



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



Facultad de Ingeniería

División de Ingenierías Civil y Geomática

Tesis

**EFFECTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA
METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO SOBRE
LA RESPUESTA ESPECTRAL REGISTRADA POR
UN SENSOR REMOTO**

Que para obtener el título de Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Wilfrido Martínez Alonso

T U T O R

M. I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose

2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/013/15

Señor
WILFRIDO MARTÍNEZ ALONSO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

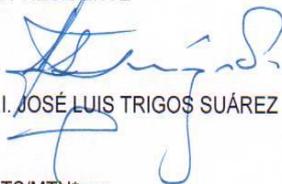
**"EFECTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO
SOBRE LA RESPUESTA ESPECTRAL REGISTRADA POR UN SENSOR REMOTO"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA PERCEPCIÓN REMOTA
- II. FUNDAMENTOS FÍSICOS
- III. PERCEPCIÓN REMOTA
- IV. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AIRE
- V. METODOLOGÍA
- VI. RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de marzo del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ
JLTS/MTH*gar.

AGRADECIMIENTOS

A mi abuelo, que siempre creyó en mí. A mi mamá por haberme apoyado y guiado, y a mi papá, por haberme apoyado y aceptado. A mi familia, que es mi eje, y a mi tutor, Rodrigo Sepúlveda, por aceptarme sin hacer preguntas y ser, además de un excelente profesor, una persona de bien. A ExxonMobil por haberme apoyado en todos los sentidos durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad, por su generosidad. Al Laboratorio de Aerosol de la Universidad del Sur de California, al doctor Constantinos Sioutas por abrirme las puertas de su laboratorio, y todas las personas increíbles que lo conforman, por haberme introducido en el tema y compartido su conocimiento. A los doctores Jesús Manuel Dorador y Francisco Valero-Cuevas por la oportunidad de realizar la estancia.

A la Universidad de Tecnología de Swinburne y al Politécnico de Turín por haberme formado en algún punto.

Al Instituto de Ingeniería por haberme permitido realizar mi servicio social, en especial a los maestros Gabriela Aviña, Vitali Díaz y Javier Carrillo, y al doctor Fernando González por abrirme las puertas de su grupo de investigación.

A Fundación Telmex, Fundación ICA y la DGCI por haberme otorgado apoyos económicos para que me pudiera enfocar a la escuela.

A mis amigos, por estar ahí.

RESUMEN

Las características geográficas, climáticas y económicas de las Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) contribuyen a la producción y mantenimiento de altos niveles de contaminación en el aire, teniendo la industria y el transporte un papel fundamental en su generación. El acceso al equipo empleado para la medición de los parámetros de calidad del aire es generalmente limitado debido a su alto precio, y por esto las técnicas de Percepción Remota (PR) emergen como una alternativa interesante.

Por un lado, mediciones de campo de Particulate Matter (PM) fueron obtenidas a través del Sistema de Monitoreo Ambiental de la Secretaría del Medio Ambiente; PM_{2.5} y PM₁₀ fueron escogidas debido a que es necesario que una partícula tenga un diámetro menor a 10 micrómetros para poder causar problemas de salud, ya que partículas más grandes no pueden ser inhaladas. Por el otro lado, Imágenes Satelitales fueron adquiridas del sensor OLI de la plataforma Landsat 8; la razón detrás de la decisión de haber escogido este sensor y esta plataforma es que la primera banda del espectro mide aerosoles.

Este trabajo de investigación se realizó con base en la información obtenida, la primera aproximación hecha en México para evaluar la calidad del aire a partir de la reflectancia medida con Imágenes Satelitales. El objetivo era comparar la respuesta espectral registrada por el sensor OLI contra los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ obtenidos con métodos tradicionales; ambas mediciones fueron llevadas a cabo al mismo tiempo, en el mismo lugar.

Durante el desarrollo del experimento se observó que mientras más contaminado esté un sitio mayor será su reflectancia debido a que las partículas suspendidas no permiten que la luz pase a través de ellas, y en actúan como un repelente. De la misma manera, si un lugar dado se encuentra más cerca de una avenida, pueden esperarse niveles de contaminación más altos. Aún más, la mayoría de los sitios evaluados podrían separarse en grupos debido a que mostraron respuestas espectrales diferentes dependiendo de la región en la que operaron, con una clara diferencia entre zonas rurales, residenciales e industriales, especialmente con las partículas más pequeñas que tienden a ser transportadas antes de asentarse; la inercia, por otra parte, causa que las partículas más grandes se sedimenten más rápido.

Adicionalmente, se intentaron definir las condiciones climatológicas que afectan la producción de contaminantes e identificar su dispersión y distribución, para así poder encontrar los momentos en los que la PR funciona mejor y comparar la relación entre la generación y asentamiento de contaminantes, y la presencia de núcleos urbanos.

ABSTRACT

The geographical, climatic, social and economic characteristics of Greater Mexico City contribute to generate and maintain high levels of air pollution, with industry and transport playing a central role in its generation. Access to equipment employed for the measurement of air quality parameters is generally limited because of its high price, and for this, Remote Sensing techniques emerge as an interesting alternative.

On the one hand, field measurements of Particulate Matter (PM) were obtained through the Environment Monitoring System of the Ministry of the Environment; PM_{2.5} and PM₁₀ were chosen because it takes a diameter smaller than 10 micrometres for a particle to cause harm to health, as larger particles cannot be inhaled. On the other hand, Satellite Images were acquired from the OLI sensor of the Landsat 8 platform; the reason to have chosen this sensor and platform is that the first band of the spectrum measures aerosols.

From this information, this research work, the first approximation made in Mexico to evaluate air quality from the reflectance measured with satellite images, was developed. The objective was to compare the spectral response registered by the OLI sensor to the levels of PM_{2.5} and PM₁₀ obtained with traditional field work methods, with both measurements carried out at the same time, in the same place.

During the development of the experiment it was observed the more polluted a site is, the largest its reflectance, because suspended particles do not allow the light to penetrate them and act as a repellent instead. In the same way, if a site is closer to a highway, larger pollution levels can be expected. Even more, most of the evaluated sites could be separated in groups because they showed different spectral responses depending on the regions they operated, with a clear difference between rural, residential and industrial zones, especially for the smaller particles that tend to be transported before settling down; inertia causes the largest particles to sediment faster.

Additionally, it was attempted to define the climatological conditions affecting the production, dispersion and distribution of pollutants, as to identify the circumstances under which remote sensing works best, and compare the existing relationship between pollutants generation and the presence of urban populations.

Índice

Introducción	7
Justificación.....	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
Capítulo 1. Antecedentes Históricos de la Percepción Remota	9
Capítulo 2. Marco Teórico	13
2.1 Principios físicos y de radiación.....	13
2.2 Dispersión y absorción en la atmósfera	17
Capítulo 3. Percepción Remota	21
3.1 Elementos de la percepción remota	21
3.2 Sensores y plataformas.....	22
3.3 Procesamiento e interpretación de datos.....	24
3.4 Optimización de imagen: realce y filtrado	25
Filtro de imágenes por contraste.....	26
Filtro de imágenes por convolución	27
Filtros espaciales.....	28
3.5 Ventajas y limitantes.....	32
Capítulo 4. Parámetros de Calidad del Aire	33
4.1 Aerosoles	34
Capítulo 5. Metodología	37
5.1 Estado del arte	37
5.2 Zona de estudio.....	38
Sitios de muestreo	39
5.3 Plataforma seleccionada	41
Fechas de muestreo.....	42
5.4 Pre-procesamiento y procesamiento de imágenes	42
Capítulo 6. Resultados	58
6.1 Análisis.....	74
Capítulo 7. Conclusiones	75
Bibliografía	77

Introducción

El aire está presente en todas las actividades que realiza el ser humano. Es tal su importancia, que diversos estudios médicos llevados a cabo en los últimos años han concluido que si el cerebro es privado de oxígeno por un tiempo variable de entre 5 y 10 minutos, sufrirá daños irreversibles. No obstante, aún si se cuenta con la presencia de aire que respirar, si éste está contaminado, su consumo puede acarrear daños a la salud, abarcando desde problemas respiratorios hasta autismo.

La revolución industrial, además de marcar una nueva era y cambiar el modelo económico por el que hasta entonces se regía el mundo, trajo consigo la proliferación de generación de contaminantes. A pesar de haber sido iniciada en el siglo XVIII, no fue hasta la década de 1940 que la contaminación atmosférica se empezó a estudiar con seriedad debido a los efectos nocivos en la salud registrados en ciudades cuyas fábricas causaban la proliferación de niebla tóxica, lo que condujo a la introducción de políticas de control de la contaminación del aire.

En México no fue hasta 1966 que se empezaron a monitorear los contaminantes atmosféricos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), cuando la entonces Secretaría de Salubridad integró la primera red para medir dióxido de azufre y partículas suspendidas; la red contaba con 4 estaciones, y se mantuvieron hasta 2003 en que el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la SEDEMA empezó la medición de PM (Particulate Matter), transmitiendo sus datos en tiempo real.

A diferencia del agua, el aire, aunque fundamental, no es un recurso en el que la disponibilidad juegue un factor importante; sin embargo, su calidad si lo hace. Así, diversas agencias estatales alrededor del mundo han ido estableciendo estándares de calidad mínimos que el aire debe cumplir para poder ser considerado como “respirable”.

