



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

TEMA: “ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO
TROPOSFÉRICO (O₃), MEDIANTE ANÁLISIS GEOESPACIAL DE
IMÁGENES SATELITALES Y MÍNIMOS CUADRADOS
PARCIALES (PLS), PARA LAS PARROQUIAS URBANAS DEL
CANTÓN QUITO.”

AUTORES: BURGOS TATÉS, MICHELLE ESTEFANÍA
COPO PAZMIÑO, KATHERINE MICHELLE

DIRECTOR: ING. ECHEVERRÍA LLUMIPANTA, NEPTALÍ
ARMANDO

SANGOLQUÍ

2017

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, “ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO (O₃), MEDIANTE ANÁLISIS GEOESPACIAL DE IMÁGENES SATELITALES Y MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS), PARA LAS PARROQUIAS URBANAS DEL CANTÓN QUITO” realizado por las señoritas Michelle Estefanía Burgos Tatés y Katherine Michelle Copo Pazmiño, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a las señoritas para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 01 de noviembre del 2017.



Ing. Armando Echeverría, Mg.

DIRECTOR

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, MICHELLE ESTEFANÍA BURGOS TATÉS, con cédula de identidad N° 172572220-9 y KATHERINE MICHELLE COPO PAZMIÑO con cédula de identidad N° 172306105-5, declaramos que este trabajo de titulación “ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO (O₃), MEDIANTE ANÁLISIS GEOESPACIAL DE IMÁGENES SATELITALES Y MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS), PARA LAS PARROQUIAS URBANAS DEL CANTÓN QUITO”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada

Sangolquí, 27 de noviembre del 2017.

Michelle Burgos Tatés

CI: 172572220-9

Katherine Copo Pazmiño

CI: 172306105-5

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN

Nosotras, MICHELLE ESTEFANÍA BURGOS TATÉS y KATHERINE MICHELLE COPO PAZMIÑO, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “ESTIMACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO TROPOSFÉRICO (O₃), MEDIANTE ANÁLISIS GEOESPACIAL DE IMÁGENES SATELITALES Y MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS), PARA LAS PARROQUIAS URBANAS DEL CANTÓN QUITO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 27 de noviembre del 2017.

Michelle Burgos Tatés

CI: 172572220-9

Katherine Copo Pazmiño

CI: 172306105-5

DEDICATORIA

A Dios. Por haberme permitido lograr este objetivo de mi vida, al darme la fuerza para estar de pie frente a todas las adversidades que se presentaron en el camino y por su infinito amor y bondad que siempre me acompaña.

A mi madre Glorita Tatés (Yoyi). Gracias madrecita bella, siempre pusiste a tus hijos antes que tu profesión, tú has sido mi apoyo incondicional, eres la mejor dando consejos, te convertiste en mi mejor amiga y el motivo por el que yo sueño ser una excelente persona y profesional, te agradezco por darme la vida y por ser mi vida entera, mi amor, mi todo; te dedico todos mis logros pues este es solo el comienzo de todas las cosas buenas que llegaran a nuestra vida, espero que Dios siempre nos tenga juntas mamita te amo.

A mi padre Aquiles. Yo sé que toda tu vida trabajaste incansablemente para que nunca nos falte nada, siempre nos diste lo mejor a mí y a mis hermanos, con tu carácter me enseñaste a ser honesta, humilde y más que nada respetuosa, padre amado te dedico este pequeño logro de mi vida gracias por siempre acompañarme en todo momento junto a mi mami y recuerda has sembrado una buena semilla, no te defraudaré y siempre seré mejor.

A mis Hermanos. Hernán (Negrito) y Juan (Juanito), son lo mejor en mi vida sin ustedes sé que no sería quien soy ahora, gracias por enseñarme a levantarme de las caídas de la vida, gracias por cada consejo, cada momento que compartimos juntos llenos de alegrías y tristezas, les amo con mi vida. Y a Maya (cuñada) y Ame (sobrina) que ahora son mi nueva familia, ya que han llenado de alegría a mi vida y les agradezco por que estuvieron conmigo en este proceso.

A mi novio Marcos. Mi vida llegas de repente y en ese instante te convertiste en una persona tan especial para mí, gracias por todos tus consejos, por tu amor, te convertiste en mi fortaleza y mi apoyo en este camino, te amo mucho, espero que sigamos luchando juntos por ser mejores cada día.

A mis Familiares. Germania y Arturo, gracias por siempre estar conmigo en todo momento, para mí son una gran inspiración de liderazgo, lucha y estudio constante, les quiero mucho ñaños. Señorita Melania y Sra. Rosita Delgado, gracias porque aun sin ser mis tías de sangre siempre me cuidaron y hasta ahora me llenan con su amor y su alegría.

A mis Amigos. Kathy, Nathy, Daisy C., Heidi, Giss, Dasy G., Ale R., Gabita M., Daniel T., Cris M., Migue, John A.; gracias por ser incondicionales, aprendí que un verdadero amigo está a tu lado pese a cualquier adversidad de la vida, sin amigos como ustedes no hubiera sido tan feliz en mi camino por la U; Kathy gracias por hacer la tesis junto a mí, sin duda te convertiste en mi mejor amiga, sé que sin ti este proyecto no tenía sentido, gracias por tantas horas de paciencia y amistad eres alguien muy especial en mi vida y sabes que puedes contar conmigo en lo que sea.

Michelle Burgos.

DEDICATORIA

Sé que este trabajo representa la culminación de una etapa muy importante en mi vida, es por ello que quiero dedicarlo a quienes han estado a mi lado a pesar de todo.

Primero que nada, gracias a Dios, energía creadora, por darme vida el tiempo necesario para alcanzar una de mis primeras metas y por haberme otorgado este lugar único en el mundo, que me permitió conocer a seres maravillosos que puedo llamar familia y amigos.

A mi mamita linda, quien me ha dado todo sin esperar nada a cambio, ha permanecido a mi lado para levantarme de cada caída, para enmendar mi camino cuando me equivoco, para secar mis lágrimas cuando me desilusiono y para alegrarse por cada logro que he alcanzado. Gracias por ser quien me enseñó, a base del ejemplo, lo que significa la perseverancia, el esfuerzo y la dedicación; por ti aprendí a seguir adelante sin importar que, pues has sabido guiarme y cuidarme siempre. Te amo demasiado mamita, gracias por ser mi constante.

A mi Lilito, a quien sin duda alguna le debo tantos sueños y anhelos que quiero cumplir. Gracias por esas conversaciones infinitas sobre la vida, el ser humano, la felicidad y los mamocitos ☺; tú y yo sabemos que podemos pasar horas hablando de cualquier cosa papito. Gracias por cultivar mi amor por los libros, el rock, el café y la vida, eres mi vena de inspiración, filosofía y conocimiento. Te amo demasiado Lilito, gracias por ser mi guía.

A mis hermanos, Danny y Denni, pues han sido mi apoyo y sonrisa en los peores momentos. Son lo más hermoso que tengo en la vida, sé que sin ustedes no sería ni la mitad de quien soy ahora y aunque viva diciendo que no les entiendo, me encanta ser su hermana come aire ☺. Les amo como no se imaginan, y sé que siempre y cuando ustedes estén conmigo, todo irá bien.

A ti, amor, ¡gracias por tanto! Eres quien más me ha enseñado este tiempo. Tú has creído en mí cuando yo no sabía cómo hacerlo y has sabido encontrarme cuando estaba perdida. Gracias por nunca soltarme y por amarme, apoyarme y motivarme

durante cada uno de estos (casi) 1827 días. Te amo muchísimo Alex, sé que todavía nos queda un largo camino juntos.

A mis abuelitos: Olga y Alfredo, a mi tía Vivi y a mis primos: Arita, Natu y Stalin, por creer en mí, escucharme y aconsejarme; sin duda su cariño y ocurrencias me han alegrado la vida. Les amo mucho.

A Miguel, Day-Day, Willy y Nico, por ser grandes amigos y enseñarme el significado de la palabra incondicional; sé que sin ustedes esta etapa no hubiera sido igual. Finalmente, y de manera muy especial, se lo dedico a mi compañera de locuras, risas, llantos, enojos y desvelos, Michu Burgos. Gracias por abrirme tu corazón y permitirme alcanzar este logro contigo. Te adoro mujercita linda.

Katherine Copo.

AGRADECIMIENTO

A la Secretaría del Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, por proporcionarnos la información necesaria para el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por abrirnos las puertas del conocimiento y formarnos como excelentes profesionales.

De manera muy especial queremos agradecer a nuestros colaboradores MSc. Lenin Ramírez, y PhD. (c) Ing. Iván Álvarez Mg., docentes de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes nos brindaron su tiempo, conocimiento, dedicación y amistad para culminar exitosamente este proyecto de investigación.

A nuestro director de tesis Ing. Armando Echeverría Mg., por su gran calidad humana, su bondad, su entrega y dedicación a la carrera y a sus estudiantes. Usted se ha convertido en nuestro modelo a seguir, ya que ha sido uno de los mejores docentes al no limitar su ayuda, ni conocimientos a sus estudiantes.

A nuestros docentes Ing. Ginella Jácome, PhD. Débora Simón, Ing. Mario Cruz, Dr. Fabián Rodríguez, Ing. Ricardo Durán, Ing. Pablo Pérez e Ing. Víctor Medrano por su dedicación y esfuerzo al proporcionarnos los conocimientos necesarios para nuestra vida y carrera estudiantil.

Finalmente a nuestros familiares y amigos quienes nos apoyaron continuamente y estuvieron a nuestro lado durante este proceso.

Michelle Burgos.

Katherine Copo.

ÍNDICE

| | |
|--|-------------|
| CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN | ii |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD..... | iii |
| AUTORIZACIÓN..... | iv |
| DEDICATORIA..... | v |
| DEDICATORIA..... | vii |
| AGRADECIMIENTO | ix |
| ÍNDICE | x |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | xiii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | xiv |
| RESUMEN..... | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| CAPÍTULO I..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Planteamiento del problema | 2 |
| 1.3. Justificación e Importancia..... | 3 |
| 1.4. Área de estudio | 4 |
| 1.5. Objetivos | 5 |
| 1.5.1. Objetivo General..... | 5 |
| 1.5.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 1.6. Metas | 6 |
| CAPITULO II | 7 |
| MARCO TEÓRICO | |
| 2.1. Fundamentación Teórica | 7 |
| 2.1.1. Sensores Remotos | 7 |
| 2.1.1.1. Componentes..... | 7 |
| 2.1.1.2. Clasificación de sensores remotos | 9 |
| 2.1.1.2.1. Fuente emisora de energía..... | 9 |
| 2.1.1.2.2. Información registrada | 9 |
| 2.1.1.2.3. Banda espectral | 10 |
| 2.1.1.2.4. Según la tecnología para captar información | 10 |

| | | |
|------------|---|----|
| 2.1.1.2.5. | Tipo de sensor | 11 |
| 2.1.1.3. | Espectro electromagnético | 12 |
| 2.1.1.4. | Satélites | 13 |
| 2.1.1.4.1. | Clasificación..... | 14 |
| 2.1.1.4.2. | Satélite Landsat | 15 |
| 2.1.1.4.3. | Misiones del Programa Landsat | 16 |
| 2.1.1.4.4. | Sensores de Landsat | 18 |
| 2.1.1.4.5. | Landsat 8 | 20 |
| 2.1.1.5. | Imágenes satelitales..... | 21 |
| 2.1.1.5.1. | Formación de la imagen | 22 |
| 2.1.1.5.2. | Tipos de imágenes satelitales | 22 |
| 2.1.1.5.3. | Resolución de una imagen | 23 |
| 2.1.1.5.4. | Tratamiento digital de imágenes satelitales | 26 |
| 2.1.1.5.5. | Índices ambientales | 29 |
| 2.1.2. | Contaminación ambiental | 32 |
| 2.1.2.1. | Contaminación del aire | 32 |
| 2.1.2.1.1. | Contaminantes criterio del aire | 33 |
| 2.1.2.2. | Factores que intervienen en la contaminación del aire | 34 |
| 2.1.2.2.1. | Eventos Meteorológicos..... | 34 |
| 2.1.2.3. | Parámetros de la calidad del aire..... | 35 |
| 2.1.2.3.1. | Norma ecuatoriana de calidad del aire ambiente (NECA)..... | 35 |
| 2.1.2.3.2. | Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito | 36 |
| 2.1.2.3.3. | Índice quiteño de la calidad aire (IQCA) | 38 |
| 2.1.3. | Análisis estadístico | 38 |
| 2.1.3.1. | Análisis multivariado | 39 |
| 2.1.3.2. | Técnicas multivariantes..... | 39 |
| 2.1.3.2.1. | Métodos dependientes..... | 39 |
| 2.1.3.2.2. | Métodos interdependientes..... | 40 |
| 2.1.3.3. | Mínimos cuadrados parciales (PLS) | 40 |
| 2.2. | Fundamentación Conceptual | 44 |
| 2.3. | Fundamento Legal | 45 |
| 2.4. | Sistema de Variables | 49 |
| 2.4.1. | Variables Independientes | 49 |
| 2.4.2. | Variable Dependiente | 49 |

| | |
|--|-----|
| CAPITULO III | 50 |
| METODOLOGÍA | |
| 3.1. Modalidad de investigación..... | 50 |
| 3.1.1. Software empleado | 51 |
| 3.2. Recopilación y validación de los datos | 51 |
| 3.2.1. Imágenes satelitales | 52 |
| 3.2.2. Datos de referencia de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ). | 52 |
| 3.3. Procesamiento digital de imágenes satelitales..... | 66 |
| 3.3.1. Corrección geométrica | 66 |
| 3.3.2. Corrección topográfica | 66 |
| 3.3.3. Corrección radiométrica | 67 |
| 3.3.4. Corrección atmosférica | 68 |
| 3.4. Cálculo de índices ambientales | 71 |
| 3.4.1. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)..... | 71 |
| 3.4.2. Proporción de vegetación (PV)..... | 72 |
| 3.4.3. Emisividad de la superficie terrestre (LSE)..... | 73 |
| 3.4.4. Temperatura de Brillo (TB) | 74 |
| 3.4.5. Temperatura de la superficie de la Tierra (LST) | 75 |
| 3.5. Aplicación de mínimos cuadrados parciales (PLS)..... | 76 |
| 3.5.1. Generación de la matriz multivariable..... | 76 |
| 3.5.2. Cálculo del modelo predictivo..... | 77 |
| 3.5.3. Visualización del modelo de predicción..... | 78 |
| CAPÍTULO IV | 85 |
| RESULTADOS Y DISCUSIONES | |
| 4.1. Análisis de resultados | 85 |
| 4.2. Discusión de resultados | 99 |
| 4.3. Comprobación de la hipótesis | 100 |
| CAPÍTULO V | 102 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | |
| 5.1. Conclusiones | 102 |
| 5.2. Recomendaciones | 103 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 Características de las misiones del programa Landsat | 17 |
| Tabla 2 Bandas Sistema MSS | 18 |
| Tabla 3 Características Radiométricas de los sensores ETM+ y TM | 19 |
| Tabla 4 Características de Landsat 8..... | 21 |
| Tabla 5 Ubicación de las estaciones de la REMMAQ..... | 37 |
| Tabla 6 Límites numéricos de cada categoría del IQCA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)..... | 38 |
| Tabla 7 Imágenes Landsat 8 de enero a julio de 2013, 2014 y 2015 | 52 |
| Tabla 8 Estadísticas de radiación solar en la estación de Cotocollao | 58 |
| Tabla 9 Estadísticas de radiación solar (15:20 – 15:30)..... | 64 |
| Tabla 10 Valores mínimos de reflectancia de cada banda multiespectral, de las imágenes Landsat 8 utilizadas | 68 |
| Tabla 11 Valores de transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente durante las tres fechas estudiadas | 70 |
| Tabla 12 Valores máximos y mínimos de NDVI durante las tres fechas analizadas | 72 |
| Tabla 13 Cargas de las variables originales dentro de cada componente | 85 |
| Tabla 14 Coeficientes de regresión iniciales, de las variables originales a cada componente..... | 88 |
| Tabla 15 Varianza explicada por el modelo según el número de componente | 89 |
| Tabla 16 Estadísticas de los residuos del modelo de O_3 | 93 |
| Tabla 17 Estadísticas de la concentración real y predicha de O_3 | 100 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa de ubicación..... | 5 |
| Figura 2. Componentes principales de los sensores remotos..... | 8 |
| Figura 3. Espectro electromagnético..... | 13 |
| Figura 4. Resolución espacial | 23 |
| Figura 5. Resolución espectral..... | 24 |
| Figura 6. Resolución radiométrica..... | 25 |
| Figura 7. Resolución temporal..... | 25 |
| Figura 8. Estación de Jipijapa | 37 |
| Figura 9. Representación gráfica de la ecuación 11..... | 41 |
| Figura 10. Matriz X es descompuesta en “scores” (t) y “loadings” (p). | 42 |
| Figura 11. Esquema metodológico aplicado..... | 50 |
| Figura 12. Concentración de O_3 durante el mes de junio - Carapungo..... | 55 |
| Figura 13. Concentración de O_3 durante el mes de julio - Carapungo..... | 56 |
| Figura 14. Concentración de O_3 durante 24 h - Carapungo | 57 |
| Figura 15. Histogramas radiación solar - Cotocollao | 58 |
| Figura 16. Diagramas de caja de radiación solar - Cotocollao | 59 |
| Figura 17. Límites de control radiación solar - Cotocollao | 60 |
| Figura 18. Límites de control – Presión barométrica..... | 62 |
| Figura 19. Límites de control – Velocidad del viento..... | 64 |
| Figura 20. Límites de control radiación solar 15:20 – 15:30..... | 65 |
| Figura 21. Corrección geométrica imágenes Landsat 8 estudiadas | 66 |
| Figura 22. Corrección radiométrica imágenes Landsat 8 estudiadas..... | 67 |
| Figura 23. Histograma de reflectancia TOA..... | 68 |
| Figura 24. Corrección atmosférica de las bandas multiespectrales | 69 |
| Figura 25. Parámetros necesarios para la corrección atmosférica de las bandas térmicas | 70 |
| Figura 26. Corrección atmosférica de las bandas térmicas..... | 71 |
| Figura 27. Cálculo de NDVI en el software ENVI 5.1 | 72 |
| Figura 28. Cálculo de PV en el software ENVI 5.1 | 73 |
| Figura 29. Cálculo de LSE en el software ENVI 5.1 | 74 |
| Figura 30. Cálculo de TB en el software ENVI 5.1 | 75 |
| Figura 31. Cálculo de LST en el software ENVI 5.1 | 76 |
| Figura 32. Matriz multivariable para la predicción de O_3 | 77 |
| Figura 33. Obtención del modelo predictivo en el software R | 78 |
| Figura 34. Creación de la malla de puntos en el software ArcGIS 10.1 | 79 |
| Figura 35. Modelo de IDW para el área de estudio directa | 80 |
| Figura 36. Modelo de IDW para el área de estudio indirecta | 82 |
| Figura 37. Extracción de los datos de contaminantes y variables meteorológicas ... | 83 |
| Figura 38. Extracción de valores de índices ambientales y radiancia de bandas..... | 84 |

| | |
|---|-----|
| Figura 39. “Loadings” de las variables predictoras en cada componente..... | 87 |
| Figura 40. Importancia de las variables predictoras en el modelo de O ₃ | 89 |
| Figura 41. Coeficiente de determinación (R ²) del modelo de O ₃ | 90 |
| Figura 42. Error cuadrático medio de predicción (RMSEP) del modelo de O ₃ | 91 |
| Figura 43. Relación entre la concentración de O ₃ predicho y medido | 91 |
| Figura 44. Dispersión de los residuos del modelo de O ₃ | 92 |
| Figura 45. Histograma de residuales de O ₃ | 94 |
| Figura 46. Mapa de concentración de ozono troposférico – 21 de junio de 2013 | 96 |
| Figura 47. Mapa de concentración de ozono troposférico – 26 de julio de 2014 | 97 |
| Figura 48. Mapa de concentración de ozono troposférico – 11 de junio de 2015 | 98 |
| Figura 49. Regla de decisión de la hipótesis planteada..... | 101 |

RESUMEN

El ozono troposférico (O_3) es un contaminante criterio proveniente de los procesos de combustión a altas temperaturas y de la reacción de los gases presentes en la tropósfera con la luz solar. Afecta directamente a la calidad del aire y a la salud de las personas, motivo por el cual es necesario contar con información sobre la concentración y distribución espacial del mismo, para tomar acciones orientadas a la mitigación y mejoramiento de la calidad de aire del DMQ. El presente proyecto buscó estimar la concentración de O_3 a través del uso de imágenes satelitales Landsat 8 y de la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), para los años 2013, 2014 y 2015. Para esto, se realizó el análisis estadístico de control de los datos de contaminantes criterio y variables meteorológicas provenientes de las estaciones de la REMMAQ. Posteriormente, se determinaron los valores de diversos índices ambientales y de radiancia TOA de las bandas multiespectrales, con la ayuda del software ENVI 5.1. Finalmente, se generó el modelo de predicción de O_3 , con base a una matriz multivariable, mediante la regresión PLS; el cual explicó el 96,39% de variabilidad del vector respuesta y fue validado por medio del análisis de sus residuos, donde se corroboró que éstos siguen una distribución normal. Así también, se determinó que las zonas de mayor concentración de O_3 fueron: Cruz Loma, Conocoto, Alangasí y Sangolquí; con valores que se encuentran dentro del nivel aceptable de concentración según el IQCA y la OMS, ya que no sobrepasan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

PALABRAS CLAVE:

- OZONO TROPOSFÉRICO (O_3)
- IMÁGENES SATELITALES
- LANDSAT 8
- MÍNIMOS CUADRADOS PARCIALES (PLS)
- DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

ABSTRACT

The tropospheric ozone (O_3) is a criterion pollutant coming from the processes of combustion at high temperatures and from the reaction of the gases present in the troposphere with sunlight. It directly affects the quality of the air and the health of people, which is why it is necessary to have information of the concentration and spatial distribution of tropospheric ozone, to take actions aimed at mitigating and improving the air quality of DMQ. The present project sought to estimate the O_3 concentration through the use of Landsat 8 satellite imagery and the partial least squares regression (PLS), for the years 2013, 2014 and 2015. For this, the statistical analysis of control of the data of criteria pollutant and meteorological variables, from the REMMAQ stations, was carried out. Subsequently, the values of various environmental indices and TOA radiance of the multispectral bands were determined with the help of the software ENVI 5.1. Finally, the prediction model of O_3 was generated, based on a multivariate matrix, using the PLS regression; which explained the 96.39% of the variability of the response vector and was validated through the analysis of its residues, where it was corroborated that they followed a normal distribution. Also, it was determined that the areas of highest concentration of O_3 were: Cruz Loma, Conocoto, Alangasí and Sangolquí; with values that are within the acceptable level of concentration according to IQCA and WHO, since they don't exceed $100 \mu\text{g} / \text{m}^3$.

KEYWORDS:

- TROPOSPHERIC OZONE (O_3)
- SATELLITE IMAGES
- LANDSAT 8
- PARTIAL LEAST SQUARES (PLS)
- METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO

CAPÍTULO I

1.1. ANTECEDENTES

Los estudios enfocados al cuidado del ambiente son cada vez más amplios, debido a la aparición de nuevas tecnologías que ayudan al ser humano con la búsqueda de distintas alternativas que permitan prevenir, mitigar y reducir aquellos daños que son producto del descuido y mal uso que se da a los recursos naturales. Es por ello que como un análisis del estado del arte previo al desarrollo de este proyecto se realizó una compilación bibliográfica de estudios donde se analizan y relacionan diversas metodologías para generar información sobre contaminación ambiental.

En el estudio de Trujillo (2012), se examinó el fenómeno de isla de calor en el valle de Aburrá, donde el desgaste de la cobertura vegetal se produjo debido al aumento de la temperatura en dicho lugar. Mediante el uso de imágenes satelitales Landsat de los años 1986 y 2010, se estimó la temperatura superficial (TS) del valle de Aburrá y de zonas rurales cercanas. Además se obtuvo como insumo el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y se determinó la correlación entre estas dos variables. Finalmente se demostró que el casco urbano presenta una temperatura superior al área rural con diferencias notables de temperatura oscilando entre 5,53 °C y 8,18 °C; por lo cual la isla de calor es representativa dentro de la urbe del valle de Aburrá debido al crecimiento poblacional.

Por otro lado Santana et al. (2010), propone un modelo para la obtención del índice de calidad ambiental (ICA) urbano, a partir de imágenes satelitales ETM+ de Cali, Colombia. Para esto se obtuvieron cinco indicadores ambientales: temperatura de superficie (TS), índice de vegetación normalizado (NDVI), índice de humedad en las hojas (LWCI), índice de suelos normalizado (NSI) e índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI); con los que se estimó el ICA a nivel de barrio, usando análisis multivariado. Al obtenerse una alta correlación entre los indicadores, los mayores valores del ICA se observan en barrios con menor área construida y viceversa.

Finalmente, los barrios fueron agrupados según el ICA, destacando aquellos que demandan intervención prioritaria por las entidades de planificación.

De la misma manera, Cortez (2013), seleccionó imágenes de satélite provenientes de los sensores MODIS y ETM+ y para la aplicación de un modelo de emisión de CH₄ empírico, que considera un algoritmo basado en las bandas térmicas para calcular el factor de temperatura a través de la temperatura superficial de la Tierra (LST) y los flujos anuales y mensuales de CH₄ determinados directamente por medidas in situ o indirectamente con el modelo mexicano de biogás desarrollado por la USEPA. El conjunto de datos MODIS permitió estimar la LST que combinada con las concentraciones de CH₄ a nivel del suelo, desde 2005 hasta 2008, posibilitaron la delimitación de la sensibilidad de los sensores en la variabilidad temporal de la emisión del gas. La comparación de la LST recuperada de los datos de la banda 6 de Landsat-7 ETM+ y las bandas 31 y 32 de Terra MODIS mostraron una buena correlación lineal. Este resultado permitió probar el potencial de la percepción remota para estimar emisiones de CH₄ con el modelo empírico utilizado el cual también depende del método de medición del flujo de CH₄ en el relleno sanitario.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ozono troposférico es un gas incoloro que está disperso en la atmósfera, se compone por tres átomos de oxígeno (O₃) convirtiéndose así en un gas sumamente reactivo (Comisión para la Cooperación Ambiental - CEC, 2009). En las últimas décadas factores como: niveles elevados de radiación solar, contaminantes que son expulsados por el tubo de escape de vehículos a motor, y los diversos compuestos químicos de origen antropogénico; generan que los niveles de este gas se eleven y se dispersen continuamente en la atmósfera, provocando un daño perjudicial a la salud de los seres humanos y al ambiente (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2016).

Actualmente en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se localizan nueve estaciones de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ), las cuales proporcionan datos de los diferentes contaminantes criterio como son el monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono troposférico y material

particulado PM10 y PM2,5, mismos que son producto de la polución antropogénica (Ministerio del Ambiente - MAE, 2010); cabe destacar que dichas estaciones no son suficientes para monitorear la dispersión espacial de estos contaminantes, y al no encontrar una respuesta inmediata a esta problemática, se propone la implementación del uso de los sensores remotos y modelos estadísticos para la estimación de los diferentes contaminantes criterio del aire.

La regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) es una metodología utilizada para resolver dos tipos de problemas. El primero es la multicolinealidad, el cual se presenta cuando hay un número excesivo de variables predictoras con una relación de extrema dependencia entre ellas; mientras que, el segundo surge cuando el número de observaciones es menor que el número de variables predictoras (Espejo, 2017). Esto da una idea del potencial de este método en situaciones con muestras pequeñas, como es el caso de estudio del presente proyecto, que busca estimar la concentración de ozono troposférico a través del uso de imágenes satelitales Landsat 8 y de una matriz de regresión de mínimos cuadrados parciales, construida con valores de índices ambientales, datos de radiancia de las bandas multiespectrales y datos de las concentraciones de otros contaminantes y variables meteorológicas registradas en las estaciones de la REMMAQ, con el fin de determinar espacialmente las zonas de mayor influencia de dicho contaminante.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El contaminante criterio ozono troposférico es un gas que afecta directamente a la calidad del aire y a la salud de las personas, ya que proviene de los procesos de combustión a altas temperaturas y de la reacción de los gases presentes en la tropósfera como: óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y luz solar (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2016). Es por este motivo que es importante contar con información confiable sobre la concentración y distribución espacial de los diferentes contaminantes presentes en el aire, mismos que servirán como insumo para acciones orientadas a la mitigación y mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad.

El DMQ como toda ciudad económicamente activa ha crecido de manera exponencial, tanto en infraestructura, población y parque automotor (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2016); frente a esto, la contaminación ambiental se ha convertido en un ente de degradación para la ciudad, ya que día a día cientos de personas deben movilizarse ya sea en transporte público o privado para llegar a sus sitios de trabajo, estudio, hogares y lugares de esparcimiento (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014). Considerando que uno de los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir (2013), garantiza los derechos de la naturaleza y promueve la sostenibilidad ambiental, territorial y global; el presente estudio busca generar un modelo de predicción de la concentración de O_3 , mediante la aplicación de una regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), para los años 2013, 2014 y 2015.

1.4. ÁREA DE ESTUDIO

El área de influencia directa del proyecto abarcó los sectores donde existen estaciones semiautomáticas de monitoreo de calidad del aire, específicamente aquellos donde se realizaron mediciones de ozono. De esta manera, se incluyen dentro del área de influencia indirecta las treinta y dos parroquias urbanas del cantón Quito, tres parroquias rurales y parte del cantón Rumiñahui (ver Figura 1).

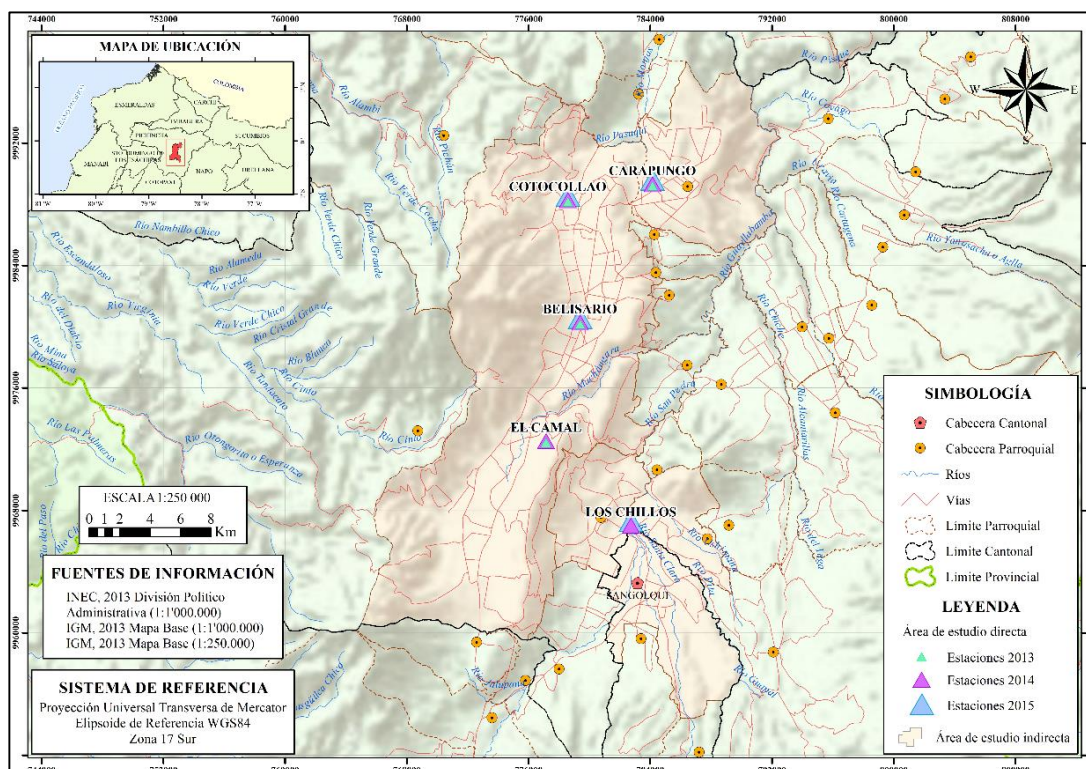


Figura 1. Mapa de ubicación

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Estimar la concentración de ozono troposférico (O_3), mediante análisis geoespacial de imágenes satelitales Landsat OLI/TIRS y mínimos cuadrados parciales (PLS), para las parroquias urbanas del cantón Quito.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Recopilar y validar la información alfanumérica y geoespacial a través de la base de datos de la Secretaría del Ambiente de Quito (REMMAQ) y del catálogo de imágenes de la USGS, para obtener datos interrelacionados en las mismas fechas de estudio.

- Preprocesar las imágenes Landsat 8 correspondientes a los años 2013, 2014 y 2015, mediante las correcciones topográfica, geométrica, radiométrica y atmosférica; para iniciar los procedimientos de obtención de información.
- Determinar mediante la aplicación de algoritmos, los valores de índices ambientales en los puntos correspondientes a cada una de las estaciones de la REMMAQ, para construir la matriz multivariable a analizarse dentro del modelo.
- Generar el modelo de estimación de O₃ en función de la regresión por mínimos cuadrados parciales, para obtener datos de concentración de dicho contaminante en las áreas urbanas de Quito.
- Validar el modelo ajustado por mínimos cuadrado parciales, a través del análisis de residuos, para corroborar el grado de ajuste entre los datos observados y los datos predichos en cada uno de los puntos correspondientes a las estaciones de monitoreo estudiadas.

1.6. METAS

- Una base de datos digital con información de cada una de las variables meteorológicas y concentración de contaminantes utilizados en el estudio.
- Tres imágenes satelitales, correspondientes a los años 2013, 2014 y 2015 con correcciones topográfica, geométrica, radiométrica y atmosférica.
- Una base de datos digital con información de temperatura superficial de la Tierra, temperatura de brillo e índices ambientales utilizados en el estudio.
- Una base de datos digital de la concentración de O₃ estimada a partir de la regresión por mínimos cuadrado parciales (PLS), en las parroquias urbanas del cantón Quito.
- Un mapa de distribución espacial de la concentración de O₃ para los años 2013, 2014 y 2015, escala 1:200.000; generado a partir del modelo estimado por PLS.

CAPITULO II

2.1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.1. Sensores Remotos

Es el conjunto de técnicas y procedimientos que permiten adquirir información de objetos que se encuentran en la superficie de la tierra, sin que exista contacto físico con ella (Universidad de Murcia, 2006). Debido a esto se han empleado diferentes procesos para el análisis de datos y el uso de instrumentos denominados “sensores”, mismos que son idóneos para captar las correlaciones espectrales y espaciales de materiales y objetos a una cierta distancia (Pérez, 2007). Para que exista una relación entre objeto y sensor, debe haber un flujo de radiación el cual es emitido por cualquier elemento de la superficie de la Tierra y a su vez es captado por el satélite (Universidad de Murcia, 2006). Dicho de otro modo, los sensores remotos adquieren una imagen de la cobertura terrestre a través de sensores que se encuentran colocados en satélites con el fin de originar información de la superficie y los cambios que se han producido en ella (Universidad Nacional de Colombia, 2015).

2.1.1.1. Componentes

Dentro de la obtención de datos existen una serie de componentes en el sistema de percepción remota como se muestra en la Figura 2 y los cuales se enunciarán a continuación (Instituto Geográfico Agustín Godazzi - IGAC, 2010):

- Fuente de energía: Se denomina así al emisor de energía lumínica, que puede ser un haz de energía solar o una fuente externa; esto es aplicado por sensores de tipo activos o pasivos.
- Cubierta terrestre: Representa a aquellos cuerpos que se localizan en la superficie terrestre; estos pueden ser vegetación, agua, suelo, construcciones entre otros.

- Sistema sensor: Se encarga de captar la energía de radiación electromagnética reflejada o emitida por algún objeto dentro de la cubierta terrestre, ésta viaja hasta el sensor que se encuentra dentro del satélite.
- Retransmisión de la energía por la atmósfera: La energía absorbida es transmitida para codificar y almacenar información con el fin de convertir la información a imágenes digitales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2014).
- Interpretación y análisis: Consiste en estudiar e interpretar la imagen digital con el objetivo de obtener todo tipo de información ya sea de fenómenos, objetos e incluso análisis climáticos, etc. (Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2014).
- Usuario final: Es quien recibe el producto de la imagen digital interpretada, ya sea para fines cartográficos, agrícolas, meteorológicos, ambientales, mineros, u otros.

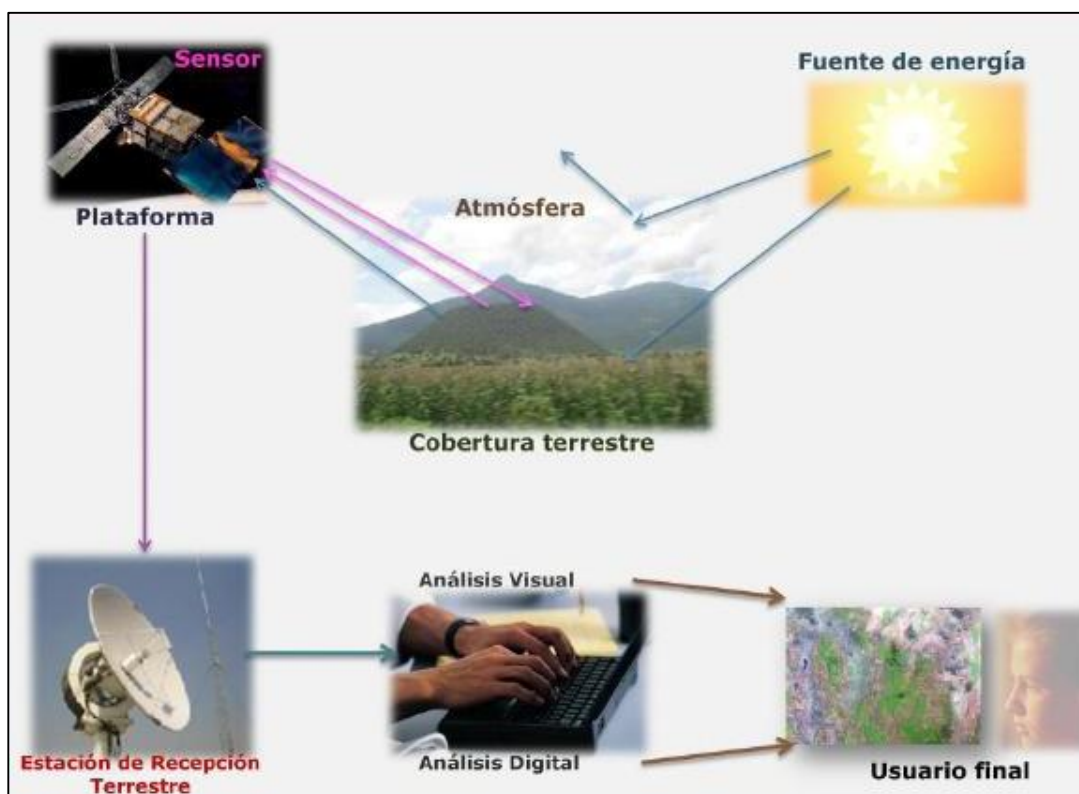


Figura 2. Componentes principales de los sensores remotos

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2014)

2.1.1.2. Clasificación de sensores remotos

Los criterios fundamentales para la clasificación de los sensores remotos son (Peguero, 2012):

- Fuente emisora de energía
- Información registrada
- Banda del espectro electromagnético
- Tecnología para captar información
- Tipo de sensor

2.1.1.2.1. Fuente emisora de energía

Se fundamenta en el origen de emisión y recepción de energía como son (Peguero, 2012):

- Sensor mono estático: Es aquel que posee ambas fuentes de energía tanto de emisión como de recepción y ocupan un mismo lugar espacial ejemplo: sistema radar.
- Sensor bi estático: Es aquel que contiene la fuente de recepción de energía, y la recepción proviene del sol y se encuentran en diferente posición espacial ejemplo: fotografía aérea.

