que no podrá ser excedido más de dos (2) veces en un año.”

De la misma manera en el Libro VI, Anexo 4 del TULSMA existe la tabla de valores que definen los niveles de alerta, de alarma y emergencia en la calidad del aire (Figura 19).

Adicional se consideró el valor de 50 ug/m³ como parámetro establecido como límite por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para PM10 en 24 horas.

Tabla 3.

Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire.

CONTAMINANTE PERÍODO DE TIEMPO	Y	ALERTA	ALARMA	EMERGENCI A
Monóxido de Carbono Concentración promedio en ocho horas		15 000	30 000	40 000
Oxidantes Fotoquímicos, expresados como ozono. Concentración promedio en una hora		300	600	800
Óxidos de Nitrógeno, como NO ₂ Concentración promedio en una hora		1 200	2 300	3 000
Dióxido de Azufre Concentración promedio en veinticuatro horas		800	1 600	2 100
Material Particulado PM10 Concentración en veinticuatro horas		250	400	500

Nota. Todos los valores de concentración expresados en microgramos por metro cúbico de aire, a condiciones de 25°C y 760 mm HG. Fuente: Ministerio del Ambiente. (2014) Libro VI, ANEXO 4. *TULSMA*.

3. CAPITULO III

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 Metodología aplicada

La metodología aplicada (Figura 18) ha sido definida por el autor, donde se distribuyen cada uno de los pasos seguidos para obtener el resultado final de la comparación entre imágenes satelitales y datos de PM10 obtenidos en campo mediante las estaciones semiautomáticas.

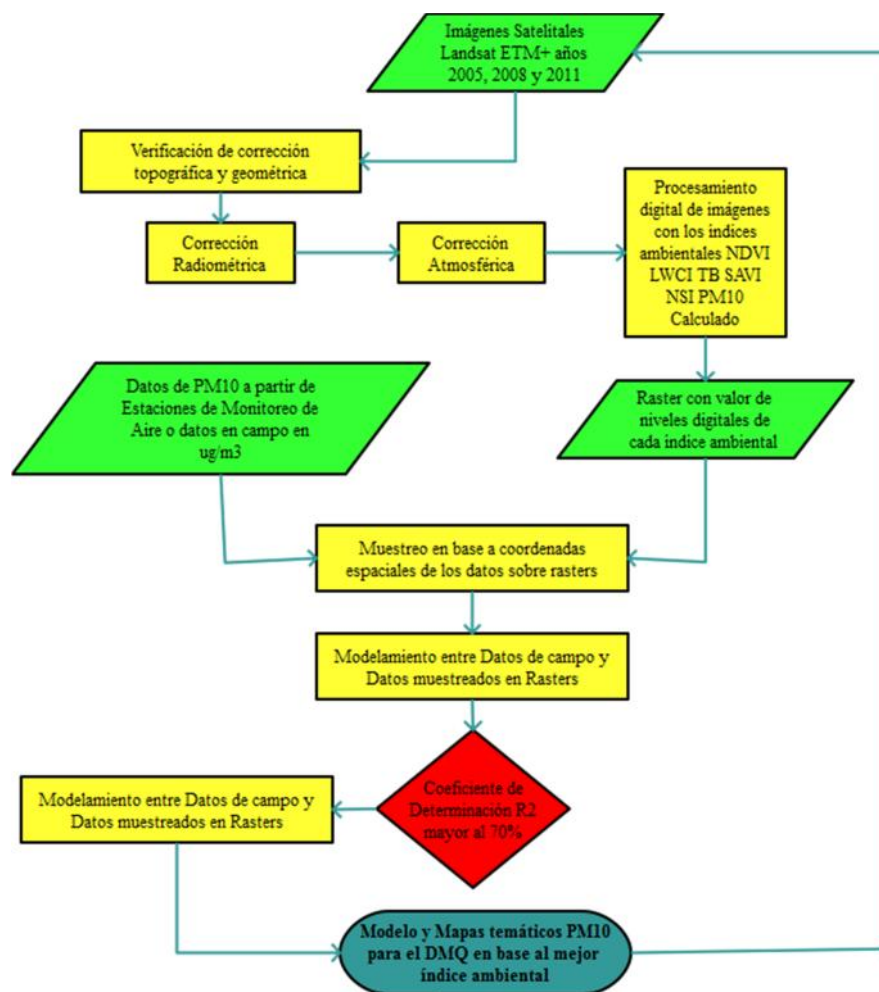


FIGURA 18. ESQUEMA METODOLÓGICO DEL PROYECTO.

3.1.2 Hardware empleado

Dentro del hardware empleado fueron utilizadas para medición de puntos en campo las estaciones de monitoreo de calidad del aire semiautomáticas, así como un computador con alto procesador Core I7 para poder generar el procesamiento digital de imágenes.

3.1.3 Software empleado

Se ha empleado para la realización del proyecto el software ENVI 5.0.3 para el procesamiento de imágenes Landsat 7 con su nuevo modelo de metadatos, como ArcGIS 10.2 para muestra de resultados en mapas y SPSS 19 para el análisis estadístico de datos. Las licencias de ambos software fueron provistas por la empresa Geoint Cia. Ltda.

3.1.4 Imágenes satelitales Landsat utilizadas en el proyecto

Para el proyecto se utilizaron imágenes Landsat 7 ETM+, de Julio 2005, Julio 2008 y Junio 2011. Se seleccionaron estas imágenes en vista de que su cobertura de nubes para el Área de Influencia directa es menor al 20%, así como también sus intervalos de tiempo son de cada 3 años en meses similares para tener mejores resultados en el estudio.

Cabe recalcar que las imágenes fueron obtenidas a partir del sistema Glovis de la NASA, donde las imágenes fueron descargadas con su totalidad de bandas multiespectrales y pancromáticas.

Vale la pena recalcar que las imágenes son de tipo L1T, lo que significa que son ortorectificadas y corregidas geométricamente para usos a escalas 1:50000.

3.1.5 Datos de referencia de PM10 tomados en campo

Los datos de referencia fueron tomados de la fuente de la Secretaría de Ambiente de Quito, donde en la página de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito se encuentra el registro de datos diario por cada año.

Se obtuvieron los datos de acuerdo a las fechas de las imágenes satelitales seleccionadas.

3.1.6 Procesamiento digital de imágenes

Para iniciar el procesamiento digital de las imágenes satelitales se aplicó la metodología descrita anteriormente (Figura 20), donde las primeras correcciones en tomar en consideración fueron la corrección geométrica y topográfica, posteriormente se pasó a la corrección radiométrica y finalmente a las correcciones atmosféricas, todo esto utilizando el software ENVI 5.0.3, donde los algoritmos de corrección ya vienen definidos en su mayoría.

Luego de las correcciones se realizó el cálculo respectivo de los índices ambientales para cada imagen satelital.

3.1.6.1 Corrección topográfica

Las imágenes descargadas tienen un nivel de corrección por terreno L1T, que significa que han sido ortorectificadas empleando modelos digitales de terreno específicamente el modelo SRTM V3 de 90 metros de resolución, como puntos de control generados en mallas de 64 x 64 píxeles usando el modelo Landsat GeoCover 2000 de datos para obtención de una precisión geodésica absoluta.

3.1.6.2 Corrección geométrica

Para la corrección geométrica lo primero que se realizó fue la comparación con los archivos vectoriales (shapefiles) escala 1:50000 del Instituto Geográfico Militar (IGM) para detallar si existía alguna diferencia, donde esta fue claramente similar en vista de que la ortorectificación de estas imágenes satelitales a nivel LIT son fácilmente comparables con escalas 1:50000.

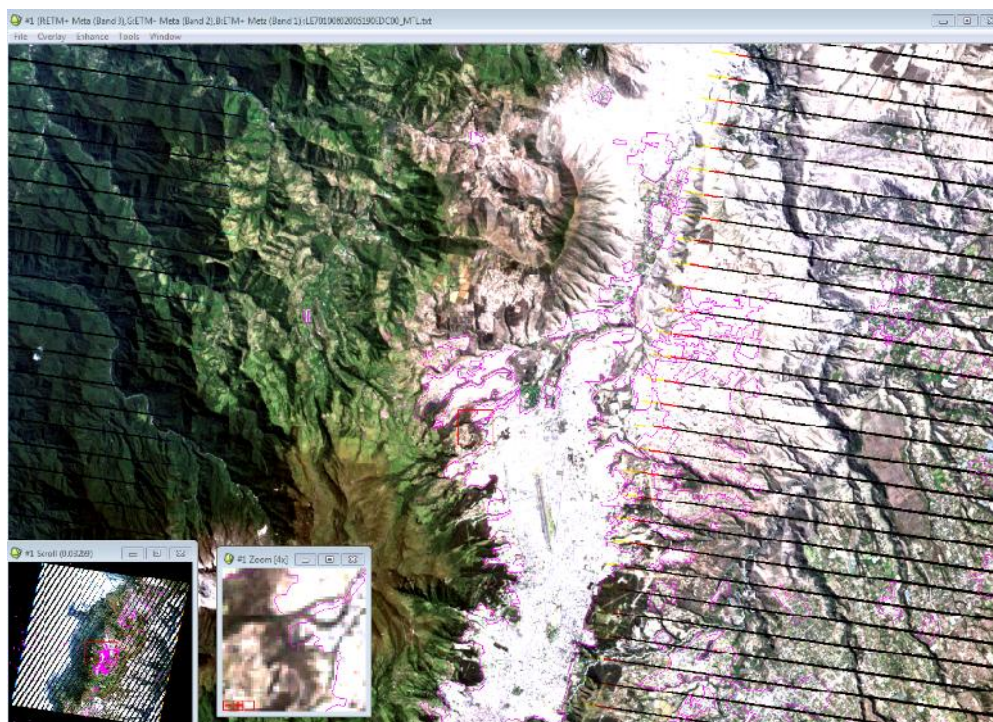


FIGURA 19. COMPARACIÓN CORRECCIÓN GEOMÉTRICA Y TOPOGRÁFICA NIVEL LIT LANDSAT ETM+ IMAGEN JULIO 2005, CON DATOS VECTORIALES ESCALA 1:50000 DEL IGM.

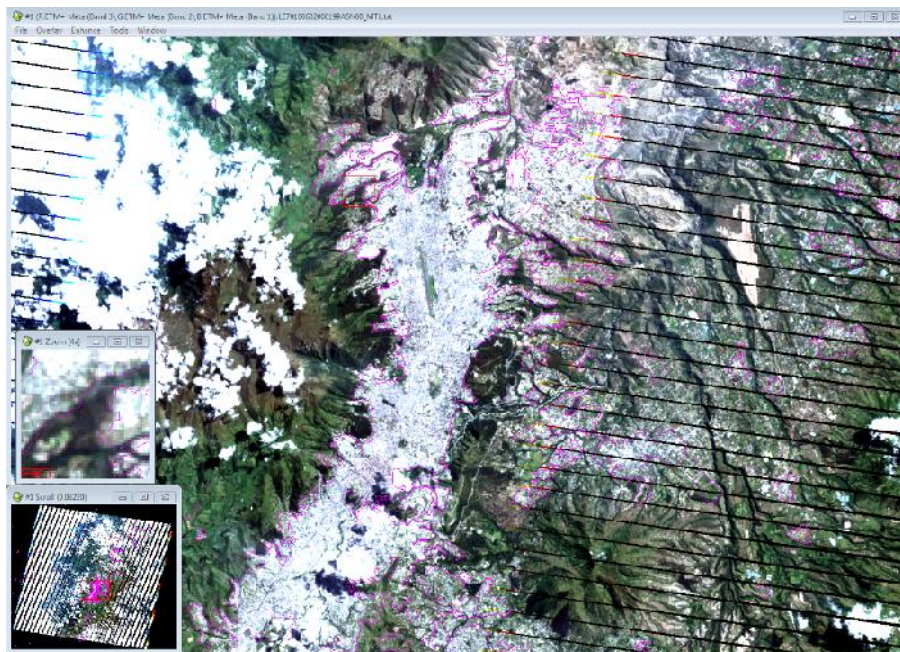


FIGURA 20. COMPARACIÓN CORRECCIÓN GEOMÉTRICA Y TOPOGRÁFICA NIVEL LIT LANDSAT ETM+ IMAGEN JULIO 2008, CON DATOS VECTORIALES ESCALA 1:50000 DEL IGM.

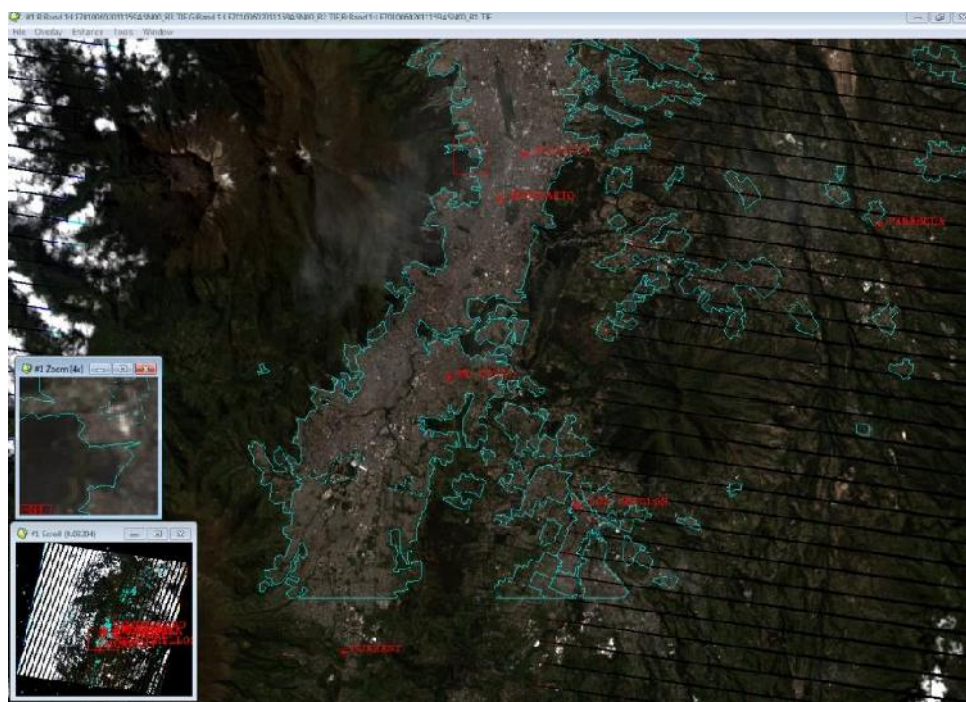


FIGURA 21. COMPARACIÓN CORRECCIÓN GEOMÉTRICA Y TOPOGRÁFICA NIVEL LIT LANDSAT ETM+ IMAGEN JUNIO 2011, CON DATOS VECTORIALES ESCALA 1:50000 DEL IGM.

3.1.6.3 Corrección radiométrica

Para las correcciones radiométricas primeramente se utilizaron las ecuaciones para pasar a radiancia los números digitales y posteriormente a valores de reflectancia para el caso de las bandas multiespectrales, es decir se ocupó las ecuaciones 2 y 3 mediante la función en ENVI Radiometric Calibration.

Para el caso de las bandas térmicas se utilizó las ecuaciones para pasar a radiancia y la temperatura de brillo, ecuaciones 2 y 5 respectivamente con las funciones en ENVI Radiometric Calibration y Band Math.

A partir de estas correcciones se puede corregir valores de los números digitales en valores de reflectancia, aproximándolos a lo que realmente las firmas espectrales de los elementos emitirían.

Cabe la pena recalcar que el software ENVI ya incorpora dentro de sus funciones los algoritmos de corrección radiométrica tanto para radiancia y reflectancia (ANEXO 1), como para radiancia y temperatura de brillo (ANEXO 3).

3.1.6.4 Corrección atmosférica

Para realizar la corrección atmosférica se utilizó la Ecuación 6 para las bandas multiespectrales con el método de Chávez o substracción del pixel negro, donde se identificaron los pixeles con menor valor (Tabla 4) y Ecuación 7 (Tabla 5) para las bandas térmicas. Para esto se utilizó el software ENVI con las funciones Dark subtraction para multiespectrales (ANEXO 2) y el cálculo Band Math respectivamente (ANEXO 3) para el caso de las bandas térmicas.

Tabla 4.

Valores mínimos de histograma en las bandas de las imágenes satelitales a utilizar en el método de Chávez de corrección atmosférica solicitados en la Ecuación 6 como $\rho\text{TOA}_{\min,k}$

Fecha Imagen	09/07/2005	17/07/2008	08/06/2011
Banda 1	0,0024	0,0023	0,0023
Banda 2	0,0027	0,0026	0,0026
Banda 3	0,0025	0,0024	0,0024
Banda 4	0,0074	0,0037	0,0036
Banda 5	0,0033	0,0033	0,0032
Banda 7	0,0031	0,0031	0,0030

Nota. Valores de acuerdo al cálculo del histograma en el software ENVI para las bandas multiespectrales a utilizar en la función Dark Subtraction o método de Chávez.