Debido a lo anterior, muestras de aire son tomadas continuamente en diversos puntos del planeta con la finalidad de evaluar los distintos parámetros que ayudan a determinar su calidad. Aunque existen equipos especializados para medir estos parámetros, su acceso es generalmente limitado, estando disponibles de manera casi exclusiva en laboratorios de alta especialidad. El factor determinante de su limitada accesibilidad es su elevado precio, por lo que el uso de la percepción remota para determinar los parámetros de calidad del aire surge como una alternativa interesante.

Durante los últimos años han sido publicados diversos artículos científicos que buscan determinar la calidad del aire por medio de la percepción remota, usando distintas plataformas y métodos (H. D. Kambezidis et al., 1998; M-C. Robinson et al., 1999; Chu et al., 2003; Liu et al., 2004; Chin et al., 2004; P. Gupta et al., 2006; Gupta et al., 2007, etc.).

En el primer capítulo de este trabajo se hace un recuento histórico del surgimiento y desarrollo de la percepción remota. Seguidamente, en el capítulo dos, se abordan las bases teóricas en las que se fundamenta la operación de los sistemas de percepción remota y en el tercer capítulo se realiza una descripción de su proceso. Los parámetros de calidad del aire sujetos a ser evaluados dentro de los alcances del proyecto se mencionan en el capítulo cuatro, continuando con la descripción de la metodología en el capítulo subsecuente. Los resultados que han sido obtenidos se plasman en el capítulo seis, y finalmente en el último capítulo se tienen las conclusiones.

Justificación

Uno de los temas sensibles que ha tomado más relevancia en los últimos tiempos es la necesidad de mantener una calidad suficiente en el aire que respiramos para evitar enfermedades que pueden ir desde el asma hasta el autismo; por ello, la evaluación de los parámetros de calidad del aire es necesaria para poder identificar las zonas de generación y asentamiento de los contaminantes y poder así implementar acciones para su reducción. Para este fin, la Secretaría de Salud del Distrito Federal lleva a cabo, por medio del Sistema de Monitoreo Atmosférico, un muestreo continuo en distintos puntos. Esto se hace por medio de métodos convencionales, específicamente gravimetría y atenuación de rayos beta, teniéndose así ciertas limitantes, como un equipo costoso, desplazamiento del personal de operación y la necesidad de evaluar únicamente ciertos puntos preestablecidos, debido a la magnitud de la zona de estudio.

Por lo anterior, se propone emplear un conjunto de técnicas novedosas que pueden obtener información de las zonas estudiadas por medio de sensores instalados en plataformas. Este conjunto de técnicas se conoce como Percepción Remota (PR). Aunque la PR no está completamente desarrollada para poder evaluar todos los parámetros que componen la cuantificación de la calidad del aire, se han hecho progresos y las plataformas más recientes han incorporado sensores para detectar la presencia de aerosoles a partir de la reflectancia obtenida, utilizando la información de las longitudes de onda de la luz visible. Además, la PR ofrece ventajas como lo es un monitoreo económico en una superficie extendida, en áreas de acceso difícil y una visión sinóptica.

Objetivo General

Identificar la relación existente entre la reflectancia obtenida por medio de un sensor remoto, y la presencia de partículas PM2.5 y PM10 obtenidas en mediciones de campo.

Objetivos Específicos

- Dar a conocer los principios de operación de la PR
- Explicar los principios básicos de los parámetros de la calidad del aire PM2.5 y PM10
- Profundizar en el estudio de las aplicaciones de la PR en la calidad del aire
- Comparar la relación entre PM2.5 y PM10
- Identificar la relación entre generación de contaminantes y presencia de asentamientos urbanos
- Estudiar la relación existente entre los datos obtenidos en campo y los obtenidos por PR

Capítulo 1. Antecedentes Históricos de la Percepción Remota

La percepción remota es el arte y ciencia de obtener información acerca de un objeto mediante el análisis de datos adquiridos por otro objeto que no está en contacto con el objeto investigado. La información se obtiene mediante la detección y medición de los cambios que el objeto impone en el campo que lo rodea, y aunque el término es generalmente relacionado con técnicas electromagnéticas, el sensor más antiguo y complejo que se conoce es el ojo, ya que responde a la luz que refleja un objeto que ve, y la información que “adquiere” son impulsos que corresponden a la cantidad de luz que dicho objeto refleja y gracias a eso podemos determinar las diversas características del objeto visto, como su forma, tamaño, movimiento y luminosidad.

El primer avance logrado en percepción remota por un objeto no orgánico no se podría entender sin Isaac Newton y las bases que sentó a partir de su experimento en el siglo XVII, en el cual observó que si un haz de luz incidía sobre un prisma triangular de vidrio, una parte se reflejaría y la otra pasaría a través del vidrio, desintegrándose en diferentes colores, siendo así, el pionero tanto en comprender el uso del espectro electromagnético, como en usar la palabra “espectro”.

Tuvieron que transcurrir casi 200 años antes de que hubiera otra contribución importante al estudio del tema electromagnético. El también inglés Michael Faraday lo hizo cuando logró exitosamente, durante su investigación experimental acerca del funcionamiento de campos magnéticos alrededor de un conductor con corriente continua, establecer el concepto del campo electromagnético y descubrió que el magnetismo puede afectar a la luz.

James C. Maxwell desarrolló la teoría clásica del electromagnetismo al lograr expresar matemáticamente las leyes del electromagnetismo basándose en el trabajo desarrollado por científicos experimentales, en donde demuestra que la electricidad y el magnetismo, así como la luz, no son otra cosa que fenómenos causados por un campo electromagnético y que los campos eléctricos y magnéticos viajan en el espacio en forma de ondas, moviéndose a la velocidad de la luz.

Artificialmente, la forma más común, versátil y económica de percepción remota es la fotografía aérea que evidentemente no se empezó a desarrollar hasta el invento de la cámara fotográfica, imitadora del ojo, que encontró en el globo aerostático la primera forma de elevarse. El globo aerostático nació en 1783, la fotografía en 1839 y en 1858 se tomó la primera fotografía aérea en París.

A partir de ese momento la fotografía aérea se desarrolló rápidamente, ya que el uso del globo aerostático fue seguido por el uso de papalotes en 1882 y de palomas en los primeros años del siglo XX, ya que éstas podían cargar las cámaras a una mayor altura. Aún más, en 1890 Arthur Batut publicó el primer libro de fotografía aérea, y aunque el primer vuelo documentado fue en el año de 1903, no fue sino 6 años después que se empezó a utilizar para realizar fotografías aéreas, permitiendo tomar fotografías en áreas lejanas y en situaciones controladas, siendo Orville Wright el piloto.

La aparición de la fotografía a color ocurrió a mediados de la década de 1930, mientras que paralelamente se desarrollaba la técnica de películas sensibles a la radiación infrarroja cercana. En la misma época, la Segunda Guerra Mundial dejó como legado dos instrumentos capaces de detectar y determinar la distancia de objetivos remotos: el radar (que se ha seguido desarrollando debido a las múltiples aplicaciones que tiene) en tierra y el sonar, bajo el agua. Ambos fueron usados para la detección de objetivos

enemigos que usaban camuflaje. El instrumento más reciente que se usa en el apartado de la percepción remota es el láser, desarrollado en 1960.

Durante la década de 1950 el desarrollo de la percepción remota fue reservado exclusivamente para su uso militar. En 1957 la Unión Soviética lanzó el primer satélite artificial, Sputnik; en respuesta, el gobierno de Estados Unidos creó la NASA en 1958. Esto marcó un hito en la carrera espacial. En 1960 el primer satélite no militar, TIROS-1, satélite meteorológico, fue puesto en órbita. Éste se valía un sistema de cámara de baja resolución, un radiómetro de exploración con 5 canales y un balómetro (usado para mantener el equilibrio del satélite) para su operación. Debido a sus múltiples aplicaciones, éste sentó las bases de los futuros satélites y permitió la desclasificación de información militar, cosa que permitió el rápido desarrollo de los satélites no militares.

El término “percepción remota” fue usado por primera vez durante este tiempo, cuando se llegó a la conclusión de que el término usado hasta ese momento, “fotografía aérea”, no describía atinadamente todas las formas en que se colectaban imágenes mediante el uso del radar fuera de la región visible del espectro; tanto potencial se vio, que la NASA estableció el programa de percepción remota desde sus primeros años.

Por primera vez en 1961 se logró tomar una fotografía orbital a color en la nave espacial MA-4 Mercury. Alan Shepard tomó 150 fotografías con una cámara Mauer 70-mm automática. Apollo 9 fue usado en 1969 para obtener las primeras fotografías multispectrales y probar su uso en la observación de recursos de la tierra. Para su misión se usaron cuatro cámaras Hasselblad 70-mm controladas eléctricamente. Las fotografías se tomaron usando una película pancromática con filtros verdes y rojos, una con película infrarroja blanca y negra, y la última con película infrarroja a color.