2.1.1.2.2. Información registrada

La información que es registrada por los sensores remotos se puede almacenar en forma de emulsiones foto-sensibles, gráficas o digitales, por ende, se clasifican en (Peguero, 2012):

- Sensor fotográfico: La información es registrada por medio de emulsiones fotosensibles.
- Sensor no fotográfico: La información obtenida se proyecta en forma gráfica y digital que es capaz de detectar la energía del espectro electromagnético.

2.1.1.2.3. Banda espectral

Este criterio se fundamenta en el uso que se da a las bandas espectrales que operan dentro de la percepción remota, que son capaces de absorber la energía que es captada del sensor, se clasifican en (Peguero, 2012):

- Sensores en la banda ultravioleta: Su longitud de onda comprende en el rango de 0.004 – 0.400 micrómetros, la relación que existe con el uso de los recursos naturales es limitado. Dicha banda se divide en 4 regiones de las cuales los dos primeros se vinculan con la percepción remota y los otros dos no atraviesan la atmósfera.
 - UV Cercano 0,400 - 0,315 μm
 - UV Medio 0,315 – 0,280 μm
 - UV Lejano 0,280 – 0,010 μm
 - UV Vacío 0,010 – 0,004 μm
- Sensores en la banda visible: Su longitud de onda va desde 0,400 a 0,700 (μm); su uso está enfocada directamente con las aplicaciones de percepción remota, por lo que actualmente el uso de esta banda se pueden encontrar en: cámaras fotográficas, sistema de televisión y barredores mecánicos ópticos.
- Sensor en la banda infrarroja: Esta banda está comprendida en los rangos de 0,700 a 14,0 (μm). Alcanza la franja visible y la región microondas por lo que la longitud de onda se amplía hasta 1,0 milímetros, su uso ayuda en la determinación de temperaturas de la superficie, índices de vegetación entre otros por lo que se divide en tres bandas.
 - IR Cercano 0,7 – 1,3 μm
 - IR Medio 1,3 – 3,0 μm
 - IR Lejano o Térmico 3,0 – 14,0 μm

2.1.1.2.4. Según la tecnología para captar información

La tecnología que utilizan los sensores remotos para captar información son varios por lo que se clasifica en (Peguero, 2012):

- Sensor Fotográfico: Se maneja bajo el principio de cámara y película; las más utilizadas en percepción remota son: Cámara métrica, panorámica y multiespectral.
- Sensor electro óptico formador de imagen: Este tipo de sensor capta la imagen en tres formas:
 - Sensor de formato: No necesita de movimiento de barrido para captar imágenes aéreas.
 - Barredor de arreglo lineal: Cuenta con un barredor unidireccional y requiere de un sistema auxiliar de movimiento para poder barrer de ambos sentidos.
 - Barredor mecánico: Posee un conjunto de sistema de barrido, que pueden ser dobles o sencillos y permiten barrer en varios sentidos por lo que es utilizado en estudios de recursos naturales.
 - Sensor radar: Emite energía electromagnética en dirección a un objeto, cuenta con sensores activos y su operabilidad se maneja en el sistema de apertura real.

2.1.1.2.5. Tipo de sensor

Los sensores según la radiación electromagnética que reciben pueden ser de dos tipos activos o pasivos.

- Sensor Pasivo: Detectan y calculan la radiación electromagnética reflejada por la superficie de la tierra, depende de una fuente de luminosidad externa como el sol; tal y como utilizan los sensores de Landsat Thematic Mapper (MSS, TM), SPOT, etc. (Pinilla, 2015).
- Sensor Activo: Posee su propia fuente de radiación energética, ya que no depende de ninguna fuente externa el sensor emite un flujo de radiación dentro de la franja espectral que interactúa con la superficie terrestre, mientras que la parte reflejada es captada con el sensor; como es el caso de los radares y radiómetros de microondas (Pérez, 2007).

2.1.1.3. Espectro electromagnético

Para que la percepción remota sea posible es necesario que exista una relación entre el flujo energético de objetos terrestres y el sensor (Chuvieco, 2008). Dicho de otro modo, el objeto es captado por la reflexión de la luz solar y así el sensor adquiere información a partir de reflexión por emisión y viceversa (Chuvieco, 2008). El flujo de energía que existe entre la superficie terrestre y el sensor es posible gracias a la radiación electromagnética (Chuvieco, 2008), como se muestra en la Figura 3.

Por lo que el espectro electromagnético, es el conjunto de longitudes de onda que describe cualquier tipo de energía de radiación en un tipo de frecuencia en la que viaja la energía (Chuvieco, 2008). Por esta razón es posible distinguir los objetos ya que ellos emiten, reflejan y transmiten una cierta cantidad de luz en el espectro, por lo que este se complementa por colores del arcoiris (Peguero, 2012). Los diversos colores que se aprecian en el espectro electromagnético corresponden a una longitud de onda diferente, y pueden variar desde ondas largas a ondas muy cortas. Dentro de la percepción remota y el uso del espectro electromagnético se pueden destacar las diversas bandas espectrales que son (Peguero, 2012):

- Rayos Cósmicos y Gamma (menor a 0,03 nm): La radiación solar se absorbe totalmente en la atmósfera por lo que no es utilizable para percepción remota.
- Rayos X (0,03 – 3 nm): Se caracteriza por que su longitud de onda se absorbe por gases atmosféricos, su uso se lo da en el campo de la medicina ya que sirven para penetrar los tejidos humanos.
- Ultra violeta (3 nm – 4 μm): Es aquella radiación que es menor a los 3 mm, se absorbe por el ozono pero la región que pertenece al rango 0,3 – 0,4 μm es utilizado para fines percepción remota.
- Visible (0,4 – 0,7 μm): Se basa en la única radiación electromagnética que perciben los ojos humanos y se pueden distinguir en tres bandas fundamentales que se convierten en los colores elementales asociados con esta longitud de onda; estos son: azul (0,4 – 0,5 μm), verde (0,5 – 0,6 μm) y rojo (0,6 – 0,7 μm).

- Infrarrojo (0,7 – 14 μm): Su uso se enfoca en la alta capacidad de distinguir masas vegetales y las diversas concentraciones de humedad en la superficie terrestre. Esta longitud de onda se clasifica en:
 - Infrarrojo reflejado (0,7 -3 μm)
 - Infrarrojo cercano (0,7 -1,3 μm)
 - Infrarrojo medio (1,3 -3,0 μm)
- Infrarrojo termal (3 – 14 μm): Su longitud de onda es absorbida por barredores de tipo termales y sensores ópticos mecánicos utiliza dos fases la primera que va desde 3 a 5 μm y la segunda de 8 a 14 μm . Su longitud de onda incluye la parte emisiva del espectro terrestre.
- Micro ondas (0,3 – 300 μm): Su longitud de onda puede traspasar niebla, nubes e incluso lluvias a través de sensores tipo radar, las longitudes superiores a este tipo son utilizados en el campo de telecomunicaciones.

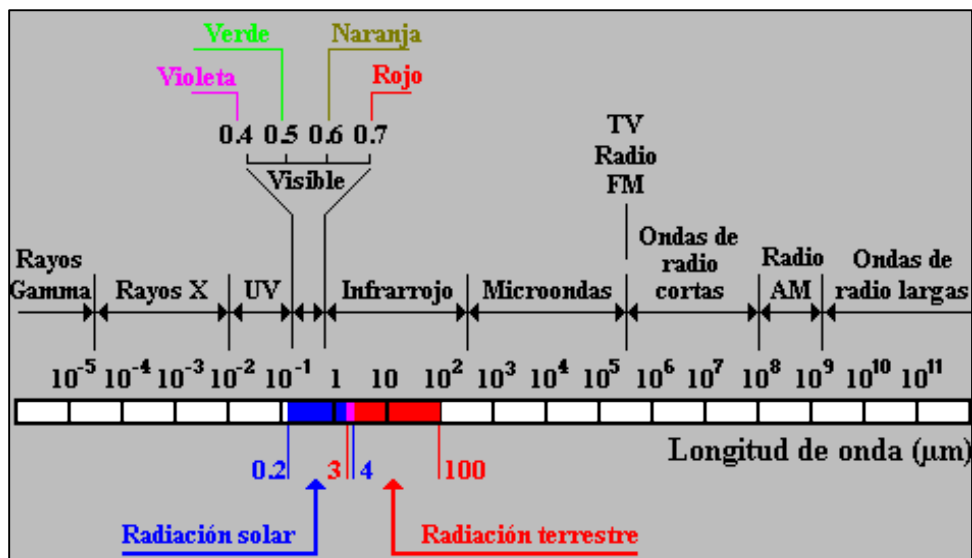


Figura 3. Espectro electromagnético

Fuente: (Lillesand et al., 1987, citado en (Peguero, 2012))

2.1.1.4. Satélites

Un satélite es un cuerpo cuya función es orbitar alrededor de cualquier objeto, por ejemplo la luna es satélite de la tierra (Sociedad Astronómica del Planetario Alfa,

2004). Este concepto se refiere a las plataformas que se encuentran en órbita en forma artificial, giran alrededor de la tierra y en las cuales se instalan dispositivos o sensores (Pérez, 2007). La trayectoria que recorre un satélite se denomina órbita, en el caso de los satélites artificiales su órbita es definida en función de diversos parámetros como: Radio de inclinación, inclinación del plano de órbita y el periodo de revolución (Pérez, 2007). El número de revoluciones diarias del satélite significa a cuantas veces este gira entorno a la tierra en un día, por ello es importante definir la altitud en la que el satélite debe ser colocado. Los satélites más utilizados en percepción remota son: en estudios de recursos naturales Landsat y SPOT, estudios meteorológicos GOES, NOAA, Seawifs y MODIS, satélites con alta resolución Ikonos, Quickbird, Geoeye y WorldView (Instituto Nacional de Estadística y Geología - INEGI, 2010).

2.1.1.4.1. Clasificación

Los satélites se clasifican en cuatro grupos (Universidad de Oviedo, 2012):

- Por su centro de gravedad
 - Órbita galactocéntrica: Su órbita se encuentra alrededor del centro de una galaxia. Ej.: El Sol que sigue este tipo de órbita alrededor de la Vía Láctea.
 - Órbita heliocéntrica: Órbita alrededor del Sol. Ej.: Los planetas, cometas y asteroides, satélites artificiales y basura espacial.
 - Órbita geocéntrica: Órbita en torno a la Tierra, en la actualidad existen aproximadamente 2.465 satélites geocéntricos.
 - Órbita Aerocéntrica: Órbita alrededor de Marte.
- Por su Altitud (Van Leeuwen, Vargas, Feingersh, Pohl, & Bakker, 2010):
 - Satélites GEO (Geo-stationary earth orbit): Se encuentra a 36.000 Km de altura.
 - Satélites LEO (Low earth orbit): Comprende desde 300 hasta 1.500 Km de altura.
 - Satélites MEO (Low earth orbit): Se encuentran a 500 y 1.5000 Km de altura.

- Según la tarea que desarrollan (Pérez, 2007):
 - Satélites de órbita baja (180 a 1.000 Km de altitud): Permiten identificar objetos con muy alta resolución y retransmiten información en tiempo real. Ej.: Quick Bird.
 - Satélites científicos: Se enfoca en analizar diversos estudios sobre la tierra, sistema solar y el universo ya que observan fenómenos físico-químicos y descubren nuevos planetas.
 - Satélites de telecomunicaciones (Geoestacionarios): Realizan transmisiones ya sea en comunicaciones telefónicas, televisión entre otros.
 - Satélites meteorológicos (Geoestacionarios): Permiten operar sobre la fase oscura de la tierra ya que utiliza sus radiómetros infrarrojos, recolectan datos de meteorología en la atmósfera.
- Satélites que registran datos sobre la Tierra y el ambiente (Pérez, 2007):
Existen satélites que aportan a conocimientos relacionados con el hombre y el ambiente, debido a su registro de datos sobre los fenómenos físicos, químicos y biológicos de la superficie terrestre y su atmósfera, dichos satélites son de órbita baja que se encuentran a centenares de kilómetros de la Tierra.

2.1.1.4.2. Satélite Landsat

Landsat se deriva de Land: tierra y sat: satélite, es un conjunto de constelaciones para el monitoreo de recursos naturales que se generan en la superficie terrestre, su mantenimiento y soporte está a cargo la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA), mientras que su producción, comercialización y visualización en su versión gratuita depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Instituto Nacional de Estadística y Geología -INEGI, 2010).

El programa Landsat constituye una serie de misiones, que con el paso del tiempo ha revolucionado la manera de ver y estudiar nuestro planeta (ESRI, 2014). En el año de 1972 Landsat comenzó con el registro continuo de los cambios que se han producido en la cobertura terrestre desde el espacio, con el fin de generar datos para vigilancia terrestre continua (ESRI, 2014). La serie de satélites Landsat van desde 1,

2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 mismos que han ido evolucionado con la aparición de nuevas tecnologías (Herrero & Fernández, 2014).

2.1.1.4.3. Misiones del Programa Landsat

Landsat constituye la más amplia colección de datos continuos adquiridos por sensores remotos con moderada resolución, su paso en el tiempo por cuatro décadas proporcionan un recurso único para estudios en geología, cartografía, educación e investigación global (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017). A su vez constan de diferentes instrumentos abordo que capturan información precisa y con un detalle cuyo fin es revolucionar la forma de ver al mundo y trabajar en él (ESRI, 2014).

Landsat 1 y 2 fueron enviados en 1972 y 1983 respectivamente por la NASA, operaba con un sensor viga de retorno vidición que contaban con tres cámaras que contenían las siguientes bandas espectrales: banda 1 visible azul y verde, banda 2 naranja y rojo, banda 3 rojo visible casi infrarrojo; y un escáner multiespectral con una resolución de la Tierra de 80 m en cuatro bandas espectrales: banda 4 verde visible, banda 5 rojo visible, banda 6 y 7 infrarrojo cercano; y con un intervalo de tamaño de píxel para el muestreo de la tierra de 57 x 79 m (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

En el año de 1978 Landsat 3 utilizó dos cámaras, montadas en ambos lados, con respuesta espectral pancromática y con una resolución espacial para complementar la cobertura multiespectral proporcionada por el escáner multiespectral (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

Landsat 4 y 5 fueron enviados en 1982 y 1984 respectivamente contaban con sensores de escáner multiespectrales e idénticos a las de Landsat 1 y 2 y también contaba con mapeador temático de tamaño de píxel de 30 m (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017). Landsat 6 fue enviado en 1993 pero este no alcanzó la órbita, y constaba con un sensor mapeador temático mejorado con ocho bandas (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

Landsat 7, enviado en 1999 posee un sensor Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) con ocho bandas espectrales incluyendo las bandas pancromáticas y térmicas, utiliza un intervalo de muestreo de tierra de 30 m reflexivo y 60 m térmico, a su vez consta con un calibrador solar (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

En 2013 fue enviado el satélite Landsat 8, que posee dos sensores el Operational Land Imager (OLI) y el infrarrojo térmico (TIRS); el primero se maneja en nueve bandas espectrales incluyendo la banda pancromática y el segundo contiene dos bandas espectrales en el infrarrojo térmico la banda 10 y 11, como se indica en la Tabla 1 (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

Tabla 1
Características de las misiones del programa Landsat

| Satélite | Lanzamiento (fin operación) | Sensores | Resolución Espacial (m) | Altura (km) | Resolución Temporal (días) |
|-----------------|--|-----------------|--|------------------------|---|
| ERTS-1 | 23/07/1972 (05/01-1978) | RBV MSS | 80 80 | 917 | 18 |
| LANDSAT-2 | 22/01/1975 (27/07/1983) | RBV MSS | 80 80 | 917 | 18 |
| LANDSAT-3 | 05/03/1978 (07/09/1983) | RBV MSS | 30 80 | 917 | 18 |
| LANDSAT-4 | 16/07/1982 (agosto 1993) | MSS TM | 80 30 | 705 | 16 |
| LANDSAT-5 | 01/03/1984 (en operación) | MSS TM | 80 30 | 705 | 16 |
| LANDSAT-6 | 03/10/1993 (03/10/1993) | ETM | 15 (Pan) 30 (MS) | 705 | 16 |
| LANDSAT-7 | 15/04/1999 (en operación) | ETM+ | 15 (Pan) 30 (MS) | 705 | 16 |
| LANDSAT-8 | 02/11/2013 (en operación) | OLI TIRS | 15 (Pan) 30 (MS) *100 (TIRS) | 705 | 16 |

* Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a muestrear a 30 metros.

Fuente: (Pérez, 2007) y (División de Generación de Imágenes - DGI, 2016)

2.1.1.4.4. Sensores de Landsat

En lo que a equipamiento se refiere, el programa Landsat puede ser estructurado en tres generaciones. Una primera fase constituida por los Landsat 1, 2 y 3 cuyo infraestructura se conforma por los sensores MSS y RBV (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017). Los satélites de la segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS e incorporan un nuevo sensor denominado TM. Finalmente, se entra en una tercera generación con la actualización del sensor TM al ETM+ en el Landsat 7, y la incorporación de los sensores OLI y TIRS para el Landsat 8 (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

- Sistema Return Beam Vidicon (RBV)
Fue creado por cámaras de televisión las cuales se instalaron en Landsat 1, 2 y 3, la escena tomada representaba un área de 185 Km, la resolución de 1 y 2 era de 80 x 80 m con tres bandas espectrales (rojo, verde e infrarrojo próximo) mientras que el 3, su resolución era de 40 x 40 m con una banda en el pancromático, se constituye como el primer sensor que sirve para obtener imágenes dentro de Landsat tiene un sistema que genera una imagen de forma instantánea (Pérez, 2007).
- Sistema Imagen Multiespectral (MSS)
Es un sensor de barradura óptico-electrónico, que opera en cuatro franjas del espectro electromagnético, dos en el visible y dos en el infrarrojo, escanea un área de 185 Km con una resolución espacial de 80 m. En Landsat 3 se agregó un canal del infrarrojo termal y una banda 8 con resolución de 240 m como indica la Tabla 2 (Pérez, 2007).

Tabla 2
Bandas Sistema MSS

| LANDSAT 1- 3 | LANDSAT 4-5 | FAJAS ESPECTRALES | RESOLUCIÓN ESPACIAL |
|---------------------|--------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| BANDA | BANDA | (μm) | (m) |
| 4 | 1 | 0,5 – 0,6 | 80 |
| 5 | 2 | 0,6 – 0,7 | 80 |
| 6 | 3 | 0,7 – 0,8 | 80 |
| 7 | 4 | 0,8 – 1,1 | 80 |
| 8 | - | 10,41 – 12,6 | 237 |

Fuente: (Pérez, 2007)

- Sistema Thematic Mapper (TM)
Sensor con barradura multiespectral, suministra mayor resolución espacial, geométrica y radiométrica, manipula las siete bandas espectrales, 3 están el visible, una en el infrarrojo próximo, dos en el infrarrojo medio y una en el termal, cuenta con una resolución de 30 metros en la banda del visible (Pérez, 2007).
- Sistema ETM+
Este sistema conserva una alta resolución espacial, espectral y calibración radiométrica absoluta del 5%. La resolución espacial es de 30 m en las bandas 1-5 y 7, su nueva banda pancromática es de 15 metros (Pérez, 2007), a continuación las características radiométricas de los sensores TM y ETM+ se describen en la Tabla 3.

Tabla 3
Características Radiométricas de los sensores ETM+ y TM

| BANDA | FAJA ESPECTRAL (μm) | REGIÓN ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO | APLICACIONES |
|-------|----------------------------|---|--|
| | 0,45 - 0,52 | Azul (Visible) | Mapeo de aguas costeras, diferenciación entre suelo y vegetación. |
| 2 | 0,52 – 0,60 | Verde (Visible) | Mapeo de vegetación, calidad de agua. |
| 3 | 0,63 – 0,90 | Rojo (Visible) | Absorción de clorofila, diferenciación de especies vegetales, uso del suelo y calidad de agua. |
| 4 | 0,76 – 0,90 | Infrarrojo Cercano | Mapeo geomorfológico y geológico, áreas incendiadas, áreas húmedas, agricultura y vegetación. |
| 5 | 1,55 – 1,75 | Infrarrojo Medio | Uso del suelo, medidas de humedad en la vegetación, diferenciación entre nubes y nieves, agricultura y vegetación. |
| 6 | 10,40 – 12,50 | Infrarrojo Termal | Mapeo de estrés térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo. |
| 7 | 2,08 – 2,35 | Infrarrojo Medio | Identificación de minerales, mapeo hidrotermal. |
| 8 | 0,52 – 0,90 | Pancromática Verde y Rojo; Infrarrojo Cercano | Mapeo de grandes áreas, estudios de cambios urbanos. |

Fuente: (Pérez, 2007)

- Sistema OLI

OLI posee dos nuevas bandas espectrales, una banda azul "costera" (banda 1) y una banda en el infrarrojo de onda corta "cirros" (banda 9) (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2013). Este sistema maneja un sensor del tipo "pushbroom" compuesto por una serie de 7.000 detectores; resguardando a las bandas espectrales de los sensores TM y ETM+, con la excepción de una banda en el infrarrojo térmico (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2013). Además la resolución espacial es de 30 m en las bandas 1-7 y 9, 15 m en la pancromática (banda 8) y de 100 m en las bandas termales como se muestra en la Tabla 4.

- Sistema TIRS

El sistema TIRS al estar compuesto por detectores QWIPs (Quantum Well Infrared Photodetectors), muestran dos segmentos del espectro infrarrojo térmico, ambos abarcan dentro de una lumbrera de transmisión atmosférica, con el fin de originar mejores estimaciones de la temperatura superficial terrestre (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2013). Cuenta con un sensor "pushbroom" y su área de cobertura es de 185 Km, posee una resolución espacial de 100 m que acumula información a 30 m para que coincida con las bandas multispectrales del OLI (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2013).

2.1.1.4.5. Landsat 8

Lanzado en Vandenberg Base de la Fuerza Aérea, California el 11 de febrero del 2013 por la NASA, órbita de sincronización solar alcanza una altitud de 705 Km, gravita el globo terráqueo cada 16 días, recorre cada 98,9 min a la Tierra (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017). Posee dos sensores el primero Operational Land Imager (OLI) y el segundo Termal Infrared Sensor los cuales tienen nueve bandas como se visualiza en la Tabla 4 (Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS, 2017).

Tabla 4
Características de Landsat 8

| ATRIBUTO | DESCRIPCIÓN | |
|--------------------------|---|---------------|
| Tipo de Producto | Imagen L1T (Precision, Terrain Corrected) – Ortorectificada | |
| Formato de Imagen | Archivo GeoTIFF Metadato en formato texto | |
| Espaciamiento de píxel | 15m Pancromático 30m Multiespectral | |
| Tamaño de Producto | 185 x 185 Km | |
| Correcciones Geométricas | Proyectadas a un datum y proyección cartográfica, usando un Modelo Digital de Elevación (SRTM) y puntos de control terrestre (GCP). | |
| Datum Horizontal | WGS84 | |
| Proyección Cartográfica | UTM (Universal Transversa de Mercator) | |
| | 11 bandas: | |
| | Longitud de Onda (nm) | |
| Bandas Espectrales | 1 Aerosol Costero | 430 – 450 |
| | 2 Azul | 450 – 510 |
| | 3 Verde | 530 – 590 |
| | 4 Rojo | 640 – 670 |
| | 5 Infrarrojo Cercano (NIR) | 850 – 880 |
| | 6 SWIR 1 | 1570 – 1650 |
| | 7 SWIR 2 | 2110 – 2290 |
| | 8 Pancromática (Pan) | 500 – 680 |
| | 9 Cirrus | 1360 – 1380 |
| | 10 Infrarrojo Térmico (TIRS) 1 | 10600 – 11190 |
| | 11 Infrarrojo Térmico (TIRS) 2 | 11500 – 12510 |
| Resolución Radiométrica | 12 bits | |

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística y Geología - INEGI, 2010)

2.1.1.5. Imágenes satelitales

Es la representación visual de datos que son reflejados en la superficie terrestre mediante la captura de un sensor, dicha información es enviada a una estación en dónde se procesan y finalmente se convierten en imagen. Las imágenes satelitales captan la radiación electromagnética que es reflejada por un objeto, esto depende la su resolución e información espacial del sensor (Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2015). A su vez son representadas en formato tipo raster las cuales se ajustan de una matriz regular o rejilla de celdas, a cada una de ellas se las conoce como píxel y que se les asigna un valor digital (Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI, 2015).

2.1.1.5.1. Formación de la imagen

La imagen digital está compuesta por un arreglo matricial, la cual se forma por celdas que se denomina “píxel”, esta estructura se genera según el sistema de coordenadas que se forma por líneas horizontales llamadas “rows” y columnas verticales “samples” llamado también raster (Pérez, 2007).

- Representación del píxel: El píxel posee un atributo numérico, el cual indica el nivel de gris de cada celda, según la calidad de este se le da el nombre de “nivel digital”, y representa la intensidad de energía electromagnética ya sea reflejada o emitida por el sensor.

2.1.1.5.2. Tipos de imágenes satelitales

El uso que se da a las imágenes satelitales hoy en día es de gran ayuda para los diversos estudios de la cobertura terrestre, ya que la imagen se relaciona con el concepto espectral, el cual permite identificar y entender los diferentes tipos de imágenes satelitales (Sensores Remotos & GIS, 2015).

- Imágenes pancromáticas: Son aquellas que captan la reflectancia de energía en la parte del espectro electromagnético, ya que abarcan la parte visible del infrarrojo cercano y su representación es escala de grises (Peguero, 2012).
- Imágenes multi-espectrales: Son captadas por un sensor digital que mide la reflectancia en diferentes bandas, generando valores que se sintetizan en un arreglo que crea imágenes de color (Martínez, 2015).
- Imágenes hiper-espectrales: Es aquella que mide la reflectancia en varias franjas estrechas del espectro electromagnético, que reconoce aquellas características sutiles en la cobertura terrestre, específicamente a vegetación, agua, suelo, rocas e incluso minerales (Peguero, 2012).
- Imágenes infrarrojas: Son aquellas que captan en el espectro lumínico lo que no se considera visibles para la percepción humana, por lo general aquellos cuerpos que emiten mayor temperatura se absorbe por la radiación infrarroja (Peguero, 2012).

2.1.1.5.3. Resolución de una imagen

Se considera como una habilidad para distinguir a detalle la información de las imágenes, ya que la resolución depende la combinación de diferentes componentes para establecer modelos con un significado físico (Chuvieco, 2008). La resolución de una imagen se clasifica en:

- Resolución espacial

Este término se refiere al objeto diminuto que se puede distinguir sobre una imagen (Chuvieco, 2008), esta resolución se maneja a través de un sensor óptico eléctrico el cual depende de distintos factores tales como: altura orbital, velocidad de barrido y número de detectores que contiene el sensor, este tipo de resolución se determina por el tamaño del píxel registrado (Peguero, 2012), como se muestra en la Figura 4.

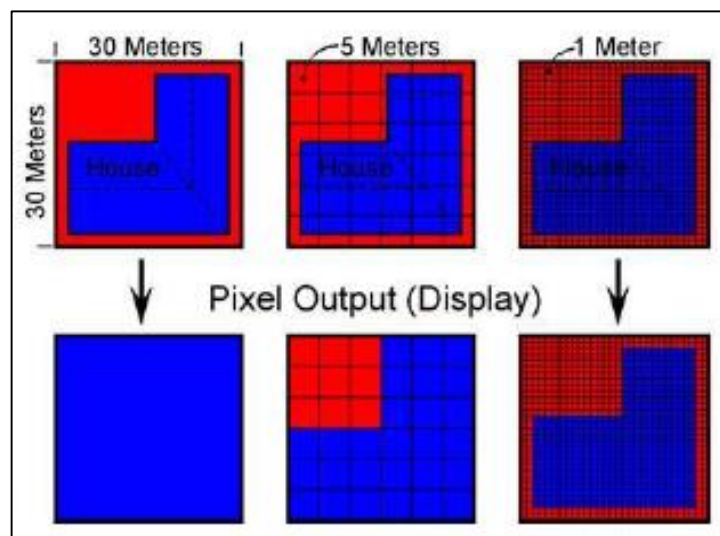


Figura 4. Resolución espacial

Fuente: (Pérez, 2007)

- Resolución espectral

Muestra el número y amplitud de las bandas espectrales que puede distinguir el sensor (Chuvieco, 2008), por lo tanto, se define como la capacidad que posee un sensor en desviar los rangos espectrales, debido a que a mayor resolución espectral se pueden diferenciar mejor los objetos, ya que estos se

comportan de distinta manera según la banda que se utiliza (Peguero, 2012). A su vez se relaciona con dos parámetros: el primero con el valor del intervalo de la longitud de onda y el segundo la cantidad de bandas que el sensor puede registrar en el espectro electromagnético (ver Figura 5) (Pérez, 2007).

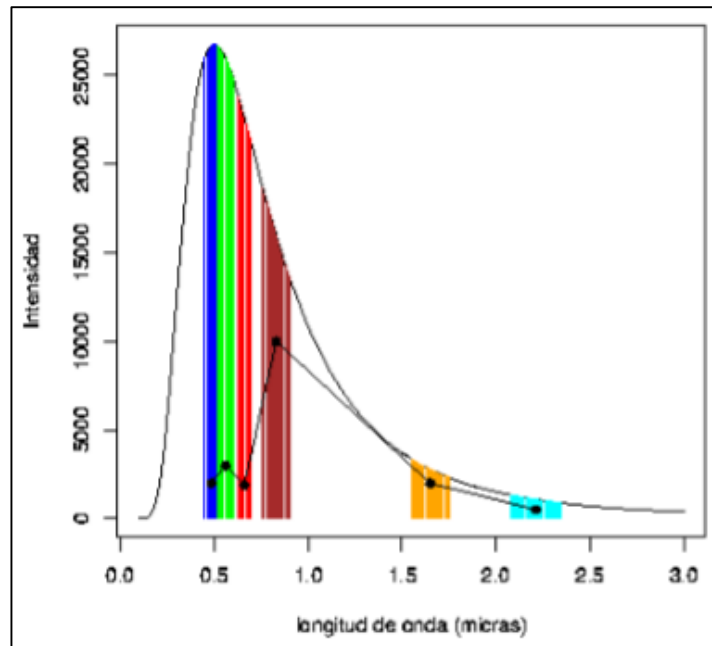


Figura 5. Resolución espectral

Fuente: (Peguero, 2012)

- Resolución radiométrica

Esta resolución diferencia los pequeños cambios en la radiancia que absorbe el sensor óptico eléctrico, recopilando la información en un formato digital el cual establece un valor a cada píxel, por ejemplo, una imagen de 8 bits tendrá una gama de colores de 28 o 256 niveles de grises que se encuentran entre 0 a 255 (Peguero, 2012). Por lo tanto una mayor resolución radiométrica admite aislar objetos con niveles semejantes de reflectividad como se muestra en la Figura 6 (Chuvienco, 2008).

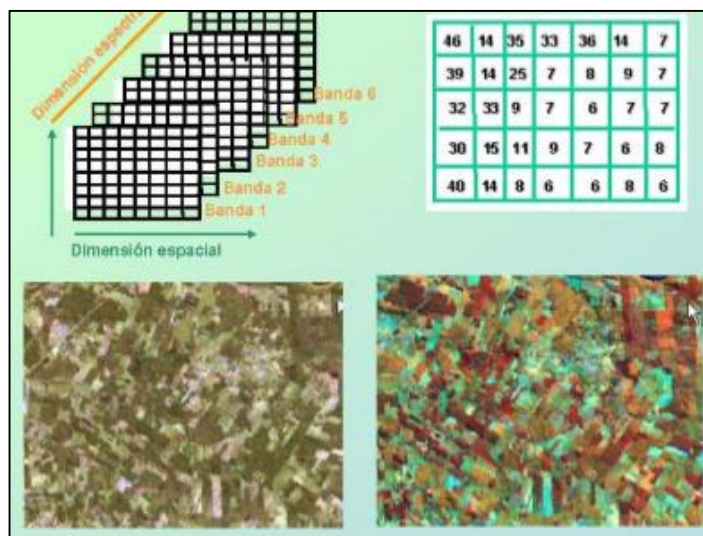


Figura 6. Resolución radiométrica

Fuente: (Peguero, 2012)

- Resolución temporal

Capacidad en la cual se generan imágenes de una misma área pero en diferentes lapsos de tiempo, esto se ve reflejado en la periodicidad de cobertura del sensor (Peguero, 2012). Dicho de otro modo es la frecuencia con la que un sensor recorre la cobertura Terrestre, por lo tanto esta resolución dependerá de los escenarios atmosféricos, ya que los sensores ópticos o térmicos no identifican áreas de nubosidad densificada (Chuvieco, 2008). Un ejemplo de esta resolución temporal es la que posee el satélite Landsat ya que cuenta con una resolución de 16 días, esto es directamente proporcional a los tipos de orbita que se encuentran los satélites (ver Figura 7) (Álvarez & Padilla, 2016).

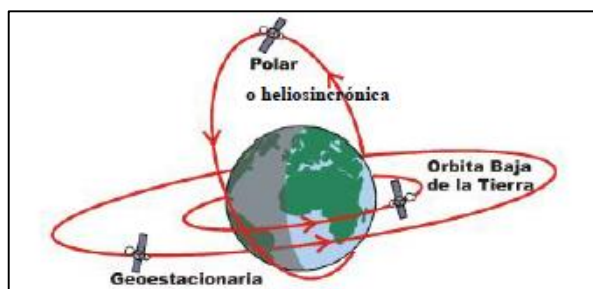


Figura 7. Resolución temporal

Fuente: (Álvarez & Padilla, 2016)

2.1.1.5.4. Tratamiento digital de imágenes satelitales

El tratamiento digital de imágenes satelitales se convierte en una herramienta fundamental para la exploración profunda de la información que contienen, ya que integran procesos como captura, tratamiento y extracción de información específica ya sea para diversos estudios agrícolas, cartográficos, meteorológicos, entre otros (Arozarena, 2010). Como primer paso del tratamiento digital de imágenes satelitales se debe realizar un pre-procesamiento, donde el principal objetivo es discriminar y reducir las distorsiones que se producen en el proceso de adquisición. Por ende es preciso describir las diferentes correcciones de imágenes que se aplican hoy en día (Basterra, 2011).

- Corrección topográfica

Este tipo de corrección busca reducir las variaciones propias de la topografía del terreno, esto se corrige sobre la imagen en un modelo digital de elevación (DTM) que tenga mejor o similar escala (Álvarez & Padilla, 2016).

- Corrección geométrica

La corrección geométrica aplica un sistema de proyección y se geo referenciarían ya que utiliza puntos de control en la superficie terrestre. Para esto es indispensable contar con modelos de elevación del territorio DTM, para minimizar las distorsiones, originadas por el sensor. Este proceso se ejecuta en base al ajuste por el método polinómico de segundo grado, y su resolución es fundamentada en la aplicación de mínimos cuadrados, ya que separa aquellos puntos que aportan con el mayor error de ajuste (Peguero, 2012).

- Corrección radiométrica

Consiste en eliminar las distorsiones que se producen por efectos de la iluminación del sol, cambios estacionales, falla del sensor ya sea por ruido o el sistema e influencia de la radiación en el terreno (Peguero, 2012). Las correcciones radiométricas convierten, los niveles digitales de la imagen original, a valores de radiancia y posteriormente genera valores de reflectancia aparente para los datos de bandas multiespectrales y térmicas (Álvarez & Padilla, 2016). Es importante conocer que en los productos de Landsat 8 se pueden hallar datos tanto del dispositivo OLI y TRIS en formato

de 16 bits; de este modo permite escalar valores de radiancia manipulando la información que se puede obtener de los metadatos (Ariza, 2013), aplicando la ecuación (1).

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{CAL} + A_L \quad (1)$$

Donde:

L_{λ} = Valor de radiancia espectral (TOA) (Watts/m²*srad* μ m)

M_L = Valor multiplicativo, obtenido de los metadatos, x que es el número de banda, (RADIANCE_MULT_BAND_x)

Q_{CAL} = Valor estándar de cada banda o nivel digital de cada banda

A_L = Valor de adición, obtenido en los metadatos, x es el número de banda (RADIANCE_ADD_BAND_x)

El cálculo de la reflectancia real de una cubierta captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación. De esta manera la reflectancia en el techo de la atmosfera TOA con la corrección por ángulo solar se calcula aplicando la ecuación (2).

$$\rho\lambda' = \frac{M_{\rho} * Q_{CAL} + A_{\rho}}{\sin(\theta_{SE})} \quad (2)$$

Donde:

$\rho\lambda'$ = Valor de reflectancia TOA con corrección por ángulo solar

M_{ρ} = Valor multiplicativo de cada banda, se encuentra en los metadatos (REFLECTANCE_MULT_BAND_x)

Q_{CAL} = Valor estándar de cada banda o nivel digital de cada banda.

A_{ρ} = Valor aditivo de cada banda, se encuentra en los metadatos (REFLECTANCE_ADD_BAND_x)

θ_{SE} = Ángulo solar de elevación, provisto en el metadato de la imagen (SUN_ELEVATION).

- Corrección atmosférica en bandas multiespectrales

La corrección atmosférica evalúa y descarta las distorsiones que son generadas por la atmósfera, en los valores de radiancia que llegan al sensor

(Álvarez & Padilla, 2016). Su aplicación es importante en superficies que tienen una baja reflectancia, por ende es importante llevar a cabo una buena corrección atmosférica en coberturas terrestres cambiantes (Peguero, 2012). Por lo tanto existen diversos métodos que se aplicaban para este tipo de corrección, como son: EL (Empirical Line), QUAC (Quick Atmospheric Correction), 6SV (Second Simulation of a Satellite in the Solar Spectrum Vector code), FLAASH (Fast line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) y DOS (Dark Object Subtraction).

Uno de los métodos más utilizados en Latinoamérica y propuesto por (Chávez, 1996), es el método “DOS (Dark Object Subtraction)” el cual se basa en el principio de comparación entre la radiación de la atmósfera y la reflectancia más baja de la superficie terrestre (Mandanici , Franci, & Bitelli, 2015). El método de sustracción de píxeles oscuros es simple ya que no requiere de información sobre las condiciones atmosféricas del terreno (Sendra, Camacho, Sanchez, Jiménez, & Gracia, 2015), por ello se asume que aquellos píxeles con reflectividad baja debe ser nula. Las imágenes obtenidas por el sensor de Landsat 8 utilizan una corrección similar a la del método DOS llamada L8SR (Landsat 8 Surface Reflectance) (Sendra, Camacho, Sanchez, Jiménez, & Gracia, 2015). Este método resta los valores mínimos del histograma de cada banda mediante la ecuación (3) (Álvarez & Padilla, 2016):

$$R_{atm\ i,j,k} = \rho TOA_{i,j,k} - \rho TOA_{min,k} \quad (3)$$

Donde:

$\rho TOA_{i,j,k}$ = Valor de reflectancia aparente de cada píxel, obtenido con la ecuación (2).

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

- Corrección atmosférica en bandas termales

Es utilizada para remover las distorsiones generadas por la atmósfera en la región termal, con el uso adecuado de esta corrección se puede estimar la transmisión y resplandor de la radiación que proviene de la superficie (Barsi,

Schott, Palluconi, & Hook, 2005). Su aplicación para imágenes Landsat consiente en utilizar los valores de radiancia, radiancia ascendente y descendente, transmitancia y emisividad mismas que se las puede encontrar en la página de las NASA¹. Para realizar la corrección atmosférica de bandas térmicas se debe considerar los metadatos de las imágenes y posteriormente aplicar la ecuación (4) (Álvarez & Padilla, 2016).

$$L_{TOA} = \tau * \varepsilon * L_{\lambda} + L_{\uparrow} + \tau(1 - \varepsilon) * L_{\downarrow} \quad (4)$$

Donde:

L_{λ} = Valor de Radiancia de las bandas térmicas

L_{\uparrow} = Valor de la radiancia ascendente

L_{\downarrow} = Valor de la radiancia descendente

τ = Transmitancia

ε = Emisividad

Un nivel más avanzado para el tratamiento digital de imágenes, incluye los diferentes usos que se le puede dar a las mismas, hoy en día existen diversas aplicaciones como: clasificación digital supervisado y no supervisado, algoritmos de transformación e índices ambientales (Chuvieco, 2008).