Tabla 5.

Parámetros requeridos en la Ecuación 7

Fecha Imagen	09/07/2005	17/07/2008	08/06/2011
Radiancia ascendente (ρ_{asc})	2,15	2,62	3,70
Radiancia descendente (ρ_{desc})	3,42	4,07	5,45
Transmitancia (τ)	0,70	0,62	0,50

Nota. Valores obtenidos de acuerdo al modelo atmosférico de la NASA para correcciones atmosféricas en bandas térmicas para Landsat.

3.1.6.5 Cálculo de Índices ambientales

Los índices ambientales fueron calculados específicamente a través de la función Band Math en ENVI, donde se ingresa la respectiva ecuación que los define (ANEXO 4) para su obtención. Cabe recalcar que para los índices ambientales ingresan las imágenes que ya tienen corrección geométrica, topográfica, radiométrica y atmosférica.

Cabe recalcar que en todos los índices donde existe escala de grises más oscuras existe más valor del índice y lógicamente donde hay menor contraste existe menor valor propio del índice. Adicional de la imagen original se realizó una extracción de la zona de influencia directa con la función Extract by mask con ArcGIS de todas las

imágenes con los índices para poder estimar de mejor manera cada uno de ellos, en vista de que muchos sectores de la imagen Landsat tienen problemas por la parte donde no existe información por el problema propio del Landsat 7 en el sensor el SLC se encuentra averiado.

3.1.6.5.1 NDVI: Para su cálculo se utilizó la Ecuación 8 ingresando la función en Band Math en ENVI, identificando como NIR a la banda 4 y R a la banda 3 de las imágenes Landsat.

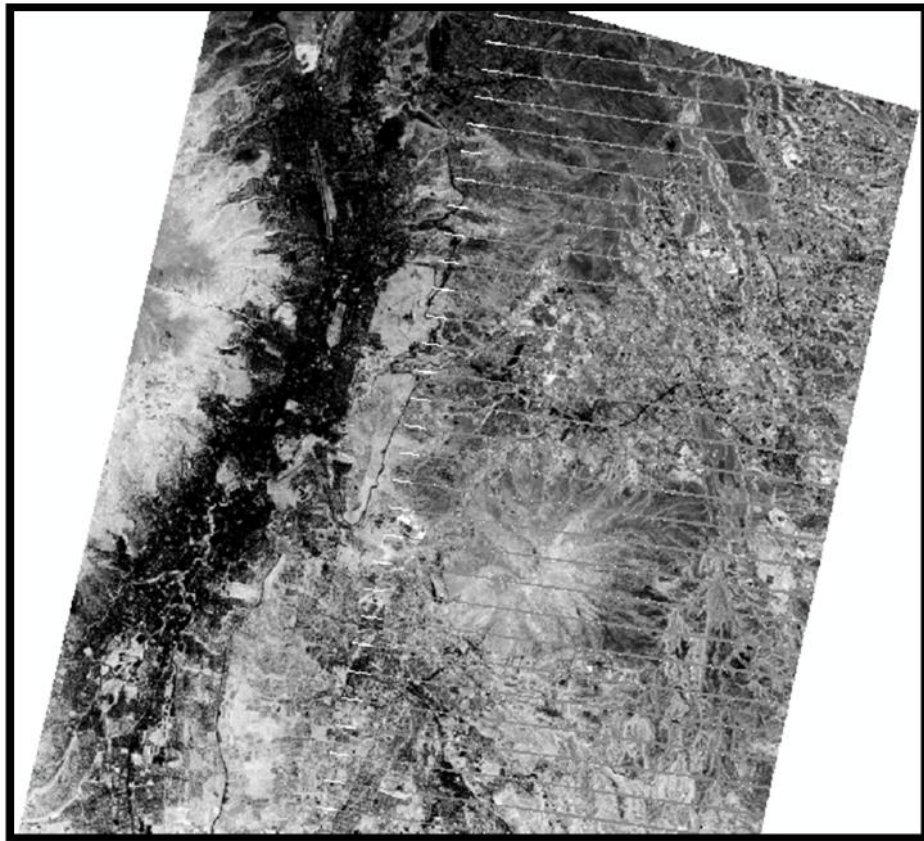


FIGURA 22. NDVI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.

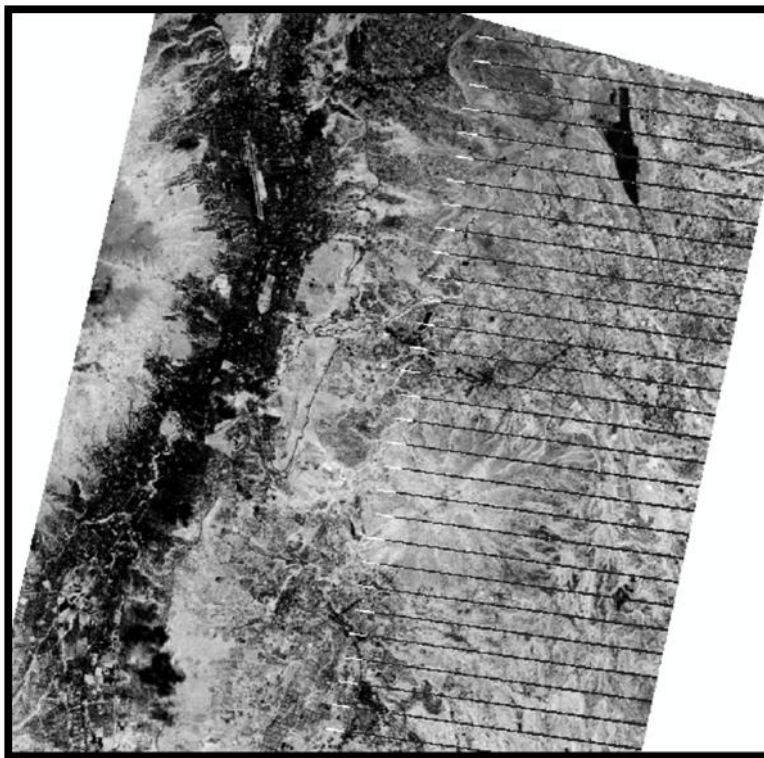


FIGURA 23. NDVI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

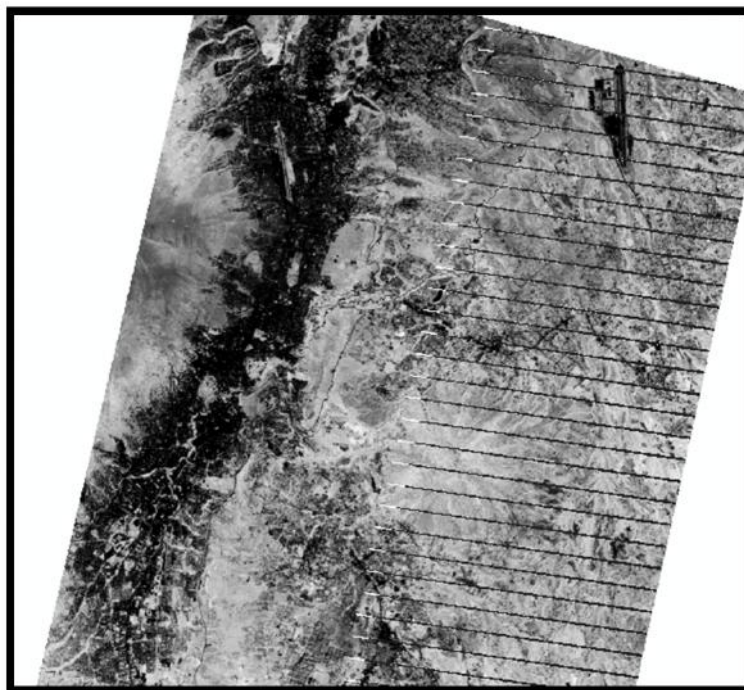


FIGURA 24. NDVI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.5.2 LWCI: Este índice conocido por ayudar a detectar humedad en las hojas permite identificar el stress de la vegetación. Para su cálculo se aplicó la Ecuación 9 basándose en las bandas 4 para el NIR y 5 para el SWIR. El resto de parámetros se calculó de la misma manera con la función Compute Statistics en ENVI (Tabla 6), para posteriormente ingresar la ecuación completa en el Band Math para los 3 años.

Tabla 6.

Valores máximos en NIR (Banda 4) y SWIR (Banda 5)

Fecha Imagen	09/07/2005	17/07/2008	08/06/2011
Banda 4	0,941987	0,939728	0,921582
Banda 5	0,839218	0,833930	0,817838

Nota. Valores de acuerdo al cálculo de estadísticas en el software ENVI.

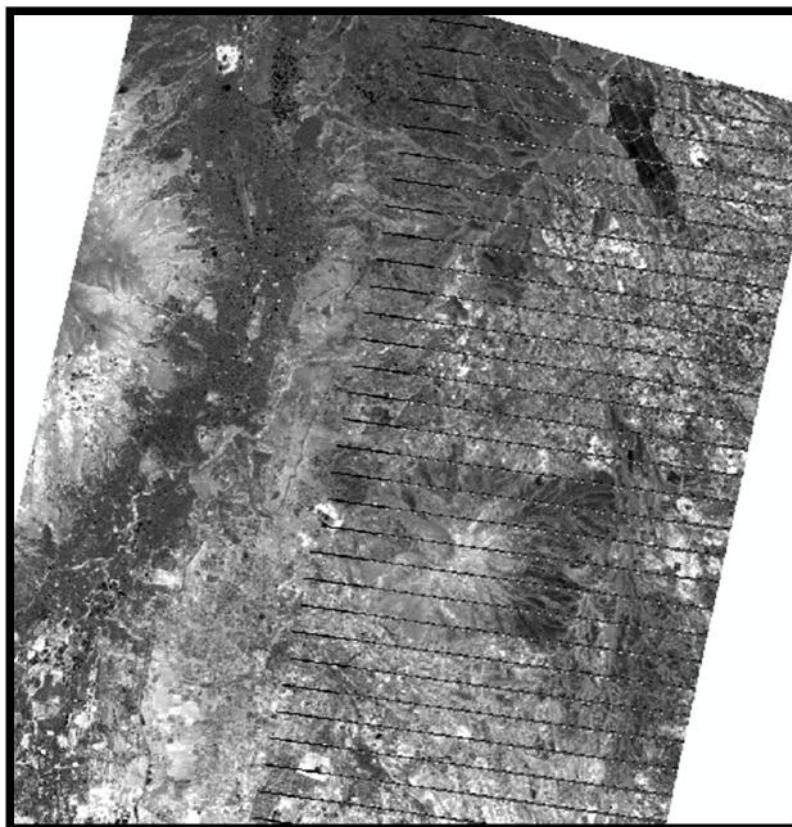


FIGURA 25. LWCI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.



FIGURA 26. LWCI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

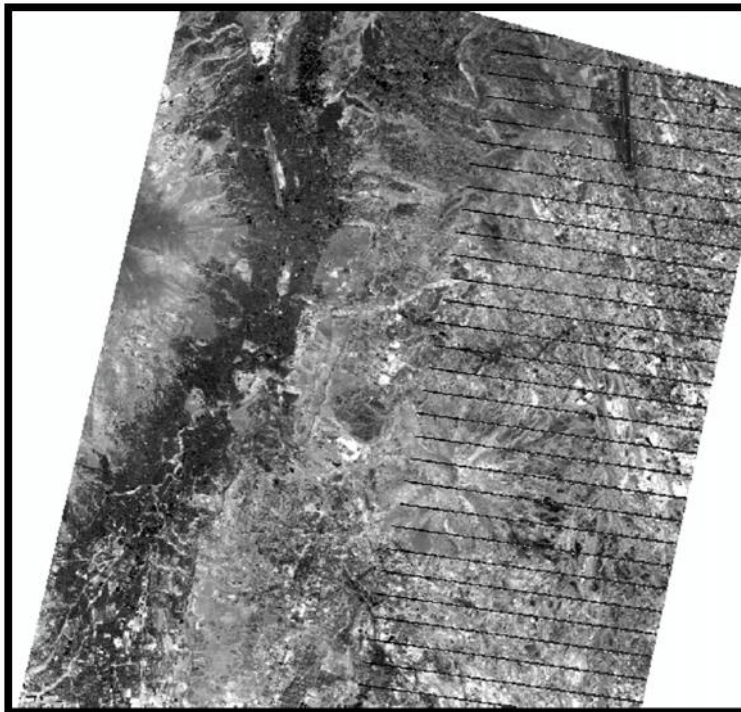


FIGURA 27. LWCI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.5.3 TB: La temperatura de brillo del satélite es un índice obtenido a partir de las bandas térmicas, donde la principal característica es acercar los valores de la banda térmica tomadas con el satélite Landsat 7 a valores de temperatura en grados kelvin. Para esto se utilizó la ecuación 5 aplicando en los 3 diferentes años que se realiza el estudio.

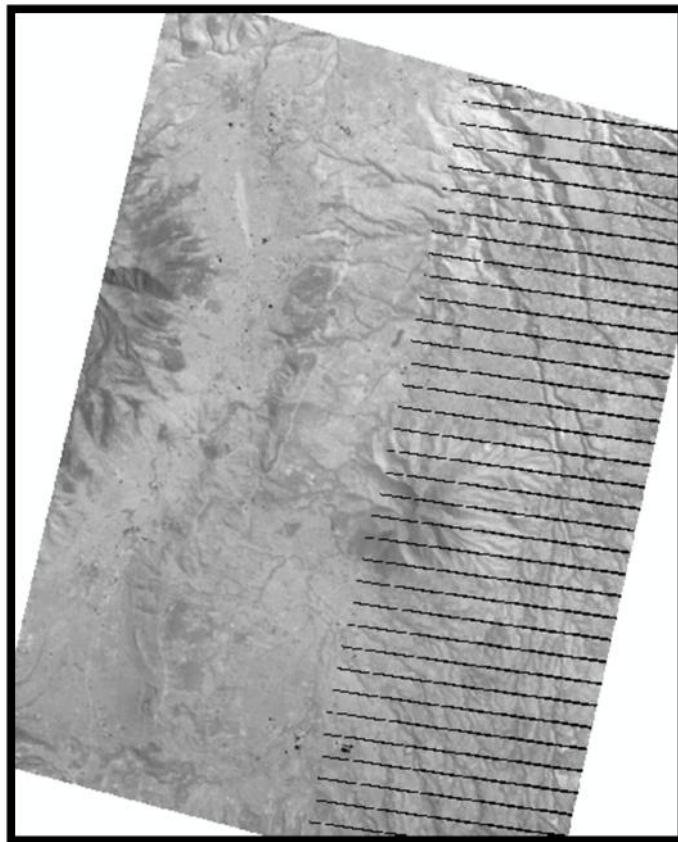


FIGURA 28. LWCI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.

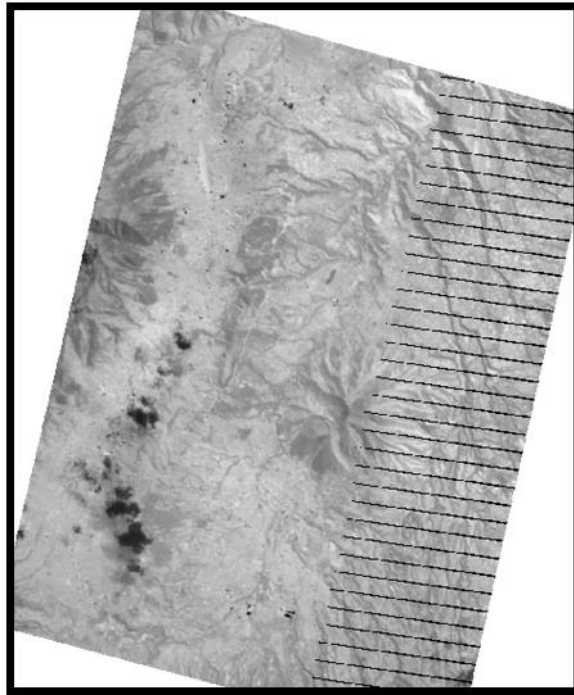


FIGURA 29. LWCi PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

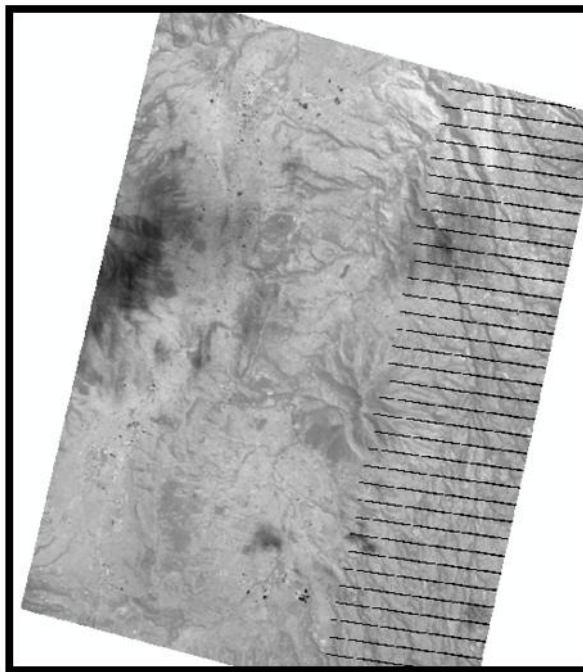


FIGURA 30. LWCi PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.5.4 SAVI: Este índice permite la corrección de brillo del suelo. Esto con frecuencia se utiliza en regiones áridas en donde la cubierta de vegetación es baja, así por ejemplo tenemos secciones áridas en el Noroccidente de Pichincha donde el área de estudio influye. Para su cálculo se ejecutó la Ecuación 10, considerando el NIR a la banda 4 y el R a la banda 5 de las imágenes Landsat ETM+.