A dicho experimento siguió, en 1972 el lanzamiento del ERTS-A (Earth Resources Technology Satellite) el cual fue renombrado después como Landsat-1 (Land Satellite) y operó durante casi 6 años. Esto fue fruto del programa ERTS, iniciado en 1967 por el gobierno de Estados Unidos, animado por las prometedoras experiencias de los primeros satélites meteorológicos y las misiones de naves espaciales tripuladas. La principal sorpresa fue que todos los datos serían recopilados con el principio de que cualquier persona, en cualquier lugar del mundo, podría tener acceso a dichos datos.

Los primeros 3 satélites Landsat tenían prácticamente las mismas características, con dos sensores diferentes integrados. El primero RBV (Return Beam Vidicon) contenía un cañón de electrones que leía las imágenes de una placa frontal fotoconductor, similar a las cámaras de televisión analógicas; el MSS (Multi Spectral Scanner) estaba formado por dispositivos de escaneo perpendiculares a la trayectoria orbital gracias a un espejo oscilante y medía la reflectancia de la superficie terrestre en 4 intervalos espectrales, de entre 0.5 y 1.1 μm . Sin embargo el MSS entregó información más valiosa por dos motivos. El primero es que el RBV estaba plagado de errores; el segundo es que el MSS fue el primer sistema global de monitoreo capaz de producir información multispectral en formato digital.

Mientras que los primeros tres satélites compartían prácticamente las mismas características, los siguientes dos las variaron un poco. La principal novedad en el Landsat-4 y Landsat-5 era que tenían integrado un sensor TM (Thematic Mapper) que podía capturar datos en 7 bandas en lugar de las 4 anteriores, incluyendo 3 bandas destinadas a lo visible (azul, verde y rojo) y 4 para lo infrarrojo (próximo, lejano y térmico). Sin embargo también estaban equipados con MSS, principalmente para asegurar la continuidad en la recaudación de datos en estaciones que no estaban preparadas para procesar TM. La segunda novedad era la desaparición del sensor RBV.

El sexto satélite, Landsat-6, resultó ser la primera misión infructuosa llevada a cabo por el programa, en 1993. El Landsat-6 estaba equipado con un sensor ETM (Enhanced Thematic Mapper) en el cual la principal mejora consistía en la anexión de una banda pancromática adicional (la octava) que operaría en el rango de 0.5 a 0.9 μm , con una resolución espacial de 15 metros. No obstante el lanzamiento fracasó al quedarse corta la velocidad alcanzada que fue insuficiente para ponerlo en órbita.

Después de 6 años del accidente se puso en órbita el Landsat-7. El sensor con el que fue equipado se bautizó como ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) el cual se enfoca en dar continuidad a la adquisición de los datos obtenidos con Landsat-4 y Landsat-5. Este sensor tiene incorporadas las mismas características del ETM, además de tener incorporada una séptima banda con una resolución de 60 metros, comparada con la de 120 del ETM, así como la inclusión de un calibrador solar con operación dual y una lámpara interna de calibración.

El más reciente en la saga es el Landsat-8, puesto en órbita en Febrero de 2013, cuyos datos están disponibles para ser consultados 24 horas después de haber sido recogidos y carga con dos sensores. El OLI (Operational Land Imager) posee 8 canales multiespéricos con una resolución de 30 metros y 1 pancromático de 15 metros; por otra parte, el TIRS (Thermal Infrared Sensor) provee 2 canales térmicos, de resolución de 30 metros para que coincida con los canales multiespectrales del OLI. Ambos sensores tienen una fiabilidad del 90 por ciento.

A pesar de que últimamente diversos países han destinado grandes presupuestos para poner en órbita sus propios satélites artificiales, como el VENESAT-1 venezolano puesto en órbita en 2008, son usados principalmente en el campo de las telecomunicaciones. Algunos de los programas de satélites artificiales, además del Landsat, destinados a la observación de la tierra y a la obtención de imágenes, son el francés SPOT y el IRS hindú. Canadá también ha incursionado con el RADARSAT, mientras que en Asia Oriental lo han hecho Corea del Sur con KOMPSAT y los japoneses con varios satélites (sus nombres son cambiados en cada ocasión). Brasil es el único país latino con un satélite de observación al haber incursionado junto a China con el programa CBERS.

El primer satélite del programa SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), SPOT-1, fue puesto en órbita en 1986 y el último ha sido el SPOT-7, operando únicamente a partir de Junio de 2014. Los 2 satélites SPOT más recientes tienen integrados dos sensores HGR (Haute Résolution Géométrique) que cuentan con una resolución pancromática de 1.5 metros y multiespectral de 6 metros, pudiéndose operarse simultáneamente. Tiene un canal pancromático y 4 canales multiespectrales, 3 en el visible (azul, verde y rojo) y 1 en el infrarrojo cercano.

El programa hindú IRS (Indian Remote Sensing Satellite) ha puesto en órbita 20 satélites para la observación de la tierra enfocados en distintos campos, desde los vientos superficiales hasta la cartografía, de los cuales 10 están orbitando todavía. Su primer satélite fue, en 1988, el IRS-1A. Los satélites están equipados con sensores que dan imágenes tanto pancromáticas como multiespectrales. El LISS (Linear Imaging and Self Scanning Sensor) es una cámara multispectral que opera en 4 canales, uno de ellos siendo canal SWIR (1.55 – 1.7 μm) y una resolución de 23.5 metros. AWiFS (Advanced Wide Field Sensor) opera con dos canales, resolución espacial de 58 metros, y un detector de calibración. Por último, también cuentan con un OBSSR (On-Board Solid State Recorder) usado para recolectar información sin la necesidad de estar en contacto con las estaciones en tierra. Su más reciente satélite es SARAL que funciona desde Febrero de 2013.

Canadá ha puesto en órbita dos satélites en asociación con la industria privada utilizados para percepción remota con su programa RADARSAT (Radar Satellite), RADARSAT-1, en 1995 y RADARSAT-2 en 2007, operando actualmente. En este caso el sensor elegido fue el SAR (Synthetic Aperture Radar) que a diferencia de otros sensores usa exclusivamente la banda C del espectro electromagnético, que tiene la ventaja de tener un sensor activo, el cual puede obtener imágenes nocturnas o bajo condiciones meteorológicas adversas.

En Oriente, los sudcoreanos han incursionado con el programa KOMPSAT (Korea Multi-Purpose Satellite) en 1995. El satélite KOMPSAT-2 puesto en órbita en 2006 opera simultáneamente 4 canales del multiespectro con resolución de 4 metros y uno del pancromático con resolución de un metro. En 1987 la JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency) japonesa puso en órbita su primer satélite de observación, MOS-1 (Marine Observation Satellite). El satélite ALOS-2 (Advanced Land Observation Satellite) que inauguró funciones en Mayo de 2014, opera un sensor SAR, como lo hace el RADARSAT-2 canadiense, pero en el canal L, con una resolución de entre 3 y 10 metros.

China y Brasil han incursionado juntos con el programa CBERS (China–Brazil Earth Resources Satellite) en 1999. El satélite CBERS-4, que comenzará operaciones en 2015, contará con un sensor AWFI (Advanced Wide Field Imager), operando 4 canales del multiespectro y con una resolución de 60 metros, así como con un sensor IRMSS (Infrared Multispectral Scanner Camera) que capturará imágenes en canales pancromáticos y multiespectrales (incluyendo infrarrojo térmico) con una resolución de 40 metros (60 en el infrarrojo térmico). De la misma manera, cuenta con PANMUX (Panchromatic and Multispectral Camera) con 1 canal pancromático y 4 del multiespectro, con una resolución espacial de 10 metros.

Aunque existen 206 países, únicamente alrededor de dos decenas tienen, o están en el proceso de tener, satélites civiles de percepción remota. La industria privada también ha incursionado en el campo al operar sus propios satélites, siendo los gobiernos de distintos países sus principales clientes. El ascenso en la calidad de las funciones de los satélites de percepción remota también ha sido meteórica ya que el número de canales de espectro disponibles ha pasado en pocos años de ser mínimos a más de 200 hoy en día (sensor Hyperion); las resoluciones también han evolucionado, y son ahora de unos pocos centímetros (IKONOS, QuickBird, OrbView-3, WorldView-1, EROS-A, por nombrar algunos) además de ser capaces de recolectar imágenes en base a la demanda en diferentes modalidades. No obstante, el paso que demuestra el grado de avance, es el hecho de que los satélites están ahora capacitados para captar imágenes de otros planetas.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Principios físicos y de radiación

La teoría electromagnética

La energía electromagnética es aquella que se ha almacenado en un lugar del espacio debido a la presencia de un campo electromagnético; se puede manifestar en diversas formas, como luz, ondas, calor, rayos ultravioleta, rayos X, entre otras. Todas las manifestaciones se comportan de manera similar, y son el medio por el cual la información es transmitida en la percepción remota, del objeto al sensor, ya que las fuentes difunden la energía electromagnética a la velocidad de la luz, y ella es recibida por el objeto, directamente o indirectamente, cuando la energía es reflejada o dispersada antes de ser captada.