2.1.1.5.5. Índices ambientales

La creación de políticas públicas para prevenir y mitigar los problemas ambientales, demanda hoy en día de la mayor cantidad de información, por lo que el uso de los sensores remotos se convierte en un herramienta para obtener un índice de calidad ambiental urbano a partir de imágenes satelitales (Santana, Escobar, & Capote, 2010). A si mismos los índices ambientales son generados a partir del procesamiento digital de imágenes y el uso de las combinaciones de sus bandas, esto ayuda a identificar parámetros importantes del territorio, específicamente algunos de ellos se describirán a continuación:

¹ <http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>.

- Índice normalizado de vegetación (NDVI)

El índice normalizado diferencial de vegetación, representa un indicador de la salud vegetal y consiste en estudiar de manera versátil, los valores estimados de la cubierta vegetal y la dinámica de la cobertura terrestre, por lo tanto aplica la ecuación (5, utilizando las bandas de espectro electromagnético (Chuvieco, 2008).

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (5)$$

Donde:

NIR = Infrarrojo cercano de la banda 5 en Landsat 8.

VIS = Rojo visible de la banda 4 en Landsat 8.

- Proporción de vegetación (PV)

Llamado también fracción de vegetación, es aquella que varía según el clima y el uso del suelo; para estimar este parámetro se utiliza el índice de normalización máximo y mínimo aplicando la ecuación(6 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** propuesta por Carlson & Ripley (1997) citado en (Sobrino, Raissouni, & Li, 2001).

$$PV = \left[\frac{NDVI - NDVI_{mín}}{NDVI_{máx} - NDVI_{mín}} \right]^2 \quad (6)$$

Donde:

NDVI_{máx} = Valor de NDVI máximo para la vegetación de mayor verdor.

NDVI_{mín} = Valor de NDVI mínimo presente en suelo desnudo.

- Temperatura de brillo (TB)

Se obtiene a partir de la radiancia espectral a nivel de sensor, se encuentra en grados kelvin y se deben aplicar las constantes térmicas que se obtiene del archivo de metadatos de las imágenes satelitales y finalmente se emplea la siguiente ecuación (7 propuesta por Landsat Project Science Office (2008) citado en (Weng, Lu, & Schubring, 2004).

$$TB = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (7)$$

Donde:

K_1 y K_2 = Constantes de calibración depende del satélite se encuentra en los metadatos de la imagen.

L_λ = Valor de radiancia (bandas con corrección radiométrica).

- Emisividad de la superficie terrestre (LSE)

Requiere convertir la temperatura de brillo en temperatura cinética de superficie, para ello toma en cuenta la proporción y la emisividad de la vegetación y del suelo, esto no se puede obtener directamente de los datos de las imágenes sin utilizar otras bandas espectrales o datos auxiliares (Santana, Escobar, & Capote, 2010). El algoritmo que se usa para estimar la emisividad de superficie, propuesto por Sobrino et al. (1990) y citado en (Sobrino, Raissouni, & Li, 2001), se muestra en la ecuación (8).

$$LSE = P_V \varepsilon_V + (1 - P_V) \varepsilon_s \quad (8)$$

Donde:

P_V = Proporción de vegetación.

ε_V = Emisividad de la vegetación (0,985).

ε_s = Emisividad del suelo (0,978).

- Temperatura superficial de la tierra (LST)

Para obtener la temperatura superficial de la Tierra es importante convertir la radiancia espectral a nivel de sensor, utilizando la temperatura de brillo y la emisividad de la tierra; finalmente se calcula utilizando la ecuación (9; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, propuesta por Artis y Carnaham (1982) citado en (Weng, Lu, & Schubring, 2004).

$$LST = \frac{T_B}{1 + \left(\lambda * \frac{T_B}{\rho}\right) * \ln(LSE)} \quad (9)$$

Donde:

λ = longitud de onda medida de la banda termal considerada.

T_B = Temperatura de Brillo.

LSE = Emisividad de la superficie terrestre.

$\rho = 13.608,69565 \mu\text{m}^*\text{K}$, se obtiene de la ecuación (10):

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} \quad (10)$$

Donde:

h = Constante de Planck ($6,626*10^{-34}\text{Js}$)

c = Velocidad de la luz ($3*10^8 \text{ m/s}$)

σ = Constante de Boltzman ($1,38*10^{-23} \text{ J/K}$)

2.1.2. Contaminación ambiental

Se denomina contaminación ambiental al cambio dañino o perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas en el agua, suelo y aire, que modifican las condiciones en el ambiente y puede afectar la calidad de vida en la tierra (Atilio, 2013).

2.1.2.1. Contaminación del aire

Se entiende por contaminación atmosférica de sustancias que alteran la calidad del aire, de modo que implica un riesgo para el bienestar humano, para es de vital importancia conocer ciertas consideraciones (Carnicer, 2007). Dicho de otro modo es la presencia de sustancias en la atmósfera que resultan de procesos humanos o naturales que al unirse por un determinado periodo de tiempo pueden obstaculizar el bienestar y salud de los seres humanos (Secretaría del Ambiente, 2011).

2.1.2.1.1. Contaminantes criterio del aire

Es cualquier contaminante que se encuentra presente en el aire, afecta a personas, animales y vegetación, estos son perjudiciales en altas concentraciones. (Secretaría del Ambiente, 2011). Actualmente el Ecuador cuenta con normas en dónde se detalla los valores máximos de concentración permitida a nivel de suelo en el aire ambiente (Secretaría del Ambiente, 2017).

Los contaminantes criterio pueden ser de tipo primario o secundario, sin embargo, ambos dependen de la interacción de diversos efectos que se producen en la atmósfera.

- Contaminantes Primarios

Se generan por alguna fuente de emisión directa como automotores, chimeneas, este grupo de contaminantes incluye (Secretaría del Ambiente, 2016):

- Dióxido de Azufre (SO_2): Se caracteriza por ser un gas de olor fuerte e incoloro, proveniente de procesos de combustión, fertilizantes, termoeléctricas e industrias, a elevadas concentraciones pueden causar daños a la salud humana generando problemas respiratorios.
- Dióxido de Nitrógeno (NO_2): Por lo general se presenta en el aire como un gas de olor fuerte y color rojo, es producto de la combustión vehicular y causa alteraciones principalmente a la salud pública.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Surge al reaccionar el monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno, provenientes del incremento del tráfico vehicular. Así también, los NO_x se generan por el uso de fertilizantes, calderas y explosivos, mientras que el NO se oxida en el ambiente y produce NO_2 que es el causante del smog fotoquímico.
- Monóxido de carbono (CO): Este contaminante es el más abundante en la capa inferior de la atmósfera, se produce por el aumento del parque automotor especialmente aquellos que funcionan a gasolina. Las concentraciones de este contaminante se elevan en los meses en que la temperatura es relativamente baja (Secretaría del Ambiente, 2016).

- Partículas (PM): Las partículas corresponden al material absorbido por el olfato en forma de polvo, hollín, ceniza entre otros; estas se dividen de acuerdo al tamaño: PM10 o partículas con diámetro igual o menor a 10 μm , y PM2,5, absorbidas con mayor frecuencia por el ser humano al ser partículas con un diámetro de 2,5 μm (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, 2013).
- Contaminantes Secundarios
Son el resultado de las reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios, destacándose:
 - Ozono (O_3): El ozono es parte fundamental de la atmósfera, no obstante a baja altura se produce el llamado ozono troposférico que se caracteriza por ser oxidante, tóxico y agresivo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, 2013). Se forma por reacciones químicas en el aire entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno, que se producen por la influencia de la luz solar (Secretaría del Ambiente, 2014).
 - Lluvia ácida: Es producto de la acumulación de ácidos que chocan en la atmósfera y posteriormente se precipitan en la Tierra en forma de lluvia o neblina meteorológicas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, 2013).

2.1.2.2. Factores que intervienen en la contaminación del aire

El resultado de la contaminación ambiental, se produce por las combinaciones de factores como eventos meteorológicos, características geográficas y fuentes de emisión las cuales tienen un efecto cíclico y producen cambios en la composición del aire (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, 2013).

2.1.2.2.1. Eventos Meteorológicos

Los eventos meteorológicos son fenómenos naturales que generan cambios por sí solos, se crean por procesos de transformación y movimiento de la naturaleza

(Programa Regional de Meteorología - IANIGLA, 2014). Según, el INAMHI (2010) son los siguientes:

- Presión atmosférica: Es el peso del aire que no solo se produce de arriba hacia abajo si no se produce en todas las direcciones.
- Humedad: Se denomina a la cierta cantidad de vapor de agua o el grado de saturación de humedad que se encuentra presente en el contenido del vapor de agua en el aire.
- Precipitación: Radica en la caída de lluvia, llovizna, nieve, granizo, entre otros desde las nubes hasta la cobertura terrestre.
- Viento: Los movimientos que se generan por el calentamiento de la superficie terrestre y las diferentes presiones se denomina viento.
- Radiación solar: Es la transmisión de energía por ondas electromagnéticas que emite el sol y se produce en todas las direcciones en espacio y tiempo en la superficie terrestre.

2.1.2.3. Parámetros de la calidad del aire

Dentro de la los parámetros existen entidades que regulan, determinan y estudian la calidad del aire en el cantón, siendo parte de la norma de calidad aire ambiente ecuatoriana (NECA), la red metropolitana de monitoreo atmosférico (REMMAQ) y el índice quiteño de la calidad aire (IQCA), mismos que se describirán a continuación.

2.1.2.3.1. Norma ecuatoriana de calidad del aire ambiente (NECA)

La organización mundial de la salud implanta en cada país normas sobre la calidad del aire en el ambiente con el fin de proteger la salud pública de cada país. En base a este criterio el ente evaluador y jurídico para valorar la contaminación atmosféricas se denomina (NECA) (Secretaría del Ambiente, 2016). Su objetivo es preservar la calidad ambiente y con ello el bienestar de los ecosistemas, para lo cual se basa en el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria Libro VI De la Calidad Ambiental, Anexo 4, cuya versión vigente se publicó en el Registro Oficial No. 464 del 7 de junio del 2011 (Secretaría del Ambiente, 2016), y que mediante Acuerdo Ministerial N°028

publicado en la Edición Especial N°270 del Registro Oficial de 13 de febrero de 2015, se sustituye el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente, 2015).

La norma implanta diferentes parámetros para su uso como son: objetivos de calidad del aire ambiente, límites permisibles de los contaminantes criterios y contaminantes no convencionales del aire ambiente y métodos y procedimientos, mismos que sirven para la medir y estimar los contaminantes en el aire ambiente (Secretaría del Ambiente, 2016). Los contaminantes criterios que se consideran dentro de esta norma son: partículas sedimentables, material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (PM10) y menor a 2,5 micrones (PM2,5), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO) y ozono (O₃) (Secretaría del Ambiente, 2016).

2.1.2.3.2. Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito

La Secretaría de Ambiente a través de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) da a conocer a las autoridades competentes y a la comunidad, información confiable sobre la calidad del aire ambiente de Quito (Alcaldía del Quito - Secretaría del Ambiente, 2016).

Esta red incluye nueve estaciones remotas de monitoreo (ver Figura 8) con la capacidad de analizar continua y automáticamente los contaminantes más comunes en el aire, como son: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO, NO₂ y NOX), ozono (O₃) y material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones (PM10) y menor a 2,5 micrones (PM2,5) (Alcaldía del Quito - Secretaría del Ambiente, 2016).




Figura 8. Estación de Jipijapa

Asimismo, existen seis estaciones meteorológicas instaladas sobre el techo de las estaciones de monitoreo miden velocidad y dirección del viento (MetOne), humedad (Thies), radiación solar (Kipp & Zonen), temperatura (Thies), presión (Vaisala) y precipitación (Thies). Por otro lado, la REMMAQ también cuenta con equipos de laboratorio y un centro de control con capacidad para recibir, almacenar y procesar la información generada por las estaciones de monitoreo (Secretaría del Ambiente, 2017). Estas estaciones se encuentran distribuidas dentro del Distrito Metropolitano de Quito y se las detalla en la Tabla 5.

Tabla 5
Ubicación de las estaciones de la REMMAQ

| ESTACIÓN | CÓDIGO | DIRECCIÓN |
|------------|--------|---|
| Cotocollao | 277 | Museo Cotocollao (Santa Teresa #70-121 entre Ignacio Loyola y Alfonso del Hierro) |
| Carapungo | 2851 | Edificio Andinatel Carapungo (Super Manzana B, el Verjel S/N) |
| Belisario | 2835 | Terraza del Edificio Administrativo del Colegio San Gabriel (Av. América 3541) |
| Jipijapa | 2781 | Patio de la Dirección Metropolitana Ambiental (Río Coca 1731 e Isla Fernandina) |
| El Camal | 2840 | Terraza del Hosp. Patronato Municipal San José del Sur (Adrián Navarro 1660 e Hinostroza) |

Continua 

| | | |
|-------------|------|--|
| Centro | 2820 | Terraza de la Radio Municipal (ex Hogar Javier, García Moreno 751 y Sucre) |
| Guamaní | 2887 | Tumbaco |
| Tumbaco | 2331 | Terraza de Andinatel (Gaspar de Carvajal) |
| Los Chillos | 2453 | Terraza de Andinatel (Av. Ilaló, Vía a El Tingo) |

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2017)

2.1.2.3.3. Índice quiteño de la calidad aire (IQCA)

La medición de concentraciones de contaminantes que afectan directamente al aire son elaboradas y analizadas por estaciones remotas automáticas y posteriormente se convierten en IQCA, utilizando los parámetros que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6
Límites numéricos de cada categoría del IQCA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

| RANGO | CATEGORÍA | CO ^a | O ₃ ^b | NO ₂ ^c | SO ₂ ^d | PM _{2.5} ^e | PM ₁₀ ^f | COLOR |
|---------|---------------------|-----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|
| 0-50 | Nivel deseable | 0-5000 | 0-50 | 0-100 | 0-62,5 | 0-25 | 0-50 | Blanco |
| 51-100 | Nivel aceptable | 5001-10000 | 51-100 | 101-200 | 63,5-125 | 26-50 | 51-100 | Verde |
| 101-200 | Nivel de precaución | 10001-15000 | 101-200 | 201-1000 | 126-200 | 51-150 | 101-250 | Gris |
| 201-300 | Nivel de alerta | 15001-30000 | 201-400 | 1001-2000 | 201-1000 | 151-250 | 251-400 | Amarillo |
| 301-400 | Nivel de alarma | 30001-40000 | 401-600 | 2001-3000 | 1001-1800 | 251-350 | 401-500 | Naranja |
| 401-500 | Nivel de emergencia | >40000 | >600 | >3000 | >1800 | >350 | >500 | Rojo |

^a: concentración máxima promedio en 8 horas; ^b: concentración máxima promedio de 8 horas; ^c: concentración máxima en 1 hora; ^d: concentración promedio en 24 horas; ^e: concentración promedio en 24 horas; ^f: concentración promedio en 24 horas.

Fuente: (Secretaría del Ambiente, 2016)

2.1.3. Análisis estadístico

Dentro de los primeros procedimientos estadísticos que debe realizar el investigador, es la descripción e identificación de los datos, por ello existen diferentes formas para el tratamiento y manipulación de información, con el fin de que sea veraz y comprobada (Castañeda, Cabrera, & Navarro, 2010).

2.1.3.1. Análisis multivariado

Es el conjunto de métodos estadísticos y matemáticos que consienten en representar y explicar aquellos datos procedentes de observaciones estadísticas (Cuadras, 2014). La información estadística que proviene de este tipo de análisis tiene carácter multidimensional por lo tanto utiliza técnicas de geometría, cálculo matricial y distribuciones multivariable (Cuadras, 2014). En esencia estudia las variables de manera simultánea, es decir al escoger un objeto no solo se toma en cuenta un aspecto si no el compendio de todas sus cualidades y las relaciona entre sí (Marín, 2010). Es preciso mencionar que dentro de este tipo de análisis es común enfrentarse con modelos, dónde las variables independientes son mayores en número que las muestras que se analiza por ello existen diferentes técnicas multivariantes que son aplicativas para cualquier tipo de estudio de variables dependientes e independientes (Alciaturi, Escobar, De La Cruz, & Rincón, 2003).

2.1.3.2. Técnicas multivariantes

Para asociar diferentes variables entre sí, existen métodos dependientes e interdependientes que permiten analizar variables de forma predictiva y estos son (Marín, 2010):

2.1.3.2.1. Métodos dependientes

Explican la variable que se considera independiente mediante la relación de diversas variables independientes o explicativas, existen diferentes métodos como (Marín, 2010):

- Regresión múltiple
- Análisis discriminante
- Métodos log – lineales
- Análisis de correlación canónica
- Análisis multivariante de varianza

2.1.3.2.2. Métodos interdependientes

Son aquellos que no distinguen variables dependientes e independientes, pero su objetivo fundamental es identificar cuáles de ellas se relacionan entre sí, existen diferentes métodos como (Marín, 2010):

- Análisis de componentes principales
- Análisis factorial
- Multidimensional scaling
- Análisis de correspondencias
- Análisis de cluster

2.1.3.3. Mínimos cuadrados parciales (PLS)

El enfoque por mínimos cuadrados parciales o partial least squares (PLS), por sus siglas en inglés, es una técnica multivariante utilizada para resolver el problema de multicolinealidad y aquel que surge cuando el número de observaciones es menor que el número de variables predictoras (Espejo, 2017).

Es el conjunto de dos técnicas multivariadas que combinan la regresión múltiple y el análisis de componentes (Marín, 2010). El sistema del PLS depende de un número pequeño de variables latentes, ya que son estimadas mediante combinaciones lineales (Valdéz, 2010); según Aparicio (2011) citado en (Olague, 2015) se deben identificar los componentes principales de las variables independientes para explicar una variable dependiente. Este modelo se desenvuelve con dos tipos de variables las dependientes (y) e interdependientes (X), para ello se utiliza el concepto del modelo lineal como se muestra en ecuación (11) y un sistema ortogonal para una variable dependiente (Valdéz, 2010). Existen dos tipos de matrices que puede explicar el modelo, la primera donde X es una matriz “alta” y “delgada”, por lo general en este tipo de aplicación solo existe una única solución con $e \neq 0$; y la segunda una matriz X que es “baja” y “gruesa”, donde existen infinitas soluciones con $e = 0$ (ver Figura 9).

$$y = X\beta + e \quad (11)$$

Donde:

y = Variable dependiente

X = Variable independiente

β = Vector solución

e = Error o residual

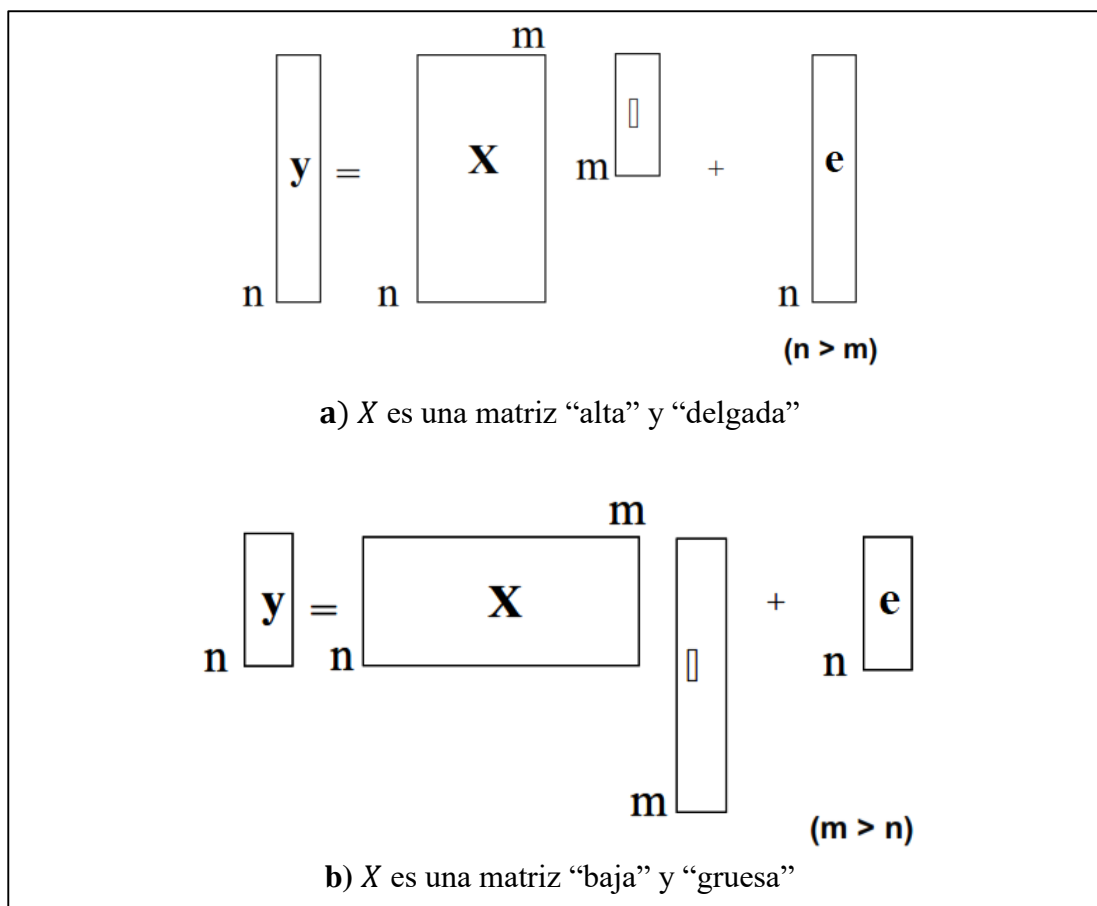


Figura 9. Representación gráfica de la ecuación (11)

Dentro de este modelo existen dos tipos de PLS, el primero considera una variable dependiente y esta se representa en forma de un vector, mientras que el segundo toma diversas variables dependientes y se representan por una matriz. Ambos métodos dependen de un número pequeño de componentes principales (Valdéz, 2010), la representación matemática de este modelo se encuentra en las ecuaciones (12 y 13).

$$x = TP^T + E \quad (12)$$

$$y = UQ^T + F \quad (13)$$

Donde:

x = Matriz de predicción

y = Matriz de respuestas

T y U = Matrices de puntuaciones o “scores”

P^T y Q^T = Matrices ortogonales de cargas o “loadings”

E y F = Representa un grado de error

En la ecuación (12), es posible representar una matriz que se encuentra dentro de un cierto error producto de la matriz T , la cual cuenta con un número menor de columnas. Este modelo se desarrolla de modo que las primeras variables latentes son de mayor significancia para poder explicar el vector y , este valor explica el modelo dentro de un error máximo permisible. (Alciaturi, Escobar, De La Cruz, & Rincón, 2003), como se muestra en la Figura 10.

El diagrama muestra la descomposición de la matriz X (de tamaño $n \times m$) en la suma de productos de matrices de puntuaciones T (de tamaño $n \times a$) y matrices de cargas P^T (de tamaño $a \times m$), más una matriz de error E (de tamaño $n \times m$). La matriz T se descompone en columnas individuales t_1, t_2, \dots, t_a , cada una de tamaño $n \times 1$. Cada columna t_i se multiplica por una fila correspondiente de la matriz P^T , denotada como p_i^T (de tamaño $1 \times m$). La ecuación se muestra en tres líneas, con una línea de puntos indicando que hay más términos en la suma.

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} m \\ \boxed{X} \\ n \end{matrix} &= \begin{matrix} a \\ \boxed{T} \\ n \end{matrix} \begin{matrix} m \\ \boxed{P^T} \\ a \end{matrix} + \begin{matrix} m \\ \boxed{E} \\ n \end{matrix} \\
 &= \begin{matrix} \boxed{t_1} \\ n \end{matrix} \begin{matrix} m \\ \boxed{p_1^T} \\ 1 \end{matrix} + \begin{matrix} \boxed{t_2} \\ n \end{matrix} \begin{matrix} m \\ \boxed{p_2^T} \\ 1 \end{matrix} \\
 &+ \dots + \begin{matrix} \boxed{t_a} \\ n \end{matrix} \begin{matrix} m \\ \boxed{p_a^T} \\ 1 \end{matrix} + \begin{matrix} m \\ \boxed{E} \\ n \end{matrix}
 \end{aligned}$$

* La matriz T contiene un número a de scores, con $a < m$.

Figura 10. Matriz X es descompuesta en “scores” (t) y “loadings” (p).

Los vectores w^T , p^T , y b son necesarios para predecir la propiedad dependiente y para un nuevo conjunto de muestras. En ese caso, se determina experimentalmente X y se calcula (utilizando los vectores w' y p') la matriz T (Alciaturi, Escobar, De La Cruz, & Rincón, 2003), como muestra la ecuación (14; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). El vector y es estimado usando los coeficientes b previamente calculados durante la calibración (Alciaturi, Escobar, De La Cruz, & Rincón, 2003):

$$y = Tb + e \quad (14)$$

Los vectores y matrices calculados por este algoritmo tienen las siguientes propiedades:

- t o “scores” son vectores ortogonales entre sí
- w^T o “weights” son ortogonales entre sí.
- El residual e es ortogonal a los t previos.
- El número máximo de variables latentes no excede el rango de la matriz X

2.2. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL

- Sensores Remotos: Instrumento apto para captar información de un objeto sin estar en contacto con él (FAO, 2009).
- Landsat 8 OLI/TIRS: Satélite de observación terrestre proveniente de Estados Unidos, adoptó nuevas mejoras como nuevas bandas espectrales y dos bandas térmicas (Roy, Wulder, Loveland, Woodcock, & Allen, 2014).
- Imágenes satelitales: Producto generado por el sensor que se encuentra a bordo del satélite artificial a través de energía electromagnética del terreno (León, 2002).
- Contaminación del aire: Composición de sustancias sólidas y gaseosas presentes en el aire, producto y procesos humanas y naturales (Ministerio del Ambiente, 2012).
- Ozono troposférico: Gas incoloro y muy irritante creado por reacciones fotoquímicas entre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (Commission for environmental cooperation - CEC, 2016).
- Red de Monitoreo Atmosférico de Quito: Produce datos confiables sobre la concentración de contaminantes atmosféricos a través de estaciones automatizadas que se encuentran en el territorio del Distrito Metropolitano de Quito (Secretaria del Ambiente, 2017).
- Análisis multivariado: Conjunto de métodos estadísticos en donde se analiza paralelamente arreglos de datos multivariantes de modo que exista variabilidad de observaciones medidas para cada objeto en estudio (Salvador, 2000).
- Mínimos cuadrados parciales: Método estadístico que utiliza la regresión de componentes principales a través de matrices ortogonales, encontrando en un nuevo espacio en proyecciones tanto para variables predichas y observadas (Gaviria, Raúl, & Puerta, 2016).

2.3. FUNDAMENTO LEGAL

El marco normativo a nivel nacional aplicable a la gestión del aire cuenta con fundamento en normas legales, orgánicas y ordinarias; así como normas secundarias (reglamentos, acuerdos, etc.) que regulan la gestión del aire, y que se mencionan a continuación utilizando el modelo jurídico de (Kelsen, 1942):

La Asamblea Nacional del Ecuador (2008), creó la Constitución de la República del Ecuador del mismo año, en la cual el presente estudio se basó en el Título II que se refiere a los Derechos del buen vivir – Sección Segunda: Ambiente Sano, en los artículos 14 y 15 menciona.

- Art. 14
Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay* y se declara la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008)
- Art. 15
El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008)
A su vez se prohíbe el desarrollo, producción, tenencia, comercialización, importación, transporte, almacenamiento y uso de armas químicas, biológicas y nucleares, de contaminantes orgánicos persistentes altamente tóxicos, agroquímicos internacionalmente prohibidos, y las tecnologías y agentes biológicos experimentales nocivos y organismos genéticamente modificados perjudiciales para la salud humana o que atenten contra la soberanía alimentaria o los ecosistemas, así como la introducción de residuos nucleares y desechos tóxicos al territorio nacional”. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

Posteriormente el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, cuenta con 17 objetivos basados en los logros de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, e incluyen nuevas esferas como el cambio climático, la desigualdad económica, la innovación, el consumo sostenible y la paz y la justicia, entre otras prioridades (Organización de Naciones Unidas - ONU, 2015). El objetivo número 12 busca reducir la huella ecológica mediante un cambio en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos, e indica lo siguiente:

- **Objetivo 12. Producción y consumo responsables**

Para lograr crecimiento económico y desarrollo sostenible, es urgente reducir la huella ecológica mediante un cambio en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos. La agricultura es el principal consumidor de agua en el mundo y el riego representa hoy casi el 70 por ciento de toda el agua dulce disponible para el consumo humano. (Organización de Naciones Unidas - ONU, 2015)

La gestión eficiente de los recursos naturales compartidos y la forma en que se eliminan los desechos tóxicos y los contaminantes son vitales para lograr este objetivo. También es importante instar a las industrias, los negocios y los consumidores a reciclar y reducir los desechos, como asimismo apoyar a los países en desarrollo a avanzar hacia patrones sostenibles de consumo para 2030. (Organización de Naciones Unidas - ONU, 2015).

Con el afán de implementar políticas públicas se creó el Plan Nacional de la Calidad de Aire que se define como uno de sus objetivos específicos el mantener las concentraciones promedio anuales de contaminantes del aire bajo los estándares permisibles, para lo cual es necesario formular investigaciones sobre la distribución espacial y densidad de contaminantes primarios y secundarios del aire y sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud de las personas (Ministerio del Ambiente, 2010). El PNCA consta de tres programas con sus respectivos proyectos de los cuales se detallarán los siguientes.

- Programa 1: Control y vigilancia de la calidad del aire - Proyecto 5: Modelos preventivos de calidad del aire.

Los modelos predictivos tienen como fin simular el comportamiento de los contaminantes primarios y secundarios formados en la atmósfera lo que permitirá estimar futuras concentraciones de contaminantes que permitirán a las entidades encargadas establecer estrategias efectivas para reducir la contaminación del aire. (Ministerio del Ambiente, 2010)

- Programa 2: Mejoramiento de la calidad del aire y prevención de su deterioro - Proyecto 6: Competencias sobre la gestión del recurso aire.

Este proyecto permitirá el fortalecimiento del rol que desempeña el Ministerio del Ambiente y otras autoridades ambientales, minimizando los conflictos de competencia que afectan la aplicación del marco normativo sobre la gestión del recurso aire. (Ministerio del Ambiente, 2010)

- Programa 3: Medidas a ser aplicadas durante los estados de alerta - Proyecto 12: Implementación de planes de contingencia ante episodios críticos de contaminación del aire.

El desarrollo de planes de contingencia están destinados a ser aplicados para poder minimizar el impacto en la seguridad, salud y bienestar de la población ante casos de episodios críticos de contaminación del aire, como son las altas concentraciones de contaminantes comunes del aire de origen antrópico u otras de origen natural. (Ministerio del Ambiente, 2010)

A demás la Ley de Gestión Ambiental Establece los principios y directrices de política ambiental; determina las obligaciones, responsabilidades, niveles de participación de los sectores público y privado en la gestión ambiental y señala los límites permisibles, controles y sanciones en esta materia (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008).

Es así que dentro del Título III: Instrumentos de Gestión Ambiental se definen las directrices para la evaluación de impactos ambientales y control de los mismos, los instrumentos de aplicación de normas ambientales y de la protección de los derechos ambientales. Específicamente los artículos 39 y 40 indican lo siguiente:

- Art. 39

Las instituciones encargadas de la administración de los recursos naturales, control de la contaminación ambiental y protección del medio ambiente, establecerán con participación social, programas de monitoreo del estado ambiental en las áreas de su competencia; esos datos serán remitidos al Ministerio del ramo para su sistematización; tal información será pública. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008)

- Art. 40

Toda persona natural o jurídica que, en el curso de sus actividades empresariales o industriales estableciere que las mismas pueden producir o están produciendo daños ambientales a los ecosistemas, está obligada a informar sobre ello al Ministerio del ramo o a las instituciones del régimen seccional autónomo. En caso de incumplimiento de la presente disposición, el infractor será sancionado con una multa de veinte a doscientos salarios mínimos vitales generales. (Asamblea Nacional del Ecuador, 2008)

Finalmente, la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire incluida en el Libro VI – Anexo 4 del TULSMA, tiene como objetivo principal preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general (Ministerio del Ambiente, 2015). Dentro de los requisitos de la norma, en el numeral 4.1.1 De los contaminantes del aire ambiente y 4.1.1.1 para efectos de esta norma se establecen como contaminantes criterio del aire los siguientes (Ministerio del Ambiente, 2015):

- Partículas sedimentables
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 micrones PM10
- Material particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 micrones PM2,5
- Dióxido de nitrógeno NO₂
- Dióxido de azufre SO₂
- Monóxido de carbono CO
- Ozono O₃.

2.4. SISTEMA DE VARIABLES

2.4.1. Variables Independientes

Al construir el modelo de PLS para el presente estudio se consideró como variables independientes a los contaminantes criterio tales como: dióxido de nitrógeno NO₂, dióxido de azufre SO₂, monóxido de carbono CO, monóxido de nitrógeno, material particulado PM_{2,5} ; además tomó en cuenta variables meteorológicas como: humedad relativa, radiación solar y temperatura media y finalmente datos provenientes del procesamiento de las imágenes satelitales como: índice normalizado de vegetación, proporción de la vegetación, temperatura de brillo, emisividad de la superficie terrestre y radiancia de las bandas multiespectrales corregidas (ver Anexo 1).

2.4.2. Variable Dependiente

Se consideró como variable dependiente al contaminante ozono troposférico, con el fin de conocer su dispersión espacial dentro del cantón Quito (ver Anexo 1).

CAPITULO III

3.1. Modalidad de investigación

El presente estudio de carácter experimental, se desarrolló con el fin de validar una nueva metodología que permita determinar la concentración de O_3 en las parroquias urbanas del cantón Quito, a partir de una matriz de regresión de mínimos cuadrados parciales, construida con valores de índices ambientales, temperatura superficial de la tierra, datos de bandas térmicas y las concentraciones de otros contaminantes y variables meteorológicas registrados en las estaciones de la REMMAQ.

La metodología aplicada dentro del proyecto (ver Figura 11) se basó en el método definido por (Álvarez & Padilla, 2016), donde se efectuó la corrección atmosférica de cada una de las imágenes satelitales. Aquí se muestra, en forma secuencial, cada uno de los procesos desarrollados para obtener la concentración estimada de ozono troposférico (O_3) y validarla mediante la comparación con los datos obtenidos en campo mediante las estaciones de la REMMAQ, que se encuentran distribuidas a lo largo del Distrito Metropolitano de Quito.

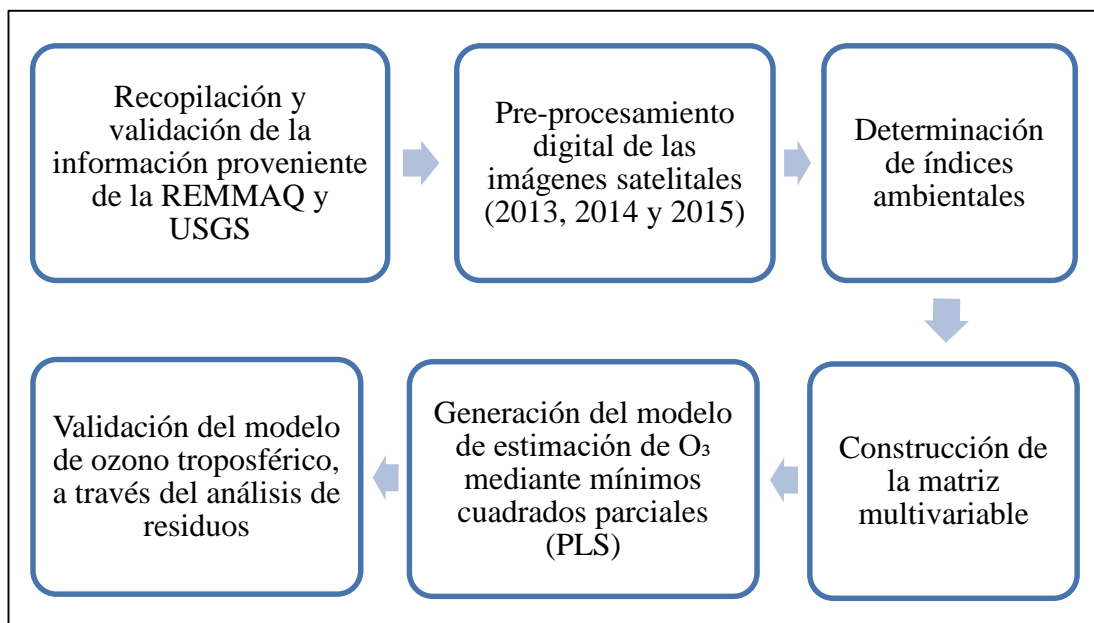


Figura 11. Esquema metodológico aplicado

3.1.1. Software empleado

Dentro del proyecto se utilizó el software ENVI 5.1 para realizar el pre-procesamiento de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI-TIRS; también se empleó el software ArcGIS 10.1 para obtener los valores de los índices ambientales, contaminantes y variables meteorológicas, en puntos distribuidos dentro del área de estudio. Para el análisis estadístico de los datos de concentración de los contaminantes y variables meteorológicas, obtenidos de las estaciones de monitoreo continuo, así como para la generación y validación de los modelos, se utilizó el software R versión 3.4.2. Las licencias necesarias en los programas ENVI 5.1 y ArcGIS 10.1 pertenecen a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

3.2. Recopilación y validación de los datos

Para definir la época adecuada de las imágenes Landsat 8 que se utilizaron dentro del proyecto, se realizó un análisis previo de los datos existentes desde el año 2013 hasta el año 2015 en cada una de las estaciones de la REMMAQ (ver Anexo 2). Cabe mencionar que la estación de Jipijapa es utilizada como un respaldo del resto de estaciones, por lo que la toma de datos de la misma es esporádica y no es de libre acceso.

Debido a que, en las estaciones de Tumbaco, Guamaní y Centro no se registraron datos de concentración de los contaminantes ni de las variables meteorológicas en su totalidad (ver Anexo 2), se decidió eliminar dichas estaciones y tomar en cuenta solamente aquellas que presentaron una lectura continua. Al no registrarse datos de las magnitudes analizadas en la estación de El Camal, desde el 21 de septiembre de 2014, se determinó que la temporalidad de las imágenes satelitales debía encontrarse dentro de los meses de enero a julio. Finalmente, se encontraron cuatro estaciones de monitoreo para los años 2013 y 2015, y cinco estaciones para el 2014, cuya lectura de datos de contaminantes y variables meteorológicas coincidió con la temporalidad de las imágenes satelitales.

3.2.1. Imágenes satelitales

Para el proyecto se utilizaron imágenes del satélite Landsat 8, mismo que cuenta con los sensores Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS), que son similares al sensor ETM+ de Landsat 7. Estas imágenes se obtuvieron de la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), y se utilizaron como parámetros de búsqueda la temporalidad de enero a julio de cada año (2013, 2014 y 2015) y el polígono delimitado por path: 10 y row: 60.

Las imágenes preseleccionadas para el estudio se encuentran enlistadas en la Tabla 7; en éstas se verificó que su cobertura de nubes sea menor al 20% dentro del área de estudio directa y que el intervalo de tiempo entre ellas sea de un mes. Así pues, se eligieron aquellas imágenes correspondientes al 21 de junio de 2013, 26 de julio de 2014 y 11 de junio de 2015; cabe mencionar que las imágenes seleccionadas son productos L1T, es decir, ya están ortorectificadas y cuentan con corrección geométrica para uso a escalas 1:50.000.