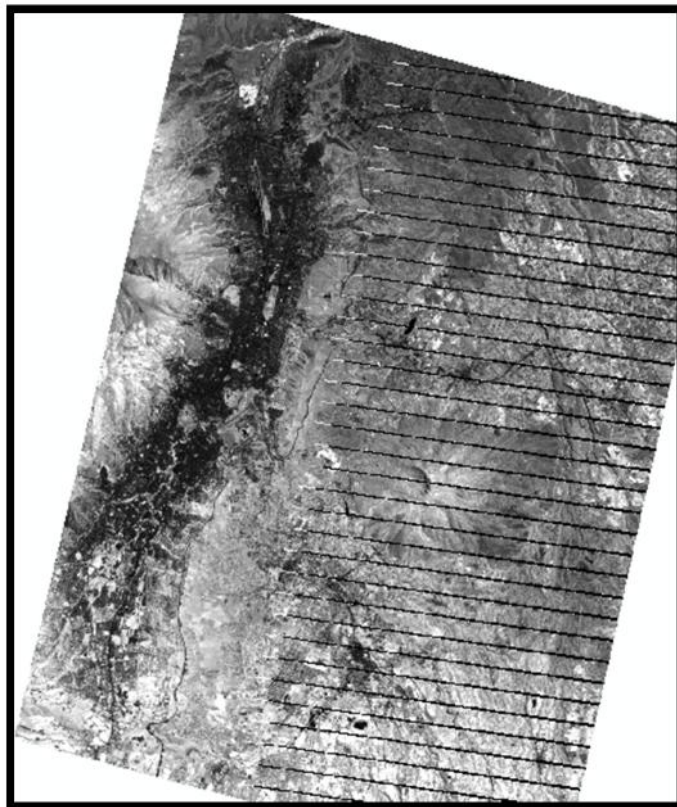


FIGURA 31. TB PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.

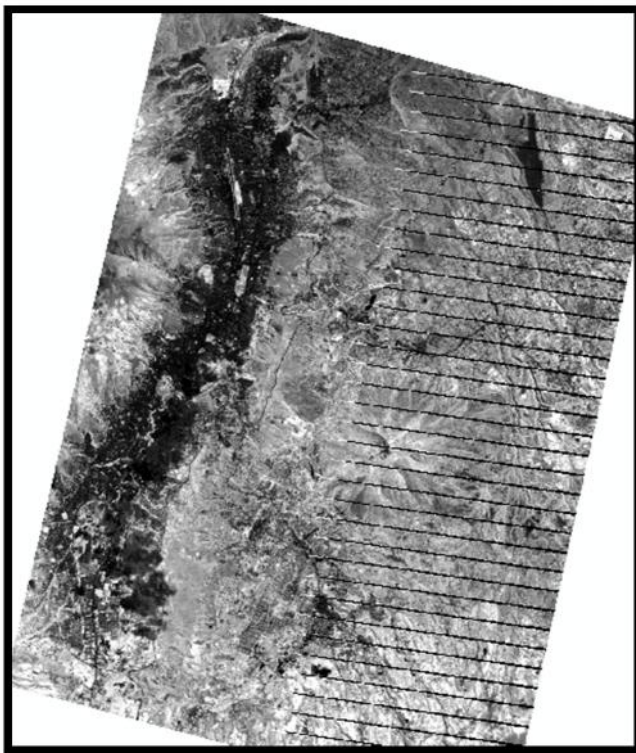


FIGURA 32. TB PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

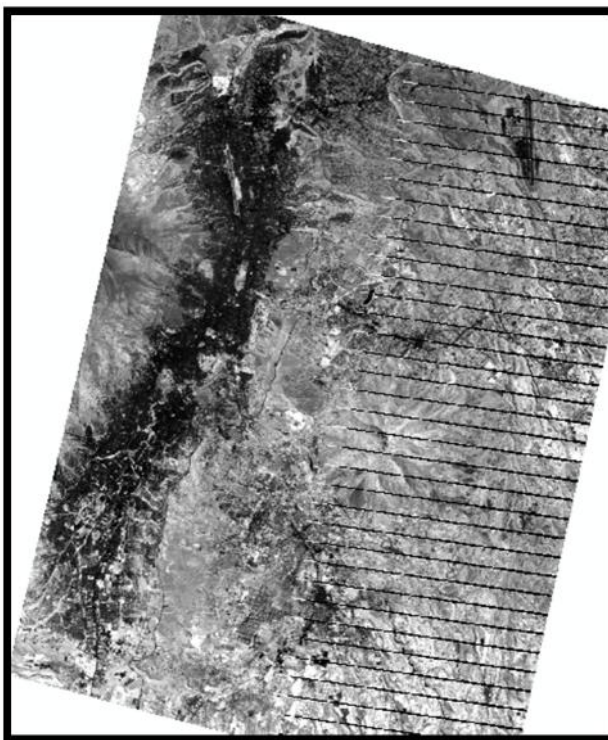


FIGURA 33. TB PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.5.5 NSI: El índice de diferencia normalizada de Suelos ayuda a destacar las áreas construidas en suelo desnudo, este es calculado a partir de la Ecuación 11 ingresada en Band Math de ENVI, donde el SWIR fue establecido como la banda 5 para Landsat y NIR la banda 4.

Este índice permite diferenciar áreas de construcción que a veces resulta complicado asimilar con otros índices.

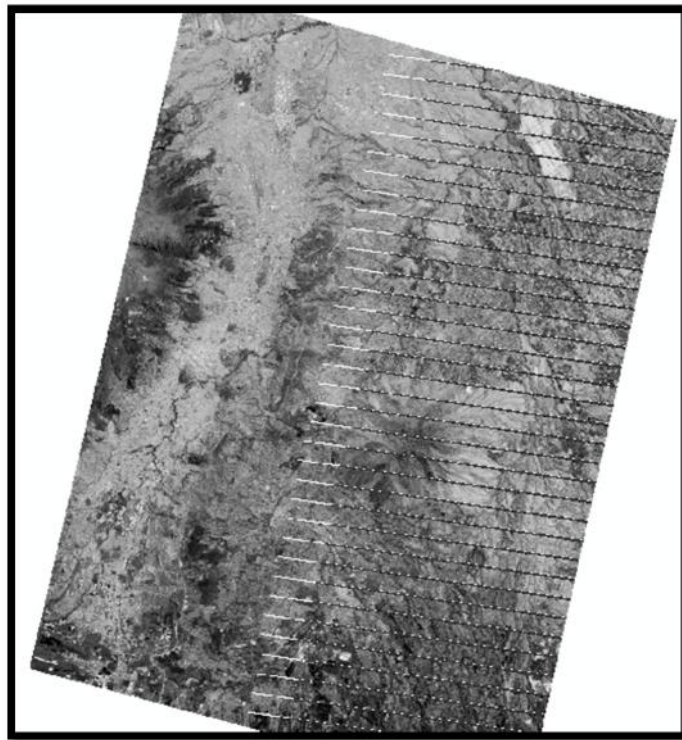


FIGURA 34. NSI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.

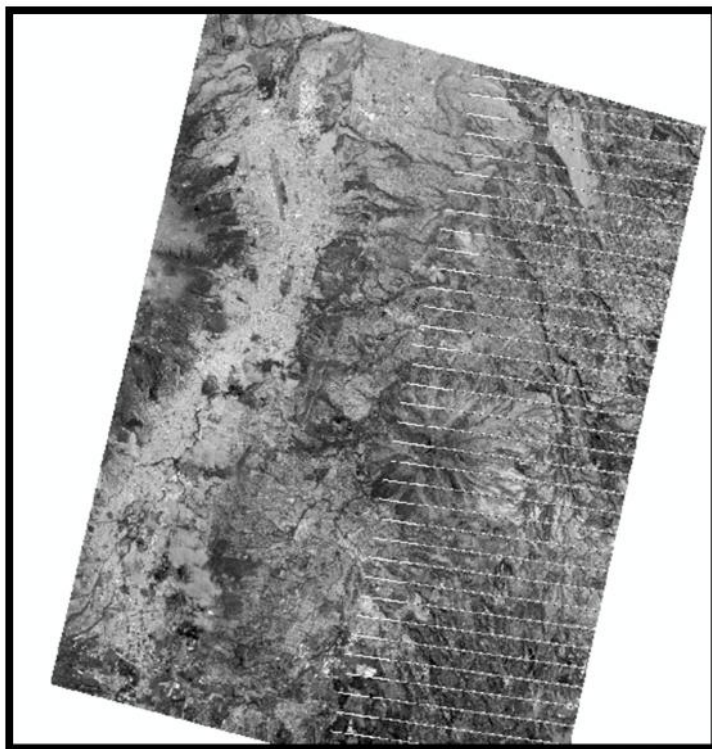


FIGURA 35. NSI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

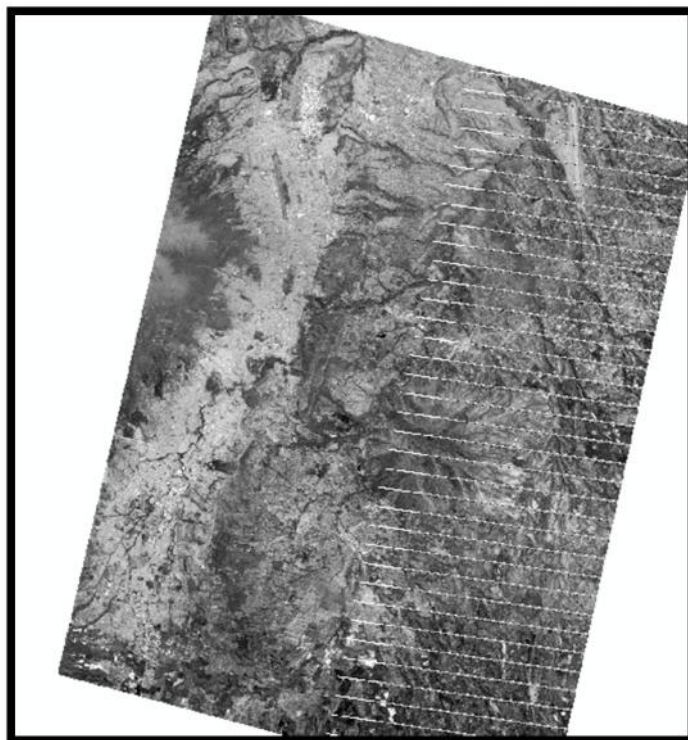


FIGURA 36. NSI PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.5.6 Algoritmo Landsat ETM+ PM10: Utilizando el modelo establecido en la Ecuación 12 se empleó un modelamiento con regresión lineal multivariable para obtener los coeficientes como el modelo establece, obteniéndose buenos resultados al realizar análisis previos en función a la Significancia de cada una de las variables, en este caso de las 3 bandas (B1, B2 Y B3) y el coeficiente de determinación R². Para realizar la regresión lineal múltiple se utilizó el software estadístico SPSS 19, esto se realizó para cada uno de los años definiendo como variable dependiente los datos en campo de PM10 y como variables independientes las 3 bandas que indica el modelo de la Ecuación 12.

Posterior a la obtención de los coeficientes empíricos obtenidos se procedió a aplicar la Ecuación 12 dentro del Band Math de ENVI para obtener los datos de PM10 calculados en base al modelo disponible.

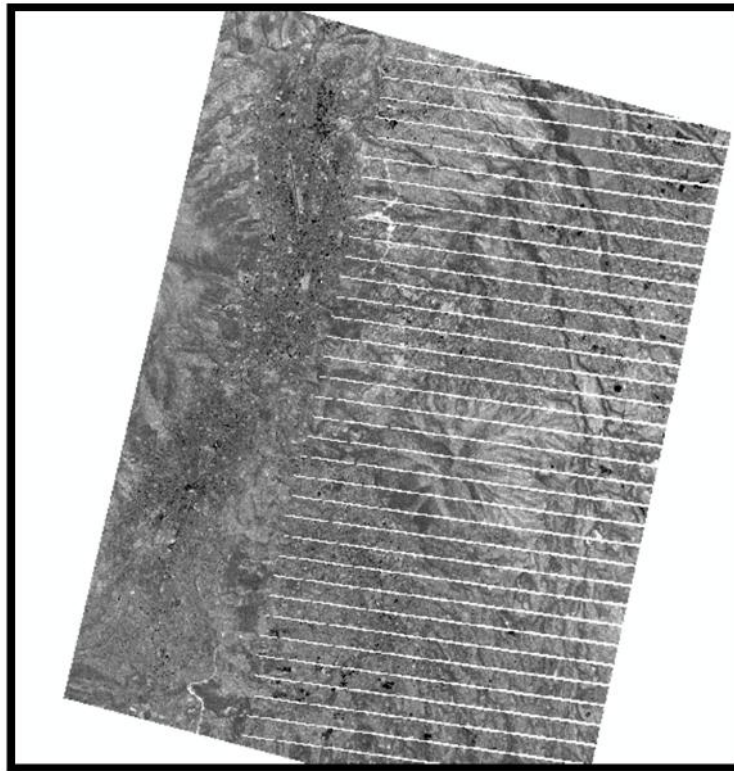


FIGURA 37. PM10 CALCULADO PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2005.

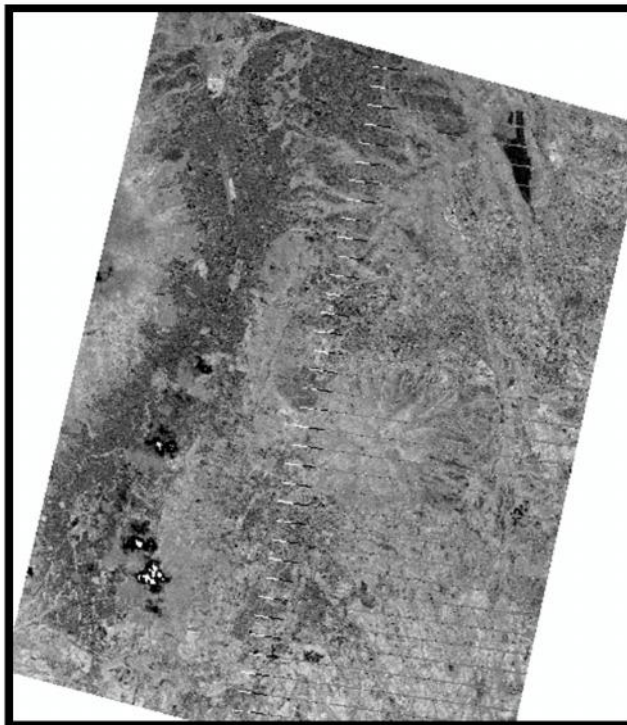


FIGURA 38. PM10 CALCULADO PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2008.

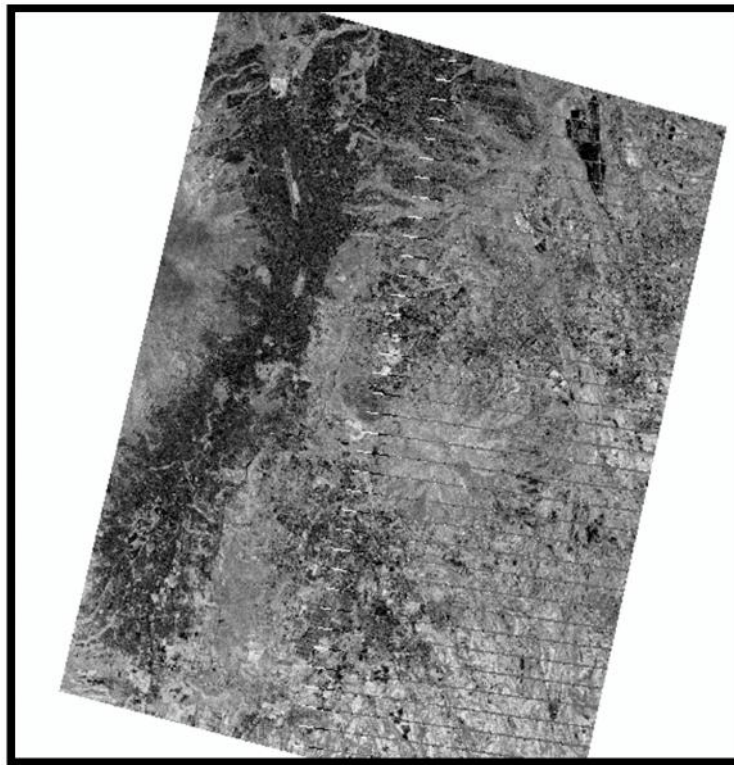


FIGURA 39. PM10 CALCULADO PARA LA ZONA DE INFLUENCIA DIRECTA EN LA IMAGEN DEL AÑO 2011.