Tanto Maxwell como Plank desarrollaron una teoría electromagnética propia; Maxwell lo hizo por medio de la teoría ondulatoria, en el siglo XIX, basado en los experimentos de Faraday, y Max Plank lo hizo por medio de la teoría de partículas, en la ley de Plank, en el siglo XX, y aunque muchas características de la radiación electromagnética se pueden describir más fácilmente con la teoría de ondas, la teoría de partículas ofrece una perspectiva útil para entender como interactúa la energía electromagnética con la materia.

La teoría ondulatoria

Primeramente, Maxwell propone que la energía electromagnética se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo, contenido en dos campos de fuerzas. Un campo eléctrico perpendicular a la dirección en que se propaga la energía, y un campo magnético, ortogonal al eléctrico que tiene la misma frecuencia que el campo eléctrico.

Así pues, el modelo ondulatorio se rige por:

$$c = v \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Donde:

c – Velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s)

λ – Longitud de onda (m)

Duración de una onda o perturbación en un determinado intervalo de tiempo, medida a partir de la distancia existente entre dos crestas de onda sucesiva, medida en metros, o alguna de sus fracciones.

v – Frecuencia de onda (Hz)

Número de ciclos por segundo en que la onda o perturbación pasa por un punto determinado. La frecuencia posee una relación inversa con la longitud de onda, ya que cuando la frecuencia es mayor, la longitud de onda disminuye, y viceversa.

El espectro electromagnético

La frecuencia de las ondas electromagnéticas es la que gobierna la interacción que se lleva a cabo entre las superficies, la atmósfera, y las propias ondas electromagnéticas. A pesar de ello, la práctica más común consiste en organizar a las ondas de acuerdo a

su longitud de onda, como se puede notar en la Figura 1. Esta organización de la división de las ondas conforme a su longitud es conocida como espectro electromagnético; las ondas en los diferentes canales del espectro tienden a activar diferentes mecanismos, electrónicos, moleculares o conductivos.

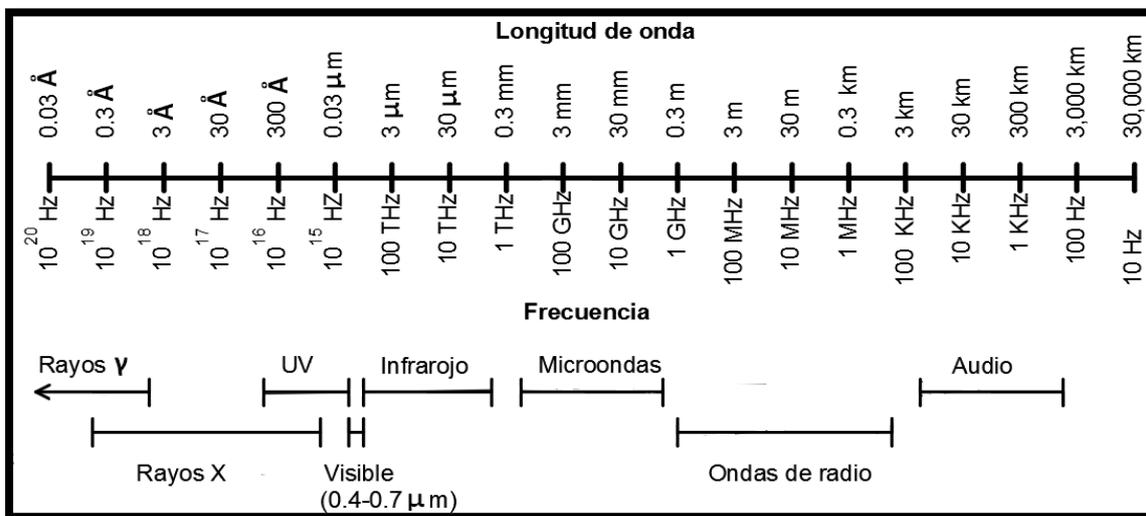


Figura 1. El espectro electromagnético (Basado en Lillesand et al., 2008)

Aunque es práctica común usar nombres para referirse a las distintas regiones del espectro electromagnético, no hay una división universalmente aceptada que separe a una región del espectro de la siguiente. Incluso se puede decir que las divisiones han surgido a partir de la combinación de varios métodos usados para el estudio de cada tipo de radiación, y como las porciones del espectro electromagnético usadas en percepción remota suelen estar caracterizadas por cambios de magnitud en potencias de 10, se suele utilizar una escala logarítmica.

Dentro de las regiones del espectro electromagnético utilizadas en el ámbito de la percepción remota, las 5 más socorridas son mostradas en la Tabla 1.

BANDA	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS
VISIBLE	<ul style="list-style-type: none"> → 0.4 μm – 0.7 μm → Porción pequeña, y única percibida por el ojo humano → Color Azul 0.4 μm – 0.5 μm → Color Verde 0.5 μm – 0.6 μm → Color Rojo 0.6 μm – 0.7 μm
INFRARROJO CERCANO	<ul style="list-style-type: none"> → 0.7 μm – 1.3 μm → Líneas de transiciones rotacionales y vibracionales → Detección de moléculas en objetos astronómicos
INFRARROJO MEDIO O DE ONDA CORTA	<ul style="list-style-type: none"> → 1.3 μm – 3 μm → Bandas moleculares → Se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y los procesos de emisión de la superficie terrestre
INFRARROJO LEJANO O TÉRMICO	<ul style="list-style-type: none"> → 3 μm – 14 μm → Incluye la porción emulsiva del espectro terrestre → Estudio de polvo y gases fríos
MICROONDAS O DE ONDA LARGA	<ul style="list-style-type: none"> → 1 mm – 1000 mm → Atraviesan la atmósfera con facilidad → Energía muy transparente a la cubierta de las nubes

Tabla 1. Bandas principales del espectro electromagnético y sus características (Basado en Arbelo, 2004 y Lillesand et al., 2007)

La teoría de partículas y sus leyes derivadas

La teoría de partículas describe la radiación electromagnética que emite un cuerpo negro ideal (aquel que absorbe toda la energía que sobre él incide) que se encuentra en equilibrio térmico, a una temperatura definida. Así pues, considera que la radiación electromagnética es una sucesión de unidades de energía, llamados cuantos o fotones, que no poseen masa. De la ley de Planck se derivan la ley de Stefan-Boltzmann y la ley de Wien.

Planck propone pues, que la radiación electromagnética se compone de muchos entes individuales, los fotones. La energía que posee y transporta cada fotón se puede expresar como:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.2)$$

Donde:

E – Energía del fotón (J)

h – Constante de Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

ν – Frecuencia de onda (Hz)

Si relacionamos ambos modelos de radiación electromagnética, el de onda y el de fotones, haciendo simultáneas sus ecuaciones, ya que la frecuencia incide en ambas, obtendremos:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.3)$$

Donde:

E – Energía del fotón (J)

h – Constante de Planck ($h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s)

c – Velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8$ m/s)

λ – Longitud de onda (m)

De la ecuación se puede observar que la energía de los fotones es inversamente proporcional a su longitud de onda y por tanto, mientras mayor sea la longitud de onda involucrada, su contenido de energía será menor. Es por lo anterior que las radiaciones naturales de onda larga, como las de microondas, son más difíciles de detectar que las radiaciones de onda corta, como las del infrarrojo lejano.

A pesar de que el sol es la más obvia fuente de radiación electromagnética usada en percepción remota, todo objeto que posea una temperatura mayor al cero absoluto (-273°C) arroja radiación, y ésta varía en magnitud y composición espectral en cada objeto. Esta composición espectral que diferencia a un objeto de otro, hace que el objeto tenga un poder emisor espectral, que es la cantidad de energía emitida por la unidad de superficie y tiempo entre dos frecuencias.

La expresión por medio de la cual se puede encontrar la emitancia de un objeto, conocida como ecuación de radiación de Planck, función de la longitud de onda, es:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.4)$$

Donde:

M_{λ} – emitancia radiante espectral del objeto ($Wm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$)
 Cantidad de energía emitida por unidad de superficie del objeto, en cierta longitud de onda.

λ – Longitud de onda (m)

T – Temperatura (K)

$C_1 - C1 = 3.742 \times 10^8$ ($W \cdot m^2 \cdot \mu m^{-4}$)

$$C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2 \quad (2.5)$$

$C_2 - C2 = 1.4385 \times 10^4$ ($\mu m \cdot K$)

$$C_2 = \frac{h \cdot c}{k} \quad (2.6)$$

k – Constante de Boltzmann ($k = 1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K)

Empleando ecuación anterior, es posible construir la curva de emitancia radiante espectral de un cuerpo negro en temperaturas distintas, como se puede visualizar en la Figura 2; para cada temperatura existe una longitud de onda donde la emitancia es máxima, lo cual es útil para conocer el comportamiento espectral de un objeto y medir su grado de similitud con un cuerpo negro a partir de las variantes de la curva. El sol es el radiador de cuerpo negro perfecto al tener eficiencia casi máxima al emitir radiación.