Tabla 7
Imágenes Landsat 8 de enero a julio de 2013, 2014 y 2015

| NOMBRE | FECHA | HORA DE TOMA | NUBOSIDAD (%) | NUBOSIDAD ÁREA DE ESTUDIO (%) |
|-----------------------|------------|--------------|---------------|-------------------------------|
| LC80100602013124LGN02 | 04-05-2013 | 15:27 | 45,10 | 10 |
| LC80100602013172LGN01 | 21-06-2013 | 15:27 | 55,43 | 10 |
| LC80100602013188LGN01 | 07-07-2013 | 15:28 | 59,64 | 15 |
| LC80100602014191LGN01 | 10-07-2014 | 15:25 | 48,93 | 10 |
| LC80100602014207LGN01 | 26-07-2014 | 15:25 | 30,34 | 5 |
| LC80100602015162LGN01 | 11-06-2015 | 15:25 | 41,17 | 10 |
| LC80100602015194LGN01 | 13-07-2015 | 15:25 | 38,95 | 75 |

3.2.2. Datos de referencia de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ).

Los datos de concentración de las diferentes variables meteorológicas y contaminantes, correspondientes a las fechas de toma de las imágenes satelitales, fueron extraídos de la base de datos de la Secretaría de Ambiente del Distrito

Metropolitano de Quito, donde se encuentran registros históricos anuales y mensuales de datos tomados diariamente cada diez minutos.

Para empezar la validación de los datos se generaron gráficas que relacionan la concentración de cada una de las variables estudiadas con la hora o día de toma, en éstas se analizó lo siguiente:

- Gráficas “Concentración vs. Tiempo” mensuales (junio y julio), utilizadas para verificar posibles daños en las estaciones de monitoreo.
- Gráficas “Concentración vs. Tiempo” veinticuatro horas (fechas de toma de las imágenes), utilizadas para verificar el comportamiento específico de cada variable y la existencia de anomalías por actividades antrópicas.

Por otro lado, y con el fin de identificar valores atípicos, frecuencia, variabilidad y distribución de las observaciones, se desarrolló el análisis estadístico de control de datos mediante el software R 3.4.2. Dicho análisis se llevó a cabo para las tres fechas de toma de las imágenes y se realizó en dos etapas: en la primera se consideran todos los datos registrados cada diez minutos durante veinticuatro horas; mientras que en la segunda se toman en cuenta solamente los datos correspondientes a las 15:20 y 15:30.

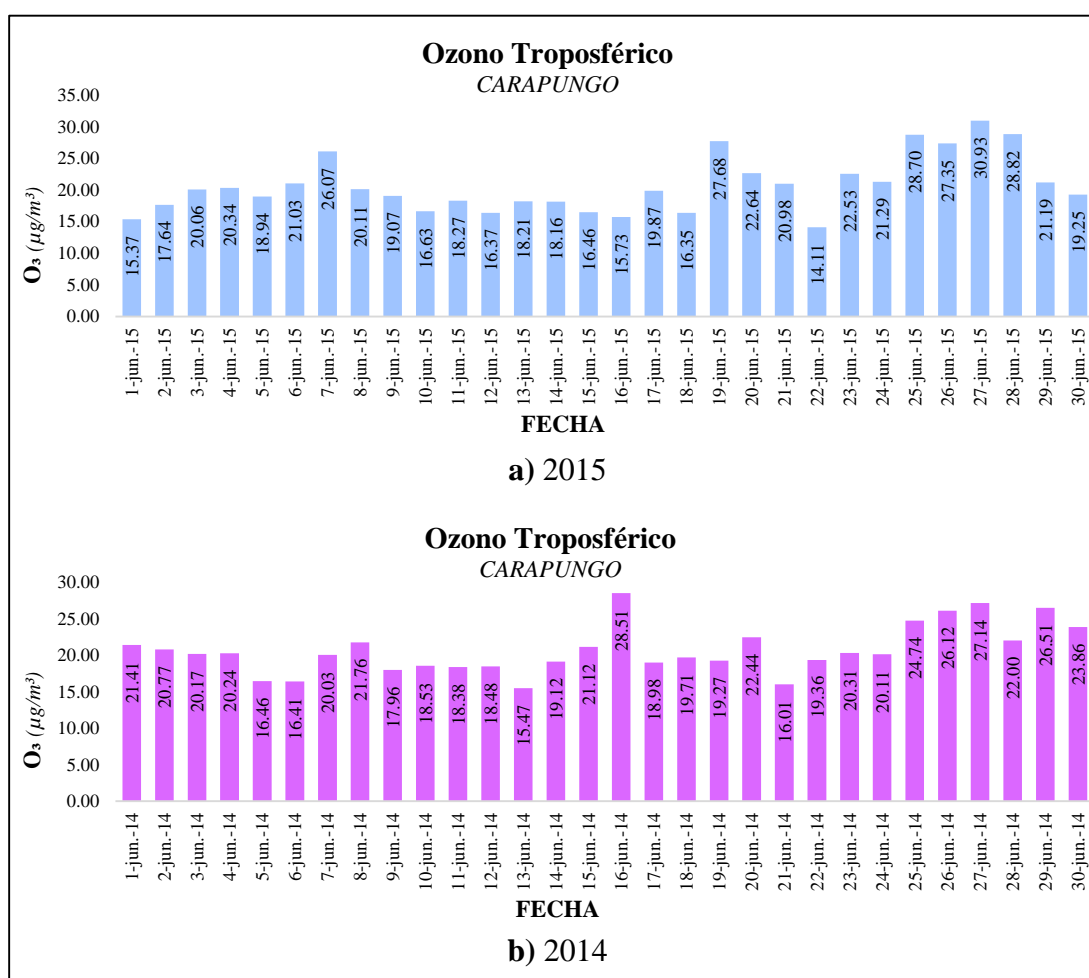
Cabe recalcar que los procesos de validación descritos anteriormente se realizaron para cada una de las variables consideradas en el estudio, dentro de las estaciones de Cotocollao, Carapungo, Belisario, El Camal y Los Chillos.

- **Comportamiento de las variables**

Con el fin de validar la información de ozono troposférico (O_3) tomada por cada una de las estaciones de la REMMAQ y comprobar la existencia de posibles daños en las mismas, se generaron las gráficas de “Concentración O_3 vs. Tiempo” mensuales. Estas gráficas fueron elaboradas a partir de la concentración media de ozono registrada diariamente durante los meses de junio y julio de 2013, 2014 y 2015.

A continuación, se analizan las gráficas obtenidas en la estación de Carapungo (ver Figura 12 y Figura 13); mientras que las gráficas correspondientes al resto de estaciones se despliegan en el Anexo 3.

Como se observa en la Figura 12, el monitoreo de O₃ es permanente durante el mes de junio de los tres años considerados, es decir, no existen datos faltantes. Por el contrario, en la Figura 13 se advierte que el registro de datos es continuo solamente durante julio del 2014; mientras que no existen mediciones entre el 19 y 20 de julio de 2013, y el 28 y 29 de julio de 2015. Gracias a una entrevista realizada al Ing. Darwin Acosta, técnico de la unidad de Laboratorio IAMQ, investigación, análisis y monitoreo de la Secretaría del Ambiente de Quito, se verificó que, a pesar de tener datos faltantes al mes, las mediciones realizadas en fechas posteriores no se ven afectadas debido al minucioso proceso de depuración y control de calidad que reciben los datos antes de ser liberados en el sistema.



Continua →

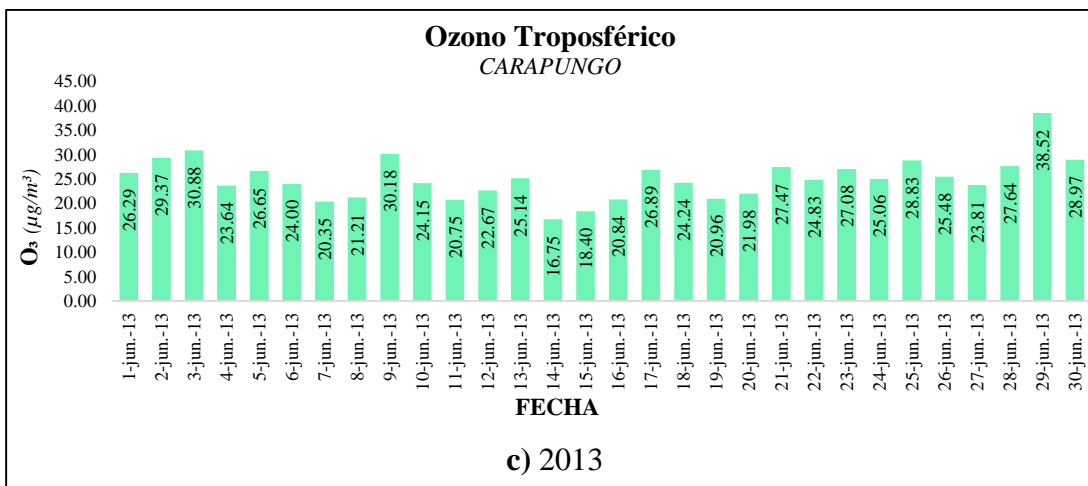
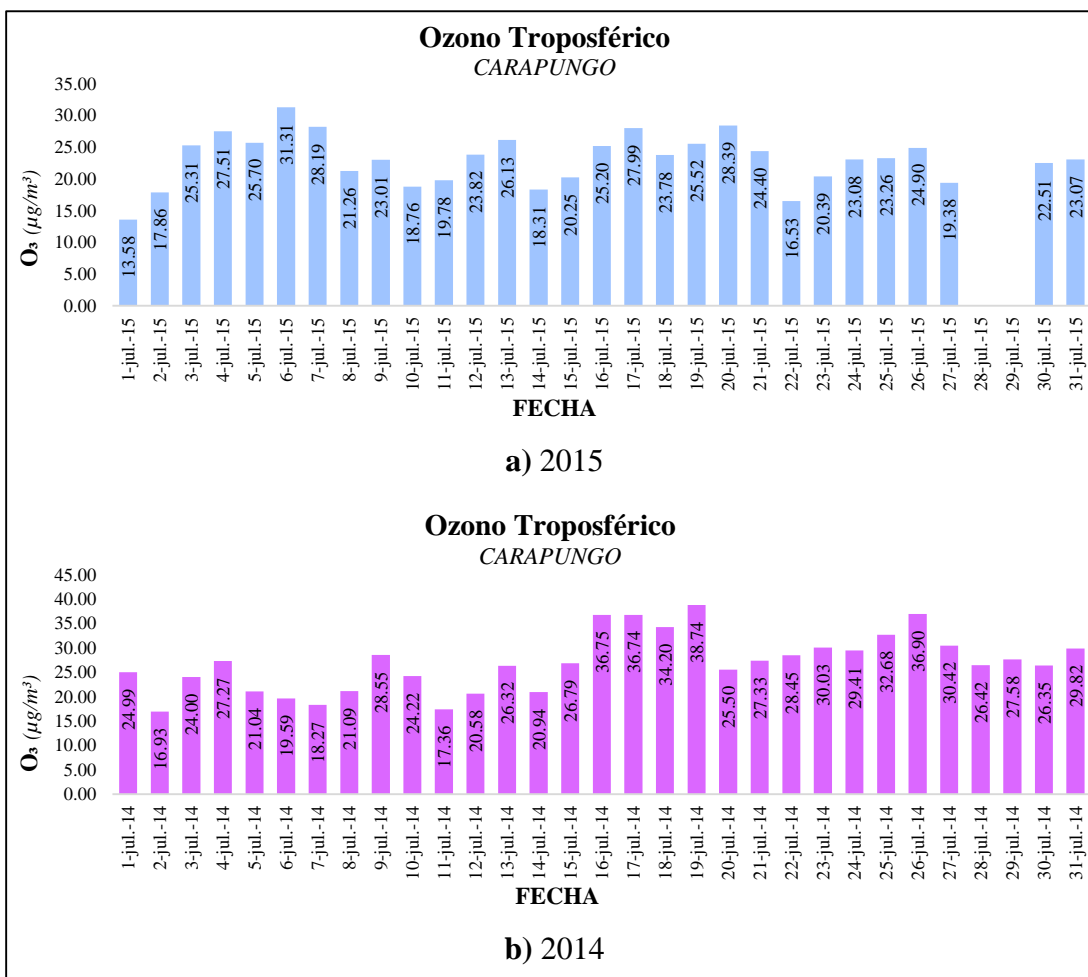


Figura 12. Concentración de O₃ durante el mes de junio - Carapungo



Continua

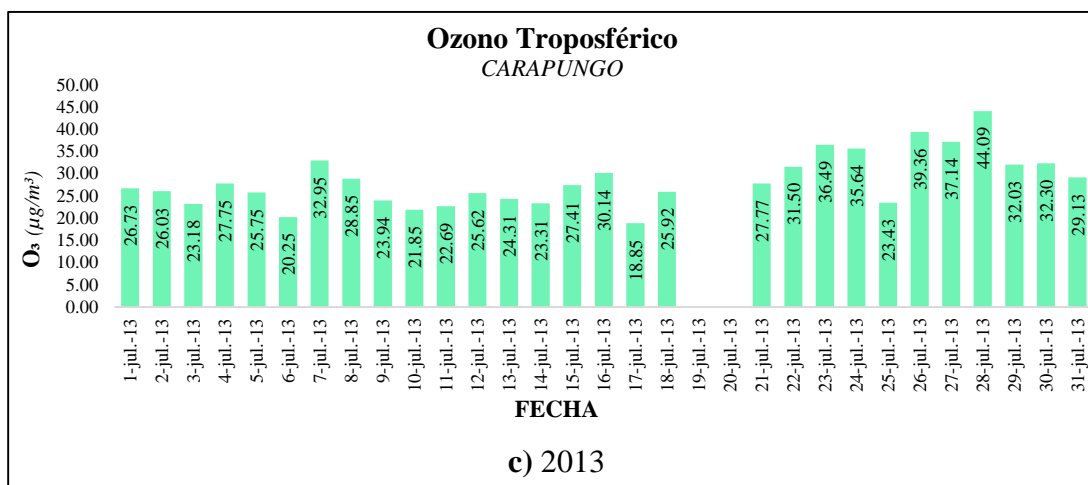


Figura 13. Concentración de O₃ durante el mes de julio - Carapungo

Para identificar el comportamiento específico del ozono y verificar la presencia de posibles anomalías causadas por actividades antrópicas como incendios, sismos o deslizamientos, se generaron las gráficas que relacionan la concentración del contaminante con la hora de toma de la muestra. Estas gráficas fueron elaboradas a partir de los datos de O₃ registrados cada diez minutos durante el 21 de junio de 2013, 26 de julio de 2014 y 11 de junio de 2015. En la Figura 14 se muestra el comportamiento de O₃ en la estación de Carapungo; las gráficas correspondientes al resto de estaciones y el análisis de las mismas, se despliegan en el Anexo 3.

Como se observa en la Figura 14, el comportamiento del O₃ es similar durante las tres fechas estudiadas. Las concentraciones más bajas se distinguen entre las cuatro y ocho de la mañana; mientras que al mediodía, específicamente entre las 12:00 y 12:50, se registraron los valores máximos. Cabe recalcar, que para el 21 de junio de 2013 y el 11 de junio de 2015 no existen datos entre las dos y tres de la mañana.

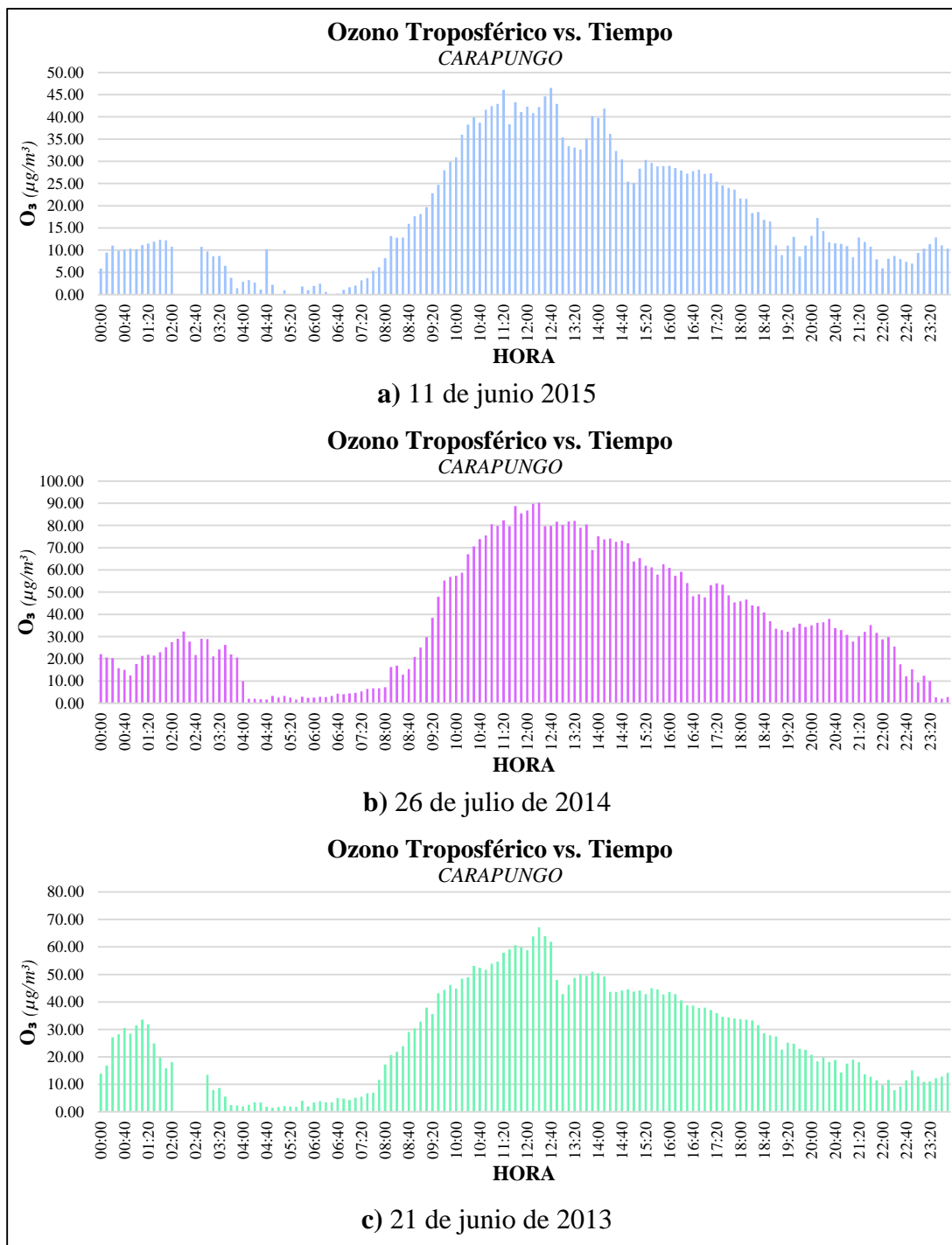


Figura 14. Concentración de O_3 durante 24 h - Carapungo

- **Análisis estadístico de control**

Con respecto a la validación estadística de los datos de radiación solar, se debe mencionar que se tomaron en cuenta solamente los valores comprendidos entre las

06:30 y 18:30, es decir, los datos registrados durante la salida (orto) y puesta (ocaso) del sol. En la Tabla 8 se muestra el resumen estadístico de los valores de radiación solar registrados en la estación de Cotocollao, durante los años 2013, 2014 y 2015.

Tabla 8
Estadísticas de radiación solar en la estación de Cotocollao

| PARÁMETRO | COTOCOLLAO | | |
|---------------------------------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2013 | 26/07/2014 | 11/06/2015 |
| Media (W/m^2) | 469,485 | 529,769 | 437,664 |
| Mediana (W/m^2) | 447,300 | 513,205 | 358,260 |
| Cuantil 0.99 (W/m^2) | 1053,232 | 1096,802 | 1093,568 |
| Desviación estándar (W/m^2) | 311,426 | 350,159 | 327,005 |
| Coefficiente de asimetría | 0,248 | 0,128 | 0,391 |

Durante dos de las fechas analizadas se observa que las medidas de localización como la media y la mediana (Cuartil 2), tienen valores cercanos entre sí. De la misma manera, al examinar los valores de los cuantiles, se determinó con un 99% de confiabilidad que aquellos datos superiores a éstos se consideran anómalos. Por otro lado, los coeficientes de asimetría positivos indican que la distribución de datos está levemente cargada o alargada hacia los valores superiores a la media, lo que se puede comprobar mediante los histogramas de frecuencia (ver Figura 15).

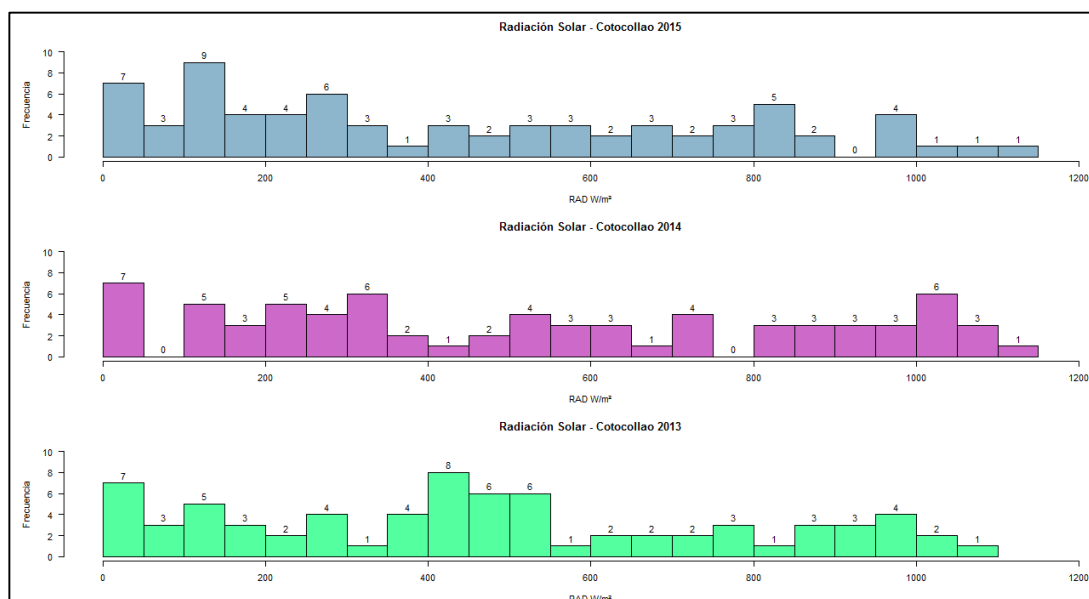


Figura 15. Histogramas radiación solar - Cotocollao

Al analizar los diagramas de caja (ver Figura 16) no se observaron valores atípicos en ninguna de las tres fechas estudiadas.

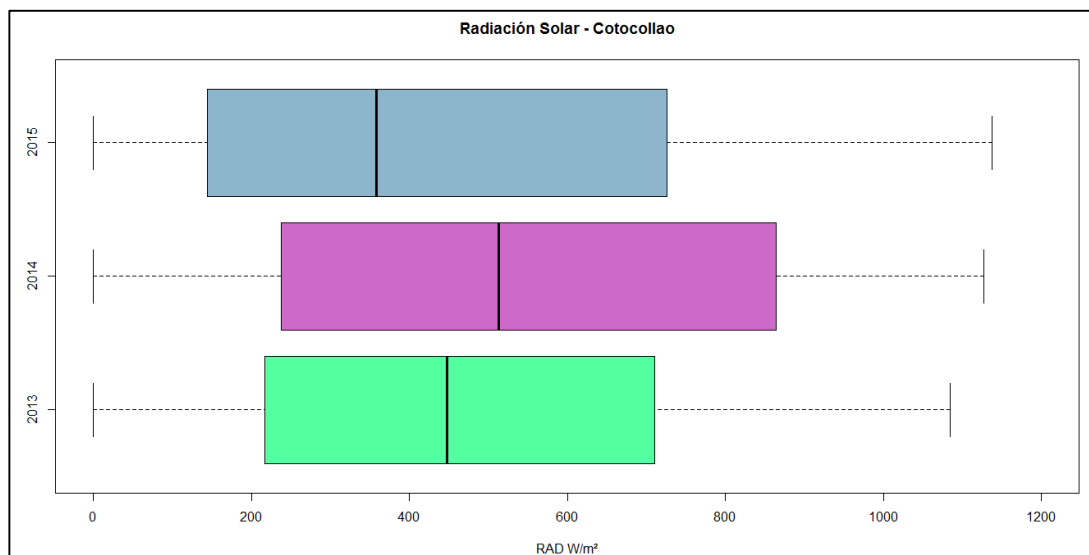
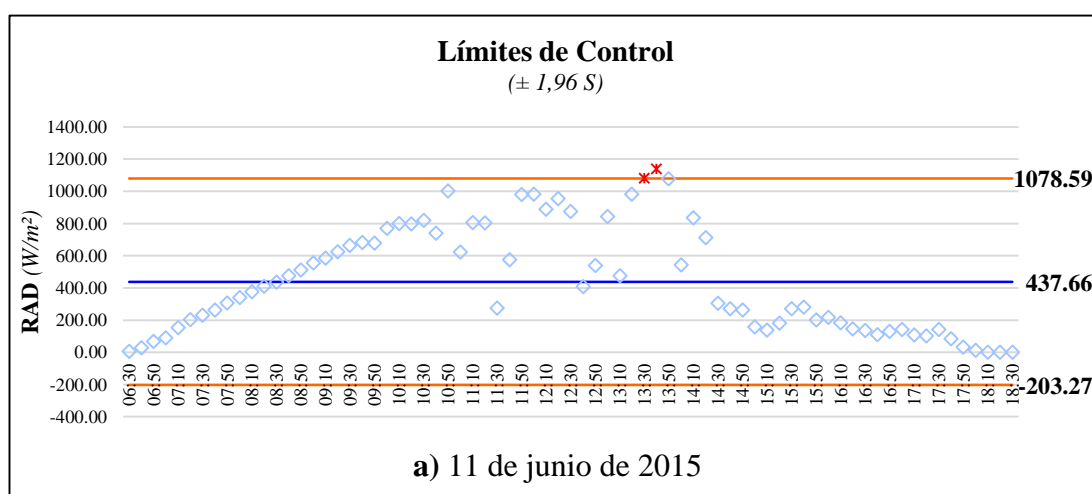


Figura 16. Diagramas de caja de radiación solar - Cotocollao

Para corroborar la existencia de valores atípicos se revisaron los gráficos de límites de control (ver Figura 17), tomados a 1,96 desviaciones estándar de la media. Aquí se observó que durante el año 2014 no existen puntos que sobrepasan el límite superior de control (LSE), mientras que, los años 2013 y 2015 presentan uno y dos puntos respectivamente. Estos valores no fueron eliminados del estudio, ya que no corresponden a la hora de toma de las imágenes.



a) 11 de junio de 2015

Continua

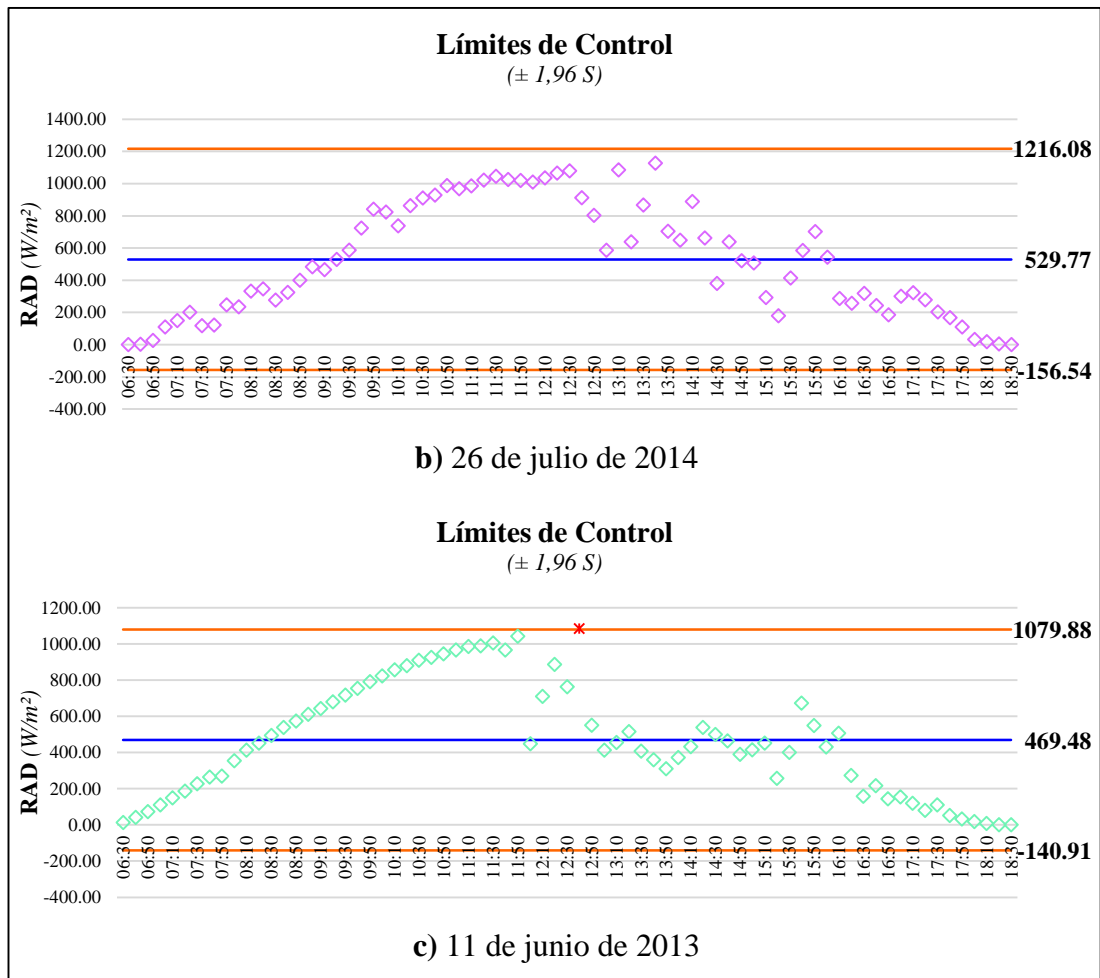
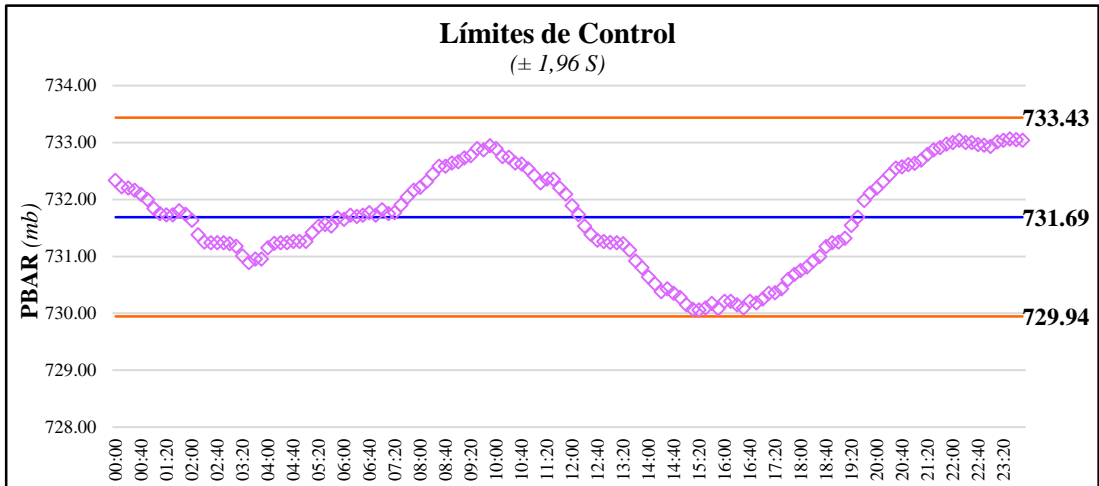


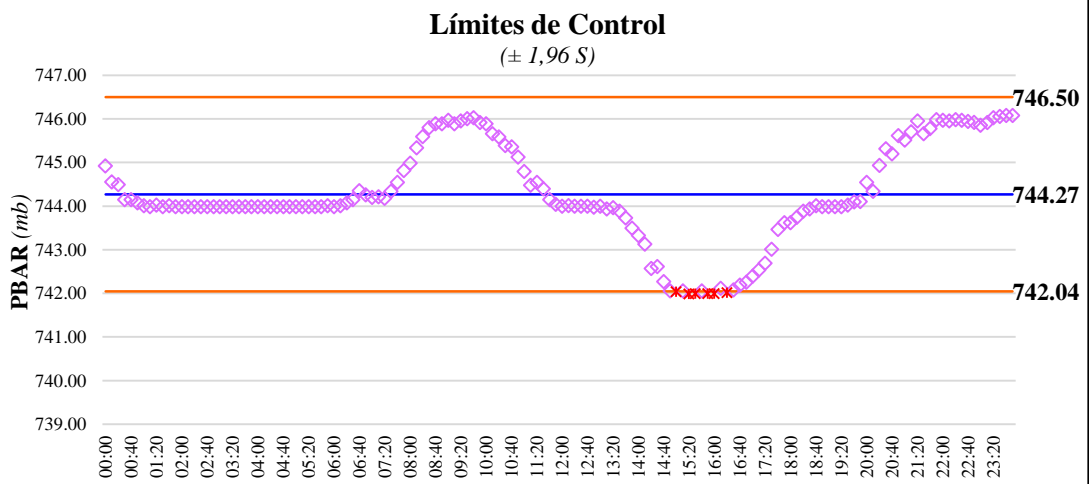
Figura 17. Límites de control radiación solar - Cotocollao

Con respecto al análisis de control de datos de radiación solar que se llevó a cabo en las estaciones de Carapungo, Belisario, El Camal y Los Chillos, se describe en el Anexo 4.

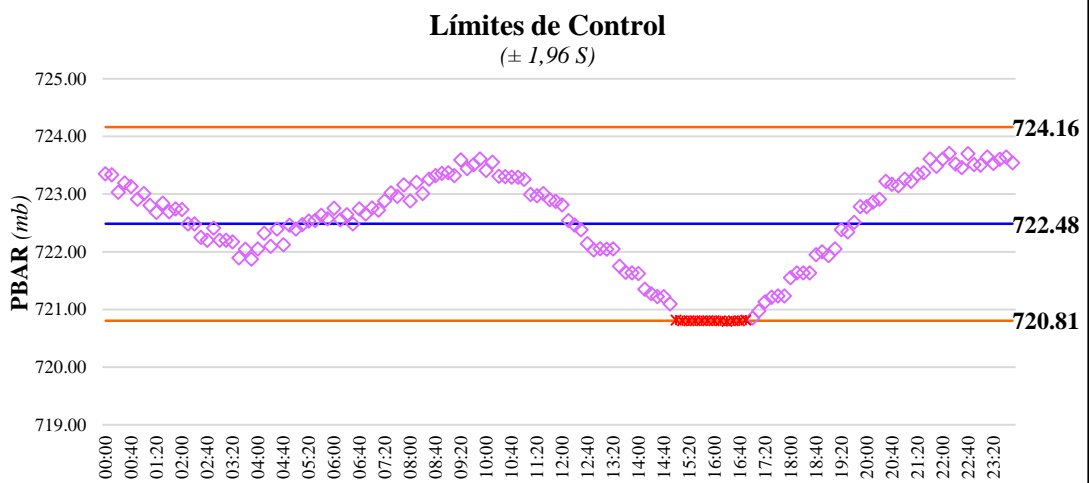
Asimismo, mediante el análisis estadístico de control de datos de presión barométrica y velocidad del viento desarrollado en cada una de las estaciones antes mencionadas, se detectó que las mediciones correspondientes a la hora de toma de las imágenes (15:20 y 15:30) se encontraron fuera de los límites de control, por lo que se dispuso eliminar dichas variables del estudio. A continuación, se presentan las gráficas de límites de control para presión barométrica (ver Figura 18) y velocidad del viento (ver Figura 19) correspondientes al 26 de julio de 2014.