3.1.6.6 Mediciones de PM10 en Terreno mediante la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito.

Las mediciones de PM10 se tienen registradas a través de las estaciones pasivas y semiautomáticas, donde el método para obtención es gravimétrico en 24 horas, así estos datos han sido recopilados desde el año 2003 hasta la actualidad de manera diaria en algunos casos. Para la obtención de esta información se recopiló datos de las mismas fechas que las imágenes satelitales, descargando estos datos de PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 40) desde la página de la Secretaria de Ambiente dQuito, donde fueron tabulados y ordenados para el estudio (Tabla 7). <https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/descarga-de-datos-1>

Tabla 7.

*Datos PM10 Monitoreo Semiautomático en el Distrito Metropolitano de**Quito*

Fecha Imagen	09/07/2005	17/07/2008	08/06/2011
Estación	Julio 2005	Julio 2008	Junio 2011
Cotocollao	92,03	32,28	24,81
Belisario	52,14	38,84	33,17
Jipijapa	29,42	25,39	21,32
Guamaní	94,11	39,97	-
Los Chillos	28,52	31,09	23,58
El Camal	-	-	37,7
Tababela	-	-	25,72

Nota. Promedio mensual de PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de acuerdo a las fechas de adquisición de las imágenes satelitales. Fuente: Secretaría de Ambiente dQuito (2014). Caracterización física y química del material particulado MP10. Disponible en: <https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>

3.1.6.7 Correlación entre puntos de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito y datos procesados Landsat ETM+.

El siguiente paso dentro de la metodología es la correlación entre los puntos tomados en campo que para los modelos será la variable dependiente y los datos procesados sean por los diferentes índices o por el modelo de PM10 que serán las variables independientes.

Para la obtención de los datos de los diferentes índices y bandas que requieren los modelos se utilizó la función Extract Values to Points de ArcGIS, donde se requiere el Raster del índice o la banda y adicional los puntos georeferenciados de las estaciones. El resultado arrojará el valor extraído del raster en la posición de cada estación para el año correspondiente.

Para ambos casos se utilizó los modelos de mínimos cuadrados de regresión. En el primer caso donde se identifican los índices ambientales NDVI (Tabla 8), LWCI (Tabla 9), TB (Tabla 10), SAVI (Tabla 11), NSI (Tabla 12) se utilizó una regresión

simple, donde se buscó la ecuación que mejor se ajuste en función de su índice de determinación R^2 (Tabla 13), no necesariamente lineal.

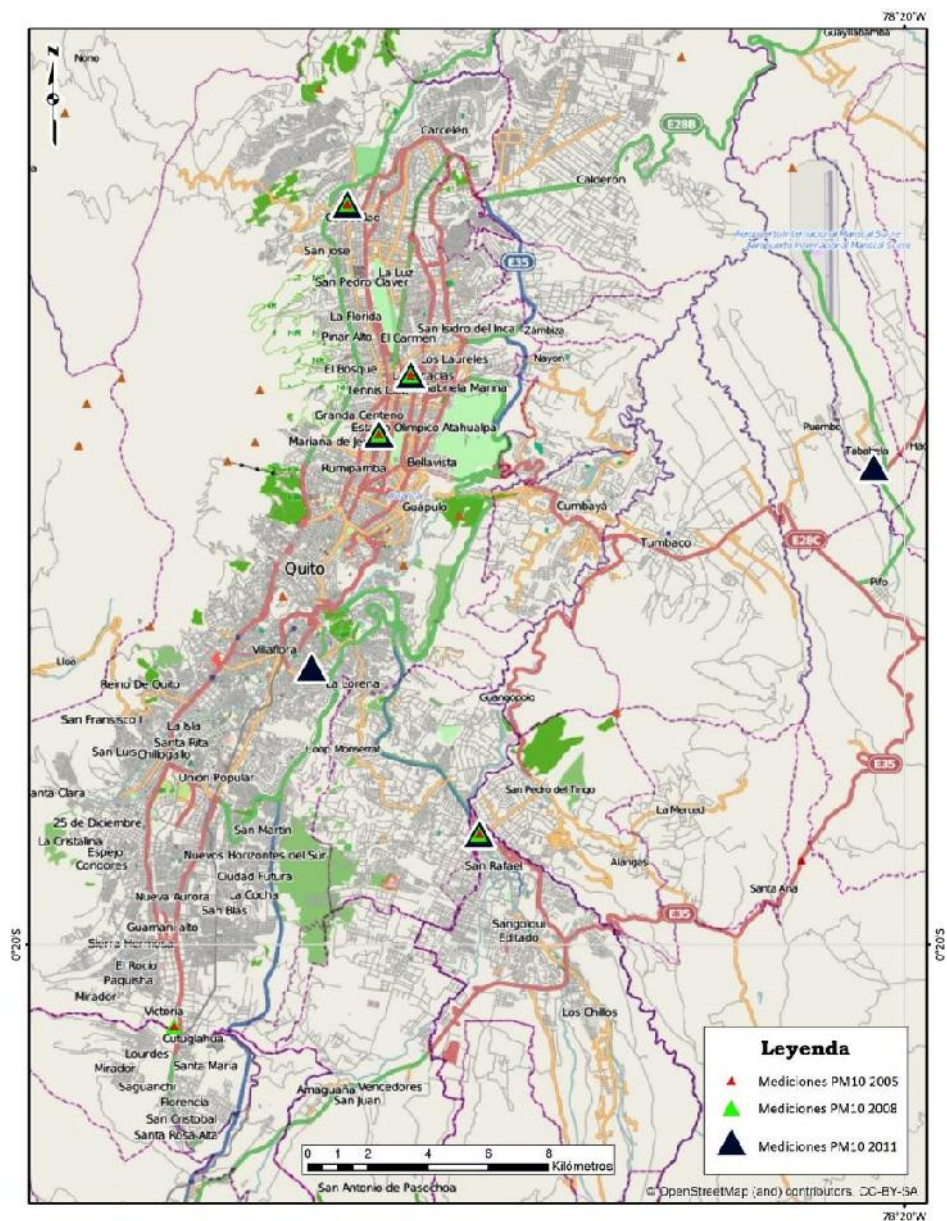


FIGURA 40. UBICACIÓN DE ESTACIONES SEMIAUTOMÁTICAS CON DATOS DE PM10 EN LOS AÑOS 2005, 2008 Y 2011.

Fuente: Secretaria de Ambiente dQuito (2014). Caracterización física y química del material particulado MP10. Disponible en:

<https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>

Tabla 8.

Valores de NDVI en los puntos de toma de datos en campo de PM10

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	NDVI	PM10	NDVI	PM10	NDVI	PM10
Belisario	0,0549	52,14	0,071	38,84	0,104	33,17
Guamaní	0,7698	94,11	0,685	39,97	-	-
Los Chillos	0,0418	28,52	0,071	31,09	0,085	23,58
Jipijapa	0,1235	29,42	0,134	25,39	0,186	21,32
Cotocollao	0,1788	92,60	0,310	32,28	0,323	24,81
El Camal	-	-	-	-	0,269	37,70
Tababela	-	-	-	-	0,402	25,72

Nota. Valores de NDVI obtenidos a partir del cálculo del índice ambiental y extracción de valores en los puntos de las estaciones donde se realizó la medición para cada año.

Tabla 9.

Valores de LWCI en los puntos de toma de datos en campo de PM10

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	LWCI	PM10	LWCI	PM10	LWCI	PM10
Belisario	-0,0332	52,14	0,0118	38,84	0,2405	33,17
Guamaní	1,9166	94,11	1,4196	39,97	-	-
Los Chillos	-0,1914	28,52	0,0233	31,09	-0,0469	23,58
Jipijapa	-0,0060	29,42	0,1143	25,39	0,2747	21,32
Cotocollao	0,0183	92,60	0,3154	32,28	0,2941	24,81
El Camal	-	-	-	-	0,2098	37,70
Tababela	-	-	-	-	0,1543	25,72

Nota. Valores de LWCI obtenidos a partir del cálculo del índice ambiental y extracción de valores en los puntos de las estaciones donde se realizó la medición para cada año.

Tabla 10.

Valores de TB en los puntos de toma de datos en campo de PM10

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	TB	PM10	TB	PM10	TB	PM10
Belisario	312,652	52,14	304,026	38,84	290,340	33,17
Guamaní	302,900	94,11	296,712	39,97	-	-
Los Chillos	313,824	28,52	306,511	31,09	307,736	23,58
Jipijapa	313,434	29,42	301,918	25,39	294,023	21,32
Cotocollao	315,371	92,60	301,493	32,28	306,920	24,81
El Camal	-	-	-	-	304,026	37,70
Tababela	-	-	-	-	309,753	25,72

Nota. Valores de TB obtenidos a partir del cálculo del índice ambiental y extracción de valores en los puntos de las estaciones donde se realizó la medición para cada año.

Tabla 11.

Valores de SAVI en los puntos de toma de datos en campo de PM10

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	SAVI	PM10	SAVI	PM10	SAVI	PM10
Belisario	0,0296	52,14	0,035	38,84	0,0614	33,17
Guamaní	0,5041	94,11	0,442	39,97	-	-
Los Chillos	0,0224	28,52	0,037	31,09	0,0470	23,58
Jipijapa	0,0629	29,42	0,067	25,39	0,1060	21,32
Cotocollao	0,1077	92,60	0,170	32,28	0,1825	24,81
El Camal	-	-	-	-	0,1284	37,70
Tababela	-	-	-	-	0,2267	25,72

Nota. Valores de SAVI obtenidos a partir del cálculo del índice ambiental y extracción de valores en los puntos de las estaciones donde se realizó la medición para cada año.

Tabla 12.

Valores de NSI en los puntos de toma de datos en campo de PM10

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	NSI	PM10	NSI	PM10	NSI	PM10
Belisario	0,0120	52,14	-0,005	38,84	-0,0807	33,17
Guamaní	-0,3770	94,11	-0,300	39,97	-	-
Los Chillos	0,0678	28,52	-0,009	31,09	0,0163	23,58
Jipijapa	0,0022	29,42	-0,046	25,39	-0,0910	21,32
Cotocollao	-0,0050	92,60	-0,101	32,28	-0,0880	24,81
El Camal	-	-	-	-	-0,0850	37,70
Tababela	-	-	-	-	-0,0422	25,72

Nota. Valores de NSI obtenidos a partir del cálculo del índice ambiental y extracción de valores en los puntos de las estaciones donde se realizó la medición para cada año.

Tabla 13.

Coficiente de determinación R^2 para los diferentes modelos de regresión simple en los índices ambientales

	Lineal	Exponencial	Logarítmica	Polinómica 2do Grado
09/07/2005				
NDVI		0,4769	0,4229	0,5941
LWCI		0,4101	0,373	-
TB		0,2269	0,2114	0,2293
SAVI		0,4813	0,4284	0,631
NSI		0,4432	0,4077	-
17/07/2008				
NDVI		0,2571	0,2398	0,1054
LWCI		0,3032	0,2781	0,0213
TB		0,1443	0,1186	0,146
SAVI		0,283	0,2635	0,1194
NSI		0,2417	0,2208	-
08/06/2011				
NDVI		4,00E-05	7,00E-05	0,0011
LWCI		0,0295	0,0262	0
TB		0,1343	0,1353	0,2609
SAVI		0,0119	0,0079	0,0017

NSI	0,1058	0,0935	0,1327
-----	--------	--------	--------

Nota. Valores de R^2 obtenidos a partir de regresiones entre PM10 tomado en campo como variable dependiente y cada uno de los índices como variable independiente. Se resalta en color amarillo el modelo que mejor correlación tiene para cada año.

Para el caso del modelo de PM10 ya establecido se tuvo que obtener los coeficientes de la regresión lineal múltiple que se plantea en el modelo, para esto a través del software SPSS se generó la regresión para cada uno de los años establecidos, donde se identificó que el valor de significancia para cada una de las variables independientes (B1, B2 y B3) es mayor a 0 y su R^2 es cercano a 1 (Tabla 14).

Tabla 14.
Valores de Significancia y R^2 para el modelo de PM10 calculado

Fecha Imagen	09/07/2005		17/07/2008		08/06/2011	
Datos	R^2	Significancia	R^2	Significancia	R^2	Significancia
Constante	0,999	0,011	0,942	0,977	0,983	0,005
B1		0,007		0,969		0,044
B2		0,121		0,187		0,010
B3		0,015		0,285		0,010

Nota. Valores obtenidos a partir de SPSS, en donde se resalta el valor de R^2 .

A partir de los valores de R^2 se determina cual es el modelo que mejor se ajusta para cada año y en base a este se definirán los mapas para la gestión ambiental atmosférica de las diferentes zonas.

4. CAPITULO IV

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1 Resultados

Los resultados arrojados se basan en seleccionar el modelo que mejor se ajuste a las condiciones dQuito para diferentes años, así esto se determina en función al R^2 (Tabla 15), donde el modelo que tiene mayor valor en su coeficiente de determinación será el seleccionado para generalizar el modelo con imágenes satelitales.

Tabla 15.

Coefficiente de determinación R^2 para los dos modelos de regresión que mejor se ajustan para determinar PM10 a partir de índices ambientales.

Imagen	Tipo de regresión	Índice	R^2
09/07/2005	Polinómica de 2do Grado	SAVI	0,7259
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,9999
17/07/2008	Polinómica de 2do Grado	NSI	0,4954
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,942
08/06/2011	Polinómica de 2do Grado	LWCI	0,3149
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,983

Nota. Valores de R^2 para los modelos que mejor se ajustan.

A partir de los resultados (Tabla 15), se selecciona para cada año el modelo que mejor se ajusta, que en este caso será PM10 calculado, así las ecuaciones del modelo quedarán definidas y comprobadas con un alto valor de coeficiente de determinación (Tabla 16).

Tabla 16.

Ecuaciones finales del modelo PM10 calculado que mejor se ajusta a cada año con las imágenes Landsat definidas.

Imagen	Ecuación
09/07/2005	$PM10_{2005} = 462,927 - 10863,881B1 + 789,300B2 + 7046,990B3$ (14)
17/07/2008	$PM10_{2008} = 0,669 - 27,283B1 + 1332,318B2 - 1023,902B3$ (15)
08/06/2011	$PM10_{2011} = 48,445 - 896,818B1 + 2858,231B2 - 2113,895B3$ (16)

Nota. Valores de R^2 para los modelos que mejor se ajustan.

Donde,

B1 = Banda 1 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente

B2 = Banda 2 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente

B3 = Banda 3 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente.

Posterior a partir de las ecuaciones 14, 15 y 16 para cada año respectivamente se realizó el cálculo en base a un mapa de estimación de PM10 para cada año (ANEXO 5), determinándose categorías (Tabla 3) en base a los límites permisibles de PM10 emitidos por el Ministerio del Ambiente en el TULSMA (Figura 41), con esto se pudo determinar en los distintos años como ha ido mejorando la gestión ambiental en el aire en Quito para contaminantes atmosféricos como PM10.



FIGURA 41. CATEGORÍAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN LOS AÑOS 2005, 2008 Y 2011.

Fuente: Ministerio del Ambiente. (2014) Libro VI, ANEXO 4. *TULSMA*.

Para comprobar que la veracidad del modelo, en los lugares donde existe mayor valor se fue haciendo un análisis puntual para determinar porque se sitúa de esa manera, así por ejemplo en San Antonio de Pichincha (Figura 42) en el año 2005 se detectó alto nivel de PM10, esto se puede empezar a deducir en vista de que en este sector justamente se encuentran canteras y existe gran cantidad de polvareda que en años anteriores no era normado de la mejor manera.