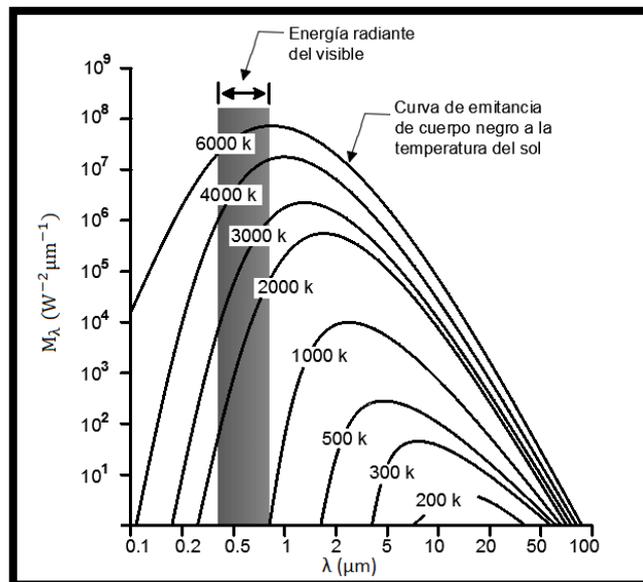


Figura 2. Curvas de emitancia radiante espectral de un cuerpo negro (Basado en Lillesand et al., 2008)

En la Figura 2 se observa, la región visible del espectro electromagnético ($0.4 \mu m - 0.7 \mu m$) está colocada en la cresta de la curva que corresponde a la temperatura del sol. Mientras más corta sea la longitud de onda, la emitancia a la que están asociadas es a la que despliegan los cuerpos de mayor temperatura.

También en la Figura 2 el área bajo la curva representa la cantidad total de energía que irradia un cuerpo por unidad de superficie. Dicha energía es una función de la temperatura a la que se encuentra la superficie del objeto y se puede expresar mediante la ley Stefan-Boltzman. La ley establece que un cuerpo negro emite radiación con una potencia emisiva esférica total, proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, en una ecuación:

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (2.7)$$

Donde:

M – Emitencia radiante total de la superficie del objeto ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)

T – Temperatura absoluta (K)

La longitud de onda dominante, en la que la curva de radiación del cuerpo negro alcanza su máximo, está relacionada con su temperatura por la ley del desplazamiento de Wien, la cual dicta que hay una relación inversa entre la longitud de onda producida en el pico de la emisión de la radiación por parte de un cuerpo negro, y su temperatura. Esta longitud de onda máxima ayuda a seleccionar la banda espectral para analizar el problema estudiado, siempre y cuando se conozca su temperatura. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\lambda_m = \frac{A}{T} \quad (2.8)$$

Donde:

λ_m – Longitud de onda máxima (μm)

A – Constante de Wien ($A = 2897.6 \mu\text{m}\cdot\text{K}$)

T – Temperatura absoluta (K)

La interacción energía – atmósfera

Independientemente de la fuente que la emita, toda radiación que es detectada por sensores de percepción remota debe pasar por la atmósfera en algún punto; el recorrido puede variar de manera diametral en cada caso y por tanto, el efecto que la atmósfera imprime también cambia, dependiendo de la magnitud de la energía medida, las condiciones de la atmósfera en el momento de la medición, y la envergadura de las longitudes de onda.

Durante su paso por la atmósfera, la radiación es afectada tanto por la dispersión como por la absorción. Al ser el nitrógeno, el oxígeno molecular, el vapor de agua y aerosoles como el polvo y el hollín, así como los cristales de hielo los principales componentes de la atmósfera, son ellos mismos los principales interferentes en las mediciones.

2.2 Dispersión y absorción en la atmósfera

Se puede definir a la dispersión atmosférica como la difusión de la radiación debido a la presencia de partículas que desvían su trayectoria inicial. En percepción remota se estudian 3 tipos de dispersión: la dispersión de Rayleigh, dominante en la mayoría de

las ocasiones, la de Mie, y la dispersión no selectiva. La radiación que no es dispersada es conocida como radiación directa.

La primera, es común cuando la radiación entra en contacto con las partículas, atmosféricas y no atmosféricas, que tienen un diámetro menor que el de la longitud de onda de la radiación; por lo tanto, es más fácil que la dispersión de Rayleigh ocurra en longitudes de onda corta. El cielo es un buen ejemplo de esta clase de dispersión, ya que cuando la luz solar atraviesa la atmósfera, dispersa mayormente a las longitudes de onda más cortas del espectro visible, las azules, y por eso vemos un cielo “azul”.

En cambio, la dispersión de Mie sucede cuando los diámetros de las partículas que se encuentran en la atmósfera son prácticamente iguales a las longitudes de onda de la energía detectada, siendo la causa de ello, en la mayoría de las ocasiones, el vapor y el polvo. Finalmente, la dispersión no selectiva puede ocurrir cuando los diámetros de las partículas atmosféricas son mayores a los de la radiación medida. Al poseer las partículas un diámetro variable entre 5 μm – 100 μm , pueden dispersar desde el espectro visible hasta el infrarrojo medio prácticamente de la misma manera, siendo, en consecuencia, no selectiva; las gotas de lluvia son un potencial detonante.

Por su parte, la absorción, en contraste con la dispersión, resulta en la atenuación de la radiación, ya que es tomada por las moléculas atmosféricas. Los principales absorbentes son el vapor, el dióxido de carbono (CO_2) y la capa de ozono (O_3). Como los gases mencionados afectan la radiación electromagnética en longitudes de onda específicas, se han propuesto el concepto de “ventanas atmosféricas”. Durante este periodo se asegura que la fuente de energía puede ser transmitida desde y hacia la superficie de la Tierra y que los sensores están disponibles para detectar y grabar esa energía.

La interacción de la energía con la superficie terrestre

Cuando la energía electromagnética actúa sobre un objeto o área de la superficie terrestre, estos pueden interactuar de 3 maneras, ya sea por medio de la reflexión, de la absorción o de la transmisión. La interacción puede darse por medio de una o más de ellas, total o parcialmente, dependiendo del tipo de material y su condición. Así mismo, la distribución de la energía involucrada dependerá de la longitud de onda.

Como la energía se descompone en 3 clases al incidir sobre un cuerpo, se puede aplicar el principio de conservación de la energía, en función de la longitud de onda. Para este caso:

$$E_I = E_R(\lambda) + E_A(\lambda) + E_T(\lambda) \quad (2.9)$$

Donde:

E_I – Energía electromagnética incidente (J)

$E_R(\lambda)$ – Energía electromagnética reflejada (J)

$E_A(\lambda)$ – Energía electromagnética absorbida (J)

$E_T(\lambda)$ – Energía electromagnética transmitida (J)

Mientras que la absorción se produce cuando el objeto toma parte de la energía que emite la fuente, la transmisión sucede si la energía únicamente pasa a través del objeto. La reflexión, por su parte, ocurre cuando la energía “rebota” con la superficie del objeto,

y por eso mismo, depende en gran medida de la rugosidad de su superficie, y se pueden distinguir 2 tipos, la reflexión especular y la reflexión difusa o Lambertiana.

Por un lado, la especular se da en superficies planas que actúan como espejos; el ángulo de reflexión es el mismo que el de incidencia, por lo que la energía se refleja en una sola dirección. Por el otro, la reflexión Lambertiana se da en superficies con algún grado de rugosidad, que reflejan a la radiación uniformemente en todas direcciones. La mayoría de las superficies no son perfectamente especulares ni perfectamente difusas, si no que están dotadas de características que las ubican un punto intermedio. En percepción remota se analiza más comúnmente la reflexión difusa, ya que éste tipo de reflexión contiene información acerca del “color” de la superficie reflejante, y la especular generalmente no lo hace.

La firma espectral de un cuerpo

Cada cuerpo es diferente, y por tanto refleja de manera diferente a la energía, en diferentes longitudes de onda. Este fenómeno es conocido como firma espectral de un objeto. Por eso cada superficie es sujeta a ser configurada mediante su curva de reflectancia o espectral, que es función de su longitud de onda. Gracias a las gráficas de curvas espectrales que se pueden obtener para diversas superficies, es posible conocer las características de un objeto y escoger la banda o bandas en las cuales es más conveniente recopilar los datos mediante el sensor para satisfacer las necesidades de un problema específico.

Más aún, así como la reflectancia espectral varía de superficie en superficie, también lo hace ligeramente dentro de una misma clase de objetos por lo que su curva de espectral no será idéntica. A pesar de ello, conviene recordar que si el fin de un análisis dado es identificar la condición de varios objetos que sean del mismo tipo, los patrones de respuesta espectral detectados por el sensor se pueden considerar confiables.

En percepción remota se ha comprobado a lo largo de los años que muchas características de la superficie terrestre pueden ser identificadas, mapeadas, y estudiadas con base en su firma espectral. Algunas de las firmas espectrales de las superficies terrestres más populares se pueden observar en la Figura 3.