a) Cotocollao



b) Carapungo



c) Belisario

Continua

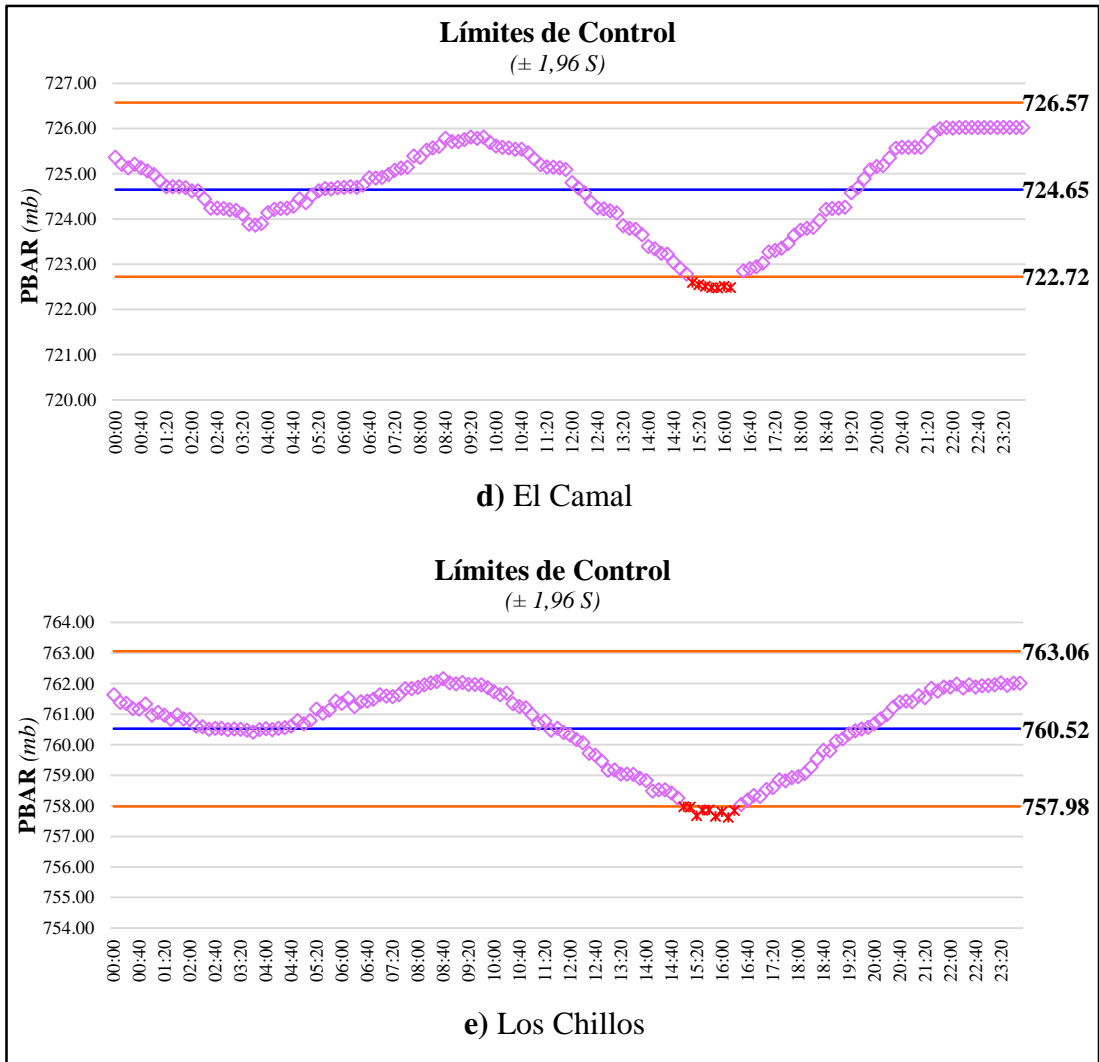
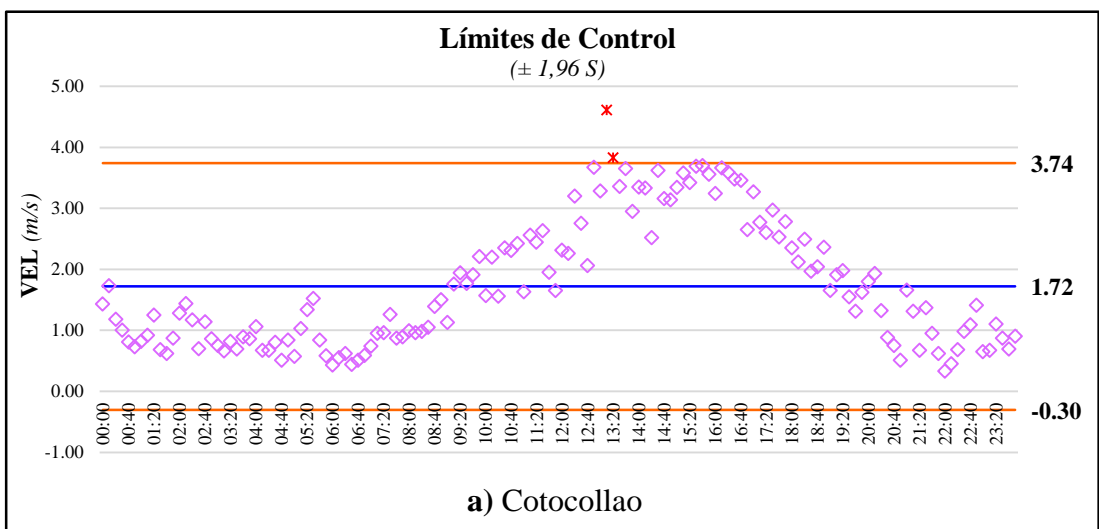
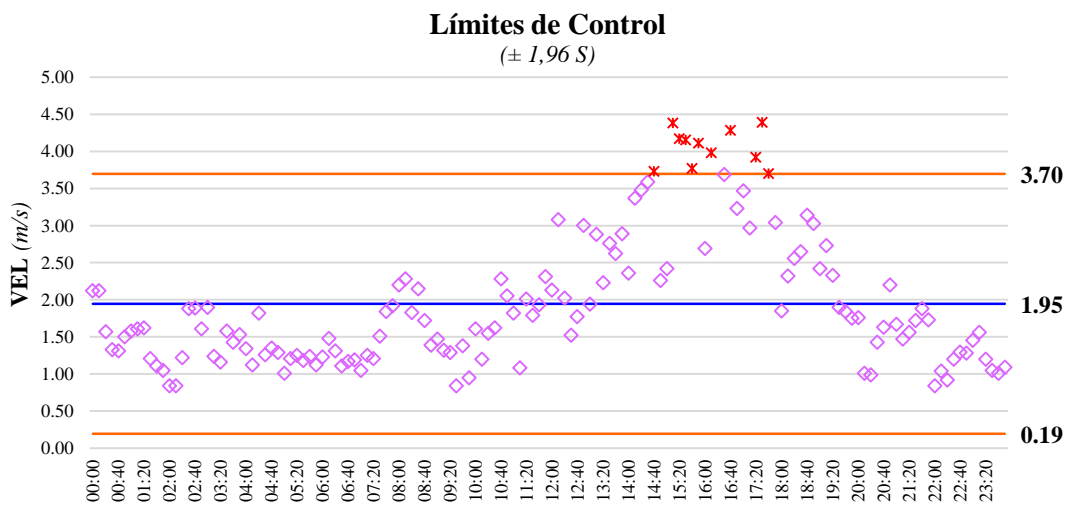
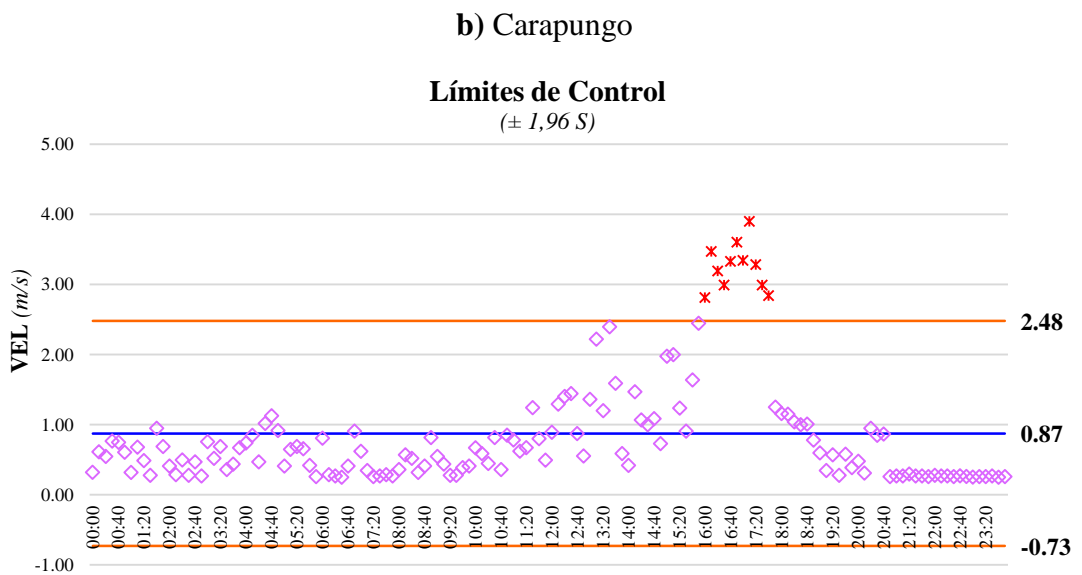
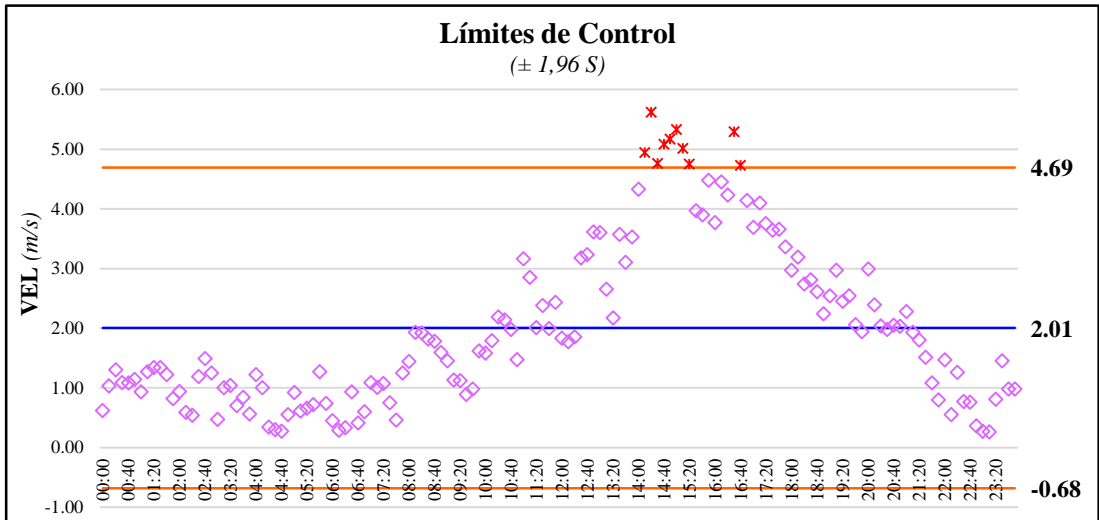


Figura 18. Límites de control – Presión barométrica



Continua



Continua

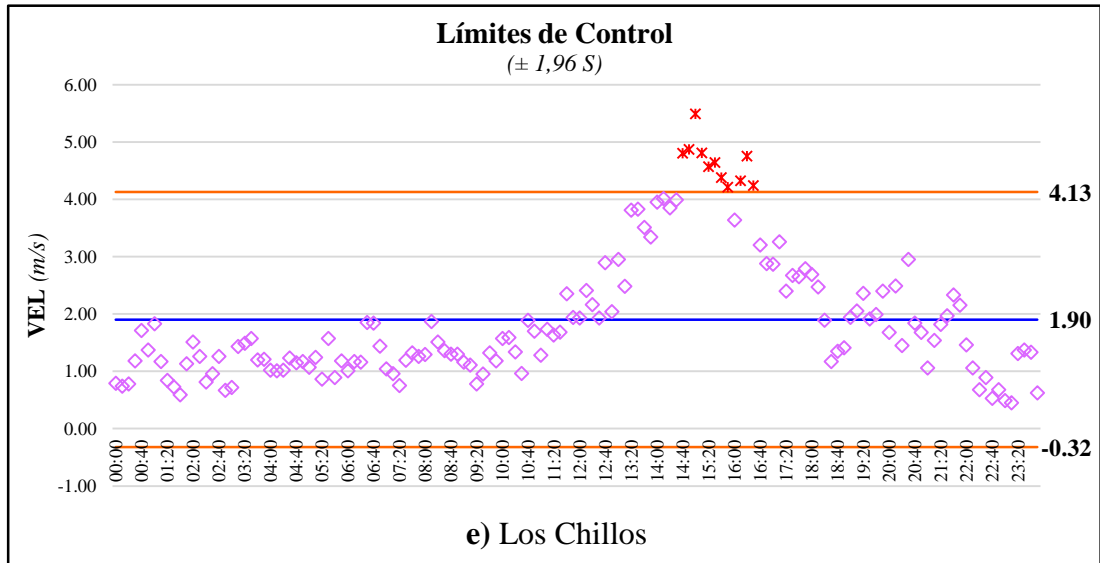


Figura 19. Límites de control – Velocidad del viento

Después de llevar a cabo el control de los datos registrados cada diez minutos durante veinticuatro horas, se efectuó un segundo análisis estadístico; donde se tomaron en cuenta los datos correspondientes a la hora de toma de las imágenes, es decir, aquellos registrados a las 15:20 y 15:30.

En la Tabla 9 se muestra el resumen estadístico de los valores de radiación solar registrados a las 15:20 y 15:30 en las estaciones de Carapungo, Cotocollao, Belisario, El Camal y Los Chillos, durante los años 2013, 2014 y 2015.

Tabla 9
Estadísticas de radiación solar (15:20 – 15:30)

| PARÁMETRO | FECHA | | |
|---------------------------------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2013 | 26/07/2014 | 11/06/2015 |
| Media (W/m^2) | 458,73 | 419,48 | 384,65 |
| Mediana (W/m^2) | 402,72 | 419,01 | 363,24 |
| Desviación estándar (W/m^2) | 191,280 | 224,510 | 181,231 |
| Coefficiente de asimetría | 0,231 | 0,227 | 0,102 |

Durante las tres fechas analizadas se observa que las medidas de localización como la media y la mediana (Cuartil 2), tienen valores cercanos entre sí. Por otro lado, los coeficientes de asimetría positivos indican que la distribución de datos está levemente cargada o alargada hacia los valores superiores a la media.

Para corroborar la existencia de valores atípicos se revisaron los gráficos de límites de control (ver Figura 20), tomados a 1,96 desviaciones estándar de la media. Aquí, se observó que no existen puntos que sobrepasan los límites de control en ninguna de las tres fechas estudiadas.

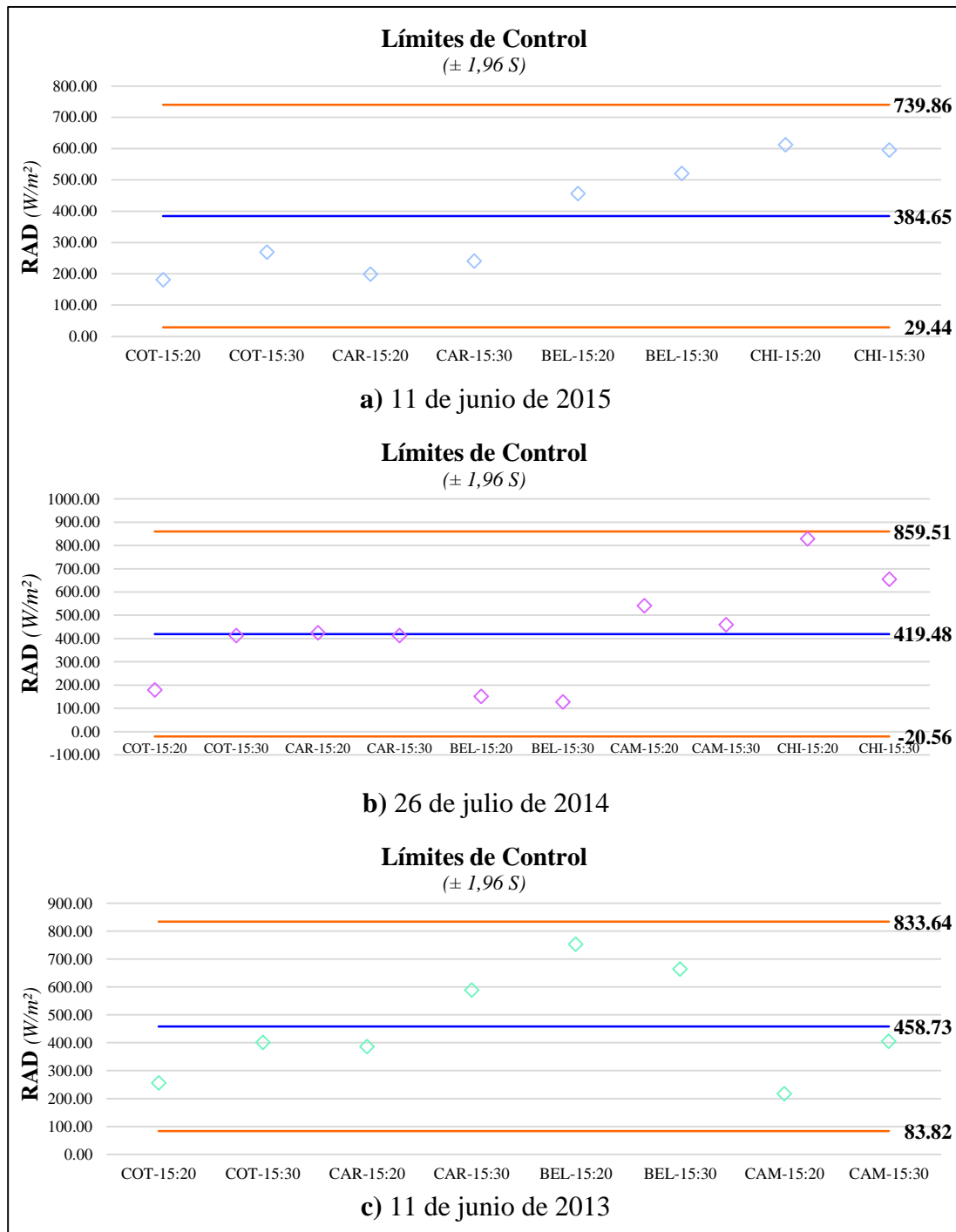


Figura 20. Límites de control radiación solar 15:20 – 15:30

3.3. Procesamiento digital de imágenes satelitales

Para iniciar el procesamiento de las imágenes satelitales se aplicó la metodología descrita anteriormente (ver Figura 11), donde las correcciones geométrica, topográfica, radiométrica y atmosférica forman parte del pre-procesamiento.

3.3.1. Corrección geométrica

La corrección geométrica se llevó a cabo mediante la comparación de las imágenes satelitales con la cartografía escala 1:50.000 de tipo vector, obtenida del geoportal del Instituto Geográfico Militar. Para esto se utilizó la capa correspondiente a los ejes viales de la provincia de Pichincha y se observó que la cartografía coincidía perfectamente con la imagen (ver Figura 21), corroborando de esta forma que dicha imagen ya se encontraba ortorectificada.

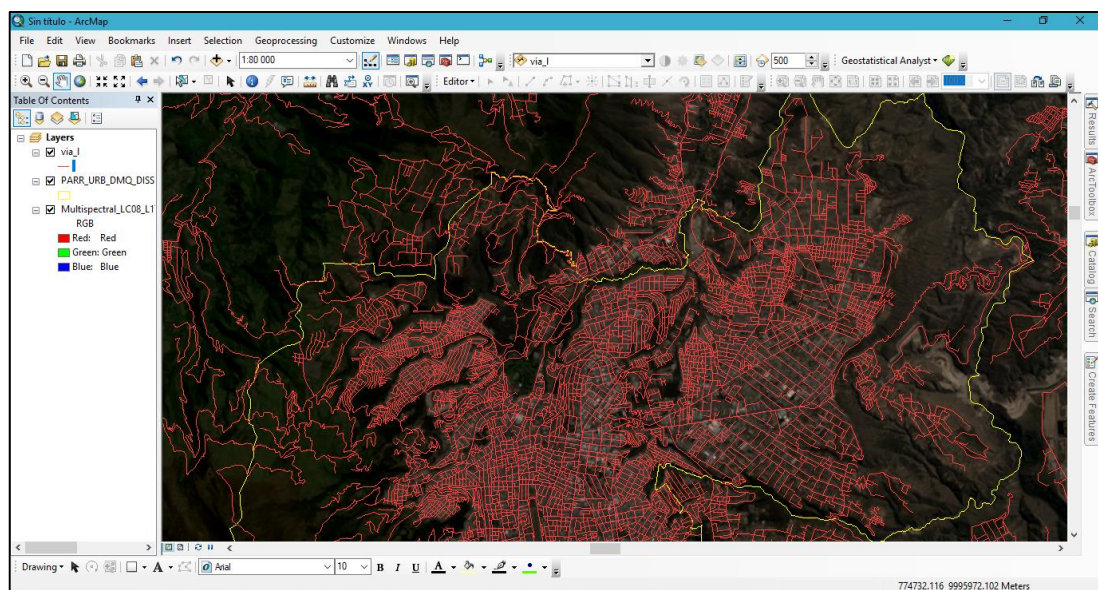


Figura 21. Corrección geométrica imágenes Landsat 8 estudiadas

3.3.2. Corrección topográfica

La corrección topográfica ya está incluida en imágenes de tipo L1T, esto significa que la imagen fue corregida respecto al terreno mediante el uso de modelos digitales

de terreno como el SRTM V3, que cuenta con una resolución de noventa metros, o el Landsat GeoCover 2000, que utiliza puntos de control organizados en mallas de 64 x 64 píxeles; permitiendo alcanzar una precisión absoluta en la ortorectificación.

3.3.3. Corrección radiométrica

Para realizar la corrección radiométrica de las bandas multispectrales se utilizó la función “Radiometric Calibration” del software ENVI. Esta función convierte los niveles digitales en valores de reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) mediante la ecuación (2 (ver Figura 22a). En el caso de las bandas térmicas se transformaron los niveles digitales a valores de radiancia TOA, utilizando la ecuación (1 incorporada también en la función “Radiometric Calibration” (ver Figura 22b).

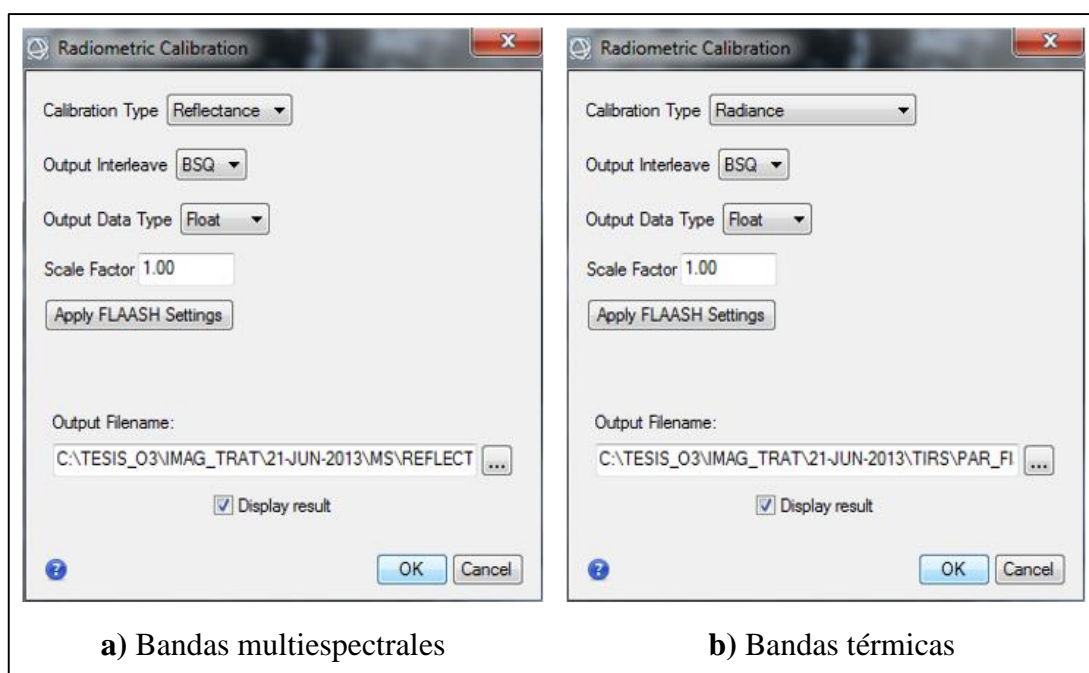


Figura 22. Corrección radiométrica imágenes Landsat 8 estudiadas

Cabe recalcar que para obtener los valores de radiancia y reflectancia TOA, es necesario conocer los factores multiplicativos y aditivos específicos para cada banda, mismos que se encuentran en el archivo de los metadatos de la imagen (*.MTL) y se leen de forma automática en el software ENVI.

3.3.4. Corrección atmosférica

Para realizar la corrección atmosférica de las bandas multiespectrales se utilizó el método DOS o también conocido como método de Chávez, para lo cual fue necesario identificar los valores mínimos de reflectancia de cada una de las bandas del sensor (ver Tabla 10), a través de la obtención y análisis de su respectivo histograma (ver Figura 23).

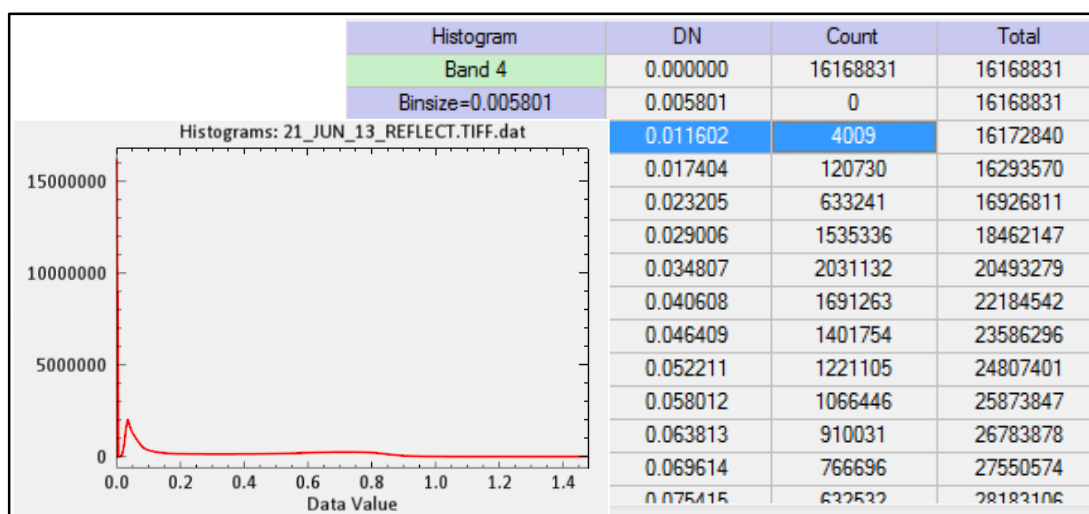


Figura 23. Histograma de reflectancia TOA

Tabla 10

Valores mínimos de reflectancia de cada banda multiespectral, de las imágenes Landsat 8 utilizadas

| BANDA | FECHA | | |
|-------------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2013 | 26/07/2014 | 11/06/2015 |
| B1: Coastal | 0,063813 | 0,058830 | 0,063720 |
| B2: Blue | 0,044395 | 0,045177 | 0,046342 |
| B3: Green | 0,023205 | 0,022416 | 0,023171 |
| B4: Red | 0,011602 | 0,011195 | 0,011585 |
| B5: NIR | 0,005801 | 0,005729 | 0,005793 |
| B6: SWIR 1 | 0,005801 | 0,005729 | 0,005793 |
| B7: SWIR 2 | 0,005801 | 0,005302 | 0,005377 |

El método de corrección atmosférica aplicado en las bandas multiespectrales se desarrolló mediante herramienta “Dark Subtraction” del software ENVI, que emplea la ecuación (3 (ver Figura 24).

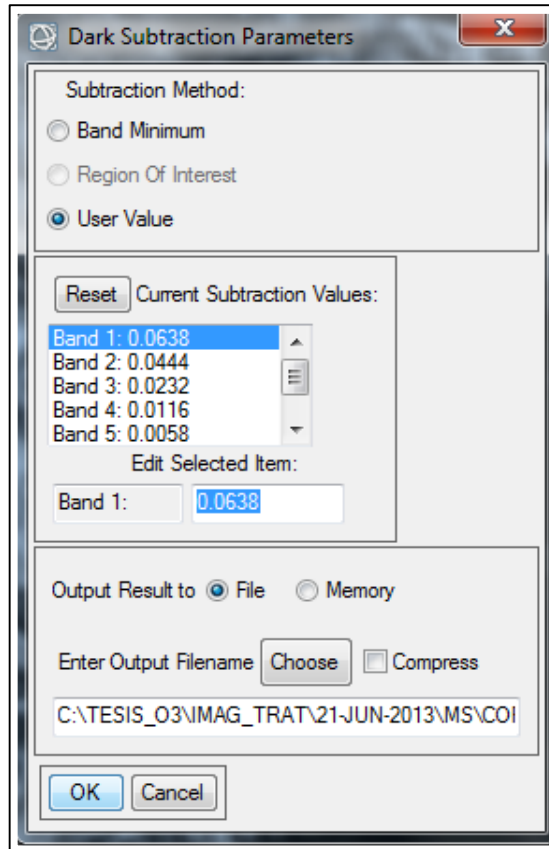
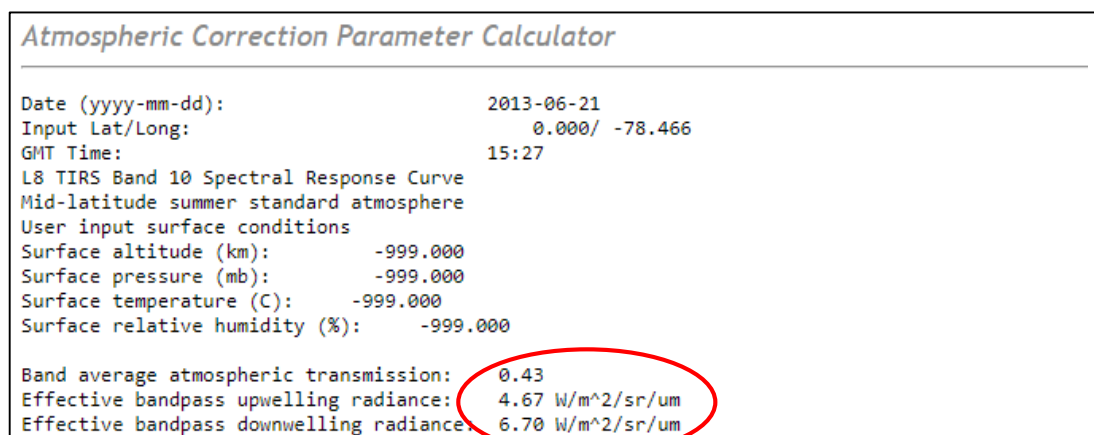


Figura 24. Corrección atmosférica de las bandas multispectrales

En el caso de las bandas térmicas se empleó el método de corrección atmosférica propuesto por la NASA (ecuación (4), donde fue necesario obtener de la página web de la NASA datos de transmitancia (τ), radiancia ascendente ($L\uparrow$) y radiancia descendente ($L\downarrow$) específicos a la hora de toma de la imagen (ver Figura 25).



Continua

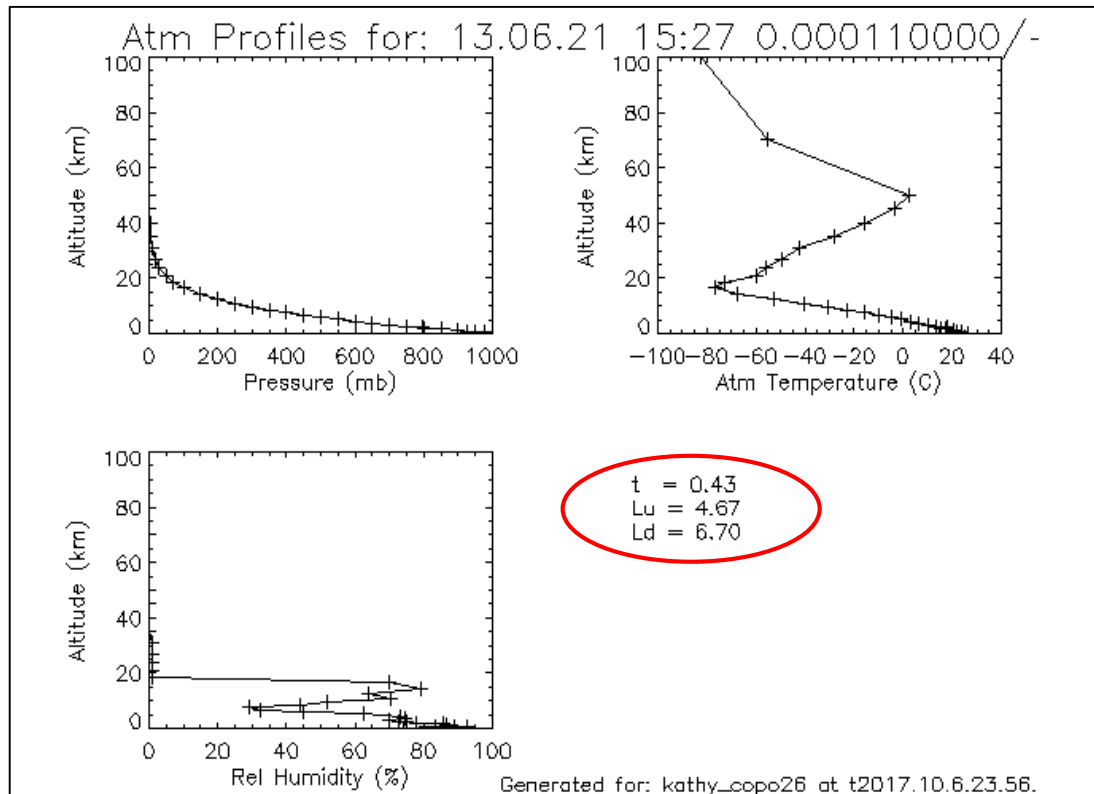


Figura 25. Parámetros necesarios para la corrección atmosférica de las bandas térmicas

Una vez que se obtuvieron los parámetros de transmitancia y radiancia ascendente y descendente de cada imagen (ver Tabla 11), se realizó la corrección atmosférica de las bandas térmicas aplicando la ecuación (4) mediante la herramienta “Band Math” del software ENVI (ver Figura 26).

Tabla 11
Valores de transmitancia, radiancia ascendente y radiancia descendente durante las tres fechas estudiadas

| PARÁMETRO | FECHA | | |
|---|------------|------------|------------|
| | 21/06/2013 | 26/07/2014 | 11/06/2015 |
| Transmitancia (τ) | 0,43 | 0,48 | 0,38 |
| Radiancia ascendente ($L\uparrow$) | 4,67 | 4,26 | 4,97 |
| Radiancia descendente ($L\downarrow$) | 6,70 | 6,27 | 7,12 |

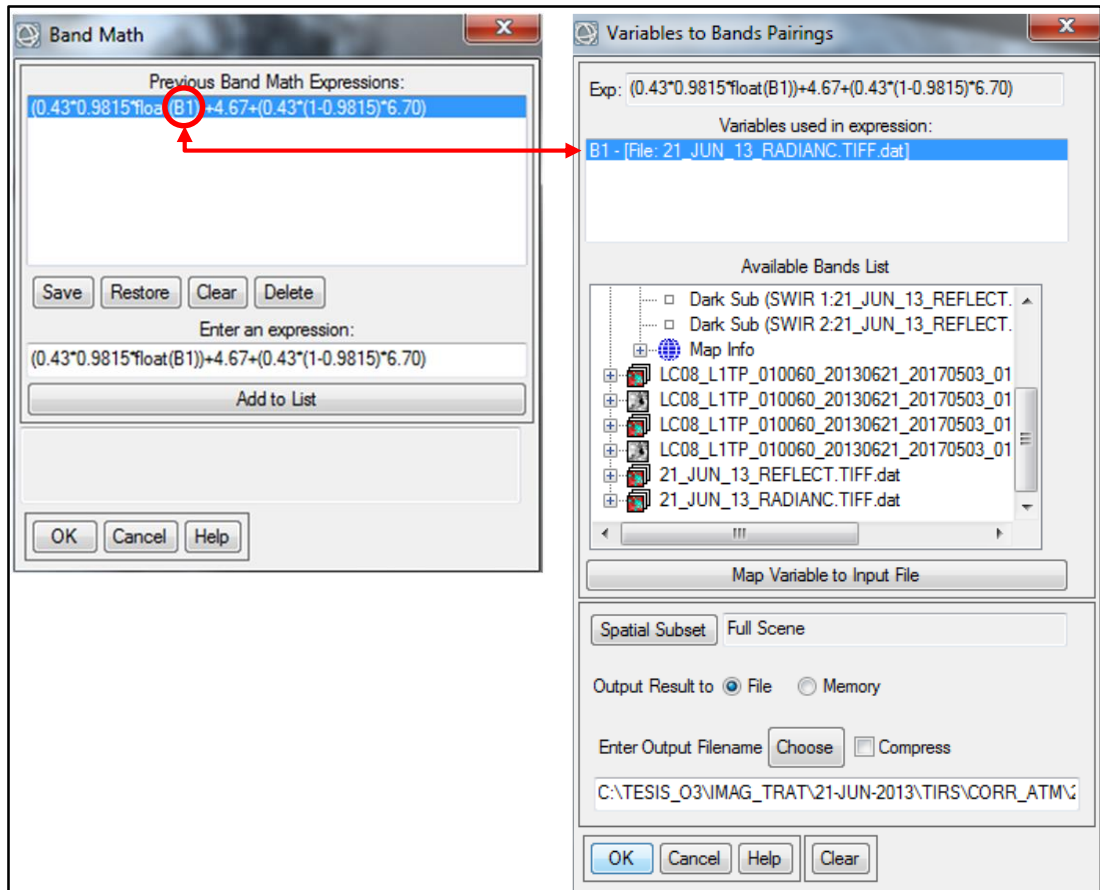


Figura 26. Corrección atmosférica de las bandas térmicas

3.4. Cálculo de índices ambientales

Los índices ambientales que se necesitan como insumos para determinar la temperatura de la superficie terrestre (LST), con excepción del NDVI, fueron calculados mediante la herramienta “Band Math” del software ENVI 5.1. Cabe recalcar que para calcular los índices ambientales se deben utilizar las imágenes que ya cuentan con corrección geométrica, topográfica, radiométrica y atmosférica.

3.4.1. Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

Este índice se calculó con la ayuda de la herramienta “NDVI” de ENVI, que trabaja con las bandas correspondientes al rojo visible (VIS) e infrarrojo cercano (NIR) mediante la ecuación (5 (ver Figura 27)).

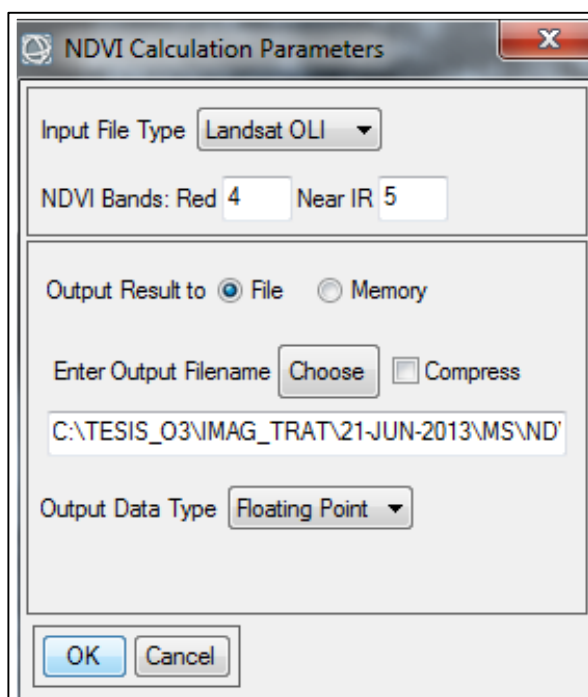


Figura 27. Cálculo de NDVI en el software ENVI 5.1

3.4.2. Proporción de vegetación (PV)

Para calcular la proporción de vegetación mediante la ecuación (6), fue necesario obtener el valor máximo y mínimo de NDVI dentro del área de estudio (ver Tabla 12), mediante la herramienta “Compute Statistics” del software ENVI. Posteriormente, se ingresó la raíz cuadrada de dicha ecuación en la herramienta “Band Math” (ver Figura 28), y se obtuvo un ráster que fue multiplicado por sí mismo para finalmente estimar la PV correspondiente a cada una de las fechas de estudio.

Tabla 12
Valores máximos y mínimos de NDVI durante las tres fechas analizadas

| PARÁMETRO | FECHA | | |
|-----------|------------|------------|------------|
| | 21/06/2013 | 26/07/2014 | 11/06/2015 |
| NDVI máx | 0,934929 | 0,921305 | 0,932648 |
| NDVI mín | -0,946146 | -0,464484 | -0,701232 |

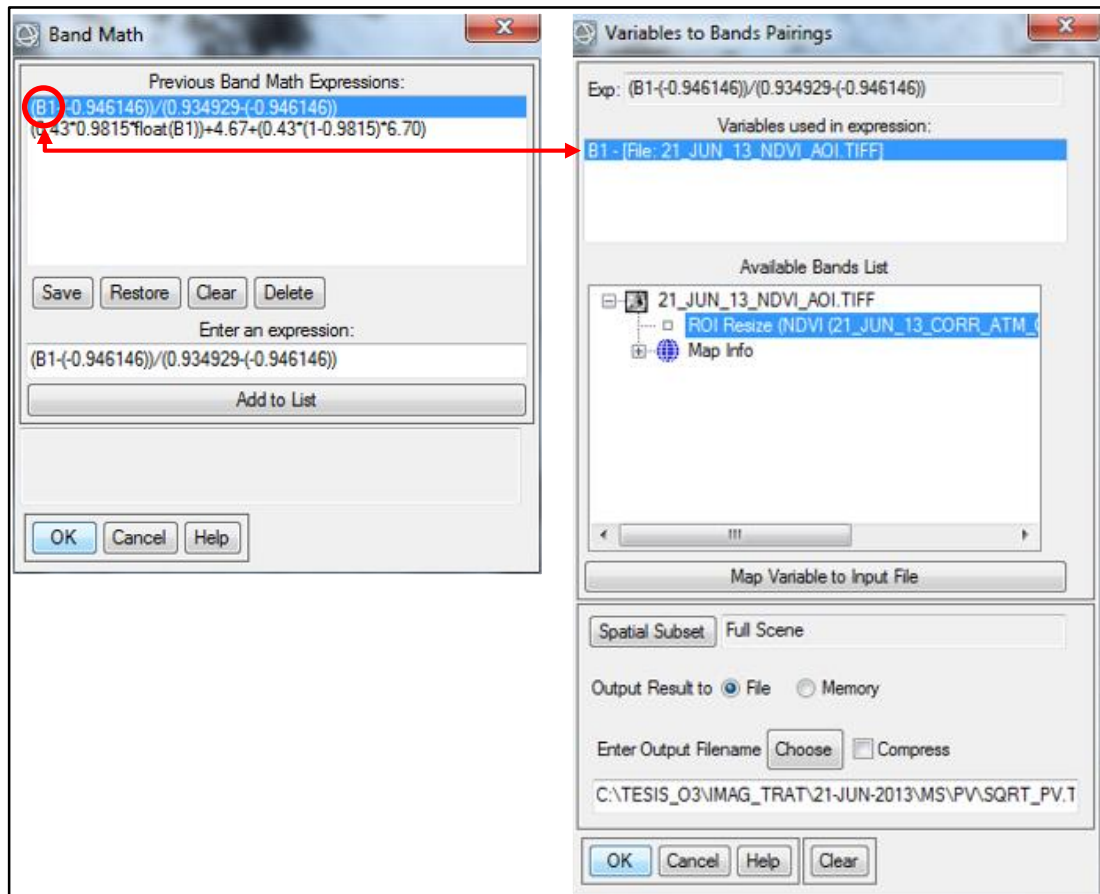


Figura 28. Cálculo de PV en el software ENVI 5.1

3.4.3. Emisividad de la superficie terrestre (LSE)

El cálculo de la emisividad de la superficie terrestre, está basado en un modelo de fracción de cobertura ecuación (8, donde, tanto el suelo como la vegetación tienen emisividades específicas conocidas. Dicha ecuación fue ingresada en el “Band Math” de ENVI y se utilizaron los valores promedio para Landsat, tanto de la emisividad del suelo como de la vegetación, es decir, 0,978 y 0,985 respectivamente (ver Figura 29).