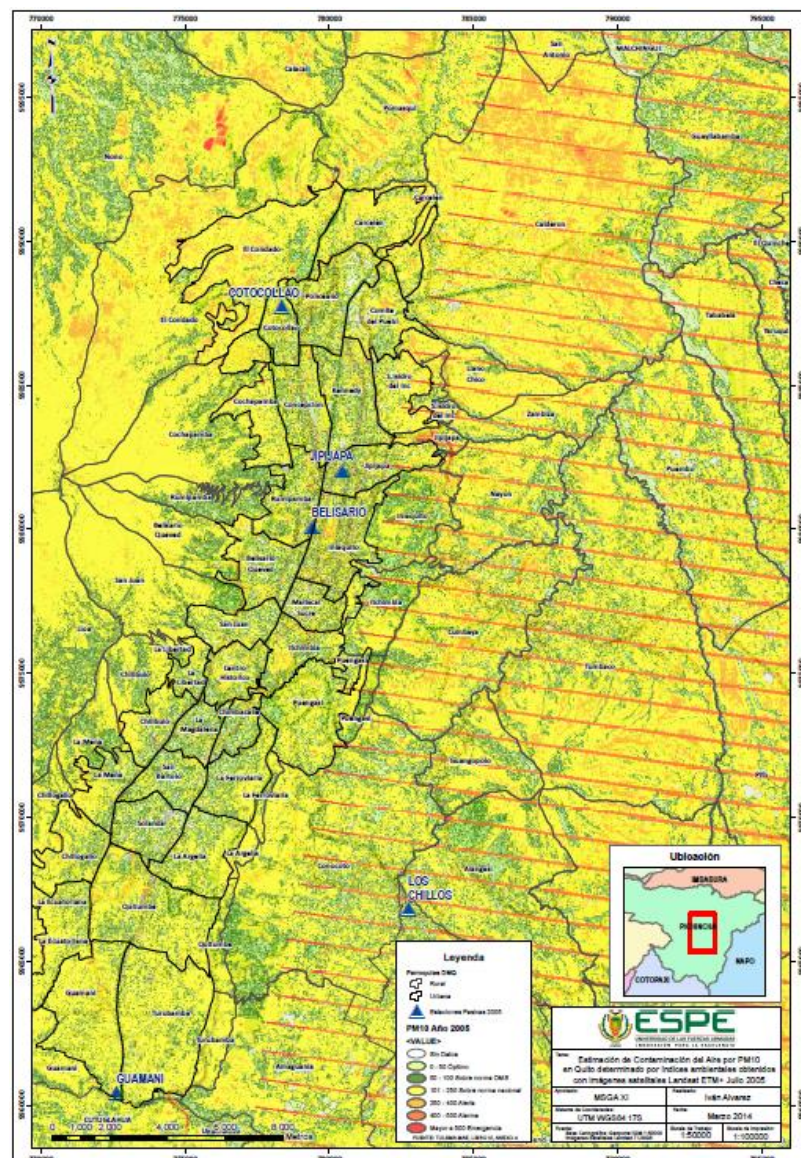


FIGURA 42. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2005.

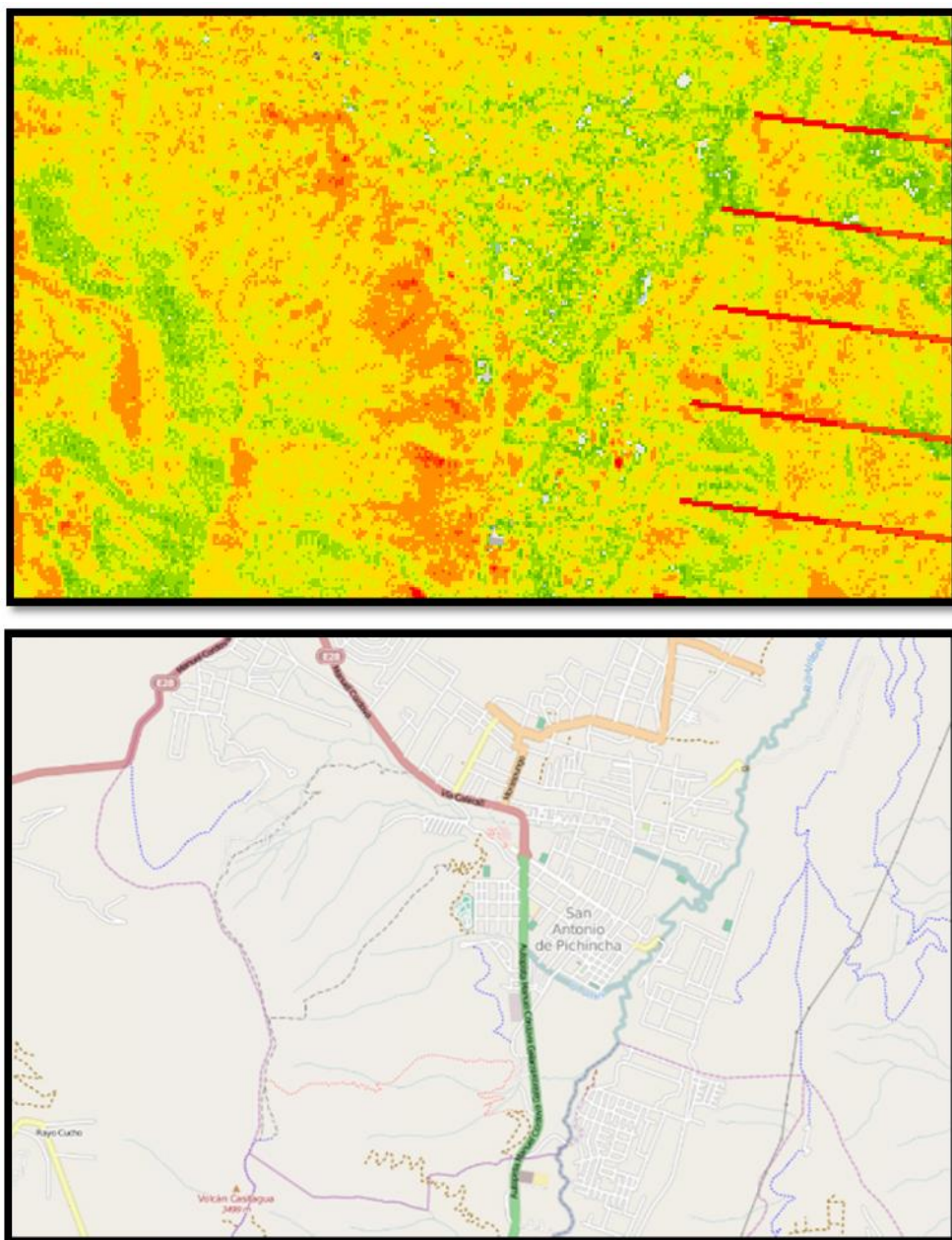


FIGURA 43. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2005 EN LA ZONA DE SAN ANTONIO DE PICHINCHA.

De la misma manera existen otros sectores como Tabacundo (Figura 44) en el año 2005 donde se puede deducir que la presencia de florícolas contribuye con el alto nivel de PM10, así mismo en el antiguo botadero de Zambiza se identifica que en 2005 hay cantidades considerables de Emergencia en PM10 (Figura 45).

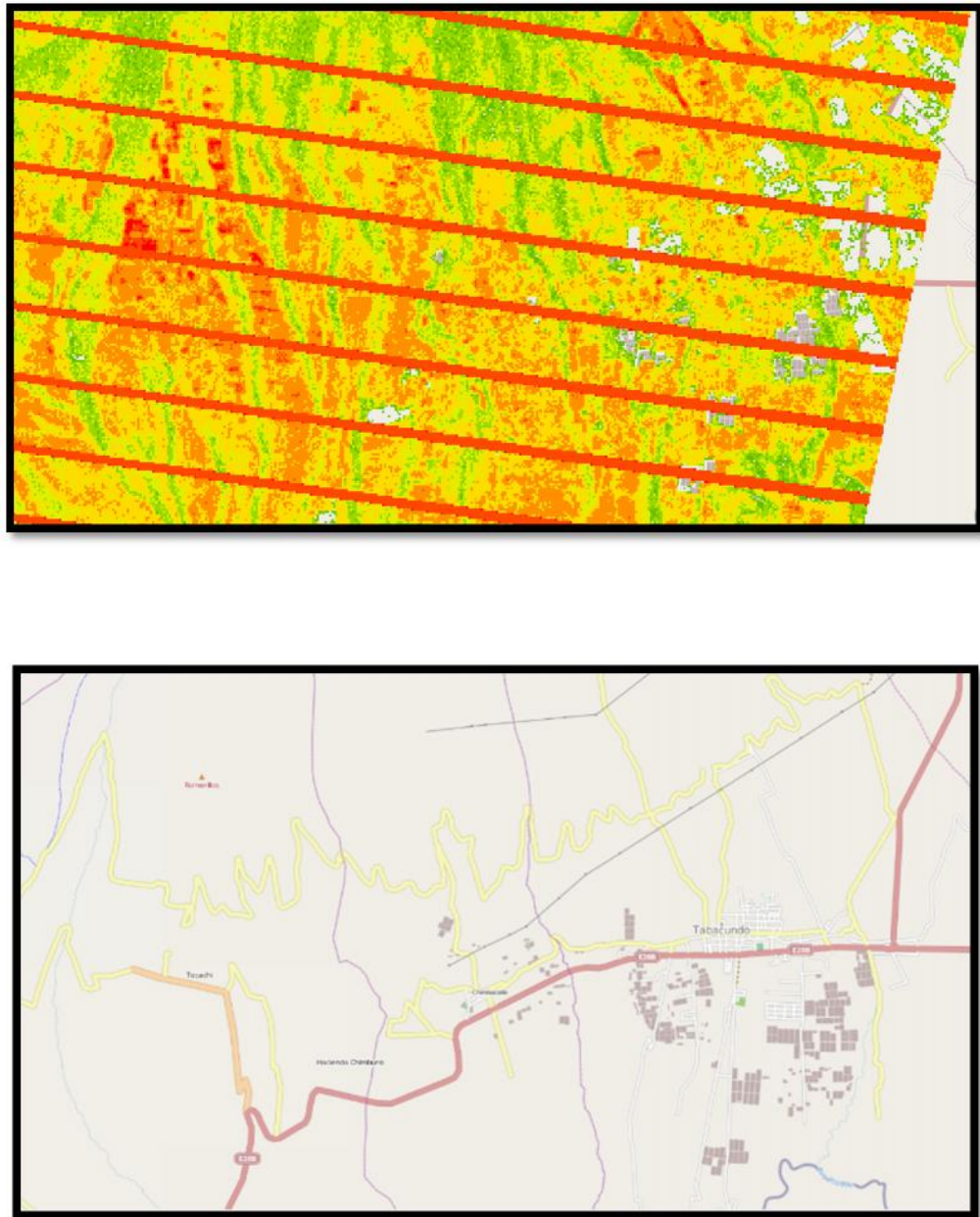


FIGURA 44. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2005 EN LA ZONA DE TABACUNDO.

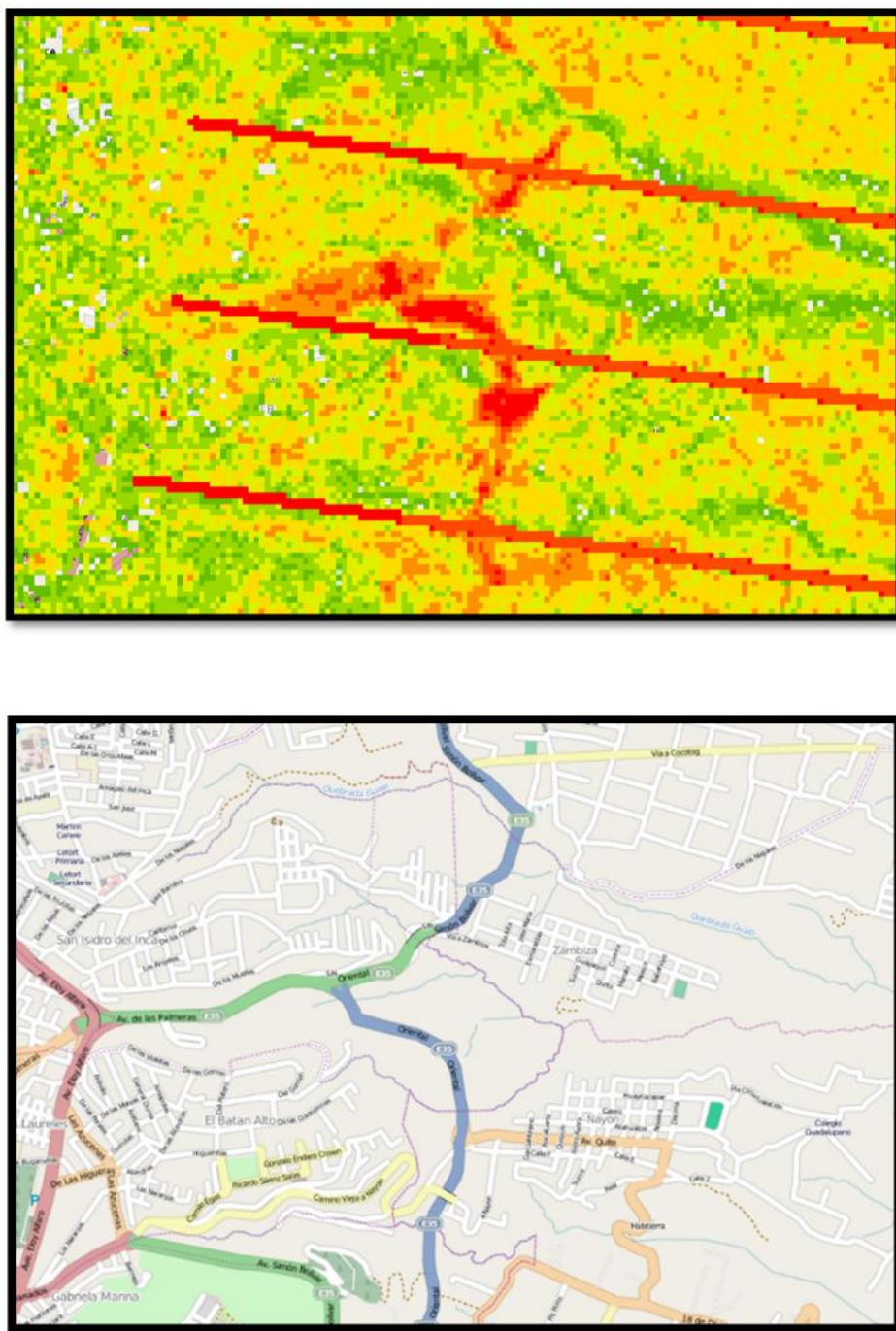


FIGURA 45. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2005 EN LA ZONA DE ZAMBIZA.

Ya en cuestión de los años más próximos 2008 (Figura 46) y 2011 (Figura 47), se identifica que la calidad de aire es mejor, disminuyéndose considerablemente los

valores de PM10 a lo largo de la ciudad a una escala entre Buena al Máximo de la Normativa del TULSMA.

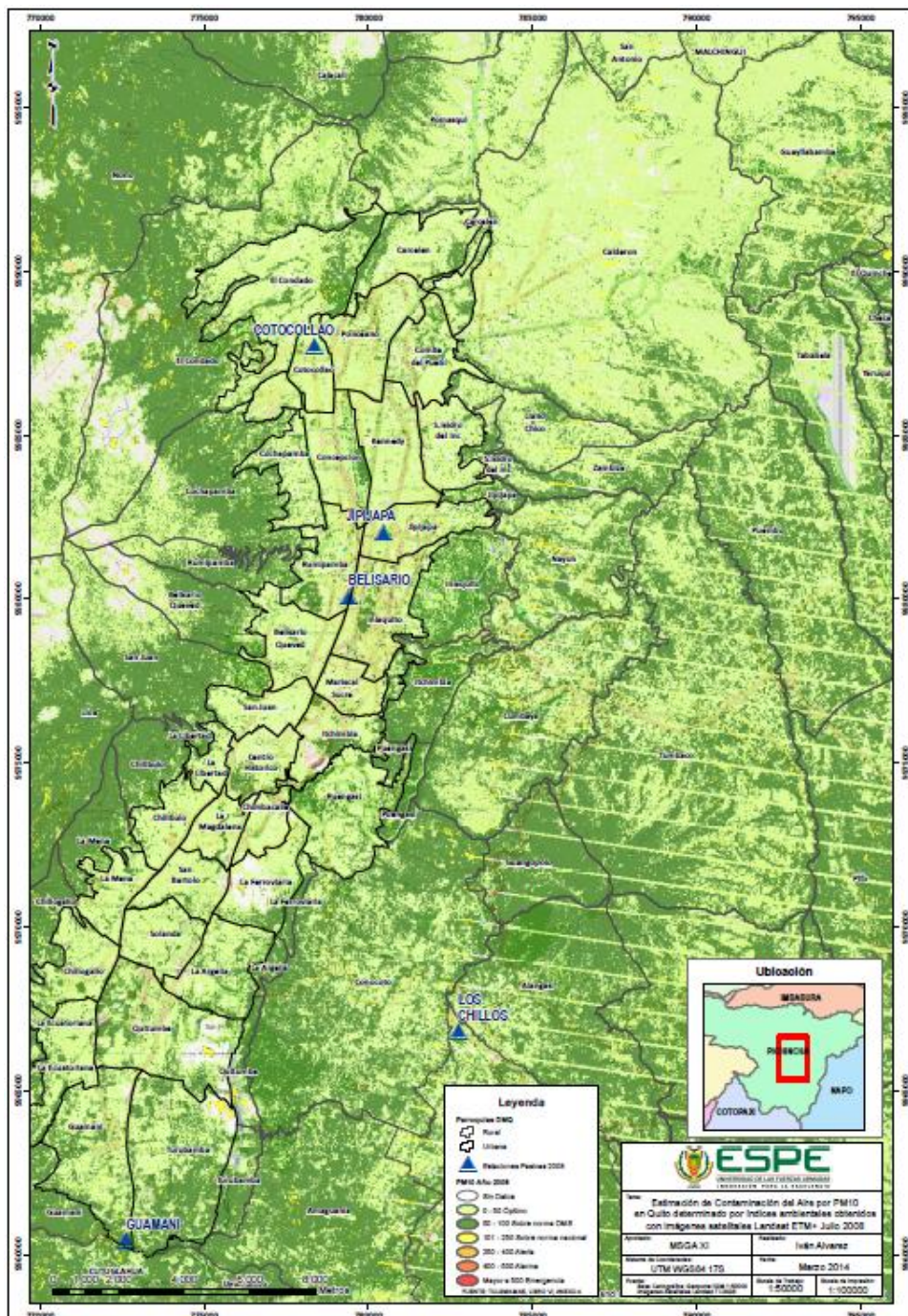


FIGURA 46. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2008.