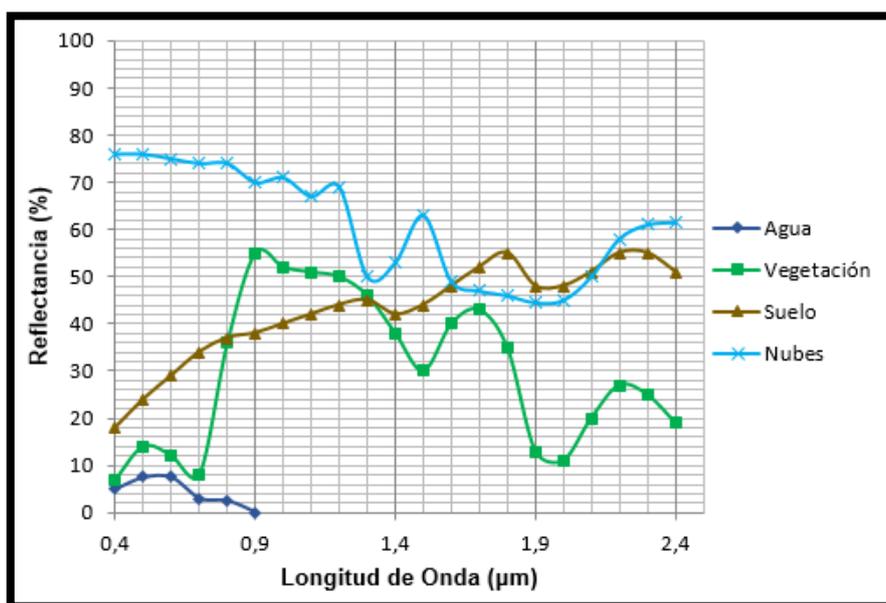


Figura 3. Curvas de las firmas espectrales de agua, vegetación, suelo y nubes. (Basado en Vázquez, 2000 y Lillesand et al., 2008)

Se puede resaltar en la figura que el agua se refleja mayormente en la banda del espectro visible, principalmente en los colores azul y verde; aunque el porcentaje de reflectancia es mínimo y nunca supera el 10 por ciento se absorbe rápidamente una vez que entra en el infrarrojo cercano. Seguidamente en la vegetación (sana) su reflectancia máxima, de alrededor de 50 por ciento, se alcanza en el infrarrojo cercano.

En contraste, el suelo incrementa su reflectancia una vez que sale de la banda visible, teniendo su mayor pico de reflectancia en la banda del infrarrojo medio, alrededor de las longitudes de onda de 2 μm . Por otra parte, las nubes son poseedoras de una reflectancia no menor al 40 por ciento, alcanzando porcentajes de reflectancia de casi 80 por ciento a lo largo del visible y disminuyendo justamente cuando el porcentaje de reflectancia del suelo es mayor.

Capítulo 3. Percepción Remota

Actualmente, según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) podemos definir a la percepción remota como “la ciencia (para algunos, arte o técnica) que permite observar y obtener información de nuestro planeta -desde el espacio-, sin estar en contacto con ella”. Por ello, el proceso de la percepción remota involucra, en este orden, el planteamiento de una necesidad, la adquisición o recopilación de datos, su procesamiento y finalmente su entrega.

3.1 Elementos de la Percepción Remota

INEGI y autores como Thomas Lillesand o Manuel Arbelo, coinciden en que la percepción remota es un proceso que consta de 7 pasos, e implica una interacción entre el objeto a estudiar, y la radiación incidente. Además hay que tener en consideración que la percepción remota también incluye a la energía emitida y que los sensores no necesariamente producen imágenes. Los pasos son:

- I. Fuente de energía o de radiación electromagnética
Todos los sistemas de percepción remota son dependientes en la energía, ya sea que emane de fuentes externas, o que el mismo sistema la produzca. Además, la totalidad de los cuerpos físicos emiten radiación electromagnética, de manera espontánea y constante.
- II. Radiación y medio de transmisión o atmósfera
Como la atmósfera es el medio por el cuál la energía viaja de la fuente al objeto, y viceversa, ésta siempre modifica, al pasar por ella, en mayor o menor grado, la fuerza y la distribución espectral de la energía que recibe el sensor.
- III. Interacción energía-objeto
La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades del objeto, y de la radiación incidente. A partir de esto, el objeto puede reflejar la energía que recibe, absorberla, reflejarla, e incluso actuar como dispersador. Muchas interacciones objeto-energía aún están siendo estudiadas.
- IV. Percepción de energía por el sensor
El sensor es el que detecta la radiación electromagnética (energía) reflejada o emitida por los agentes externos (objeto y atmósfera). El sensor ideal debería ser altamente sensible a las diversas longitudes de onda emitidas por diversos objetos.
- V. Transmisión, recepción y procesamiento de datos
La energía recibida y grabada por el sensor debe ser transmitida (en la mayoría de los casos electrónicamente) a una estación externa, en la cual, los datos son procesados y convertidos a imágenes digitales.
- VI. Usuarios de datos
Los usuarios interpretan y analizan el material, visual o electrónicamente, para extraer información acerca del objeto de interés. Los datos sólo se pueden considerar información cuando se entiende cómo fueron generados.

VII. Aplicación

Se alcanza en el instante en que se le da un sentido a la información de las imágenes. Con el uso de dicha información se puede lograr comprender mejor al objeto, o resolver la necesidad planteada en un principio.

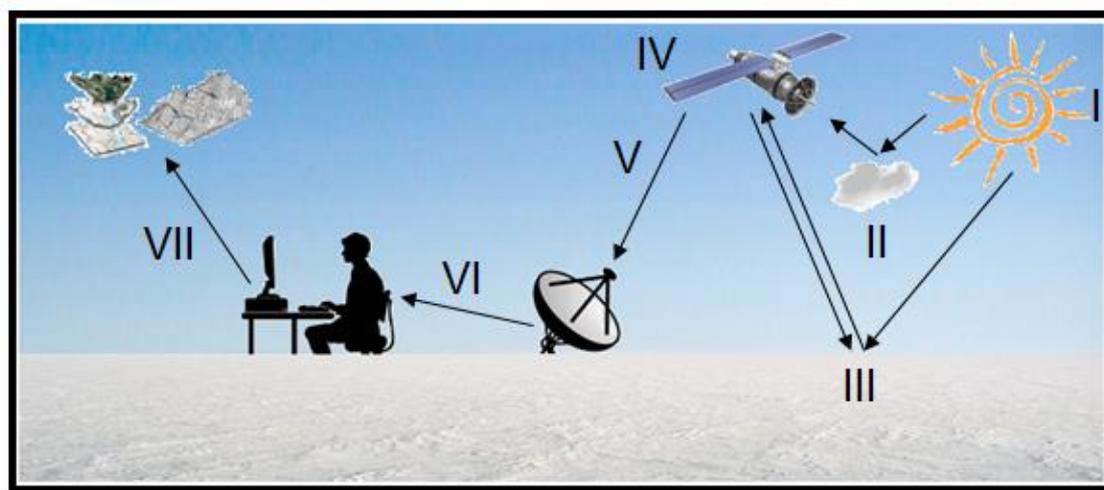


Figura 4. Elementos de la Percepción Remota (Basado en Arbelo, 2004 e INEGI, 2014)

3.2 Sensores y plataformas

Aunque en percepción remota sensores y plataformas trabajan conjuntamente, son en realidad 2 entidades diferenciadas. Mientras que los sensores se encargan de recibir y leer la información que emite el objeto estudiado, en forma de energía o radiación electromagnética, la función de las plataformas es la de acoger y transportar a los sensores. Un buen ejemplo de la relación entre ellos es el Landsat-8. Mientras que la NASA desarrolló la plataforma, el sensor OLI fue obra del USGS (United States Geological Survey).

Los sensores

Conviene diferenciar entre 2 tipos de sensores: aquellos que dependen de la energía externa para funcionar y aquellos que son capaces de generar energía propia. Los primeros, llamados pasivos, no cuentan con su propia fuente de radiación y operan únicamente cuando los objetos reflejan la energía que reciben, generalmente por parte del Sol. La mayoría de las plataformas están equipadas con este tipo de sensores debido a la mejor resolución espacial de imágenes que pueden entregar. Los sensores pasivos, en función de la posición espectral de las distintas bandas, recolectan la energía reflejada (visible e infrarrojo), emitida (infrarrojo lejano), y dispersada (generalmente en visible y microondas). La energía puede ser atmosférica o de la superficie terrestre.

Por su parte, los sensores activos, los cuales no han sido tan desarrollados como los pasivos, producen su propia radiación o iluminación, y son capaces de penetrar la atmósfera bajo casi cualquier condición meteorológica, ya que no operan dentro del espectro visible. Estos sensores funcionan al emitir microondas hacia los objetos, que a su vez reflejan las ondas recibidas de vuelta hacia el sensor, el cual decodifica las señales recibidas. El radar (radio detection and ranging) es el mejor ejemplo, aunque necesita cierto nivel de energía para su adecuado funcionamiento.

A su vez, los sensores también se pueden clasificar en función de sus características operacionales, siendo los principales criterios la aplicación, el número y grosor de las bandas espectrales, y la resolución.

La aplicación se refiere a la finalidad con que es usado. Los primeros en surgir fueron los militares, y a pesar de que el Landsat-8 es un satélite que cuenta con sensores para la observación de la Tierra (OLI y TIRS), también hay meteorológicos, de telecomunicaciones, de exploración y otros más. El número de bandas espectrales tiene que ver con la capacidad de un sensor para poder operar en diferentes porciones del espectro electromagnético, pudiendo ser pancromáticas, multiespectrales o hiperespectrales; mientras más estrecha sea la banda, mayor será su resolución.

En términos generales, la resolución se refiere a la habilidad de un sensor de percepción remota para grabar y desplegar información detallada de manera diferenciada; existen 4 tipos de resolución que toman parte en la obtención de datos en la percepción remota: espectral, espacial, temporal y radiométrica.