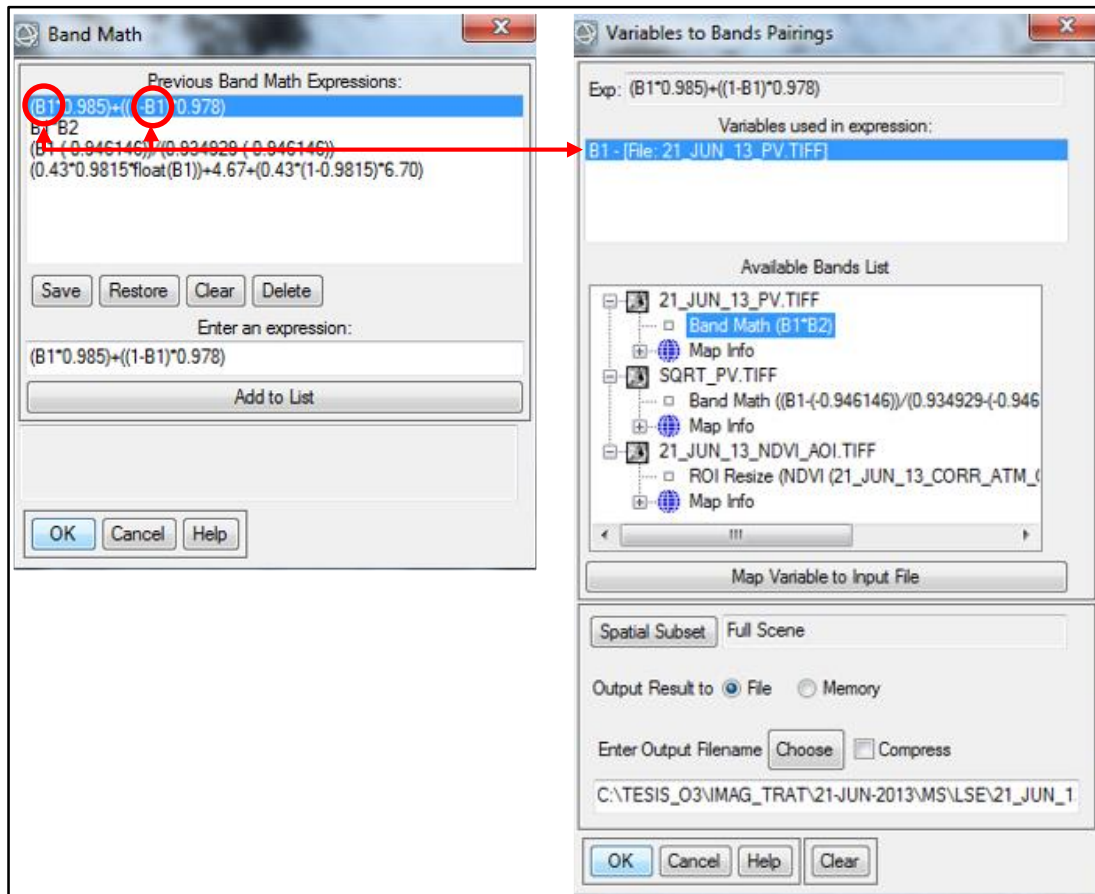


Figura 29. Cálculo de LSE en el software ENVI 5.1

3.4.4. Temperatura de Brillo (TB)

La temperatura de brillo es un índice obtenido a partir de las bandas térmicas del satélite y tiene como objetivo aproximar los valores de temperatura tomados con el satélite a temperatura en grados Kelvin. Cada una de las bandas térmicas cuenta con valores específicos de las constantes K_1 y K_2 que se encuentran dentro del archivo de metadatos, y son imprescindibles para calcular la temperatura de brillo aplicando la ecuación (7) mediante la herramienta “Band Math” (ver Figura 30).

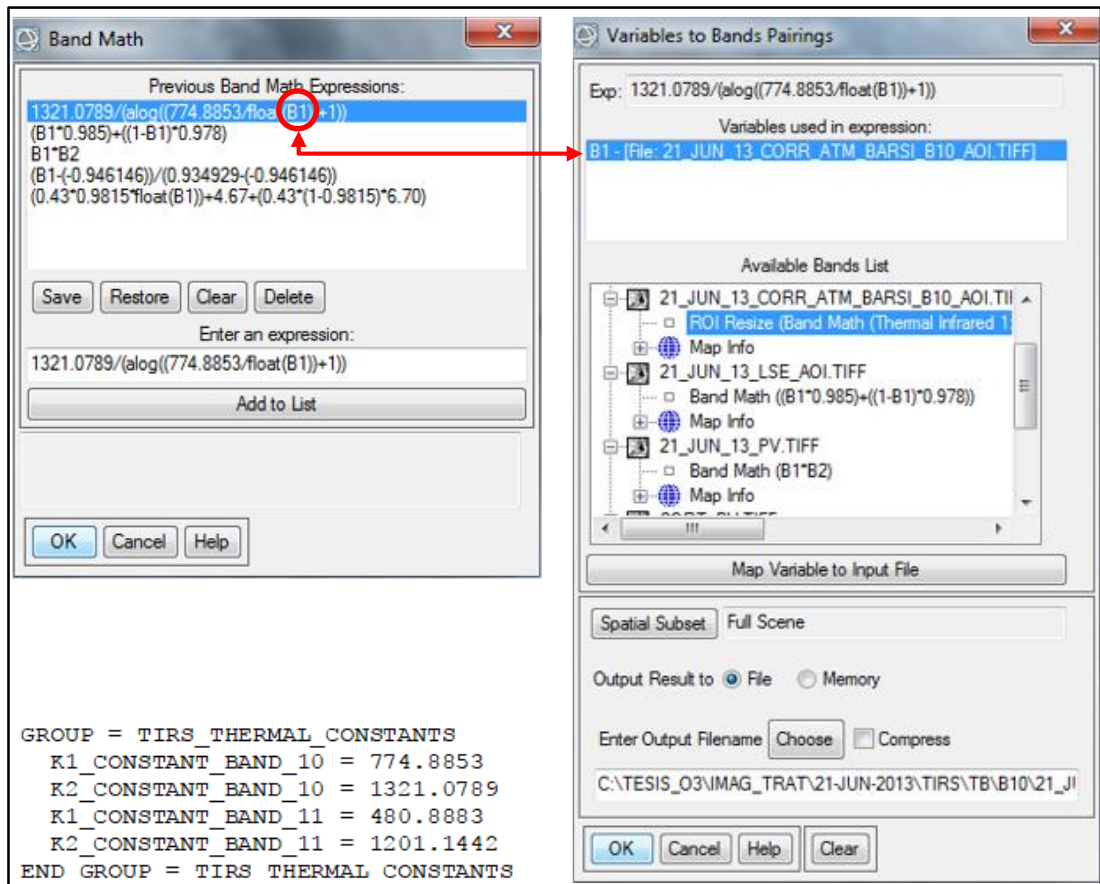


Figura 30. Cálculo de TB en el software ENVI 5.1

3.4.5. Temperatura de la superficie de la Tierra (LST)

Una vez obtenidos los índices ambientales tales como el NDVI, TB, PV y LSE, se procedió a calcular la temperatura de la superficie terrestre mediante la ecuación (9), que se ingresó en el “Band Math” del software ENVI (ver Figura 31).

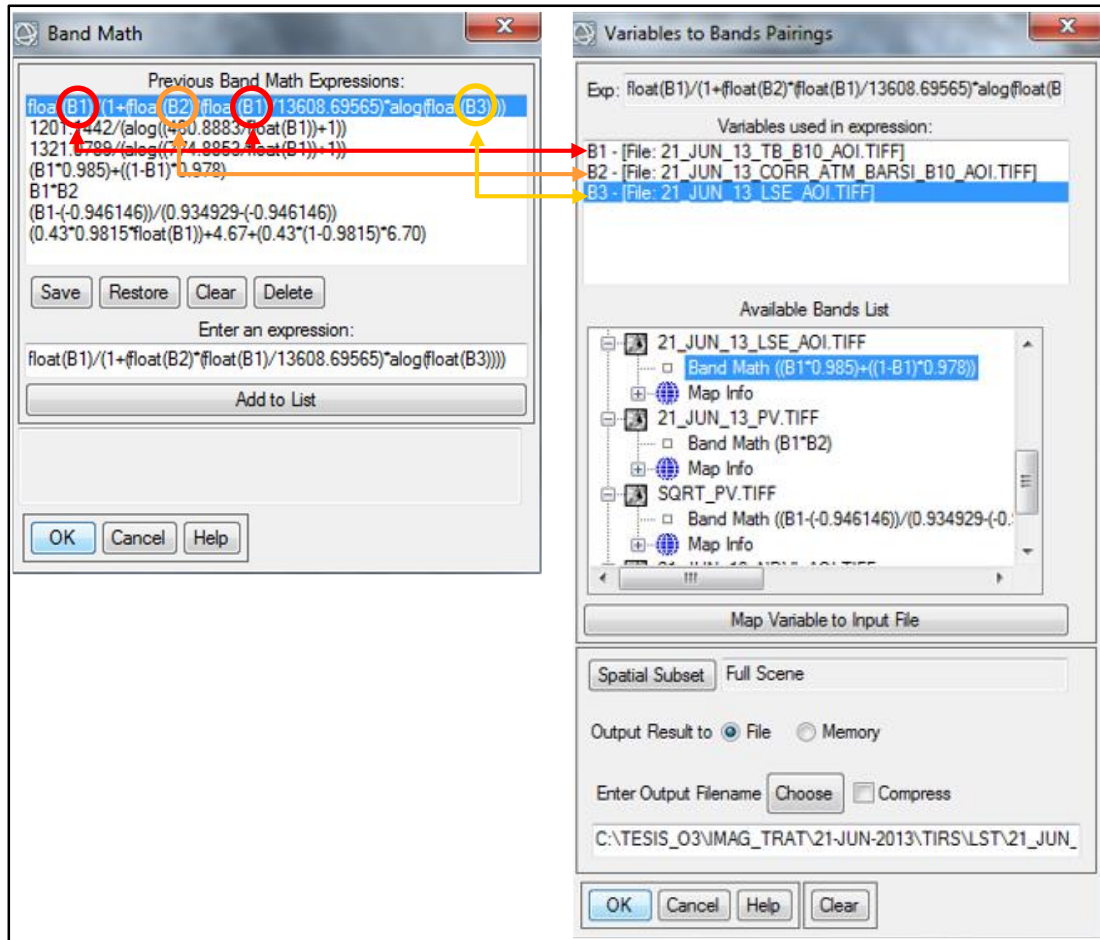


Figura 31. Cálculo de LST en el software ENVI 5.1

3.5. Aplicación de mínimos cuadrados parciales (PLS)

Se aplicó el método de mínimos cuadrados parciales (PLS) con el objetivo de generar un modelo predictivo de ozono troposférico (O_3) en función de los datos de contaminantes, variables meteorológicas, índices ambientales y coordenadas geográficas. Para la obtención de dicho modelo fue necesaria la creación de la matriz multivariable, el cálculo del modelo predictivo y la visualización del mismo; etapas que se describen a continuación:

3.5.1. Generación de la matriz multivariable

La matriz multivariable (ver Figura 32) fue creada en base a los datos de O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , NO , NO_x , $PM_{2.5}$, humedad relativa, radiación solar, temperatura media,

NDVI, PV, TB, LSE, LST, radiancia de las bandas multispectrales y coordenadas geográficas, correspondientes a las estaciones de monitoreo analizadas en cada una de las tres fechas de estudio.

Cabe mencionar que los datos de los contaminantes y variables meteorológicas fueron validados en el apartado 3.2.2. Por otro lado, la información proveniente del procesamiento digital de las imágenes satelitales fue asignada a cada uno de los puntos de las estaciones mediante la herramienta “Extract Values To Points” del software ArcGIS 10.1.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P | Q | R | S | T | U | V | W | X | Y |
|----|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|---------|-----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|-----------|-----------|---|
| 1 | O3 | NO2 | NO2 | CO | NO | NOx | PM2.5 | HUM | RAD | TEM | NDVI | PV | TB | LSE | LST | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | LAT | LON | |
| 2 | 43.395 | 2.285 | 10.075 | 0.250 | 8.795 | 18.870 | 10.885 | 52.360 | 228.875 | 17.525 | 0.11163 | 0.11524 | 21.78200 | 0.98027 | 22.38224 | 93.44375 | 86.49375 | 75.15718 | 68.24125 | 50.30284 | 13.84071 | 4.71168 | -63.10778 | -78.48720 | |
| 3 | 41.890 | 3.422 | 7.900 | 0.410 | 4.360 | 12.420 | 20.225 | 49.335 | 487.660 | 18.295 | 0.22082 | 0.43242 | 21.4422 | 0.98120 | 23.5317 | 75.11294 | 72.00795 | 61.24550 | 60.53006 | 65.71217 | 14.16961 | 3.95235 | -6.02983 | -78.14720 | |
| 4 | 37.285 | 5.125 | 15.615 | 0.500 | 12.470 | 28.040 | 4.945 | 44.390 | 707.835 | 18.780 | 0.10891 | 0.31459 | 21.92191 | 0.98020 | 23.02945 | 70.12817 | 67.45525 | 57.51883 | 51.06939 | 36.79939 | 8.23177 | 2.58038 | -6.18000 | -78.49000 | |
| 5 | 41.825 | 6.920 | 24.820 | 0.685 | 14.360 | 38.245 | 2.825 | 42.825 | 310.735 | 18.740 | 0.41023 | 0.51991 | 21.21295 | 0.98164 | 22.22183 | 61.33517 | 54.74880 | 47.42147 | 39.69020 | 52.76980 | 9.66799 | 2.62194 | -6.20000 | -78.31000 | |
| 6 | 34.220 | 2.135 | 6.790 | 0.275 | 1.000 | 8.205 | 18.380 | 37.000 | 276.565 | 18.690 | 0.06681 | 0.14700 | 21.59913 | 0.97963 | 22.72001 | 88.47117 | 80.62305 | 83.96100 | 71.72180 | 50.31488 | 13.20424 | 6.29834 | -6.10778 | -78.19220 | |
| 7 | 61.510 | 2.270 | 13.395 | 0.440 | 5.530 | 18.930 | 14.490 | 47.615 | 418.700 | 18.545 | 0.18657 | 0.22072 | 20.72400 | 0.97955 | 21.84084 | 84.25349 | 86.52094 | 78.55454 | 74.66637 | 64.04817 | 15.95451 | 4.48179 | -0.09813 | -78.44720 | |
| 8 | 54.190 | 4.515 | 22.955 | 0.520 | 6.675 | 29.625 | 16.920 | 47.915 | 138.785 | 17.335 | 0.10641 | 0.16973 | 19.147971 | 0.97919 | 20.96478 | 62.95248 | 58.49794 | 48.66653 | 41.51236 | 29.45772 | 6.72137 | 1.89436 | -6.18000 | -78.49000 | |
| 9 | 49.700 | 4.785 | 18.910 | 0.520 | 12.960 | 31.340 | 18.770 | 35.915 | 500.395 | 18.605 | 0.27413 | 0.26908 | 19.14438 | 0.97959 | 20.38180 | 63.14911 | 57.57853 | 49.21449 | 29.84949 | 39.48617 | 8.51881 | 1.21291 | -6.22000 | -78.31000 | |
| 10 | 53.430 | 0.490 | 6.820 | 0.230 | 3.320 | 10.130 | 6.740 | 27.015 | 741.930 | 21.200 | 0.11068 | 0.18456 | 20.66022 | 0.97929 | 21.78868 | 72.93353 | 66.88478 | 57.15469 | 48.16165 | 34.58466 | 8.31034 | 2.40005 | -6.30000 | -78.46000 | |
| 11 | 27.455 | 0.355 | 6.905 | 0.330 | 6.148 | 15.015 | 20.350 | 48.185 | 215.640 | 18.890 | 0.08966 | 0.25831 | 20.34642 | 0.97964 | 20.96465 | 76.59870 | 79.14076 | 65.07941 | 60.57941 | 42.51740 | 10.55225 | 4.64223 | -6.10778 | -78.49720 | |
| 12 | 29.950 | 1.270 | 6.945 | 0.215 | 3.090 | 9.835 | 34.820 | 42.460 | 219.900 | 20.020 | 0.21869 | 0.35802 | 21.27257 | 0.98017 | 21.82399 | 72.78068 | 72.78068 | 67.96869 | 60.57002 | 60.39942 | 15.30125 | 3.35142 | -6.09813 | -78.14720 | |
| 13 | 25.850 | 1.820 | 14.945 | 0.490 | 18.820 | 33.770 | 7.550 | 35.955 | 488.900 | 20.205 | 0.11000 | 0.25881 | 20.45234 | 0.97981 | 21.00769 | 68.13394 | 62.85364 | 55.05838 | 43.82749 | 34.17572 | 8.90638 | 2.61513 | -6.18000 | -78.49000 | |
| 14 | 29.975 | 0.895 | 6.480 | 0.245 | 7.450 | 14.000 | 0.000 | 11.460 | 604.105 | 23.645 | 0.05154 | 0.21140 | 20.48015 | 0.97949 | 21.04428 | 78.50648 | 77.27012 | 64.30944 | 58.16540 | 38.71213 | 11.86188 | 3.57648 | 6.30000 | -78.46000 | |

Figura 32. Matriz multivariable para la predicción de O₃.

3.5.2. Cálculo del modelo predictivo

Para obtener el modelo de predicción de ozono troposférico mediante mínimos cuadrados parciales, se empleó el paquete “pls” del software R 3.4.2 (ver Figura 33), cuyo código se muestra en el Anexo 5 e incluye la obtención y visualización de los parámetros y gráficas de validación y predicción del modelo.

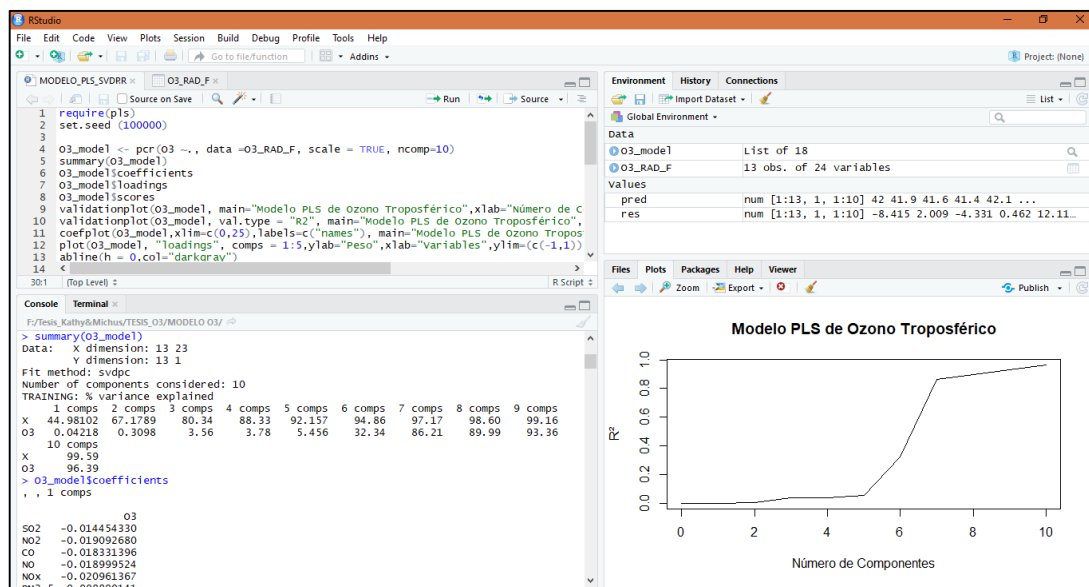
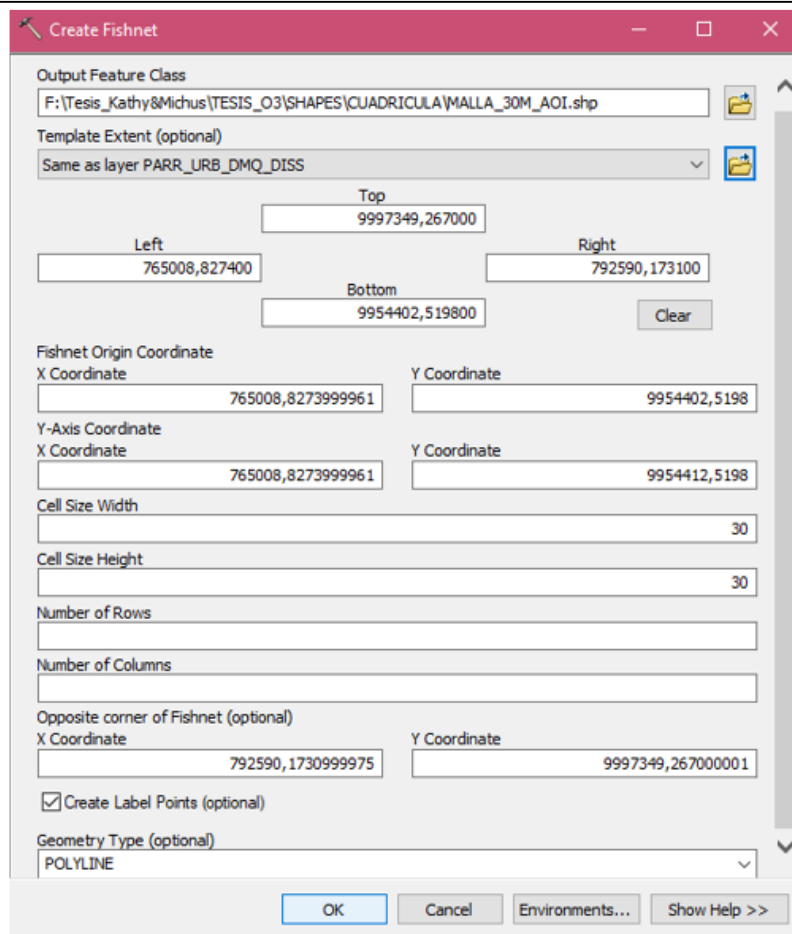


Figura 33. Obtención del modelo predictivo en el software R

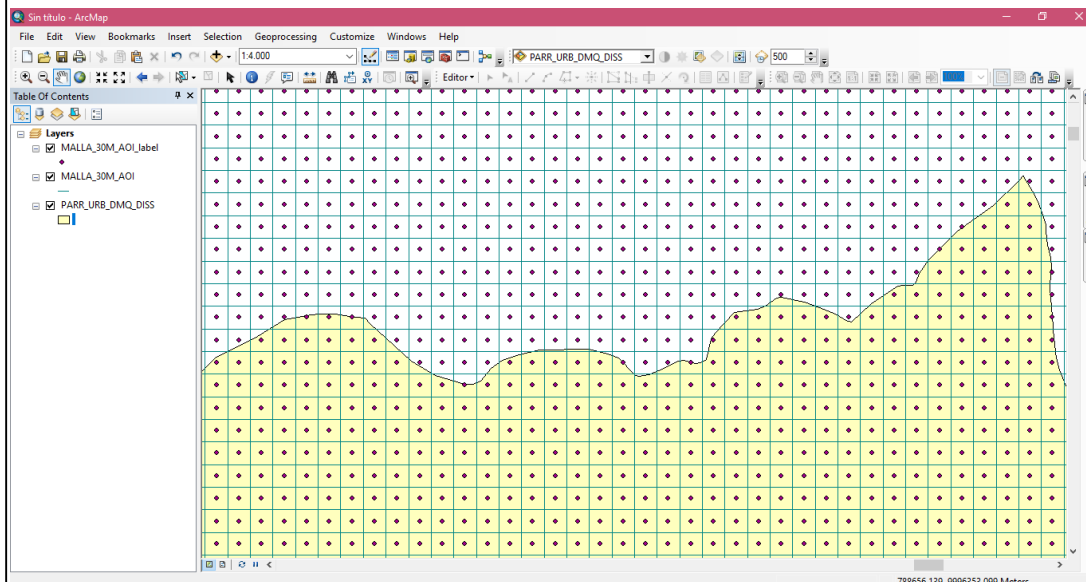
3.5.3. Visualización del modelo de predicción

Los modelos de predicción de ozono troposférico del 21 de junio de 2013, 26 de julio del 2014 y 11 de junio de 2015 se obtuvieron en base a una matriz multivariable para cada una de las fechas estudiadas. Estas matrices fueron generadas con datos de contaminantes, variables meteorológicas, índices ambientales, radiancia de las bandas multispectrales y posición geográfica de una red de puntos distribuidos dentro del área de estudio indirecta (ver Figura 1).

Para obtener los datos de concentración de los contaminantes y variables meteorológicas, se creó una malla de puntos dispuestos dentro del área de estudio con un intervalo de 30 m, por medio de la herramienta "Create Fishnet" del software ArcGIS 10.1 (ver Figura 34).



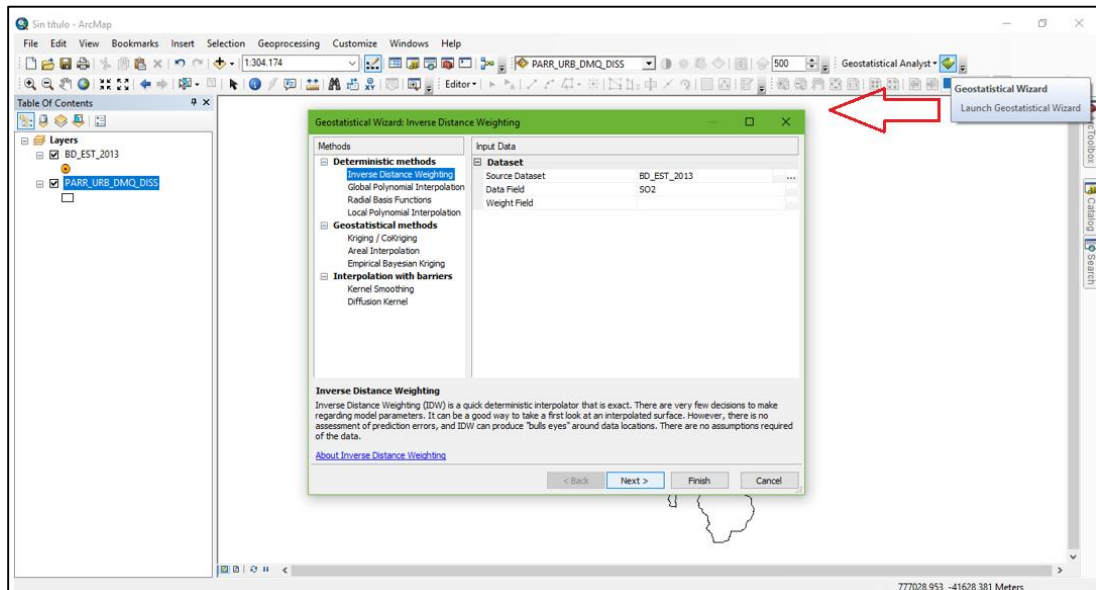
a) Personalización de la herramienta “Create Fishnet”



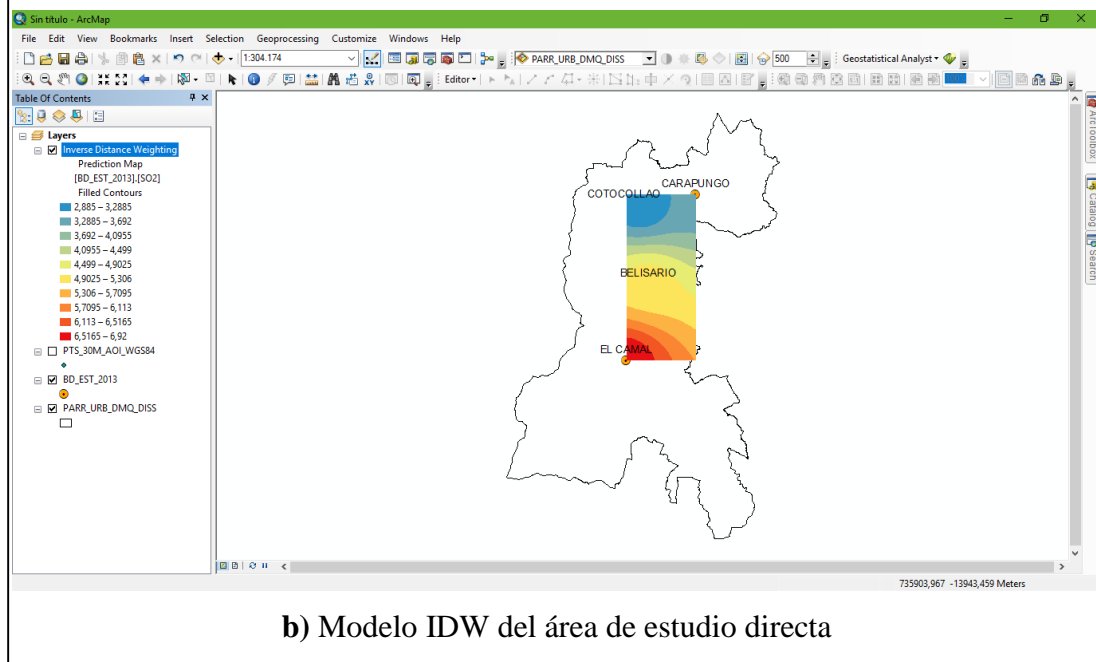
b) Capas de líneas y puntos que forman el mallado

Figura 34. Creación de la malla de puntos en el software ArcGIS 10.1

A continuación, se realizó una interpolación por IDW con los puntos de las estaciones correspondientes a cada una de las fechas antes mencionadas, por medio de la función “Geostatistical Wizard” del software ArcGIS 10.1; donde se obtuvo un modelo de predicción para cada variable dentro del área de estudio directa (ver Figura 35).



a) Personalización de la herramienta “Geostatistical Wizard”

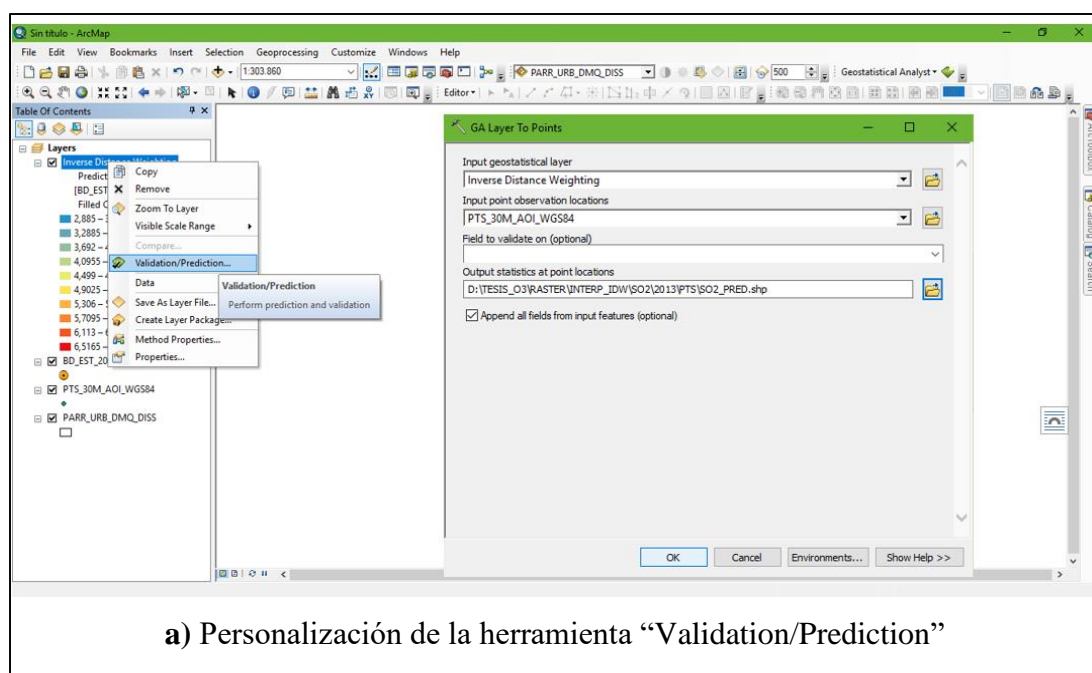


b) Modelo IDW del área de estudio directa

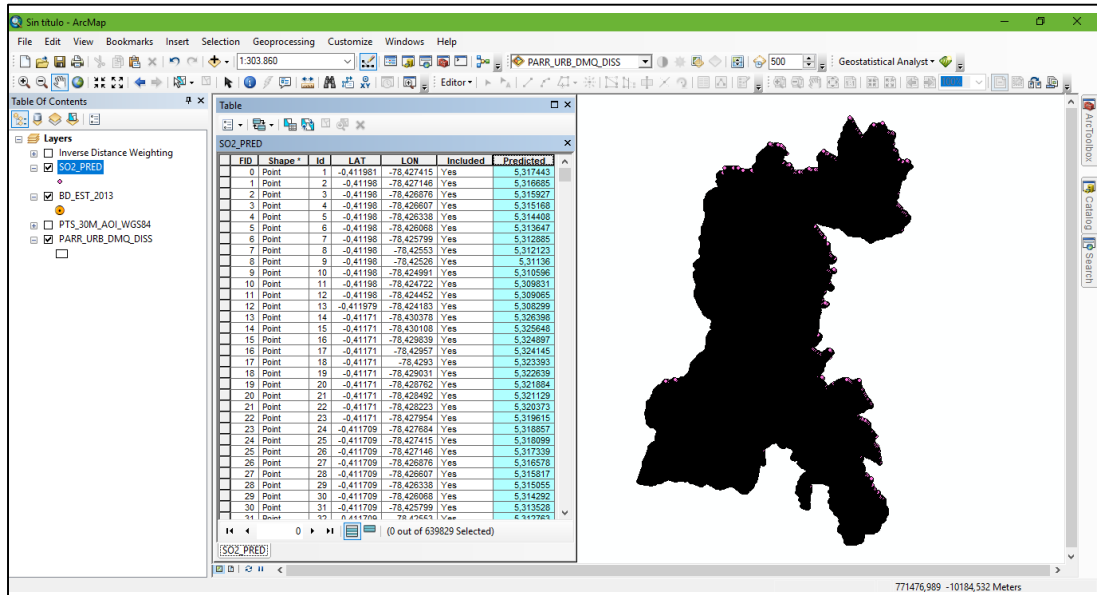
Figura 35. Modelo de IDW para el área de estudio directa

Vale destacar que se utilizó el método de la media ponderada por el inverso de la distancia (IDW), debido al reducido número de puntos y a la similitud que existió entre los datos de los contaminantes y variables meteorológicas de aquellos puntos cercanos entre sí (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI, 2014).

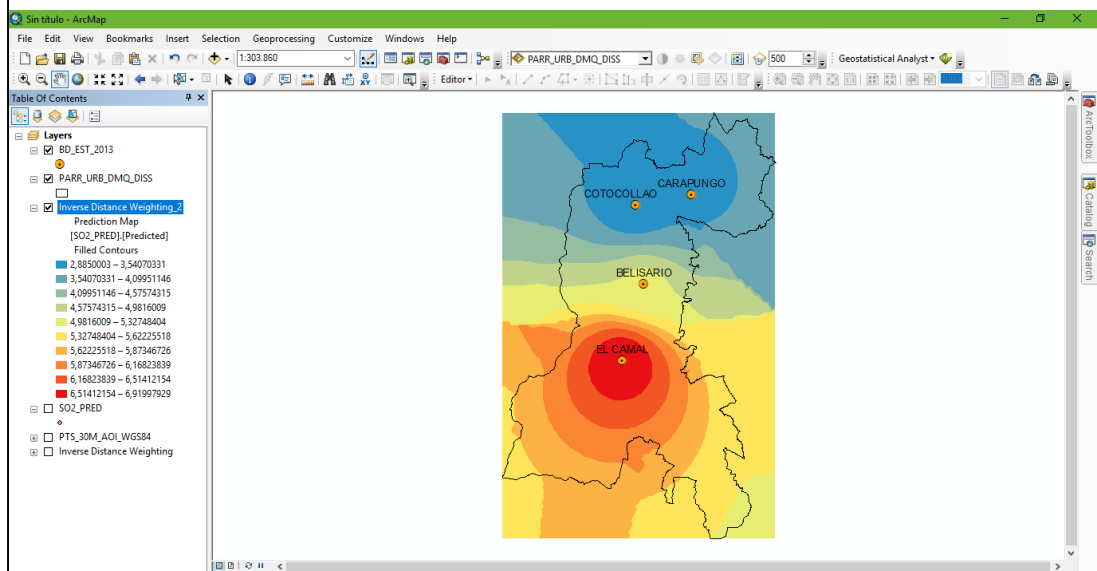
Una vez que se desarrolló el modelo de IDW con los puntos de las estaciones, se predijo el valor de los contaminantes y variables meteorológicas en cada uno de los puntos de la malla a través de la opción “Validation/Prediction”, que se despliega en el menú de propiedades del modelo. Con esta nueva malla de 639.829 puntos predichos, se generó una nueva interpolación por IDW con el fin de obtener datos de cada variable dentro del área de estudio indirecta (ver Figura 36), es decir, se extrapolaron los valores de cada una de las variables para toda el área de estudio definida.