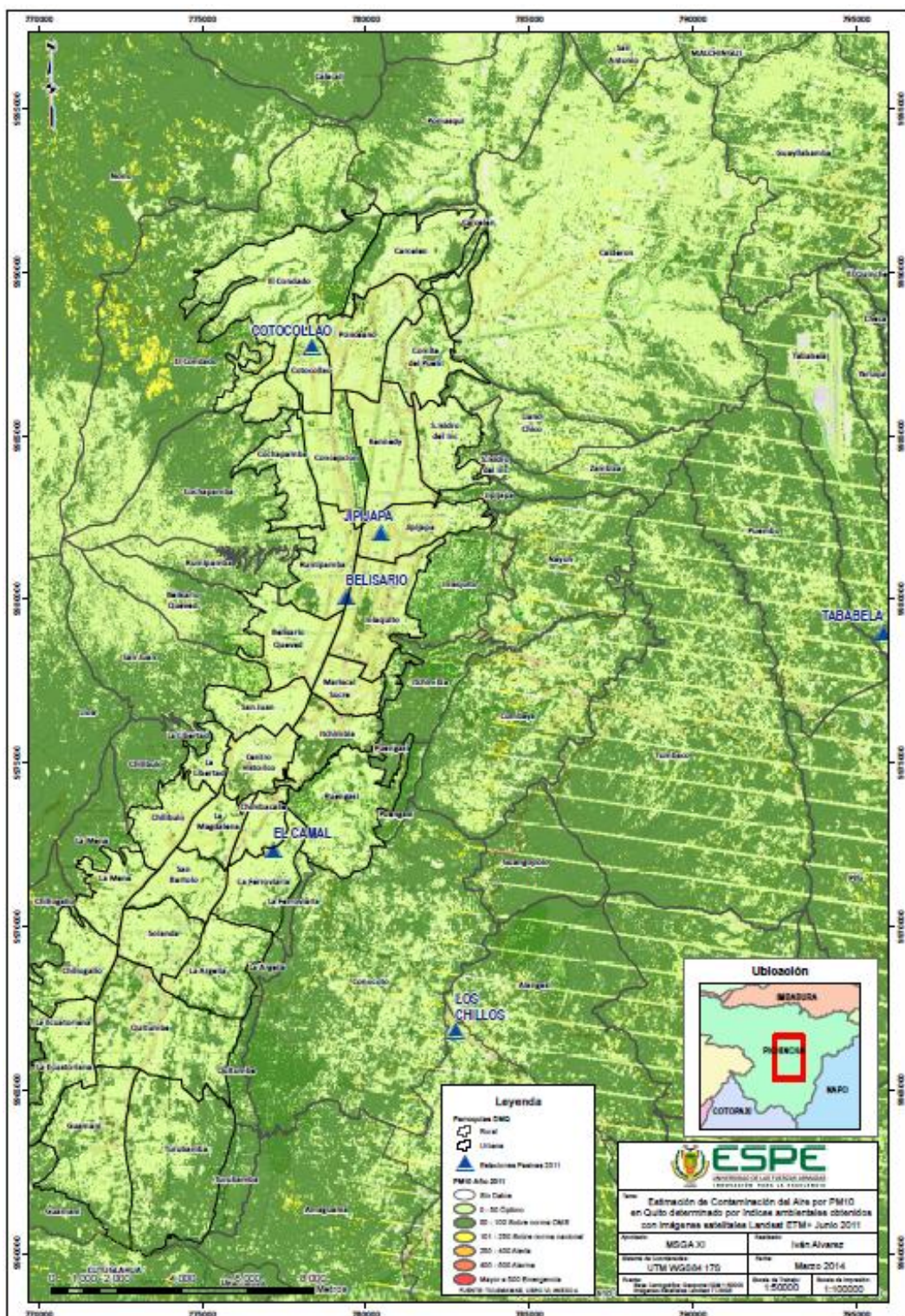


FIGURA 47. CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2011.

Para poder verificar de mejor manera los datos arrojados por el modelo de manea espacial se normalizó la información para cada uno de los años, así se puede verificar el cambio de concentración en porcentaje para cada uno de estos (Figura 48).

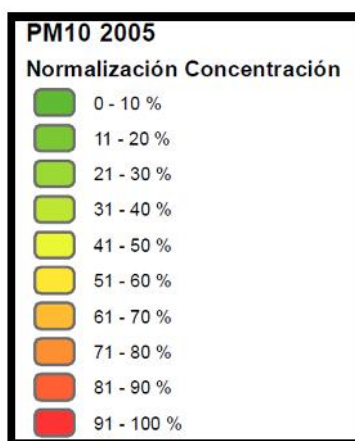


FIGURA 48. CATEGORÍAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN LOS AÑOS 2005, 2008 Y 2011 DE MANERA NORMALIZADA EN PORCENTAJES.

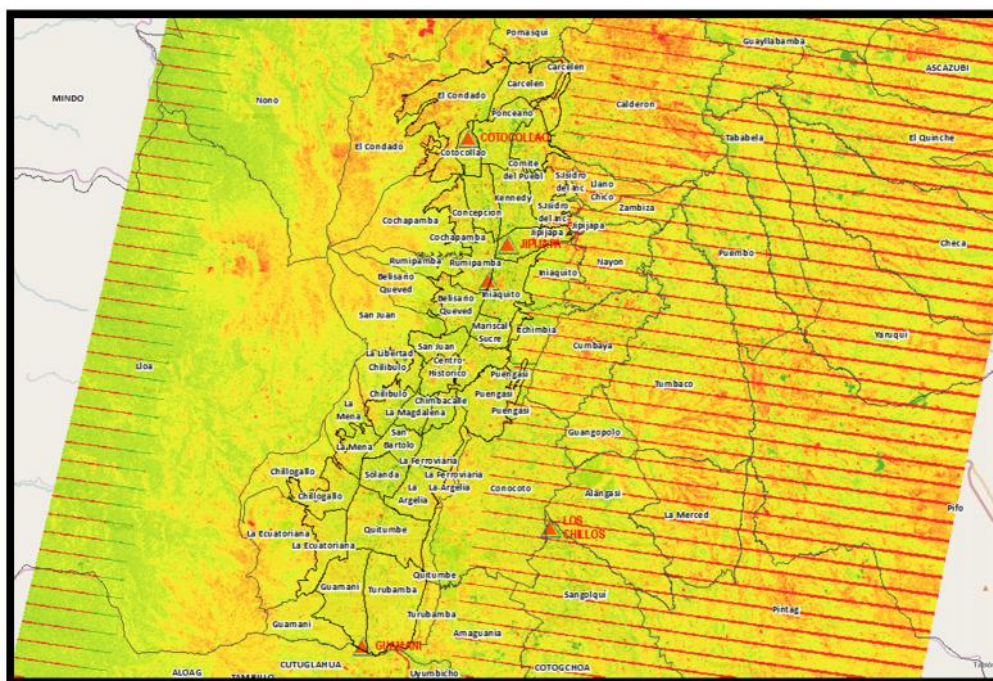


FIGURA 49. NORMALIZACIÓN PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2005.

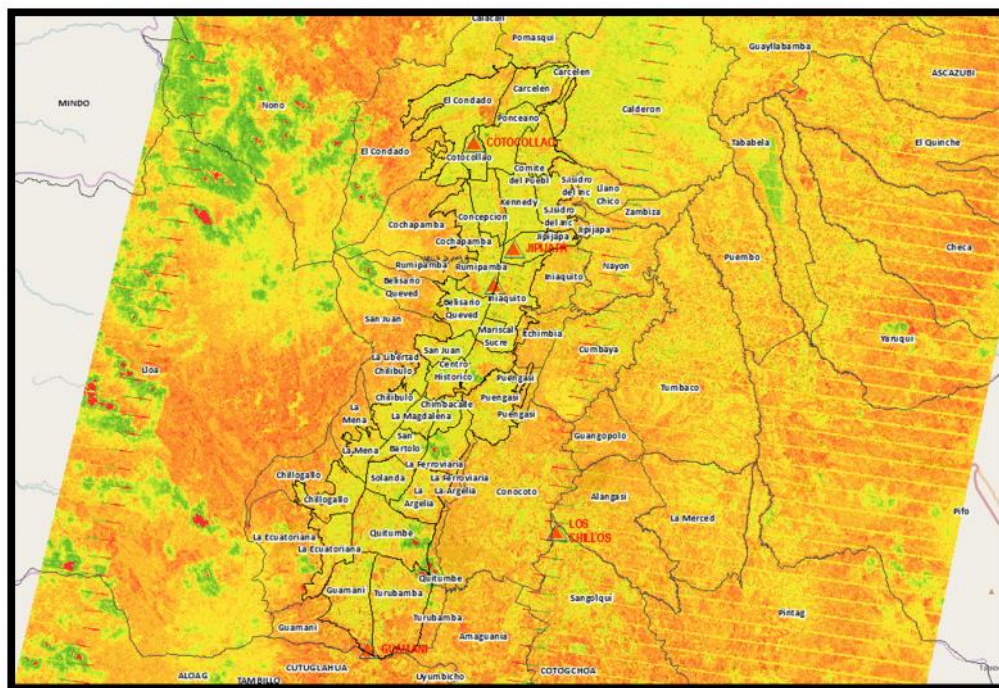


FIGURA 50. NORMALIZACIÓN PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2008.

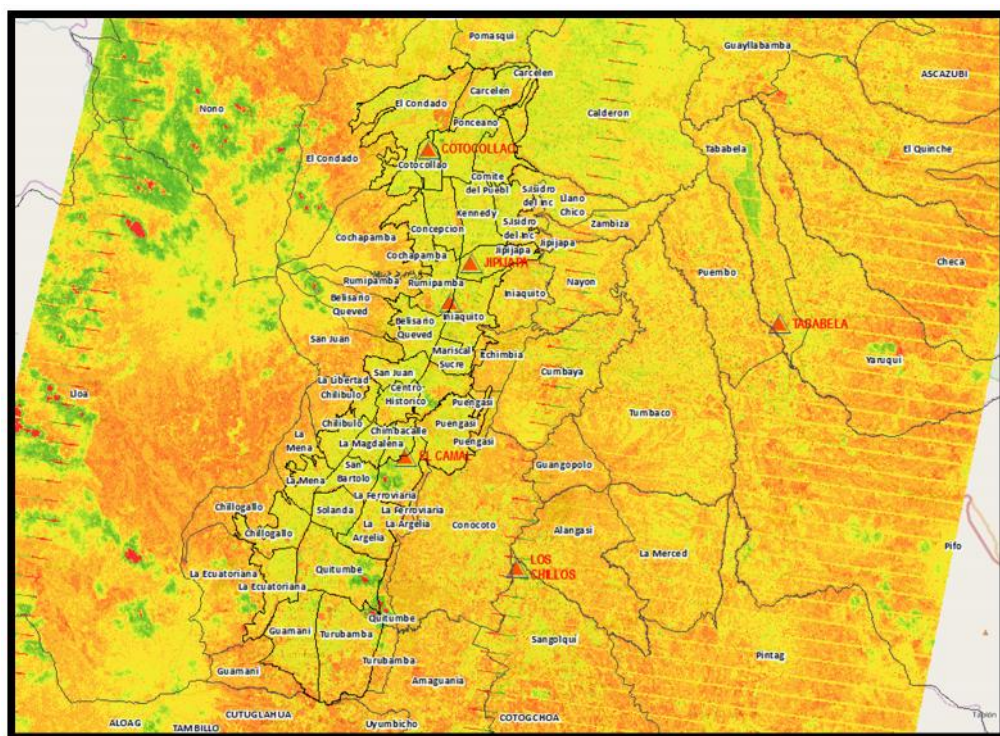


FIGURA 51. NORMALIZACIÓN PM10 CALCULADOS A PARTIR DE LOS MODELOS CON MEJOR AJUSTE EN EL AÑO 2011.

5. CAPITULO V

5.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.1 Conclusiones

1. El modelo que mejor se ajusta al cálculo de PM10 para Quito es justamente el llamado PM10 calculado basado en una regresión lineal múltiple para los 3 años, donde la significancia de cada una de las 3 bandas que intervienen en la ecuación es importante para su determinación.
2. El PM10 afecta directamente a los valores de radiancia de las imágenes satelitales, es así que se tienen valores de R^2 altos al momento de generar el modelo con las diferentes bandas, considerándose así que donde existan problemas de contaminación de aire se podrá analizar estos con imágenes satelitales.
3. A partir de imágenes satelitales se puede obtener valores de contaminantes del aire como PM10 sin la necesidad de tener una gran cantidad de datos, así con esta información muchas ciudades en el país podrán aplicar el modelo solo basándose en realizar ciertas mediciones en diferentes puntos.
4. Los índices ambientales típicos como NDVI, LWCI, TB, SAVI y NSI pudieron ser calculados y determinados de manera correcta, pero para este modelo no tuvieron alta significancia en comparación al modelo de PM10 Calculado, considerándose que estos índices deberían ser motivo de estudio constante para otras investigaciones.

5. Dentro de las zonas con mayor cambio en concentración por PM10 se pueden definir que se encontró lugares típicos donde es conocido la presencia de este contaminante como San Antonio de Pichincha con sus canteras, Tabacundo con las diferentes florícolas, Zambiza y el antiguo botadero de basura de la ciudad, entre otros para el año 2005. Para el caso del año 2008 y 2011 la concentración de PM10 en la ciudad se mantiene en niveles aceptables aún, cumpliéndose dentro de la normativa del TULSMA. No obstante esto se da en Quito, pero vale la pena realizar el estudio en otras ciudades donde no existen estudios o análisis de presencia de PM10 para conocer como es su comportamiento y determinar cómo aplicar una mejor Gestión Ambiental en el aire, adicional a estudios con otros contaminantes del aire e imágenes satelitales.

5.1.2 Recomendaciones

1. Si bien es cierto el modelo se ajusta de buena manera, sería importante tener una mayor cantidad de datos para que el modelo pueda ser generalizado para cada mes, así solamente se tendría una ecuación que pueda estimar todo el mes sin la necesidad de estar calculando cada vez los coeficientes empíricos de la regresión múltiple.
2. Podría realizarse el estudio en otras ciudades para verificar si este modelo sirve, aunque se requeriría los datos de campo que son uno de los puntos más débiles al momento de realizar este tipo de análisis.
3. Sería importante verificar si se puede aplicar el modelo para determinar otro tipo de contaminante del aire, diferente al PM10.

Bibliografía

- Chander, G., Markham, B., & Barsi, J. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote sensing letters*, 490-494.
- Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia.
- Chuvieco, E., & Hantson, S. (2010). *Procesamiento estándar de imágenes Landsat*. Obtenido de Instituto Geográfico Nacional de España (IGN): http://www.ign.es/PNT/pdf/especificaciones-tecnicas-pnt-medar-landsat_v2-2010.pdf
- Coll, C., Galve, J., Sánchez, J., & Caselles, V. (2010). Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground-Based Measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 547-555.
- Eva, H., & Lambin, E. (1998). Burnt area mapping in Central Africa using ATSR. *International Journal of Remote Sensing*, 3473-3497.
- Hollinger, D. (2008). Spatial correlation between Landsat 5 TM-derived vegetation spectral indices and corn yield in northwest Ohio. *Papers of the Applied Geography Conferences*, 85-94.
- Martínez, F., Herrero, J., & Casterad, M. (2014). Obtenido de Utilización de la Banda Térmica de Landsat en la discriminación de terrenos yesosos: http://digital.csic.es/bitstream/10261/43993/1/HerreroJ_Symp_2011.pdf
- NASA. (2014). NASA. Obtenido de Landsat 7 Handbook. Radiometric Characteristics: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_properties/

- Othman, N., Mat, M., & Hwee, L. (2010). *Modern Applied Science*. Obtenido de Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah:
<http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/download/6363/6063>
- Padilla, O. (2005). *ESPE*. Obtenido de Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local:
<http://noticias.espe.edu.ec/latingeo/files/2012/08/Cartograf%C3%ADa-de-%C3%81reas-Quemadas-Mediante-An%C3%A1lisis-Multitemporal-e-Im%C3%A1genes-Satelitales-de-Diferentes-Sensores1.pdf>
- Santana, L., Escobar, L., & Capote, P. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 77-95.
- Satimagingcorp. (2012). *Satimagingcorp*. Obtenido de Characterization of Satellite Remote Sensing Systems: <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>
- Secretaria del Ambiente Quito. (2014). *Secretaria del Ambiente Quito*. Obtenido de Caracterización física y química del material particulado MP10:
<https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>
- The Yale Center for Earth Observation. (2010). *Yale University*. Obtenido de Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature:
http://www.yale.edu/ceo/Documentation/Landsat_DN_to_Kelvin.pdf

Glosario

Imagen Satelital: consisten en tener imágenes de la superficie terrestre bajo ciertas características en base a satélites.