Para empezar, la resolución espectral tiene que ver con la capacidad del sensor para clasificar la radiación detectada en distintas longitudes de onda del espectro. Esta resolución se determina por el número de bandas adquiridas, y su ancho, en micrómetros (μm). A mayor número de bandas, mejor será la caracterización espectral de un objeto determinado.

Después, la resolución espacial indica el grado de detalle que un sensor puede obtener en una imagen, ya que cada sistema de percepción remota tiene un límite en cuanto al tamaño mínimo que puede tener un objeto en la superficie terrestre para poder ser “visto” por el sensor. El pixel es la unidad de área mínima de resolución espacial que se puede obtener, y depende de la plataforma y el sensor que se empleen. Generalmente la resolución se clasifica como baja, media o alta.

Por su parte, la resolución temporal, es el periodo de tiempo que ocurre entre el momento en que el sensor adquiere una imagen de una superficie dada, en un punto determinado, y la siguiente ocasión en que se encuentra en posición de tomar la misma imagen, o secuencia de imágenes. Es pues, en resumen, la frecuencia de visita a una posición determinada, y depende de la manera en que orbita el satélite.

Finalmente, la resolución radiométrica es la habilidad de un sensor para grabar diferentes niveles de intensidad de la radiancia espectral, es decir, la cantidad de energía medida en términos de variaciones de la radiancia espectral. Una resolución pequeña trabajará usando pocos niveles de intensidad, o unos pocos bits; la vasta mayoría de los sensores ofrecen una resolución de 8 bits, o 256 niveles por pixel (del 0 al 255).

Las plataformas

Las plataformas, también conocidas como vehículos, casi siempre son elegidas en función del tipo de sensor que operará, ya que, por ejemplo, en el caso de los sensores fotográficos, ellos son poseedores de una buena resolución espacial pero al mismo tiempo carecen de la sensibilidad de amplio espectro que si pueden obtener los sensores no fotográficos; además, los sensores pueden tener complejos sistemas ópticos, mecánicos y electrónicos que necesiten una plataforma con adaptaciones especiales. Las plataformas pueden ir desde helicópteros hasta satélites, pasando por escaleras.

Por lo general, las plataformas pueden clasificarse en función de sus características en 2 grandes grupos:

- ➔ Por la distancia o altura de la superficie en donde operan
Helicópteros, aviones, satélites y otros.
- ➔ Por la trayectoria que recorre (Heliosíncrona)
Sincronizada con el sol, o haciendo una órbita geoestacionaria

Al escoger la plataforma se deben tomar en cuenta las ventajas y desventajas que cada una acarrea. Por una parte, las plataformas aéreas son preferibles en misiones que requieren de gran detalle y en aquellas de corta duración, pero, al mismo tiempo, requieren de una excelente planeación y se debe tener en cuenta que la trayectoria puede variar en cualquier momento. Por la otra, las plataformas satelitales están limitadas por las características de su órbita, aunque tienen una trayectoria definida y son preferibles en tareas de larga duración y en estudios que requieran el monitoreo de áreas geográficas extensas.

Por todo lo anterior, la decantación por plataformas aéreas o plataformas satelitales, combinada con la altura de operación escogida y sumado a la elección del dúo sensor-plataforma, necesario para una operación dada, afectará la escala, resolución y cobertura de los datos recolectados.

3.3 Procesamiento e interpretación de datos

Una vez que el sensor ha recabado la información requerida y los datos se transmiten al usuario, la radiancia de la superficie de un objeto, que ha sido detectada en pixeles, se debe traducir en un Nivel Digital (ND) para cada banda del espectro, ya que esto facilita su procesamiento y transmisión. El ND es expresado como un valor numérico entero y varía en función de la resolución radiométrica de cada sensor. Cada pixel se “traduce” en una intensidad visual por medio de su nivel de gris.

Ya que los sensores pueden, por medio de la longitud de onda, separar a los componentes de la radiancia, para formar bandas, los pixeles que la forman se representan en una imagen satelital; cada pixel es representado por 3 coordenadas, dependientes de su ND. Mientras que las primeras 2 dimensiones (renglones i y columnas j) representan su localización espacial, geográfica o no, la tercera dimensión (bandas k) representa al número de bandas con que está equipado el sensor por medio de matrices, y corresponde a la localización espectral de cada pixel. La manera en que se lleva a cabo organización de una imagen digital se puede observar en la Figura 5.

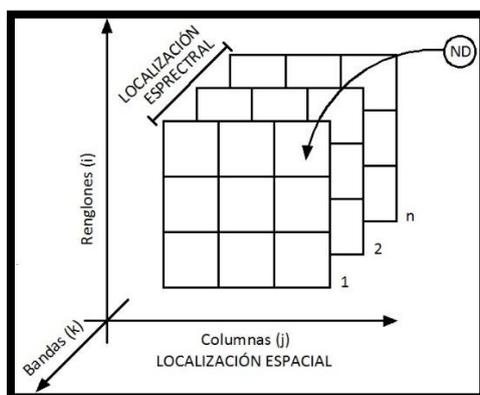


Figura 5. Organización de una imagen satelital
(Basado en Sepúlveda, 2011)

Antes de poder utilizar la información que ha sido recabada por el sensor, analizándola, modelándola o interpretándola, es necesario procesar los datos capturados. A pesar de que virtualmente existen posibilidades infinitas de manipular los datos, generalmente es un proceso formado por 4 pasos: rectificación y restauración, también llamado pre-procesamiento, mejora, clasificación, y, finalmente, post-clasificación.

Para iniciar, el pre-procesamiento de imagen consiste en corregir la posible distorsión o degradación de datos para crear una representación más fiel, y por lo general involucra la corrección de distorsiones geométricas y calibraciones radiométricas. Las correcciones geométricas son provocadas casi siempre por variaciones de altitud y velocidad de la plataforma, además de por errores del propio sensor; dichas correcciones tratan de remover errores provocados por la curvatura de la Tierra, la refracción atmosférica y la sincronización de la rotación satélite-tierra. Las correcciones radiométricas, por otra parte, buscan corregir equivocaciones producto de irregularidades en el funcionamiento de los detectores, cambios en la iluminación y condiciones atmosféricas desfavorables, ya que éste tipo de irregularidades evitan la adecuada representación de la radiación de las superficies.

Subsecuentemente, la mejora de imagen se lleva a cabo para exhibir los datos de una manera más efectiva, de forma tal que se incremente el grado de detalle de la información que se puede observar visualmente, facilitando su análisis digital. La mejora se realiza por medio de su realce y filtrado.

La clasificación de imagen tiene como finalidad reemplazar su análisis visual con técnicas cuantitativas para automatizar la identificación de sus características. La clasificación implica el análisis multiespectral de la imagen para determinar la identidad de cada pixel, y así separarlos en clases. Las clases se determinan al separar a los pixeles en grupos por medio de fronteras de decisión, siendo todos los pixeles que se encuentren dentro de los límites de la frontera pertenecientes a una misma clase, que pueden ser espectrales o de información. Las espectrales son formadas por grupos de pixeles similares respecto a su nivel de brillo; las de información son categorías que el operador establece y trata de identificar en las imágenes. Actualmente, hay 2 maneras de clasificación de imagen: supervisada y no supervisada.

En la clasificación supervisada el operador vigila la categorización de los pixeles al comparar, por medio de una computadora, los pixeles de la imagen con aquellos almacenados en una base de datos, y separarlos con base en sus atributos espectrales, para así poderlos asignar a una clase informacional. En contraparte, en la clasificación no supervisada los pixeles se sepan en grupos en función de su espectro natural, dependiente de su reflectancia; acto seguido, el analista determina y clasifica la clase de pixel de acuerdo con la información de referencia que se tiene, atribuyéndolos a una clase espectral.

Finalmente, una vez que la imagen ha sido clasificada, la post-clasificación trata de afinar su apariencia, generalmente mediante el uso de filtros, ya que así se asegura el mostrar la clase dominante óptimamente.

3.4 Optimización de imagen: realce y filtrado

Como ya se mencionó, la mejora de imagen tiene como meta facilitar su interpretación visual, al incrementar la distinción aparente entre objetos acrecentando los rasgos de interés, debido a que el ojo es dueño de una baja habilidad para discriminar entre las pequeñas diferencias radiométricas y espectrales existentes. Las mejoras pueden

llevarse a cabo en una única banda, monocromática, o en los componentes individuales de varias bandas.

Aunque existen técnicas no destructivas para el mejoramiento de imagen, como la composición y el ajuste de contraste, éstas son útiles únicamente si el objetivo es mejorar globalmente a la imagen. Sin embargo, en la mayoría de los casos la atención se vuelca en mejorar aspectos puntuales mediante técnicas destructivas, como el filtrado. Mientras estas últimas generan un nuevo conjunto de datos al manipular la imagen, las no destructivas no alteran a la imagen original.