Continua 



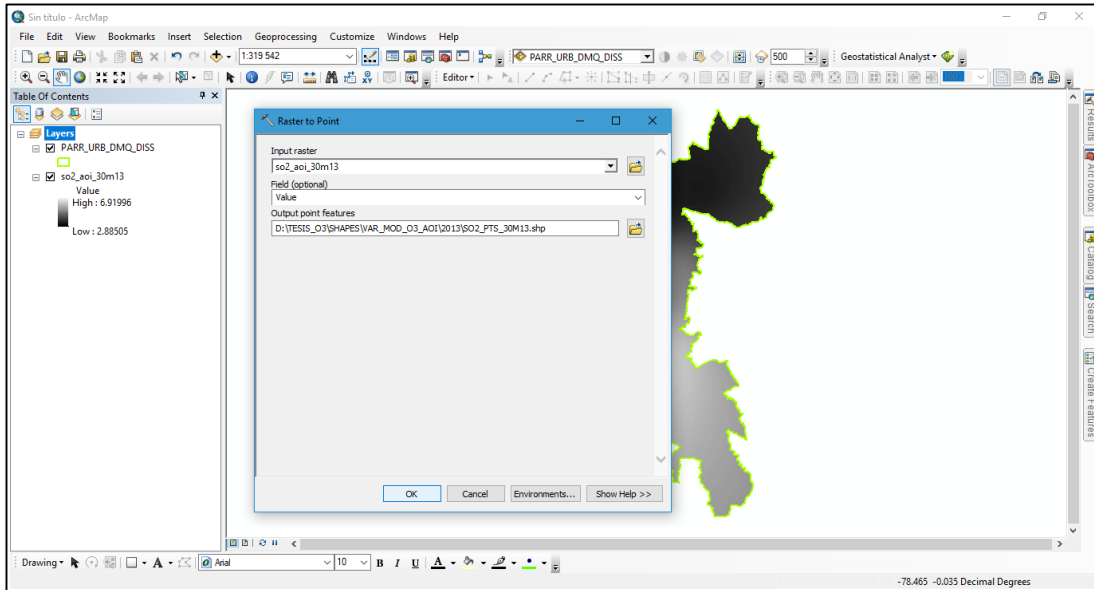
b) Tabla de atributos de la malla de puntos predichos



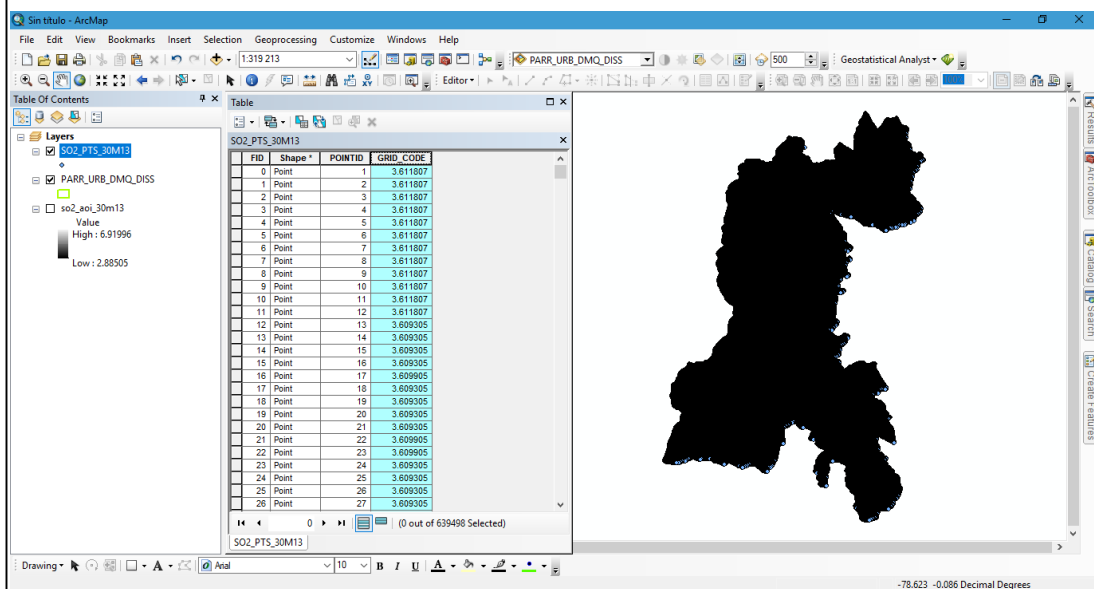
c) Modelo IDW del área de estudio indirecta

Figura 36. Modelo de IDW para el área de estudio indirecta

Posteriormente, se guardó el modelo de IDW anterior como un ráster, conservando el tamaño de píxel por default que asigna el software (0,0009 m) para evitar errores en la creación del mismo. Este ráster fue redimensionado con la ayuda de la función “Resample” a un tamaño de píxel de 30 m, para luego extraer los valores del centroide de cada píxel con la herramienta “Raster to Point” (ver Figura 37).



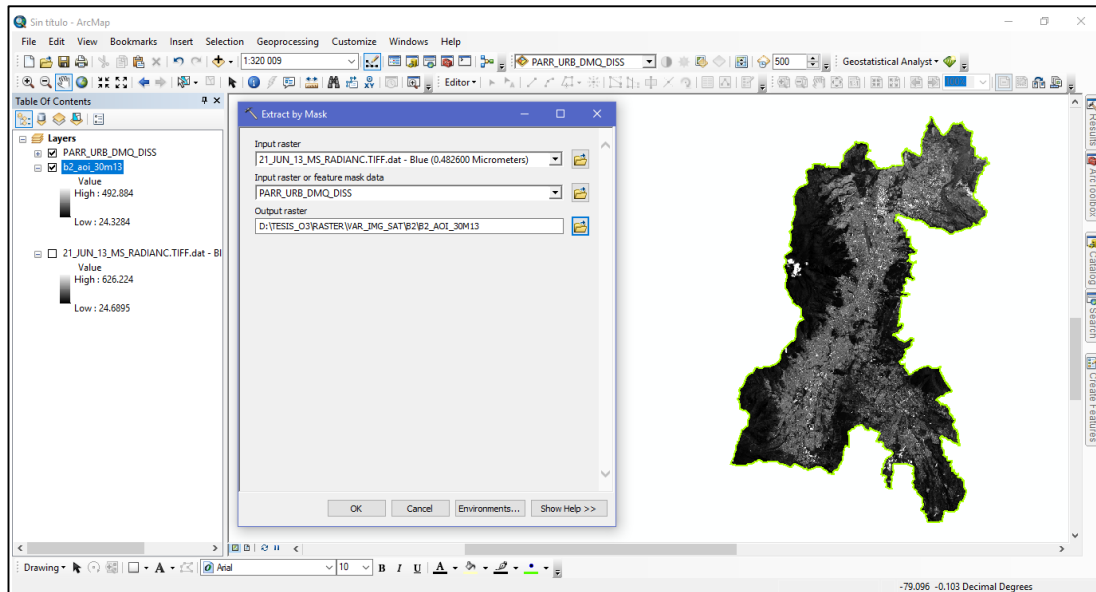
a) Personalización de la herramienta “Raster to Point”



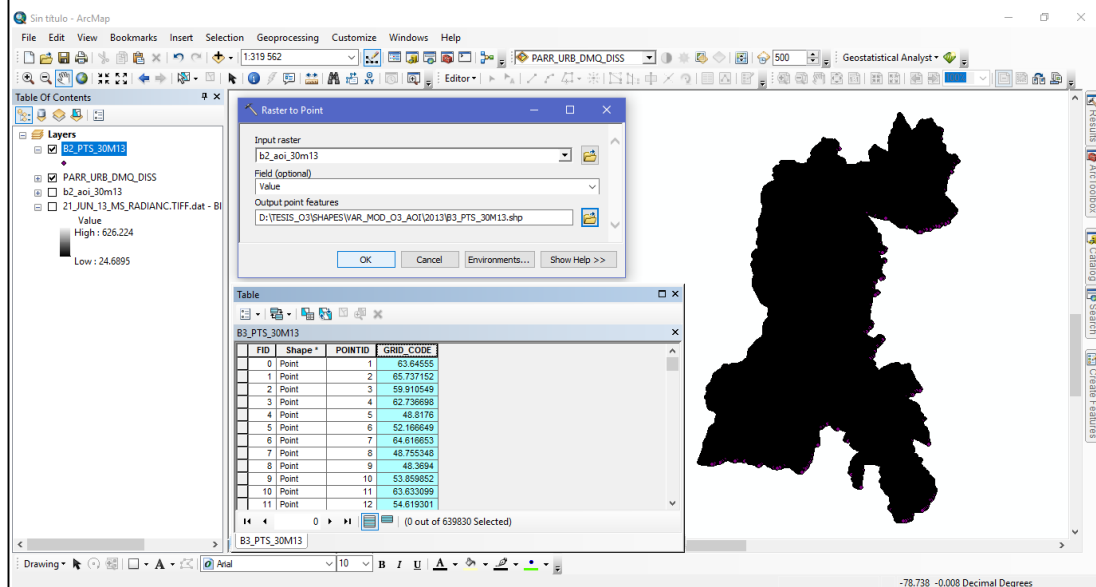
b) Tabla de atributos de la capa de puntos obtenidos a partir del ráster.

Figura 37. Extracción de los datos de contaminantes y variables meteorológicas

Por otro lado, para determinar los valores de los índices ambientales y de la radiancia de las bandas multispectrales se extrajo el área de interés de cada uno de los ráster con la ayuda de la función “Extract by Mask” del software ArcGIS. A continuación, se extrajeron los valores del centroe de cada píxel de los ráster cortados a través de la herramienta “Raster to Point” (ver Figura 38).



a) Personalización de la herramienta “Extract by Mask”



b) Tabla de atributos de la capa de puntos obtenidos a partir del ráster.

Figura 38. Extracción de valores de índices ambientales y radiancia de bandas

Como resultado de la unión de las tablas de cada uno de los shapes obtenidos anteriormente, en base al atributo de latitud, se crearon las matrices multivariable necesarias para estimar la concentración de ozono en cada uno de los años de estudio. Finalmente, los valores estimados de O₃ quedaron listos para ser representados en un sistema de información geográfica, luego del ingreso de dichas matrices en el apartado de predicción del código desarrollado en el software R (ver Anexo 5).

CAPÍTULO IV

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo PLS consta de dos pasos fundamentales. Primero, descompone la matriz de variables independientes en un conjunto más pequeño de componentes no correlacionados, con ayuda de la variable dependiente. Segundo, realiza una regresión de mínimos cuadrados sobre estos componentes, en lugar de hacerlo sobre los datos originales, usando la variable dependiente original.

De acuerdo a Vega & Guzmán (2011), el número de componentes necesarios para el análisis de regresión debe ser menor que el número de predictoras, ya que describen la máxima correlación existente entre las variables originales y la variable dependiente. Como se indica en la Tabla 13 el modelo de ozono troposférico consta de diez componentes, conformados por “loadings” o cargas que representan la cantidad de información que aporta cada variable dentro de cada uno de ellos.

Tabla 13
Cargas de las variables originales dentro de cada componente

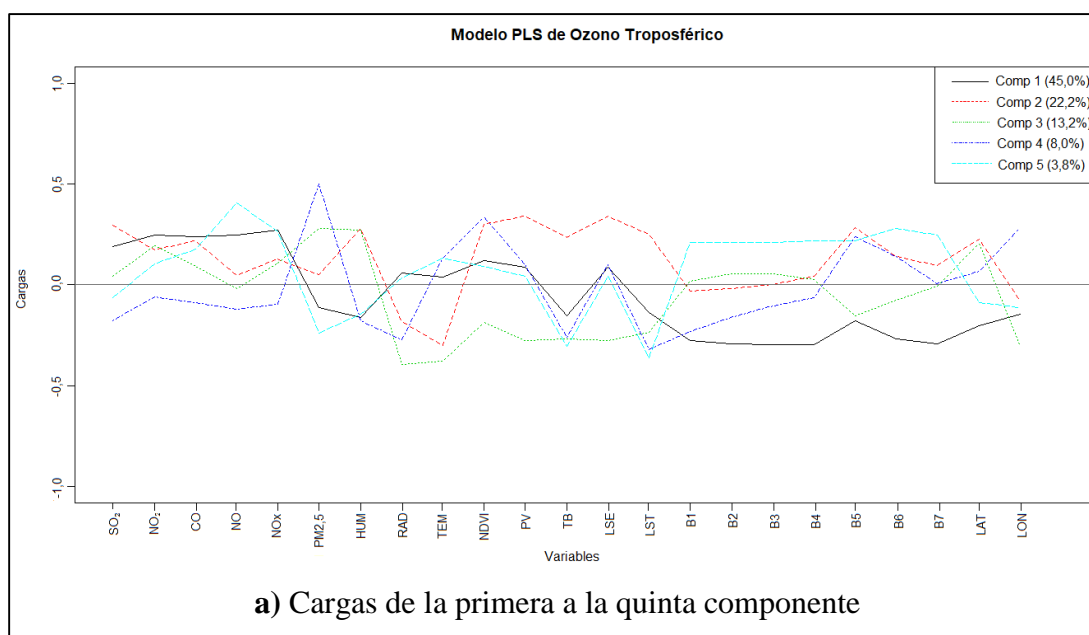
| VARIABLE | COMPONENTES | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| SO ₂ | 0,188 | 0,295 | — | -0,176 | — | — | 0,378 | 0,163 | 0,361 | -0,224 |
| NO ₂ | 0,249 | 0,172 | 0,193 | — | 0,102 | -0,179 | 0,237 | -0,167 | 0,208 | -0,240 |
| CO | 0,239 | 0,220 | — | — | 0,175 | -0,352 | — | — | -0,295 | 0,203 |
| NO | 0,248 | — | — | -0,121 | 0,407 | — | -0,553 | 0,129 | 0,230 | 0,139 |
| NO _x | 0,273 | 0,128 | 0,108 | — | 0,263 | -0,138 | -0,125 | — | 0,240 | — |
| PM _{2,5} | -0,115 | — | 0,281 | 0,499 | -0,239 | — | -0,148 | 0,476 | 0,328 | -0,127 |
| HUM | -0,163 | 0,280 | 0,272 | -0,178 | -0,144 | — | — | -0,194 | -0,162 | 0,125 |
| RAD | — | -0,183 | -0,394 | -0,274 | — | -0,251 | — | 0,629 | -0,238 | -0,198 |
| TEM | — | -0,300 | -0,380 | 0,133 | 0,130 | — | — | -0,239 | 0,210 | — |
| NDVI | 0,119 | 0,301 | -0,188 | 0,335 | — | — | 0,259 | 0,198 | -0,223 | 0,250 |
| PV | — | 0,341 | -0,278 | 0,101 | — | 0,290 | -0,131 | — | — | -0,278 |
| TB | -0,153 | 0,236 | -0,270 | -0,261 | -0,305 | — | -0,229 | — | 0,269 | 0,215 |
| LSE | — | 0,341 | -0,278 | 0,101 | — | 0,290 | -0,130 | — | — | -0,278 |
| LST | -0,137 | 0,250 | -0,235 | -0,321 | -0,361 | — | — | — | 0,125 | 0,158 |
| B1 | -0,278 | — | — | -0,230 | 0,211 | 0,159 | 0,172 | — | — | -0,443 |

Continua

| | | | | | | | | | | |
|-----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B2 | -0,294 | — | — | -0,163 | 0,211 | — | — | — | -0,113 | -0,177 |
| B3 | -0,296 | — | — | -0,105 | 0,209 | — | — | 0,167 | 0,242 | 0,197 |
| B4 | -0,299 | — | — | — | 0,220 | -0,127 | — | — | — | — |
| B5 | -0,179 | 0,284 | -0,155 | 0,240 | 0,218 | -0,159 | 0,161 | — | -0,144 | 0,117 |
| B6 | -0,268 | 0,139 | — | 0,140 | 0,280 | — | — | — | 0,283 | 0,198 |
| B7 | -0,292 | — | — | — | 0,247 | 0,154 | — | — | — | — |
| LAT | -0,204 | 0,225 | 0,204 | — | — | -0,222 | -0,475 | — | -0,245 | -0,285 |
| LON | -0,147 | — | -0,304 | 0,284 | -0,112 | -0,646 | — | -0,325 | 0,122 | -0,248 |

Al analizar la Tabla 13, se observó que las variables predictoras NO₂ y B5 aportan información a nueve de los diez componentes que conforman el modelo; mientras que, las bandas B4 y B7 contribuyen en tan solo tres de ellos. Además, se detectó que ciertas variables no aportan a cada uno de los componentes, es decir, como menciona Kvalheim (2010), ciertos componentes no contienen información de todas las variables originales, puesto que al agregar estos datos se rompe la condición de ortogonalidad. Así también, destaca que las cargas correspondientes a cada componente, no son la mejor opción para determinar las variables más importantes que explican el vector de respuesta.

En la Figura 39, se presenta de manera gráfica las cargas de cada uno de los diez componentes del modelo según las veinticuatro variables predictoras consideradas, explicadas anteriormente en la Tabla 13.



Continúa

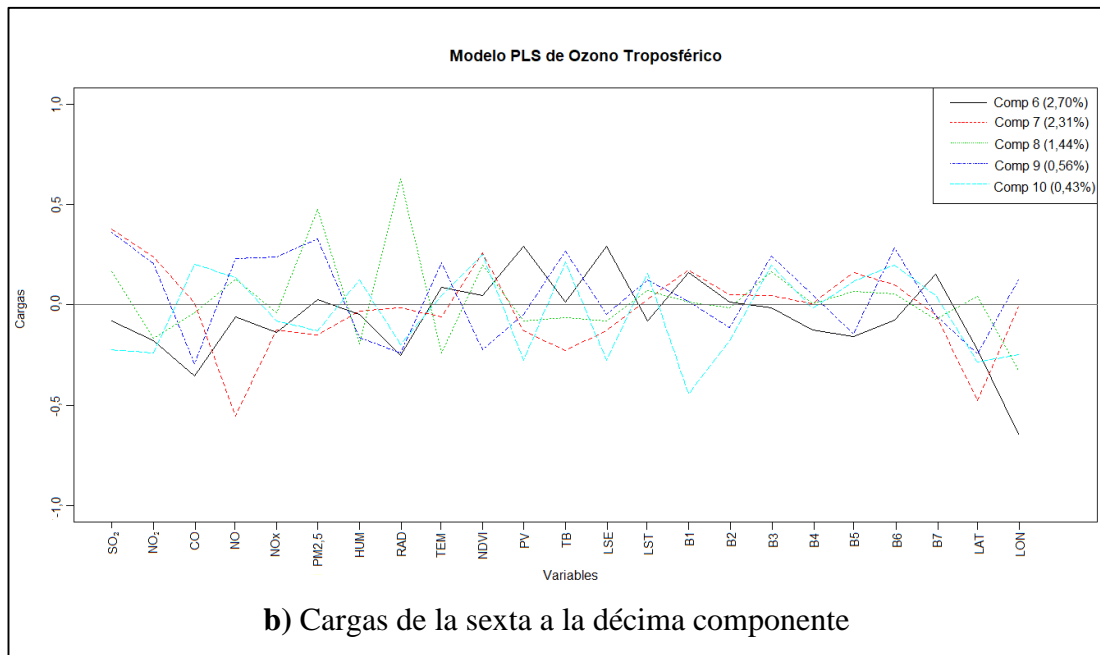


Figura 39. “Loadings” de las variables predictoras en cada componente

Como se distingue en la Figura 39, los porcentajes más altos mostrados en la simbología corresponden al primero, segundo, tercero y cuarto componente; estos valores indican la cantidad de información que contiene cada componente de la matriz inicial, más no el aporte de cada uno de ellos dentro del modelo. Según Vega & Guzmán (2011), la mejor descripción del modelo no se da necesariamente con los primeros componentes, ya que busca explicar completamente la varianza del vector de respuesta al recabar la mayor cantidad de información de las variables originales, descomponiéndolas en nuevas dimensiones o variables latentes.

Los coeficientes de regresión que se muestran en la

Tabla 14, son calculados a partir de la covarianza entre las variables independientes y el vector de respuesta, además de ser utilizados para transformar las variables predictoras a cada uno de los componentes. Sin embargo, existen otros coeficientes de regresión que el algoritmo almacena en el archivo de datos del modelo e intervienen en la conversión de las variables latentes (componentes) a la variable dependiente (Kvalheim, 2010).

Tabla 14***Coefficientes de regresión iniciales, de las variables originales a cada componente***

| VARIABLE | COMPONENTES | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| SO ₂ | -0,014 | 0,067 | 0,118 | 0,191 | 0,296 | 0,945 | 5,521 | 6,184 | 3,962 | 2,465 |
| NO ₂ | -0,019 | 0,028 | 0,268 | 0,294 | 0,125 | 1,544 | 4,413 | 3,733 | 2,455 | 0,848 |
| CO | -0,018 | 0,042 | 0,155 | 0,192 | -0,099 | 2,688 | 2,810 | 2,654 | 4,465 | 5,827 |
| NO | -0,019 | -0,006 | -0,029 | 0,021 | -0,654 | -0,176 | -6,872 | -6,348 | -7,759 | -6,832 |
| NO _x | -0,021 | 0,014 | 0,148 | 0,188 | -0,248 | 0,845 | -0,675 | -0,830 | -2,304 | -2,828 |
| PM _{2,5} | 0,009 | 0,022 | 0,372 | 0,165 | 0,561 | 0,360 | -1,437 | 0,498 | -1,518 | -2,370 |
| HUM | 0,013 | 0,090 | 0,428 | 0,502 | 0,740 | 1,122 | 0,751 | -0,036 | 0,962 | 1,799 |
| RAD | -0,005 | -0,055 | -0,546 | -0,432 | -0,492 | 1,491 | 1,336 | 3,894 | 5,357 | 4,029 |
| TEM | -0,003 | -0,086 | -0,559 | -0,614 | -0,830 | -1,534 | -2,273 | -3,248 | -4,536 | -4,223 |
| NDVI | -0,009 | 0,074 | -0,160 | -0,299 | -0,451 | -0,821 | 2,316 | 3,121 | 4,491 | 6,161 |
| PV | -0,007 | 0,087 | -0,259 | -0,301 | -0,371 | -2,666 | -4,246 | -4,578 | -4,295 | -6,158 |
| TB | 0,012 | 0,077 | -0,260 | -0,151 | 0,355 | 0,248 | -2,519 | -2,785 | -4,436 | -2,996 |
| LSE | -0,007 | 0,087 | -0,259 | -0,301 | -0,372 | -2,667 | -4,245 | -4,577 | -4,293 | -6,154 |
| LST | 0,011 | 0,079 | -0,213 | -0,079 | 0,519 | 1,151 | 1,453 | 1,736 | 0,969 | 2,030 |
| B1 | 0,021 | 0,012 | 0,032 | 0,128 | -0,222 | -1,481 | 0,596 | 0,660 | 0,553 | -2,411 |
| B2 | 0,023 | 0,017 | 0,084 | 0,151 | -0,198 | -0,310 | 0,292 | 0,225 | 0,917 | -0,265 |
| B3 | 0,023 | 0,024 | 0,092 | 0,136 | -0,211 | -0,097 | 0,481 | 1,159 | -0,332 | 0,988 |
| B4 | 0,023 | 0,034 | 0,066 | 0,093 | -0,273 | 0,729 | 0,785 | 0,802 | 0,478 | 0,349 |
| B5 | 0,014 | 0,092 | -0,101 | -0,201 | -0,563 | 0,697 | 2,643 | 2,912 | 3,795 | 4,581 |
| B6 | 0,021 | 0,059 | -0,038 | -0,096 | -0,561 | 0,049 | 1,243 | 1,460 | -0,279 | 1,043 |
| B7 | 0,022 | 0,049 | 0,039 | 0,036 | -0,374 | -1,590 | -2,182 | -2,467 | -2,140 | -1,837 |
| LAT | 0,016 | 0,078 | 0,332 | 0,304 | 0,449 | 2,201 | -3,555 | -3,386 | -1,881 | -3,790 |
| LON | 0,011 | -0,011 | -0,389 | -0,507 | -0,322 | 4,781 | 4,628 | 3,306 | 2,555 | 0,896 |

En la Figura 40 se muestra la importancia de cada variable predictora dentro del modelo, como se aprecia las variables que aportan con mayor cantidad de información al modelo son: CO, NO, NDVI, PV y LSE. Por el contrario, las variables NO₂, B2, B3, B4 y LON no tienen un aporte virtualmente significativo dentro del modelo; sin embargo, no fueron eliminadas ya que contribuyen con información solamente en ciertos componentes como se constata en la Tabla 13.

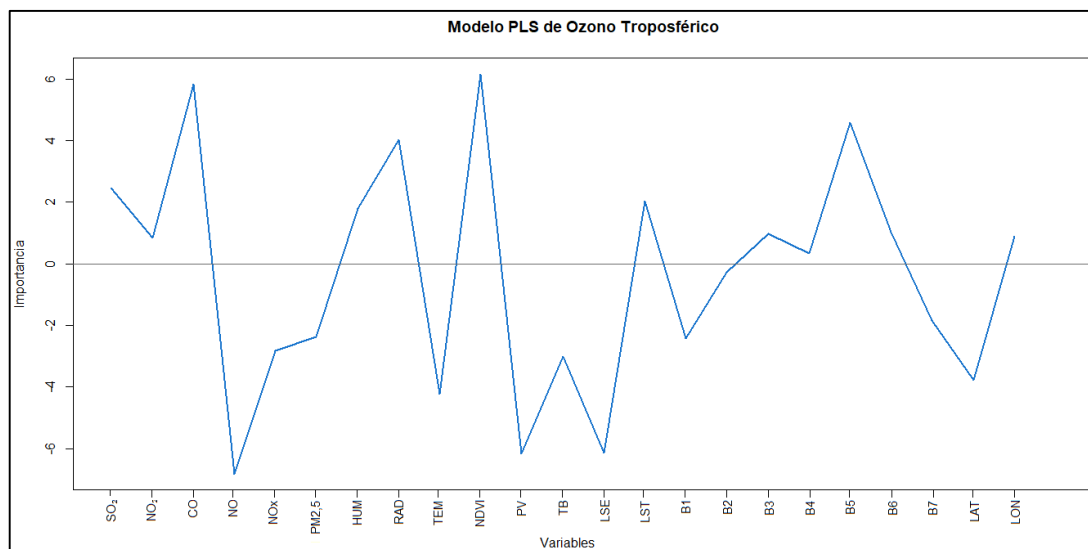


Figura 40. Importancia de las variables predictoras en el modelo de O₃

Según Vega & Guzmán (2011), en PLS el número de componentes se selecciona de acuerdo a dos aspectos importantes: la cantidad de varianza que explican los componentes de las variables predictoras (X), y la cantidad de varianza que éstos explican de la variable dependiente (O₃), es decir, continúan con la reducción dimensional de la matriz inicial hasta que los componentes explican más del 95% de la varianza de la respuesta (ver Tabla 15).

Tabla 15

Varianza explicada por el modelo según el número de componente

| VARIANZA | COMPONENTES | | | | | | | | | |
|----------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| X | 44,98 | 67,18 | 80,34 | 88,33 | 92,16 | 94,86 | 97,17 | 98,60 | 99,16 | 99,59 |
| O ₃ | 0,04 | 0,31 | 3,56 | 3,78 | 5,46 | 32,34 | 86,21 | 89,99 | 93,36 | 96,39 |

Al analizar la Tabla 15, se distingue que con diez componentes, el modelo explica el 99,59% de la variabilidad de los datos de la matriz inicial (X). Por otro lado, la variabilidad del vector de respuesta (O₃) explicada hasta el sexto componente es prácticamente insuficiente, y a medida que se aumenta el número de variables latentes el modelo comienza a tener una varianza representativa llegando a explicar el 96,39%.

Una forma de comprender y valorar el resultado obtenido al aplicar la regresión por PLS, consiste en observar el cambio que se va produciendo en el coeficiente de

determinación (R^2) y en el error cuadrático medio de predicción (RMSEP) a medida que se van incorporando variables latentes al modelo (Alciaturi, Escobar, De La Cruz, & Rincón, 2003). Por esta razón se obtuvieron las figuras Figura 41 y Figura 42, donde se observa que el RMSEP es inversamente proporcional al R^2 , ya que, mientras se aumenta el número de componentes en el modelo se va reduciendo el error de predicción al mínimo posible y se incrementa la bondad de ajuste real del modelo.

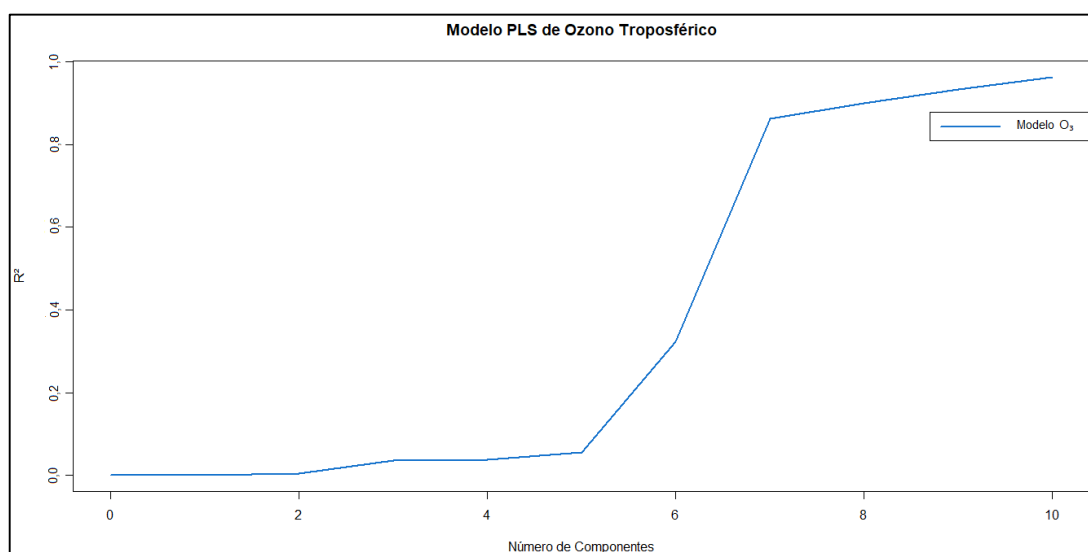


Figura 41. Coeficiente de determinación (R^2) del modelo de O_3

Como se aprecia en la Figura 41, el R^2 muestra un incremento significativo a partir del sexto componente y al llegar al décimo componente se obtiene un mejor ajuste del modelo, ya que el R^2 alcanza un valor muy cercano a 1.

Actualmente, es una práctica común evaluar la incertidumbre de predicción de los modelos multivariantes comparando los valores de referencia y las predicciones de un conjunto de datos. El RMSEP se calcula a partir de la raíz cuadrada media de la diferencia entre predicciones y valores de referencia (Bro, Rinnan, & Faber, 2005).

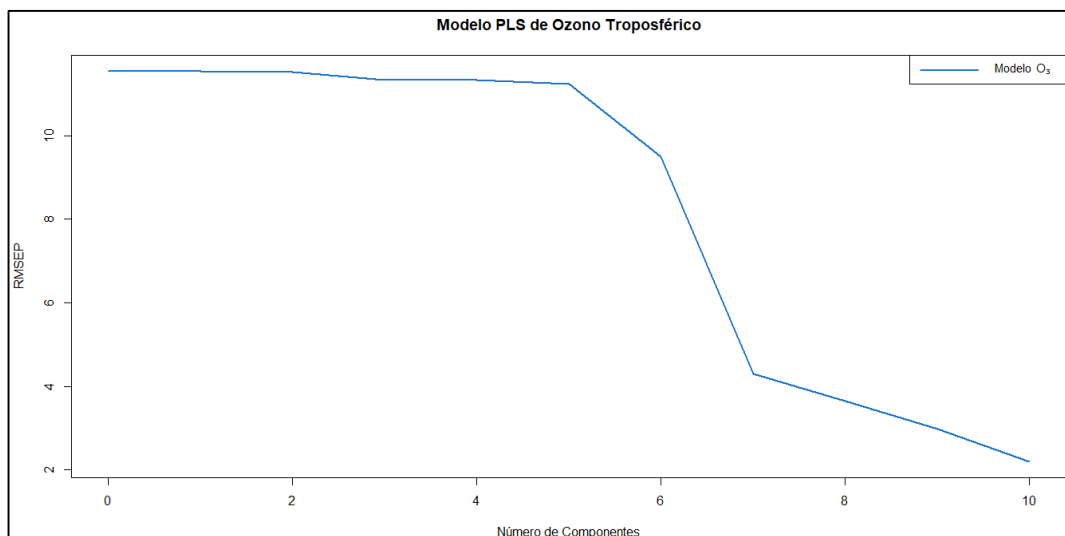


Figura 42. Error cuadrático medio de predicción (RMSEP) del modelo de O_3

Como se aprecia en la Figura 42, el error cuadrático medio de predicción no muestra una disminución significativa hasta el quinto componente; es a partir del sexto componente donde se empieza a minimizar la incertidumbre de predicción del modelo, hasta alcanzar un valor aproximado a 2 al llegar al décimo componente.

Según Esbensen et al. (2002), el RMSEP a menudo se encuentra ilustrado en el gráfico que relaciona los valores de referencia y las predicciones de un modelo; es por ello que se generó la gráfica de valores reales y predichos de ozono troposférico en las estaciones de monitoreo de la REMMAQ, que se presenta en la Figura 43.

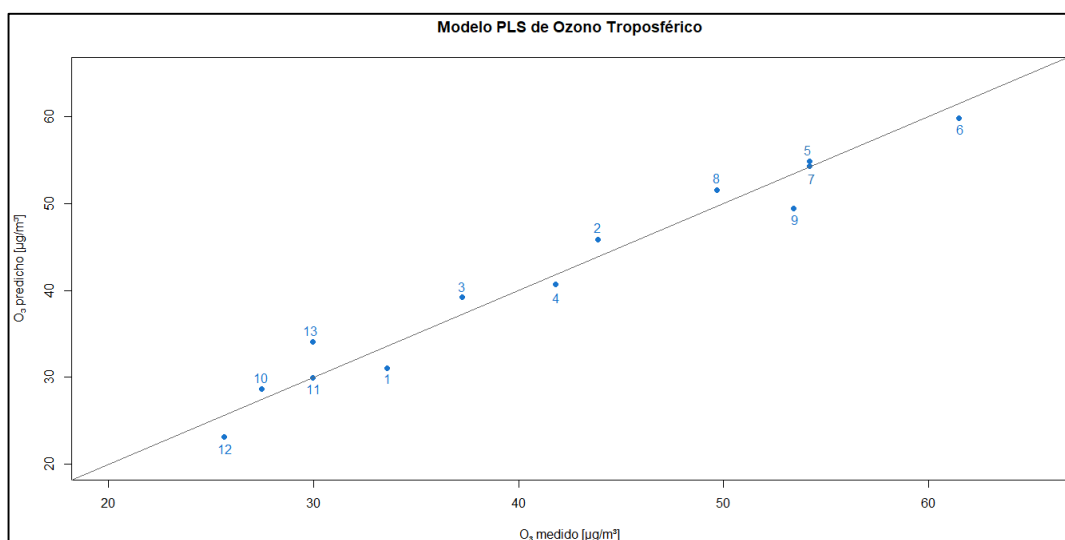


Figura 43. Relación entre la concentración de O_3 predicho y medido

Gráficamente la varianza residual es la distancia que existe entre cada una de las observaciones con respecto a la línea gris, misma que indica la tendencia de un modelo teórico que explica el 100% de la varianza del vector de respuesta. Además, se puede señalar que los puntos 7 y 11 son los más cercanos a esta línea, mientras que las observaciones 9 y 13 presentan mayor varianza residual (ver Figura 43). Es importante mencionar que la varianza residual está asociada al error aleatorio que se produce por factores incontrolables que ocurren en la naturaleza (Esbensen, Guyot, Westad, & Houmoller, 2002).

De acuerdo a Vega y Guzmán (2011), los residuos son muy importantes en el análisis de la regresión por mínimos cuadrados parciales, ya que al relacionar su dispersión con la disminución del RMSEP (ver Figura 44) se obtiene información sobre el grado de exactitud de los pronósticos.

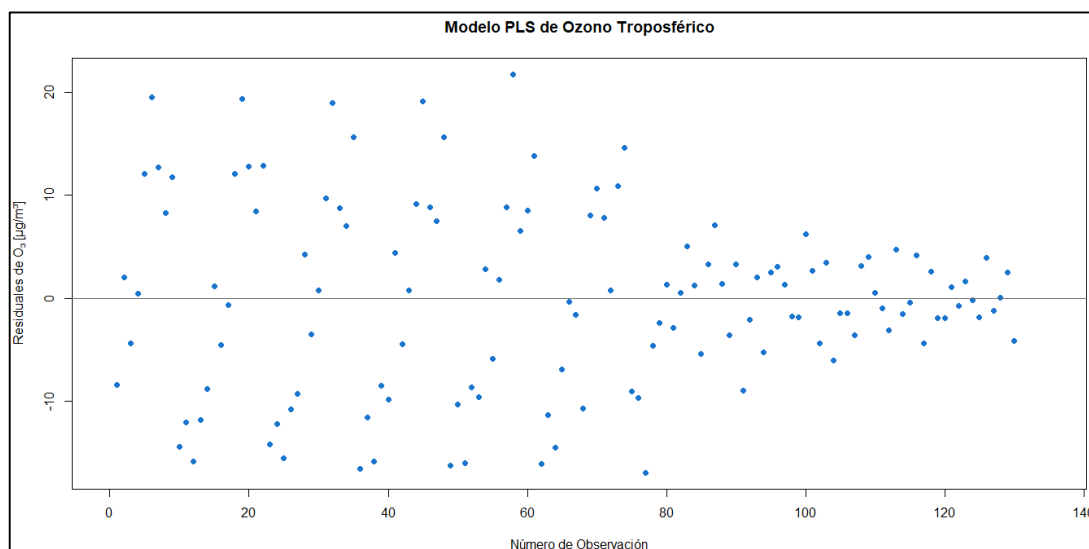


Figura 44. Dispersión de los residuos del modelo de O₃

En la Figura 44, se observa que los residuos presentan mayor dispersión en los primeros componentes, donde la varianza explicada de la variable dependiente es menor (ver Tabla 15). No obstante, a partir de la observación número 80 los residuales se aproximan más a cero; lo que corrobora que tanto el R² como la varianza explicada del vector de respuesta (ver Tabla 15) aumenten paulatinamente hasta alcanzar su valor máximo en el décimo componente.

Uno de los principios básicos para validar un modelo de regresión lineal o multivariante, es el análisis de residuos donde se comprueba que estos siguen una distribución normal (Guerra, Cabrera, & Fernández, 2003). Por este motivo, se realizó la validación del modelo de estimación de ozono troposférico, mediante la comparación de la distribución de sus residuos con una distribución normal estándar. En la Tabla 16 se muestra el resumen estadístico de los residuales del modelo de ozono troposférico (O₃), donde tanto la sumatoria como la media de éstos tienden a cero.

Tabla 16
Estadísticas de los residuos del modelo de O₃

| PARÁMETRO | VALOR |
|--|-----------------------|
| Sumatoria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $3,37 \cdot 10^{-11}$ |
| Media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | $-1 \cdot 10^{-10}$ |
| Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 0,2458 |
| Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 8,8920 |
| Coefficiente de asimetría de Fisher | 0,1278 |
| Curtosis | 2,6239 |

De los parámetros que se presentan en la Tabla 16, se distingue que las medidas de localización como la media y la mediana (Cuartil 2), tienen valores cercanos entre sí. De la misma manera, al examinar el coeficiente de asimetría positivo se comprueba que la distribución de datos está levemente cargada o alargada hacia los valores superiores a la media, lo que se ratifica mediante el histograma de frecuencia de los residuos (ver Figura 45). Por otro lado, el coeficiente de curtosis al ser menor a tres indica que la distribución es leptocúrtica, lo que significa que existe una mayor concentración de datos en torno a la media (Joglekar, 2003).

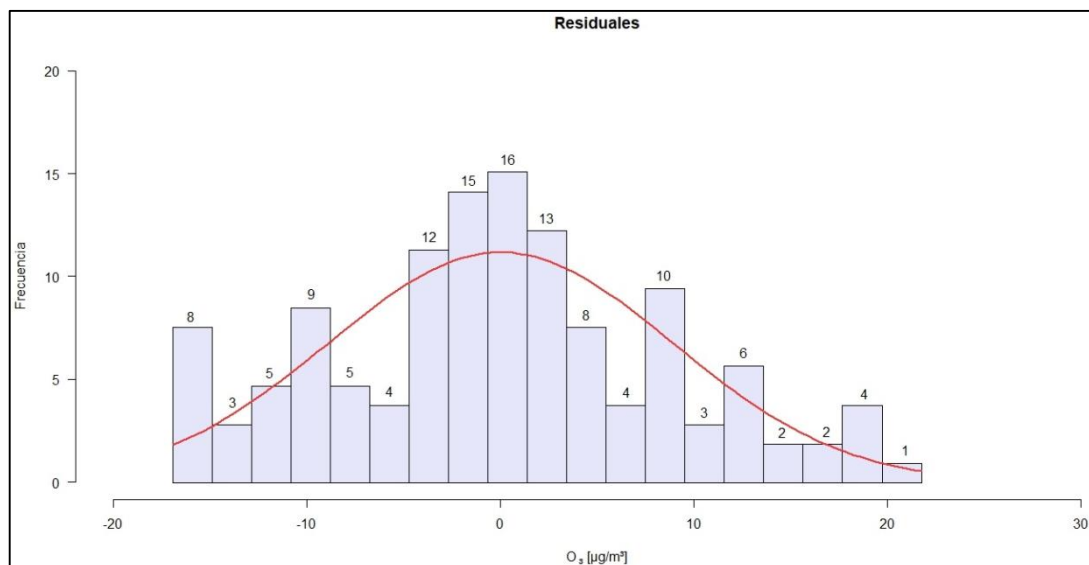


Figura 45. Histograma de residuales de O₃

El histograma de los residuos (ver Figura 45) permite comprobar gráficamente la hipótesis de normalidad (Senado, Vila, & Juan, 2008), en este caso vemos que la distribución es campaniforme, lo que significa que la curva es semejante a la campana de Gauss y tiene un solo pico en el centro de la distribución; dos características esenciales de la distribución normal estándar.