PM10: Contaminante del aire que involucra material particulado menor a 10 micras.

Landsat: Programa de satélites emitido por la NASA para la observación de la tierra. Existen misiones hasta la última lanzada llamada Landsat 8.

Landsat 7 ETM+: Séptimo satélite del programa Landsat que tiene la particularidad de tener 8 bandas, donde se incluyen bandas térmicas.

Banda térmica: Banda que permite obtener datos de temperatura de brillo y superficie.

Corrección radiométrica: Proceso para pasar niveles digitales a valores de radiancia y reflectancia.

Corrección atmosférica: Corrección aplicada para disminuir efectos de la atmósfera sobre imágenes satelitales.

NDVI: Índice de Vegetación Normalizado

LWCI: Índice de contenido de agua en hojas

TB: Temperatura de brillo

SAVI: Índice de vegetación ajustado al suelo

NSI: Índice de diferencia normalizada de suelos

PM10 Calculado: Modelo para calcular en base a imágenes satelitales Landsat la concentración de PM10 de un lugar.

Gestión Ambiental: Relacionado al buen manejo de recursos naturales en base a tecnología y análisis de información para mejorar la calidad ambiental.

Contaminación de Aire: Proceso por el cual la atmósfera modifica su estructura por presencia de distintos componentes externos.

REMMAQ: Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito.

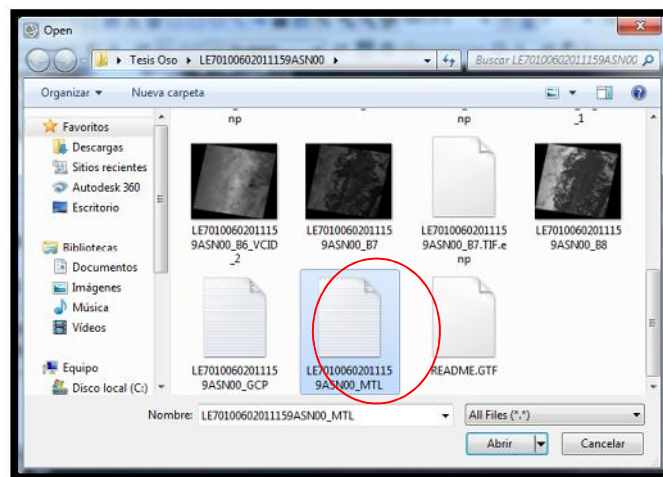
Estación Pasiva: Estación que toma datos atmosféricos de manera pasiva para su posterior análisis como PM10.

Anexo 1

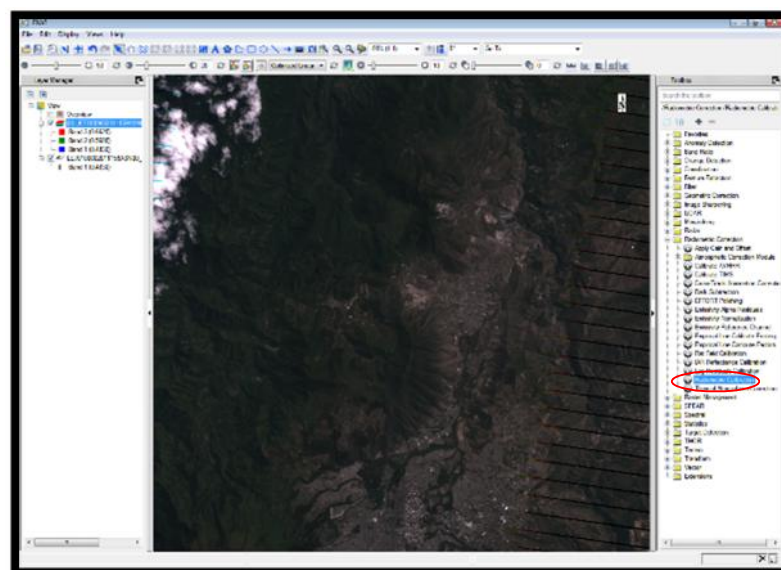
Corrección radiométrica en bandas multiespectrales mediante ENVI

Para la corrección radiométrica en ENVI 5.0.3 se aplicaron los siguientes pasos:

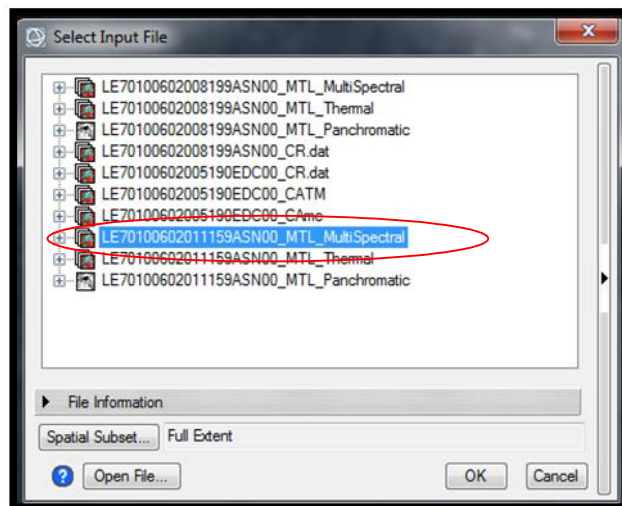
1. En el software ENVI abrir los archivos de metadatos de cada una de las imágenes Landsat 7 a utilizar en el proyecto.



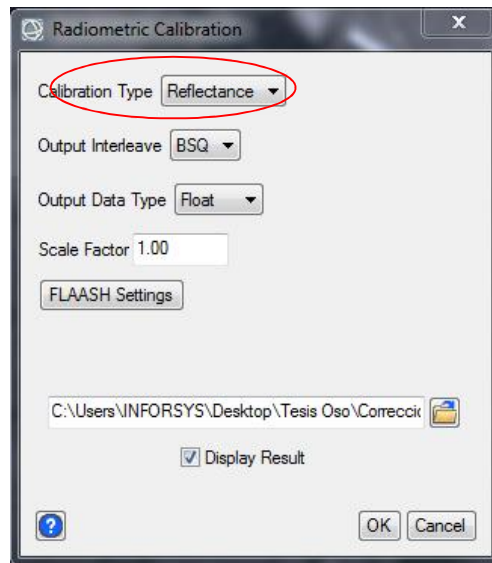
2. En el toolbox seleccionar con doble clic la herramienta Radiometric Calibration, la cual se encuentra en la carpeta Radiometric Correction.



3. Seleccionar la imagen y las bandas a las que se requiere realizar el procesamiento de calibración radiométrica. En este caso será la imagen multispectral original. Clic en OK.



4. Posterior seleccionar el tipo de calibración Reflectance, donde calculará la reflectancia aparente obtenida a partir de las ecuaciones 2 y 3, los parámetros requeridos para aplicar las ecuaciones se obtienen desde el archivo de metadatos de la imagen Landsat, igual al aplicar Reflectante se estarán aplicando radiancia y reflectancia aparente. Adicional seleccionar donde se guardará el archivo que contendrá ya la calibración radiométrica de las bandas multiespectrales.

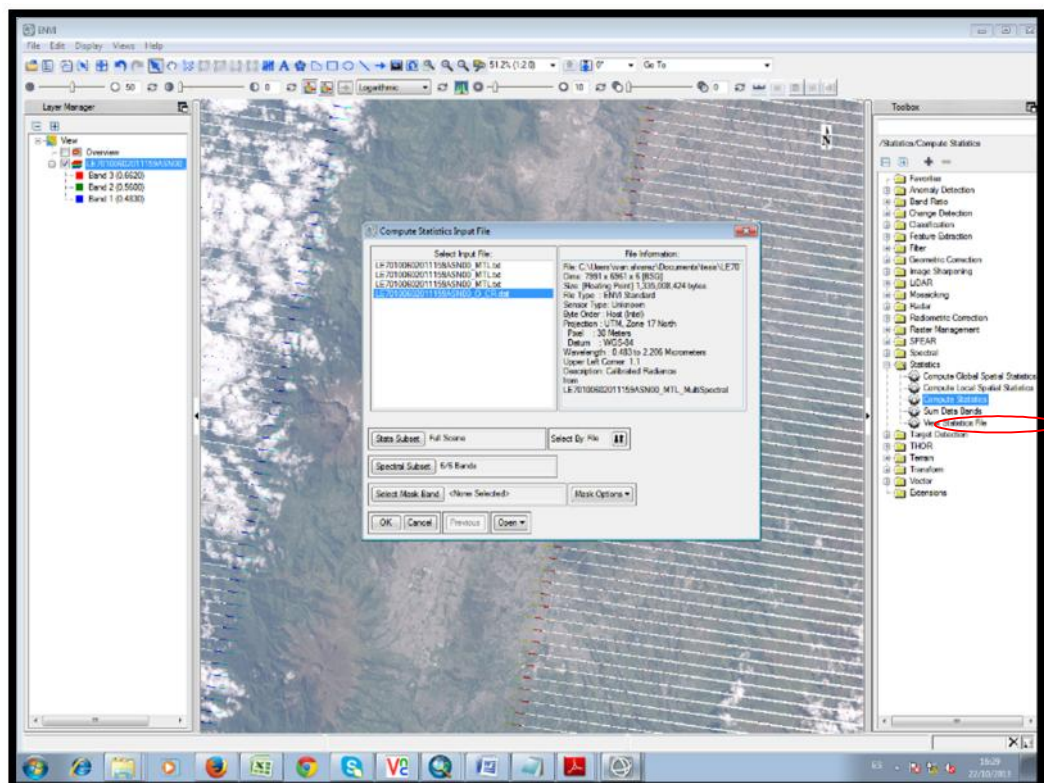


Anexo 2

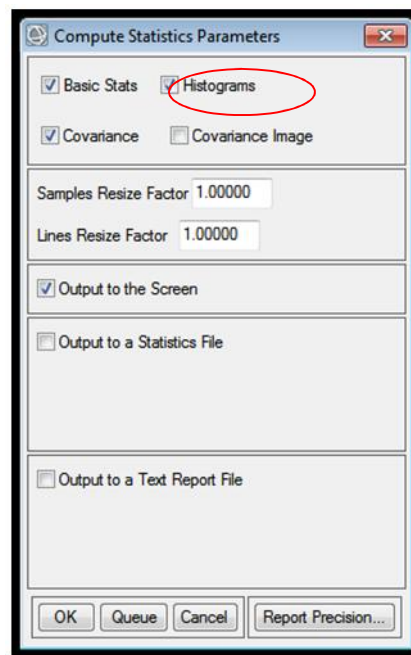
Corrección atmosférica en bandas multispectrales mediante ENVI

Para la corrección atmosférica en ENVI 5.0.3 se aplicaron los siguientes pasos:

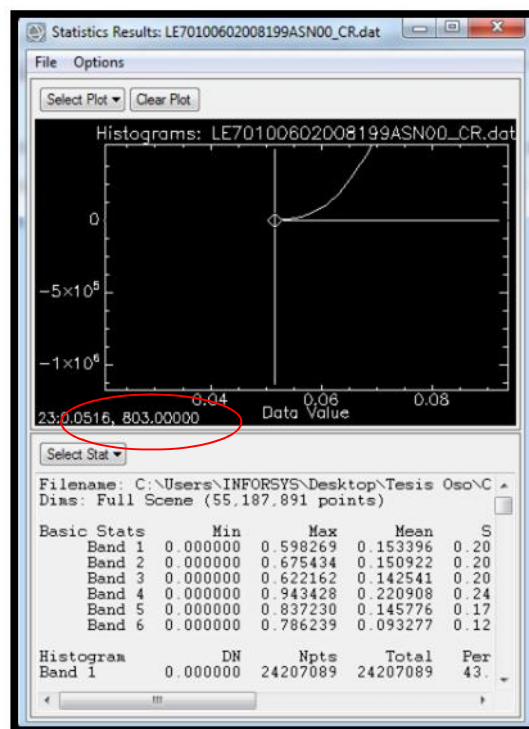
1. Primero se deberá calcular los valores mínimos del histograma que servirán para realizar el dark subtraction o Método de Chávez en ENVI, para eso se deberá en el programa ir a la opción Compute Statistics. Se deberá seleccionar la imagen que ya tiene aplicada la corrección radiométrica.



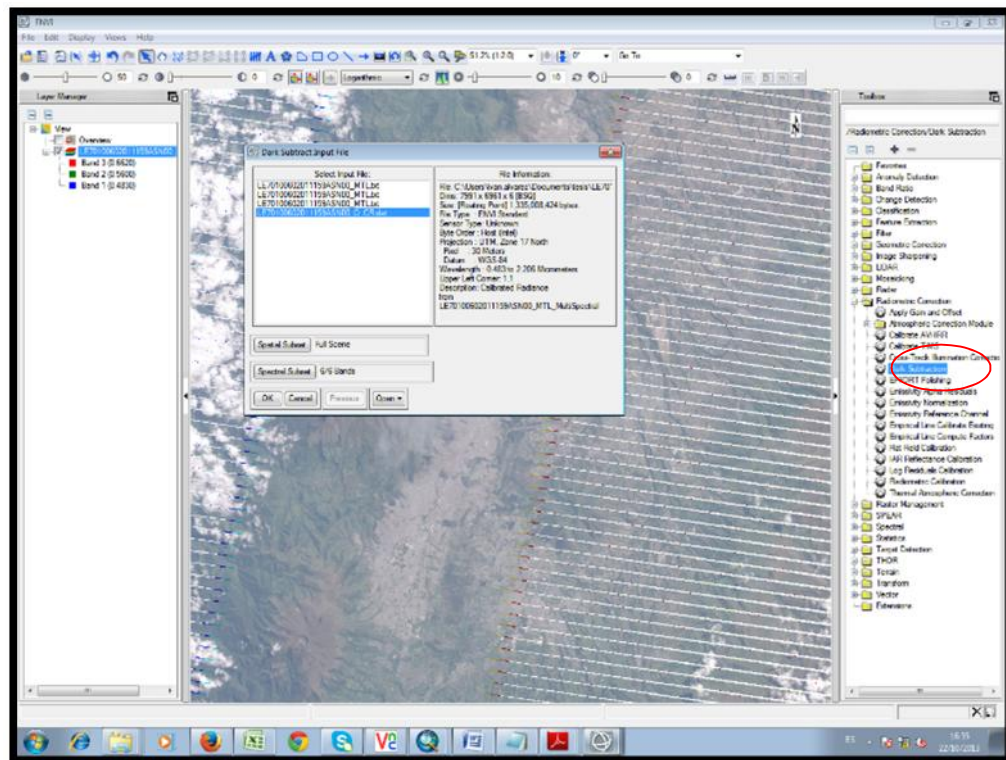
2. Posterior enviar a calcular los parámetros estadísticos, donde se debe activar la opción Histograma que será el que permita visualizar los valores menores en píxeles.



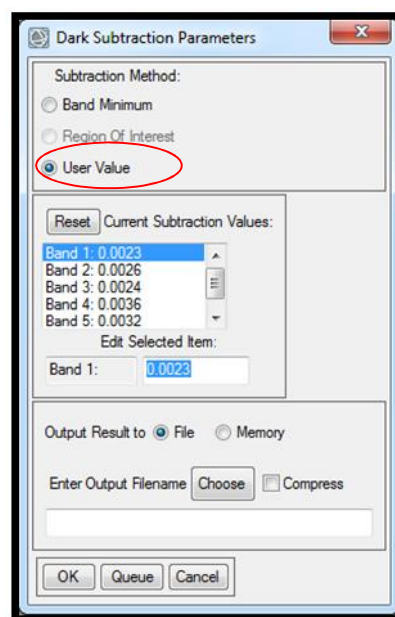
3. En el histograma se identificará el valor mínimo de Número Digital. Esto se realizará para cada una de las bandas multiespectrales de la imagen. Se deberá identificar el valor mínimo donde existan por lo menos 200 píxeles.



- Una vez obtenidos los valores mínimos del histograma ir a la función Dark Substraction seleccionando la imagen a la que fue ya aplicada la corrección radiométrica que se requiere realizar el correspondiente análisis.



5. Dentro de la opción Dark Subtraction seleccionar User Value y colocar los valores obtenidos manualmente en el histograma para cada banda. Adicional seleccionar la opción Choose para guardar la imagen en una ruta definida.

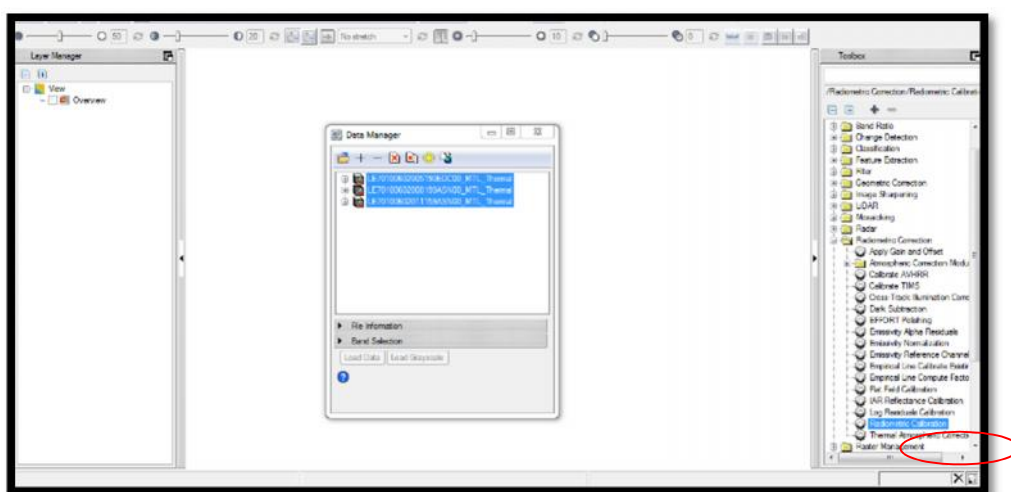


Anexo 3

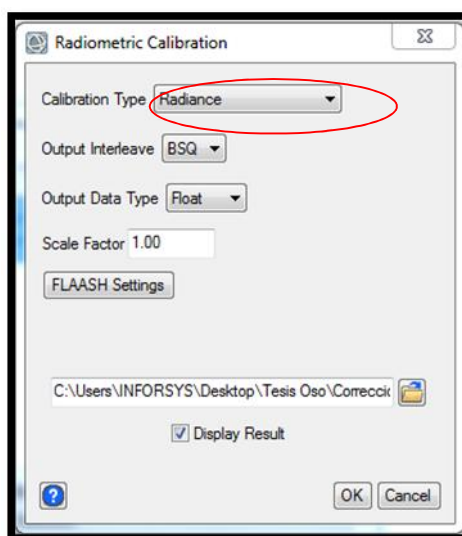
Corrección atmosférica y radiométrica en bandas térmicas mediante ENVI

Para la corrección atmosférica en ENVI 5.0.3 se aplicaron los siguientes pasos:

1. El primer paso es la aplicación de la Ecuación 2, es decir convertir los números digitales a Radiancia, para esto se seleccionó la opción Radiometric Calibration en ENVI, similar a lo que se hizo con las bandas multiespectrales.



2. Posterior se deberá seleccionar la opción Radiance para obtener mencionados valores.



3. Una vez realizado el procedimiento de obtención de valores de Radiancia se procederá a realizar la corrección atmosférica en base a la Ecuación 7. Para la obtención de los datos requeridos en la Ecuación se ingresó a la página <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>, donde se aplica el modelo de corrección atmosférica en bandas térmicas de la NASA definido para el estudio, definiendo los parámetros solicitados como Año, Mes, Día, Hora, Latitud y Longitud obtenidos desde el archivo de metadatos de la imagen original. Una vez ingresados esto clic en calcular y se obtendrán los parámetros de Radiancia ascendente ($L \uparrow$), Radiancia descendente ($L \downarrow$) y Transmitancia (τ).

Enter the parameters for which you wish calculate atmospheric transmission and upwelling radiance:

Year: 2005 Month: 07 Day: 09
 GMT Hour: 15 Minute: 15

Latitude: -0.19512 Longitude: -78.4961
 + is North, - is South + is East, - is West

Use atmospheric profile for closest integer lat/long [help](#)
 Use interpolated atmospheric profile for given lat/long [help](#)

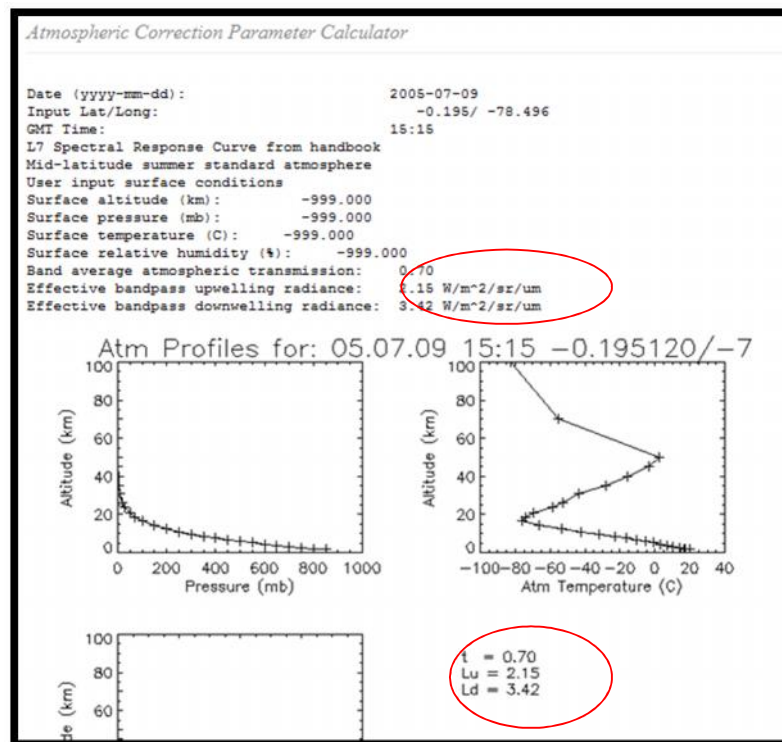
Use mid-latitude summer standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)
 Use mid-latitude winter standard atmosphere for upper atmospheric profile [help](#)

Use [Landsat-8 TIRS Band 10 spectral response curve](#)
 Use [Landsat-7 Band 6 spectral response curve](#)
 Use [Landsat-5 Band 6 spectral response curve](#)
 Output only atmospheric profile, do not calculate effective radiances

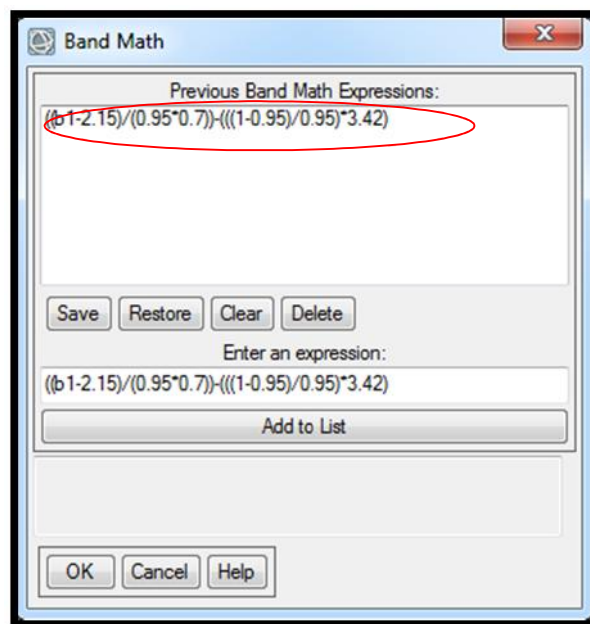
Optional: Surface Conditions
(If you do not enter surface conditions, model predicted surface conditions will be used. If you do enter surface conditions, all four conditions must be entered.)

Altitude (km): Pressure (mb):
 Temperature (C): Relative Humidity (%):

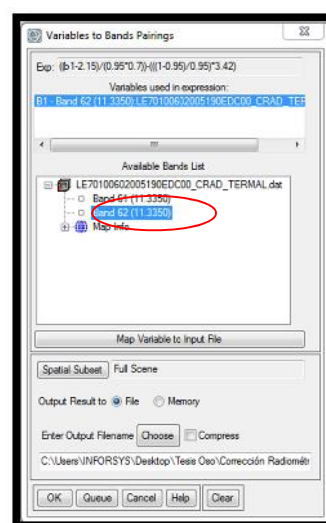
Results will be sent to the following address:
 Email:



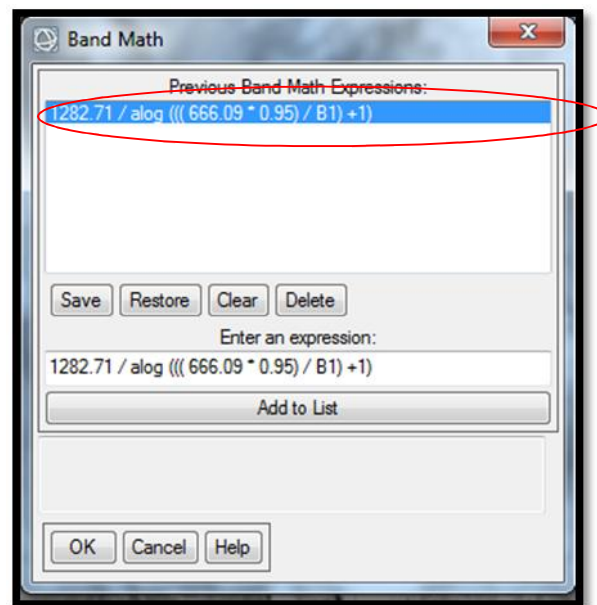
4. Ya con los valores de los parámetros de Radiancia ascendente ($L \uparrow$), Radiancia descendente ($L \downarrow$) y Transmitancia (τ), se puede empezar a realizar la corrección atmosférica en las bandas térmicas en ENVI. Para esto se aplica el Band Math aplicando la ecuación 7, en esta función se deberá tipiar la Ecuación con los valores obtenidos en el anterior modelo.



5. Posterior se seleccionará la banda térmica en valores de radiancia que corresponde a la Ecuación 7, para esto se seleccionará la de Alta ganancia, en vista de que según el modelo de la NASA para la época seca Junio – Julio la temperatura de brillo es baja en el Ecuador, aunque cabe recalcar que la diferencia entre la banda 6L y 6H es mínima y se podría utilizar cualquiera de las dos.



6. El siguiente paso es transformar los valores de radiancia atmosférica en temperatura de brillo en grados kelvin, para eso se utilizará la Ecuación 5, ingresando la Ecuación en la función Band Math de ENVI. Hay que recalcar que los valores K1 y K2 para la Ecuación 5 son valores constantes para el Landsat 7, estos valores son $K1 = 666.09$ y $K2 = 1282.71$.

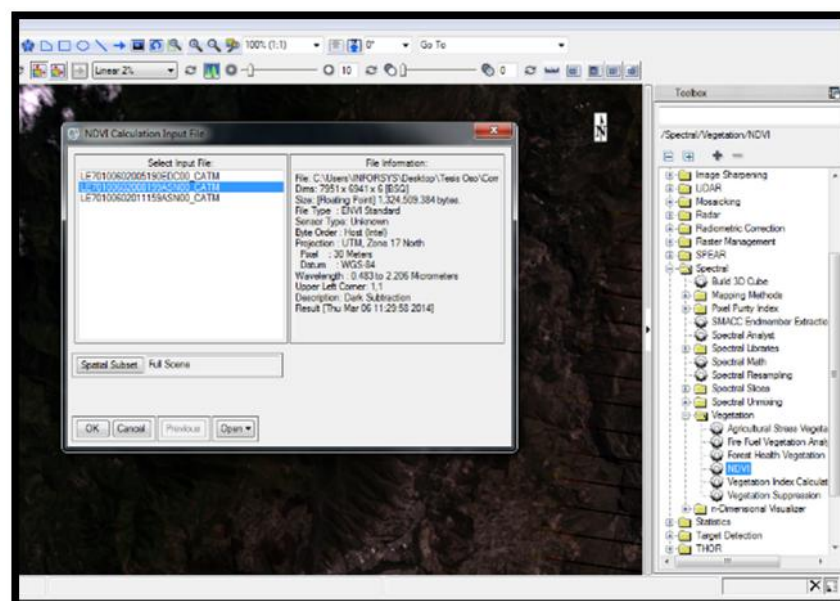


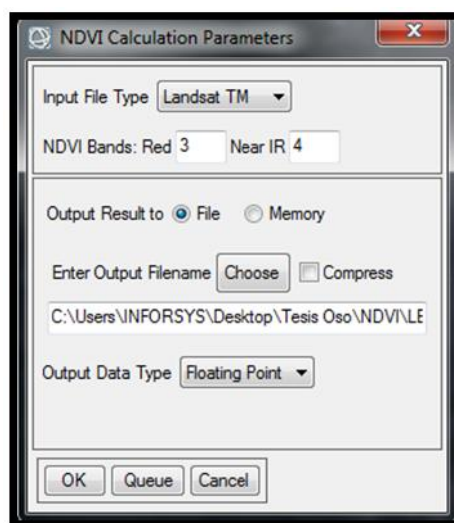
Anexo 4

Cálculo de Índices Ambientales en ENVI

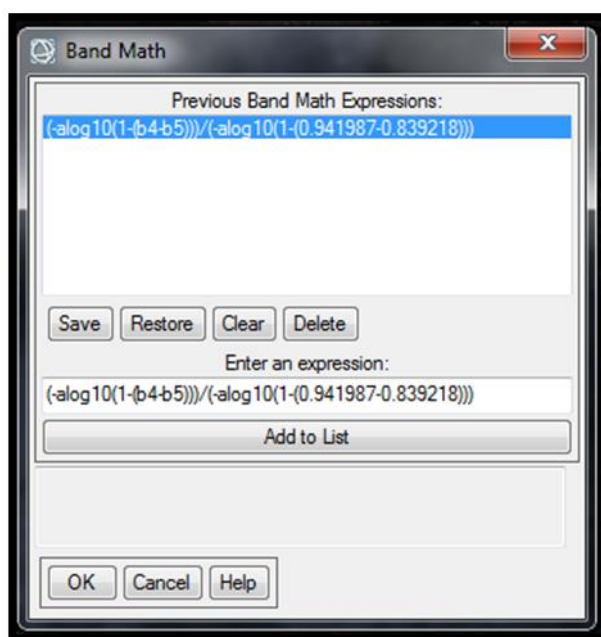
Para el cálculo de los diferentes índices ambientales en ENVI 5.0.3 primeramente se utilizaron las imágenes que ya tienen las correcciones radiométrica y atmosférica, adicional se aplicaron los siguientes pasos:

1. Seleccionar la opción NDVI y la imagen de la cual se quiere obtener, identificando claramente que el tipo de archivo es Landsat TM y que las bandas R y NIR son las 3 y 4 respectivamente.



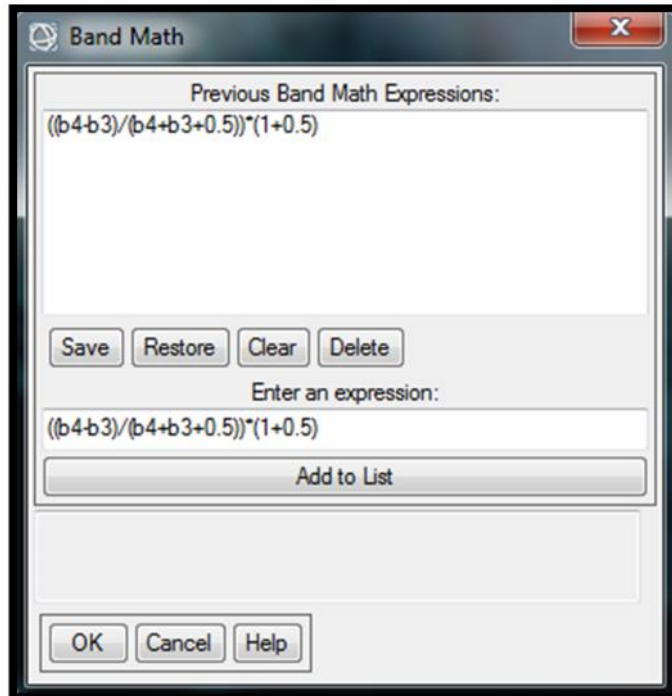


2. Para el cálculo del LWCI se ingresó en la función band math y se colocó la ecuación 9, identificando previamente todos los parámetros numéricos a ser calculados.



3. El cálculo de la Temperatura de Brillo (TB) se obtiene a partir de la corrección radiométrica y atmosférica de la banda térmica (ANEXO 3).

4. Para el cálculo de SAVI igualmente se ingresará en Band Math en ENVI, identificando la Ecuación 10.



5. En el NSI se utilizará dentro de Band Math la ecuación 11.