Una vez que se validó el modelo de ozono troposférico mediante el análisis de residuos se obtuvo un mapa para cada una de las fechas de estudio, en los que se pudo visualizar el comportamiento del O₃ estimado para el Distrito Metropolitano de Quito, como se observa en las figuras Figura 46, Figura 47 y Figura 48.

Las concentraciones de ozono troposférico estimadas durante los años 2013, 2014 y 2015 alcanzaron valores máximos de 92,42, 94,69 y 94,84 µg/m³, respectivamente. De acuerdo al IQCA (2016) éstas se encuentran dentro del “nivel aceptable” (51-100 µg/m³) de concentración de O₃ durante 8 horas, y de la misma forma no sobrepasan el límite de concentración (100 µg/m³) promedio durante 8 horas de la OMS (2016).

Al analizar la Figura 46, se observó que las zonas con mayor concentración de O₃ fueron Sangolquí, Alangasí, Conocoto y Cruz Loma; mientras que las concentraciones más bajas se presentan en los sectores donde el DMQ limita con las parroquias de Pomasqui y Nono. En la Figura 47, la parroquia de Sangolquí registra la concentración más alta de O₃, así también se distinguen concentraciones medianamente altas en las

zonas aledañas a las estaciones utilizadas durante este año; por el contrario, los valores más bajos de ozono se reflejan en los sectores limítrofes entre en el DMQ y las parroquias de Nono y Lloa. Por último, en la Figura 48 se advierte que dentro de la mayor parte del área de estudio existen concentraciones bajas, que oscilan entre 1,01 y 30,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; en cambio los sectores de Sangolquí, Conocoto y Alangasí manifiestan valores altos de ozono.

Cabe mencionar que los contaminantes primarios que dan origen al ozono troposférico, se desplazan conforme la dirección del viento; razón por la cual, se observa un incremento en la concentración de O_3 a las afueras de los centros urbanos y en sectores con mayor altura sobre el nivel del mar (Secretaría del Ambiente, 2015).

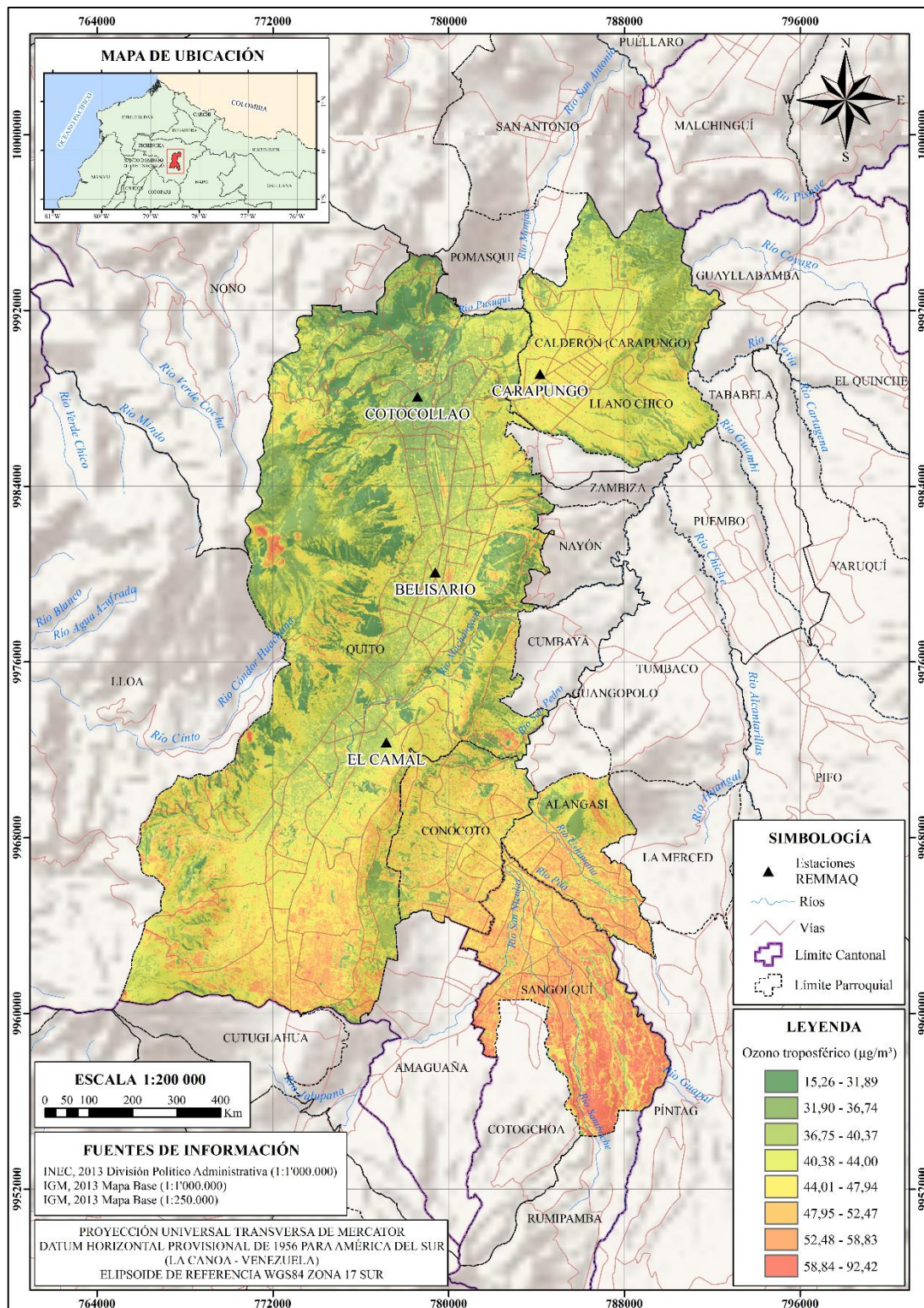


Figura 46. Mapa de concentración de ozono troposférico – 21 de junio de 2013

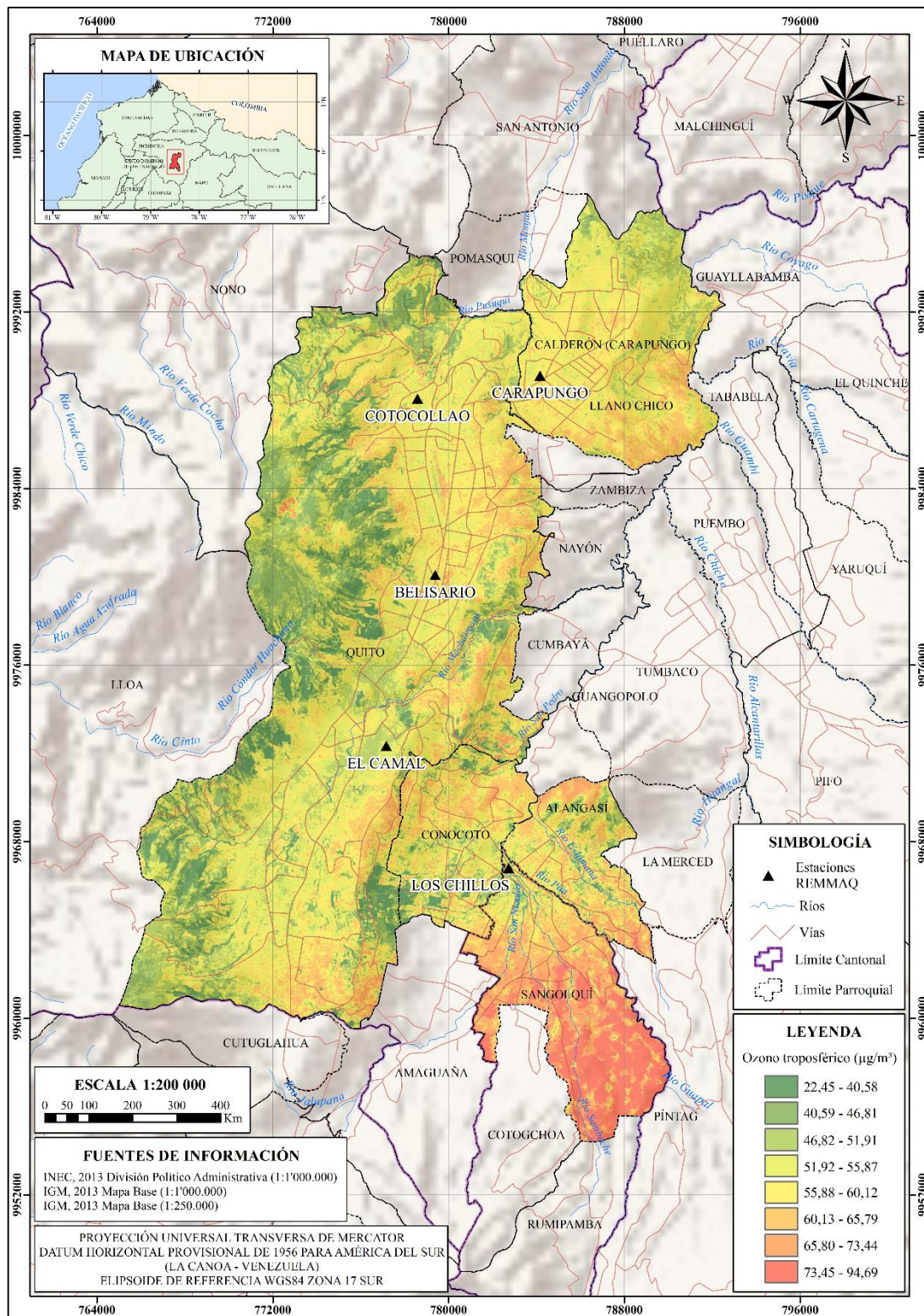


Figura 47. Mapa de concentración de ozono troposférico – 26 de julio de 2014

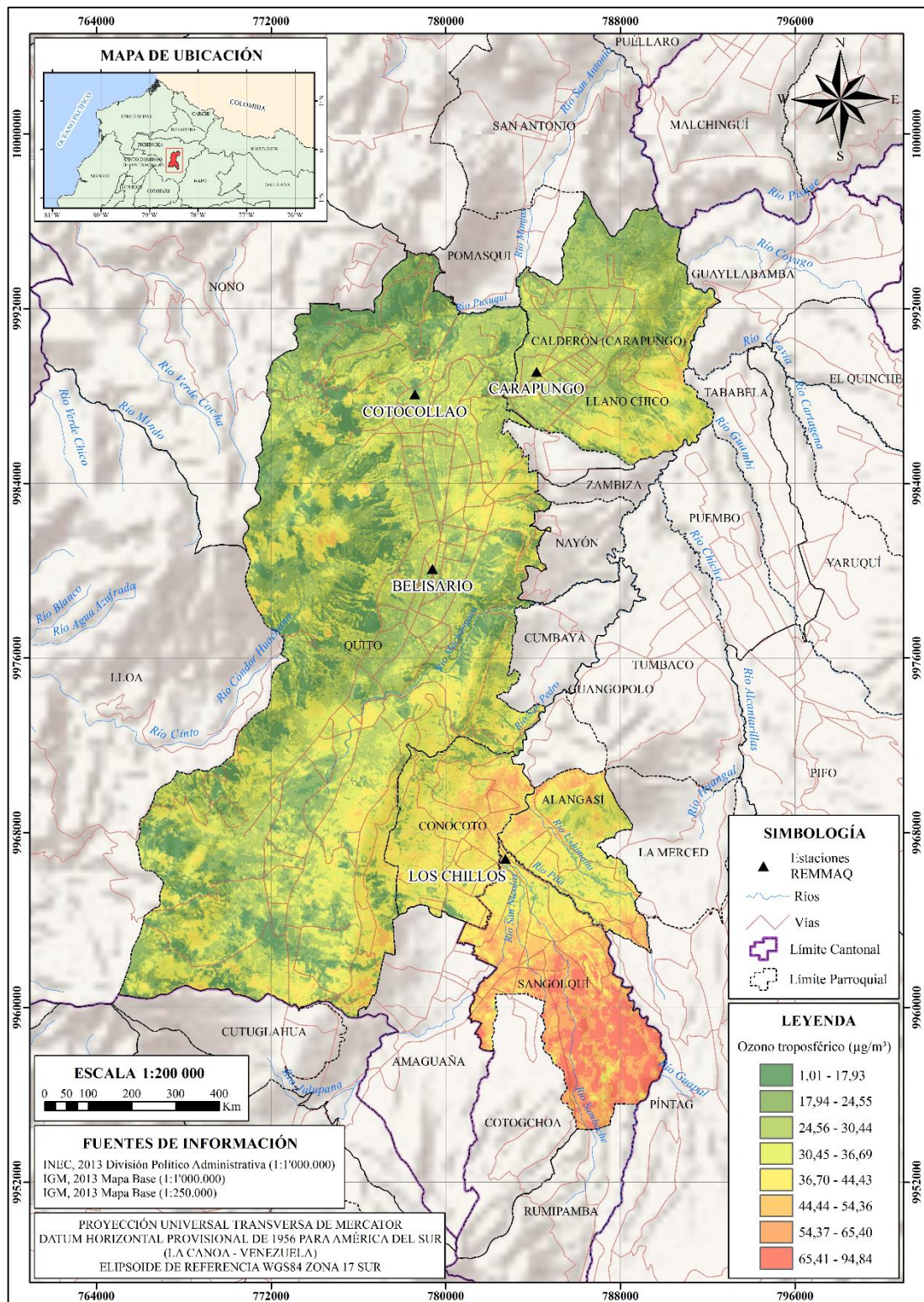


Figura 48. Mapa de concentración de ozono troposférico – 11 de junio de 2015

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Gracias al análisis de los resultados obtenidos en este proyecto, se puede deducir, que la regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), permite desarrollar un modelo de predicción en el que existe un menor número de observaciones que variables predictoras; así también da solución al problema de multicolinealidad entre variables independientes (Espejo, 2017).

Cabe mencionar que ciudades como Bogotá y México D.F., que presentan similar crecimiento poblacional, automotor e industrial a la ciudad de Quito, cuentan con 14 y 29 estaciones de monitoreo de calidad del aire, respectivamente. Debido a que el DMQ cuenta con tan solo ocho estaciones de monitoreo, se presentó como principal limitante la determinación del número de estaciones a utilizarse en cada uno de los años de estudio. Para esto se realizó una recopilación de los datos existentes desde el año 2013 hasta el año 2015 en cada una de las estaciones de la REMMAQ (ver Anexo 2), en el que se pudo observar que tres estaciones no registraron datos continuos y que la estación del Camal fue deshabilitada a partir del mes de septiembre de 2014. Por esto se escogieron cuatro estaciones para los años 2013 y 2015, y cinco estaciones para el 2014; que contenían información continua de los contaminantes y variables meteorológicas.

Para generar los modelos de predicción de ozono troposférico de los años 2013, 2014 y 2015, fue necesario generar una malla de puntos distribuidos a lo largo del área de estudio indirecta, en la cual se obtuvo información de los contaminantes y variables meteorológicas por medio de una interpolación por IDW con los puntos correspondientes a las estaciones de monitoreo.

No fue posible comparar los resultados de mínimos cuadrados parciales (PLS) con otros estudios, ya que esta metodología no ha sido aplicada para modelar contaminantes atmosféricos. Sin embargo, al contrastar la distribución de ozono troposférico que se refleja en los mapas de estimación (ver Figura 46, Figura 47 y Figura 48) con el estudio realizado por Echeverría (2012), se demostró que el sector de Cruz Loma al encontrarse a mayor altura sobre el nivel del mar, acumula más cantidad de O₃ que el resto del DMQ. De la misma manera, se pudieron explicar los bajos niveles de concentración de ozono que se obtuvieron durante el 2015, al analizar

el ICA del mismo año, donde se menciona que los meses de junio y julio presentaron concentraciones mínimas de este contaminante (Secretaría del Ambiente, 2015).

De los modelos de predicción resultantes (ver Figura 46, Figura 47 y Figura 48), se pudo constatar que la dispersión del contaminante O₃ afecta directamente a las zonas periurbanas del Distrito Metropolitano. Según los ICA del 2014 y 2015, la dirección y velocidad del viento influyen en el desplazamiento de los contaminantes que dan origen al ozono, al dirigirlos hacia las afueras de los centros urbanos y en sectores con mayor altura sobre el nivel del mar.

4.3. COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis formulada fue la siguiente: “La concentración de ozono troposférico (O₃) estimada en cualquier punto de la ciudad de Quito a partir de una regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), genera un menor grado de incertidumbre que los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo continuo de la REMMAQ.”

La comprobación de la misma se realizó a través del análisis de la homogeneidad de varianzas, conocida también como homocedasticidad, para lo cual se aplicó la prueba de F de Fisher.

Tabla 17
Estadísticas de la concentración real y predicha de O₃

| PUNTO | OZONO MEDIDO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | OZONO PREDICHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|-----------------|---|---|
| COT_13 | 33,595 | 31,010 |
| CAR_13 | 43,890 | 45,817 |
| BEL_13 | 37,265 | 39,195 |
| CAM_13 | 41,825 | 40,706 |
| COT_14 | 54,220 | 54,908 |
| CAR_14 | 61,510 | 59,858 |
| BEL_14 | 54,190 | 54,340 |
| CAM_14 | 49,700 | 51,540 |
| CHI_14 | 53,430 | 49,459 |
| COT_15 | 27,455 | 28,658 |
| CAR_15 | 29,950 | 29,921 |
| BEL_15 | 25,650 | 23,140 |
| CHI_15 | 29,975 | 34,103 |
| <i>Media</i> | <i>41,743</i> | <i>41,743</i> |
| <i>Varianza</i> | <i>144,416</i> | <i>139,203</i> |

- Planteamiento del problema

$$H_0: S_{med}^2 = S_{pred}^2$$

$$H_1: S_{med}^2 \neq S_{pred}^2$$

- Nivel de confianza del 95% $\longrightarrow \alpha = 0,05$
- Grados de libertad:

$$GL_{num} = n - 1 = 13 - 1 = 12$$

$$GL_{den} = n - 1 = 13 - 1 = 12$$

- F de tabla: $F_t = 2,69$
- Punto crítico

$$F_e = \frac{S_{med}^2}{S_{pred}^2}$$

$$F_e = \frac{144,416}{139,203}$$

$$F_e = 1,0344$$

- Regla de decisión

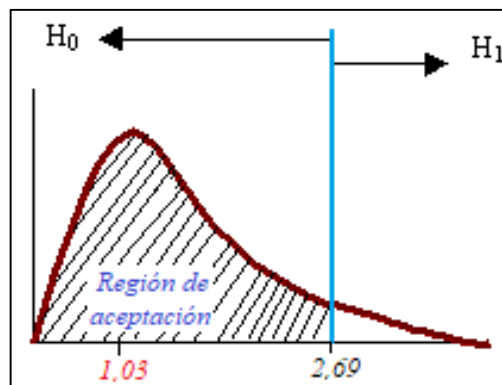


Figura 49. Regla de decisión de la hipótesis planteada

Fuente: (Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2003)

Decisión:

Se acepta la hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alternativa (H_1). Lo que verifica que las varianzas de los datos predichos y de los datos reales son las mismas, es decir, el modelo de ozono troposférico generado mediante PLS tiene una incertidumbre de predicción menor al 5%.

CAPÍTULO V

5.1. CONCLUSIONES

Los datos de concentración de los diferentes contaminantes criterio y variables meteorológicas, correspondientes a las fechas de toma de las imágenes satelitales, fueron extraídos de la base de datos de la Secretaría de Ambiente del DMQ, en cuatro estaciones de monitoreo para los años 2013 y 2015, y en cinco de ellas para el año 2014. A través de esta información se verificó la existencia de anomalías por actividades antrópicas, daños en las estaciones de monitoreo y el comportamiento específico de cada variable. Posteriormente, se ejecutó un análisis estadístico de control, donde se detectó la presencia de valores atípicos en las variables de presión barométrica y velocidad del viento, por lo que se dispuso eliminar dichas variables del estudio.

El pre-procesamiento de las imágenes satelitales, que incluyó las correcciones topográfica, geométrica, radiométrica y atmosférica, tuvo un papel fundamental en el cálculo de cada uno de los índices ambientales (NDVI, PV, TB, LSE, LST) que sirvieron como insumo para la creación de la matriz multivariable.

Para valorar el modelo de ozono troposférico obtenido mediante PLS, se analizó el porcentaje de varianza explicada del vector respuesta (O_3), misma que alcanza un 96,39% al llegar al décimo componente. Así también, se comprueba la efectividad del modelo al advertir que el coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio de predicción (RMSEP) son inversamente proporcionales, ya que mientras aumenta el número de componentes en el modelo se va reduciendo el error de predicción al mínimo posible y se incrementa la bondad de ajuste real del modelo, definida por el R^2 .

La validación del modelo de ozono troposférico efectuada a través del análisis de residuos, demostró que esta técnica multivariante explica más del 95% de variabilidad de la variable dependiente. Esto se demuestra al distinguir que tanto la media, como la sumatoria de los residuos tienden a cero y que la curva de la distribución de los mismos

es semejante a la campana de Gauss, presentando una mayor concentración de datos en torno a la media.

Las zonas que presentan mayor concentración de ozono troposférico fueron: Cruz Loma, Conocoto, Alangasí y Sangolquí, con valores de 92,42, 94,69 y 94,84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 2013, 2014 y 2015, respectivamente. Al comparar estos valores con el IQCA y la OMS, se concluye que se encuentran dentro del nivel aceptable de concentración de ozono ya que no sobrepasan los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio durante 8 horas. Debido a que el ozono troposférico se origina de las emisiones de NO, NO₂, NO_x y COVs, los factores que pueden causar su acumulación en zonas peri urbanas y en aquellas que se encuentran a mayor altitud son la velocidad y dirección del viento, mayor incidencia de radiación solar en las primeras horas del día, aumento del parque automotor y crecimiento del parque industrial.

5.2. RECOMENDACIONES

Al no contar con más de trece datos de concentración de ozono troposférico, se recomienda utilizar herramientas y modelos de predicción que generen mayor cantidad de datos en base a la ubicación geográfica de nuevos puntos de muestreo; para esto se puede recurrir a la herramienta “CF TOOL” del software Matlab. Con este proceso preliminar se asegura una mayor concentración de datos y por ende un mejor ajuste de los modelos de estimación de ozono troposférico en las parroquias urbanas del DMQ.

Para desarrollar nuevos modelos de predicción de los contaminantes criterio del aire, con un menor número de variables dentro del análisis, se recomienda emplear técnicas como componentes principales, redes neuronales y autómatas celulares.

Se recomienda utilizar imágenes de satélites como NOAA–AVHRR, TERRA–ASTER y SPOT de los meses de agosto y septiembre, donde se produce la mayor acumulación de este contaminante en la atmósfera y que corresponden a la época de mayor radiación solar en el Ecuador.

Debido al escaso número de estaciones de monitoreo y al limitado registro de información tanto de contaminantes criterio como de variables meteorológicas, se recomienda agregar nuevas estaciones por medio de un estudio de evaluación

multicriterio, con el fin de conocer los sitios de mayor influencia y concentración de los mismos y modelar su distribución espacial.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2016). *Ozono troposférico*. Obtenido de El Medio Ambiente en Europa: Segunda evaluación:
<https://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page005.html>
- Alcaldía del Quito - Secretaría del Ambiente. (2016). *Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico - REMMAQ*. Obtenido de Alcaldía de Quito:
<http://www.quito.gob.ec/index.php/quito-por-temas/ambiente>
- Alciaturi, C., Escobar, M., De La Cruz, C., & Rincón, C. (2003). Partial least squares (PLS) regression and its application to coal analysis. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 26(3), 197-204. Obtenido de
<http://200.74.222.178/index.php/tecnica/article/view/5823>
- Álvarez, I., & Padilla, O. (2016). Estimación de la contaminación del aire por PM10 en Quito a través de índices ambientales con imágenes Landsat ETM+. *Revista Cartográfica*(92), 135-147. Obtenido de
http://comisiones.ipgh.org/CARTOGRAFIA/rca/RCA92_Digital.pdf
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Recuperado el 16 de 10 de 2017, de
<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Arozarena, A. (2010). *Teledetección y sistemas de tratamiento digital de imágenes*. Recuperado el 21 de 09 de 2017, de http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-cartografia-y-geodesia/contenidos/TEMA_11_FOTOGAMETRIA_Y_TELEDETECCION/Teledeteccion/microsoft-word-teledeteccion_y_sist_tratamiento_digital_imagenes.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2008). *Constitución del Ecuador*. Recuperado el 05 de 10 de 2017, de
http://www.asambleanacional.gov.ec/documentos/constitucion_de_bolsillo.pdf
- Atilio, E. (2013). *Contaminación*. Catamarca: Científica Universitario - universidad Nacional de Catamarca.
- Barsi, J., Schott, J., Palluconi, F., & Hook, S. (2005). *Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments*. Recuperado el 28 de 09 de 2017, de
https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/Barsi_AtmosCorr_SPIE05.pdf

- Basterra, I. (2011). *Teledetección imágenes satelitales procesamiento digital de imágenes*. Recuperado el 23 de 09 de 2017, de <http://ing.unne.edu.ar/dep/goeciencias/fotointer/pub/teoria2011/parte02/tdi.pdf>
- Bro, R., Rinnan, A., & Faber, N. (2005). Standard error of prediction for multilinear PLS 2. Practical implementation in fluorescence spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 75, 69-76. Obtenido de <http://www.models.life.ku.dk/~asmund/Papers/Standard%20error%20of%20prediction%20for%20multilinear%20PLS%20-%20Practical%20implementation%20in%20fluorescence%20spectroscopy.pdf>
- Carnicer, J. (2007). *Contaminación ambiental*. Obtenido de http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45259/componente45257.pdf
- Castañeda, M., Cabrera, A., & Navarro, Y. (2010). *Procesamiento de datos y análisis estadístico utilizando SPSS*. Porto Alegre: Edipucrs.
- Chávez, J. (1996). *Image-based atmospheric corrections - Revisited and Improved*. Recuperado el 26 de 09 de 2017, de <http://www.unc.edu/courses/2008spring/geog/577/001/www/Chavez96-PERS.pdf>
- Choudhury, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daughtry, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by made simulation. *Remote Sensing of Environment*, 1-17.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental* (Tercera ed.). Barcelona, España: Ariel S.A.
- Coll, C., Galve, J., Sánchez, J., & Caselles, V. (2010). *Thermal band calibration and Atmospheric Correction with ground-based measurements*. IEE Trans. Geosci. Remote Sens.
- Comisión para la Cooperación Ambiental - CEC. (2009). Panorama de los problemas ambientales más relevantes: Ozono troposférico. *El mosaico de América del Norte*, 1-4. Obtenido de <http://www3.cec.org/islandora/es/item/986-north-american-mosaic-overview-key-environmental-issues-es.pdf>
- Cortez, J. (2013). *Estimación de emisiones de metano del relleno sanitario Bordo Poniente por medio de imágenes de satélite*. Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo - CIEMAD, México D.F. Obtenido de

<http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/13579/Jocelyn%20Alejandra%20Cortez%20Nunez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cuadras, C. (2014). *Nuevos métodos de análisis multivariable*. Obtenido de <http://www.ub.edu/stat/personal/cuadras/metodos.pdf>

División de Generación de Imágenes - DGI. (2016). *División de Generación de Imágenes*. Obtenido de http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/espanhol/satelites_esp.php

Echeverría, A. (2012). *Análisis espacial de la variación de las concentraciones de NO₂, O₃, SO₂ y BTX provenientes de zonas de alta concentración poblacional y alto tráfico vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito, utilizando herramientas geoestadísticas*. Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Quito: Enero. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5113/1/T-ESPE-033063.pdf>

Esbensen, K., Guyot, D., Westad, F., & Houmoller, L. (2002). *Multivariate Data Analysis: In Practice : an Introduction to Multivariate Data Analysis and Experimental Design* (Quinta ed.). (M. D. Analysis, Ed.)

Espejo, L. (2017). *Modelo PLS*. Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla, Departamento de Estadística e Investigación Operativa, Sevilla. Obtenido de <https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/63227/Espejo%20Alonso%20Luc%C3%ADa%20TFG.pdf?sequence=1>

ESRI. (2014). *Aeroterra*. Recuperado el 29 de 08 de 2017, de http://aeroterra.com/Productos/Esri/ArcGIS.com/Landsat/Landsat_historia.shtml

FAO. (2009). *Sistemas de información geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina*. Roma. Obtenido de <http://www.fao.org/3/a-a0906s.pdf>

Gaviria, C., Raúl, P., & Puerta, M. (2016). *Regresión por mínimos cuadrados parciales PLS con datos de intervalo*. Recuperado el 01 de 10 de 2017, de http://ciencias.medellin.unal.edu.co/revistas/facultad-de-ciencias/images/docs/2016_Junio/Art9RevFacCienV51doi.pdf

Guerra, C., Cabrera, A., & Fernández, L. (2003). Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 37(1). Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/1930/193018072001/>

Herrero, E., & Fernández, I. (2014). *Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+*. Recuperado el 29 de 08 de 2017, de <http://www.cartesia.org/data/apuntes/teledeteccion/landsat-analisis-visual.pdf>

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)*. Obtenido de United Nations Office for Outer Space Affairs - SPIDER. Space based Information for Disaster Management and Emergency Response:
<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- Instituto Geográfico Agustín Godazzi - IGAC. (2010). *Fundamentos de Percepción Remota*. Recuperado el 15 de 08 de 2017, de Telecentro Regional en Tecnologías Geoespaciales:
http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/fundamentos_pr-semana1-unidad1/index.php?id=31
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (2014). *Imágenes de satélite: Elementos de percepción remota*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía:
http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/imagenes/imgsatelite/metadatos/elem_per_rem.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI. (2015). *Imágenes satelitales*. Recuperado el 10 de 09 de 2017, de
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geología - INEGI. (2010). *Imágenes del Territorio*. Recuperado el 20 de 09 de 2017, de
<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.a.spx>
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI. (2010). *Variables meteorológicas y salud*. Recuperado el 10 de 10 de 2017, de
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/uploads/anuarios/meteorologicos/Am%202010.pdf>
- Instituto Tecnológico de Chihuahua. (2003). *Distribución "F" Fisher*. Obtenido de Curso: Estadística I:
<http://www.itchihuahua.edu.mx/academic/industrial/estadistica1/cap03c.html>
- Jimenez, J., Sobrino, A., & Cristóbal, J. (2011). Obtenido de Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales - CREAM:
www.cream.uab.es/MiraMon/publicat/oral_p/.../Paper_AET2009_Jimenez_v2.doc
- Joglekar, A. (2003). *Statistical Methods for Six Sigma: In R&D and Manufacturing*. New Jersey: Wiley Interscience.

- Kelsen, H. (1942). The Journal of politics. *Judicial Review of Legislation: A Comparative Study of the Austrian and the American Constitution, IV*, 183-200. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/2125770>
- Kvalheim, O. (2010). Interpretación de modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales mediante proyección de objetivos y gráficos de relación de selectividad. *Journal of Chemometrics*, 24(7-8), 496-504. Obtenido de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cem.1289/pdf>
- León, Y. (2002). *Programa de modernización de la jurisdicción de Tierras*. Recuperado el 01 de 10 de 2017, de <http://percepcion-remota.intec.edu.do/Material%20de%20apoyo%20sensores%20remotos.pdf>
- Li, F., Jackson, T., Kustas, W., & Bindlish, R. (2004). *Deriving land surface temperature from landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/222399232_Deriving_land_surface_temperature_from_landsat_5_and_7_during_SMEX02SMACEX
- Mandanici, E., Franci, F., & Bitelli, G. (2015). Comparison between empirical and physically based models of atmospheric correction. *SPIE. DIGITAL LIBRARY*, 2-3.
- Marín, J. (2010). *Introducción al análisis multivariante y al cálculo matricial*. Obtenido de <http://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/AMult/tema1am.pdf>
- Martínez, J. (2015). *SIGA*. Recuperado el 20 de 09 de 2017, de <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledeteccion%20espacial.PDF>
- Ministerio del Ambiente - MAE. (2012). *Acuerdo No. 050*. Recuperado el 01 de 10 de 2017, de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Acuerdo-50-NCA.pdf>
- Ministerio del Ambiente - MAE. (2010). *Plan Nacional de la Calidad de Aire*. Obtenido de Ministerio del Ambiente: <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>
- Ministerio del Ambiente - MAE. (2015). *Acuerdo Ministerial N°061*. Recuperado el 05 de 10 de 2017, de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155124.pdf>
- Ministerio del Ambiente - MAE. (2015). *Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión*. Recuperado el 01 de 10 de 2017, de <https://maeorellana.files.wordpress.com/2015/11/anexo-4-calidad-del-aire.pdf>

- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2014). *Diagnóstico Estratégico - Eje Movilidad: Diagnóstico de la Movilidad en el DMQ para el Plan Metropolitano de Desarrollo Territorial (PMOT)*. Recuperado el 19 de 10 de 2017, de Secretaría General de Planificación - Gobierno Abierto: <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/pdf/diagnosticomovilidad.pdf>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2016). *Diagnóstico Estratégico - Eje Económico: Situación económica y productiva del DMQ*. Recuperado el 19 de 10 de 2017, de Secretaría General de Planificación - Gobierno Abierto: <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/pdf/diagnosticoeconomico.pdf>
- Murcia Salud. (ND). *Portal sanitario de la Región de Murcia*. Obtenido de <https://www.murciasalud.es/pagina.php?id=84045&idsec=301#>
- Olague, J. (2015). *El método de mínimos cuadrados parciales (PLS) como herramienta de análisis causal: un modelo explicativo de los componentes de imagen de destino en función de las motivaciones de viaje del turista urbano*. Artículo del Congreso de Investigación Turística Aplicada 2015, Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey. Obtenido de http://eprints.uanl.mx/6054/1/JOlague_Extenso.pdf
- Olivier, M. (2010). *Geostatistics Applications for Precision Agriculture*. New York: Springer Science + Business Media BV.
- Organización de Naciones Unidas - ONU. (2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Recuperado el 01 de 10 de 2017, de <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2016). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. Obtenido de Centro de prensa - Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Peguero, C. (2012). *Sensores remotos y aplicaciones en Teledetección*. Obtenido de Departamento de Innovación y Tecnología: http://www.academia.edu/23743025/SENSORES_REMOTOS_Y_APLICACIONES_EN_TELEDETECCI%C3%93N_GEODESIA_Y_GESTI%C3%93N_DE_RECURSOS_NATURALES_Y_PATRIMONIO_NATURAL

- Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*. Obtenido de Universidad de Buenos Aires - Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Departamento de Ciencias Geológicas:
http://aviris.gl.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf
- Pinilla, C. (2015). *Tipos de sensores*. (D. d. Cartográfica, Ed.) Obtenido de Universidad de Jaén:
<http://www.ujaen.es/huesped/pidoceps/tel/archivos/8.pdf>
- Programa Regional de Meteorología - IANIGLA. (2014). *Fenómenos meteorológicos*. Recuperado el 29 de 09 de 2017, de
<http://www.prmarg.org/fenomenos-meteorologicos>
- Rojo, J. (2007). *Regresión lineal múltiple*. Obtenido de Instituto de Economía y Geografía - Laboratorio de Estadística:
http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Roy, D., Wulder, M., Loveland, T., Woodcock, C., & Allen, R. (2014). Landsat-8: Ciencia y visión de producto para la investigación del cambio global terrestre. *ELSEVIER*, 154-172. Obtenido de
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571400042X>
- Salvador, M. (2000). *Introducción al Análisis Multivariante*. Recuperado el 02 de 10 de 2017, de <http://ciberconta.unizar.es/leccion/anamul/inicio.html>
- 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. Obtenido de
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022010000100006
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. (2013). *Calidad del aire: Una práctica de vida*. Obtenido de
<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- Secretaría del Ambiente. (2011). *Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire*. Obtenido de Quito Ambiente:
http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/norma_ecuato_calidad.pdf
- Secretaría del Ambiente. (2014). *Calidad del Aire en Quito: Informe Anual 2014*. Obtenido de Quito Ambiente:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/informes>

- Secretaría del Ambiente. (2015). *Calidad del Aire en Quito: Informe Anual 2015*.
Obtenido de Quito Ambiente:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/informes>
- Secretaría del Ambiente. (2016). *Calidad del Aire en Quito: Informe Anual 2016*.
Obtenido de Quito Ambiente:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/informes>
- Secretaría del Ambiente. (2017). *Generalidades de la REMMAQ*. Obtenido de Quito Ambiente:
<http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/generalidades>
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - SENPLADES. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013 - 2017*. Recuperado el 19 de 10 de 2017, de <http://www.buenvivir.gob.ec/69>
- Senado, M., Vila, A., & Juan, A. (2008). *La Distribución Normal*. Obtenido de Universidad Oberta de Catalunya:
https://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Distrib_Normal.pdf
- Sendra, V., Camacho, F., Sanchez, J., Jiménez, J., & Gracia, J. (2015). Método para la corrección atmosférica de imágenes Landsat. *Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 484-487. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/277343027_METODOLOGIA_PARA_LA_CORRECCION_ATMOSFERICA_DE_IMAGENES_ASTER_RAPIDEYE_SPOT_2_Y_LANDSAT_8_CON_EL_MODULO_FLAASH_DEL_SOFTWARE_ENVI_ATMOSPHERIC_CORRECTION_METHODODOLOGY_FOR_ASTER_RAPIDEYE_SPOT_2_AND_LANDSAT
- Sensores Remotos & GIS. (2015). *Guía básica sobre imágenes satelitales y sus productos*. Recuperado el 07 de 09 de 2017, de <http://www.cartografia.cl/download/srgis.pdf>
- Servicio Geológico de los Estados Unidos - USGS. (2017). *Misiones Landsat*. Recuperado el 17 de 08 de 2017, de <https://landsat.usgs.gov/landsat-1-history>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI. (2014). *Análisis comparativo de método de interpolación espacial para la elaboración de mapas climáticos de precipitación*. Obtenido de Ministerio del Ambiente:
http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro_2014_Ana_com_met_int.pdf
- Sobrino, J., Raissouni, N., & Li, Z. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data. *Remote Sensing of Environment*, 75(2), 256-266. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00171-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00171-1)

- Sociedad Astronómica del Planetario Alfa. (2004). *Satélites Artificiales*. (C. López, Ed.) Obtenido de Astrónomos:
http://www.astronomos.org/articulistas/Polaris/2004/43-SATELITES_ARTIFICIALES.pdf
- Trujillo, S. (2012). *Estimación de temperatura superficial en el Valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota*. Tesis de grado, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado. Obtenido de Escuela de Ingeniería de Antioquia: <http://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/409/1/AMBI0118.pdf>
- Universidad de Murcia. (2006). *Fundamentos físicos de la teledetección*. Obtenido de Universidad de Murcia:
<http://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html>
- Universidad de Oviedo. (2012). *Servicio de telecomunicaciones en el mar*. Recuperado el 23 de 08 de 2017, de
http://isa.uniovi.es/docencia/SIGC/pdf/satelites_artificiales.pdf
- Universidad Nacional de Colombia. (2015). *Sensores remotos*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias:
<http://ciencias.bogota.unal.edu.co/gruposdeinvestigacion/ecolmod/informacion-de-interes/que-son-los-sensores-remotos/>
- Valdéz, D. (2010). Regresión por mínimos cuadrados parciales. *Revista Varianza*(7). Obtenido de http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?pid=S9876-67892010000100005&script=sci_arttext
- Van Leeuwen, B., Vargas, R., Feingersh, T., Pohl, C., & Bakker, W. (2010). *Introducción Sensores Remotos*. Recuperado el 25 de 08 de 2017, de Universidad Nacional Autónoma de Honduras:
<http://cidbimena.desastres.hn/docum/unesco/Amenazas/Presentaciones%20Powerpoint/02%20Introduccion%20Sensores%20Remotos/Introduccion%20Sensores%20Remotos.PDF>
- Vega, J., & Guzmán, J. (2011). Regresión PLS y PCA como solución al problema de multicolinealidad en regresión múltiple. *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones*, 18(1), 9-20. Obtenido de
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=45326927002>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat islands studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467-483. Obtenido de
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>