El realce

Consiste en mejorar las características del brillo y contraste de la imagen, así como en focalizar la atención en algunos detalles de los objetos mediante operaciones con matrices. Esto se debe a que la mayoría de los sensores de percepción remota operan en un rango de 256 niveles de gris y los valores recolectados raramente cubren todo ese rango, resultando en ND bajos. El realce es logrado cuando el rango de valores se expande al alternarse el Nivel de Gris (NG), resultando en una imagen que acentúa el contraste entre diversos aspectos de interés.

Aun cuando existen distintas modalidades para llevar a cabo esto, habitualmente se hace o por realce de contraste o por convolución, también conocido como realce espacial. El filtro por convolución es usado para resaltar y suprimir información en conformidad al objetivo del análisis, enfatizando o dejando de lado información de diferentes frecuencias espaciales. El de contraste, en cambio, es recurrido cuando se desea hacer más clara la diferencia entre los valores oscuros y los claros, lográndose al bloquear o pasar energía en varios rangos del espectro, situación que los hace conocerse también como filtros espectrales.

Filtro de imágenes por contraste

El realce por contraste se hace por medio de un análisis de histograma y existen muchos y muy diversos métodos para realizarlo. No obstante, resaltan 3 métodos: expansión lineal, expansión espacial y expansión de histograma ecualizado.

Para empezar, en el realce de contraste por expansión lineal, también nombrada automática o simple, el reajuste depende de los NDs, máximo y mínimo que forman parte de la imagen. Así, el rango de valores se expande uniformemente hasta llenar los niveles de la escala de grises. En el algoritmo usado los números digitales y el nivel de gris tienen asignados valores enteros, siendo 0 el ND más bajo, que representa al color negro, y el 255 el máximo, que representa al blanco; el algoritmo que se aplica a cada pixel, con un nivel de gris en 8 bits, es:

$$NG = 255 \cdot \left(\frac{ND_i - ND_{mín}}{ND_{máx} - ND_{mín}} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

NG – Nivel de Gris (1)
Nuevo nivel digital asignado al pixel

ND_i – Nivel Digital Original (1)
Nivel asignado del pixel asignado por el sensor

$ND_{mín}$ – Nivel Digital Mínimo ($ND_{mín} = 0$ (1))

$ND_{máx}$ – Nivel Digital Máximo ($ND_{máx} = 255$ (1))

La expansión espacial, conocida en ocasiones como lineal manual o expansión por porcentaje de saturación, opera bajo el mismo principio que la expansión simple; la diferencia más recalable es que el operador acota los valores de los niveles digitales. Esto permite que se destaquen lugares de interés concretos, facilitando la observación del área de estudio. Ésta expansión se rige por 3 criterios:

- Si $ND_{máx} > ND > ND_{mín}$, entonces: $NG = 255 \cdot \left(\frac{ND_i - ND_{mín}}{ND_{máx} - ND_{mín}} \right)$
- Si $ND_{mín} > ND$, entonces: $NG = 0$
- Si $ND_{máx} < ND$, entonces: $NG = 255$

Un histograma representa gráficamente a una variable en forma de barras. Cada barra posee un área que es proporcional a la frecuencia de los valores que se representan. En el eje horizontal aparecen los valores variables, y en el vertical las frecuencias, siendo para este caso, respectivamente, ND y pixeles; para la expansión de histograma ecualizado se espera obtener un histograma que sea tan uniforme como sea posible. Todo esto se logra si el número de pixeles asignados a cada ND es casi idéntico, ya que esto quiere decir que los niveles de gris son similares.

Los pixeles no pueden ser divididos, y por tanto pertenecerán únicamente a un ND. Como resultado, los ND con más pixeles ocuparán la mayor porción del histograma y por tanto la mayoría proporcional del área en la imagen. El histograma ecualizado presenta picos menos pronunciados, aumentando así el contraste de la imagen, como se puede observar en la Figura 6.

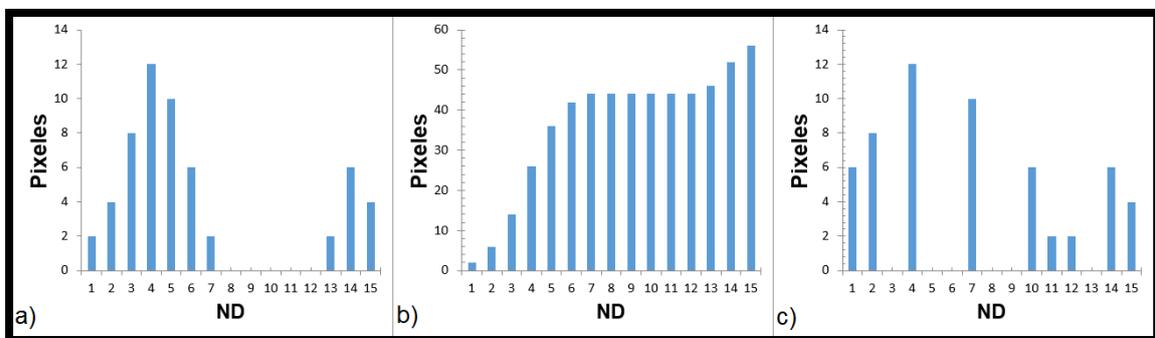


Figura 6. Histogramas. a) Histograma original, b) Histograma de frecuencias acumuladas, c) Histograma ecualizado

Filtro de imágenes por convolución

Éste tipo de filtros operan a un nivel “local”, es decir, los valores originales del pixel son modificados con base en los NGs de los pixeles vecinos. Los filtros por realce espacial son, prácticamente, una aplicación especial de la convolución, que no es otra cosa que una operación genérica del procesamiento de imagen. Al ser más agresivo, el realce espacial se usa mayormente para realzar características especiales de una imagen, o para corregir fallas de toma de imagen.

Convolucionar a una imagen requiere un filtro, en forma de matriz de coeficientes, conocida como kernel o núcleo; éstas matrices están formadas comúnmente por un número impar de pixeles (generalmente 3x3, 5x5, 7x7, pero pueden tener otros

tamaños). La matriz es móvil y se aplica secuencialmente, renglón a renglón y columna a columna, a los diferentes píxeles, lo que genera un valor nuevo para el píxel filtrado con la información de los píxeles vecinos, modificando solamente el ND del píxel en cuestión. Los píxeles periféricos son la única excepción, ya que no poseen píxeles circundantes de los cuales tomar información.

La influencia que la convolución pueda tener en una imagen dada por medio del realce espacial está condicionada por el tamaño del kernel utilizado y los valores de los coeficientes que los forman. Mientras más grande sea la matriz mayor información de píxeles adyacentes se involucrará. El proceso puede ser observado en la Figura 7.

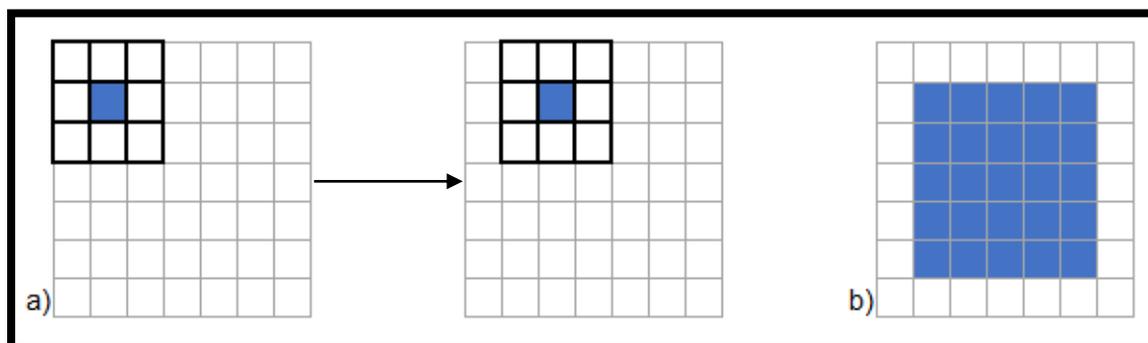


Figura 7. Proceso de convolución. a) Desplazamiento de la matriz de filtrado móvil, b) Realce espacial obtenido al emplear un Kernel 3x3
(Basado en Schowengerdt, 2007 y Ramos, 2013)

Como el filtrado por realce espacial requiere asignar valores a los elementos, para atenuar o acentuar las variaciones de sus fronteras, se ha dado paso a los filtros espaciales.

Filtros espaciales

Los filtros de paso bajo y de paso alto son filtros que acentúan o atenúan información contenida en las imágenes estudiadas. Esto lo hacen en varias frecuencias espaciales, que se refiere a los cambios abruptos de variaciones de tono en la imagen, por lo que a menor frecuencia espacial mejor será la calidad de la imagen; mientras que los filtros de paso bajo han sido diseñados para enfatizar las frecuencias bajas y suavizar las frecuencias altas, los filtros de paso alto hacen justamente lo opuesto.

Los filtros de paso bajo

Empleados durante el proceso de mejora de imagen, se usan para intentar remover variaciones espaciales aleatorias, comúnmente ruido, ya que este afecta los niveles de brillo en los píxeles. Estos filtros homogenizan a la imagen para así suavizar el contraste espacial existente, atenuando la diferencia entre frecuencias altas y bajas; en otras palabras, se uniformiza la variabilidad asociada a los diversos tipos de cubierta en la imagen. Los bordes, al ser frecuencias altas, se perderán.

Aunque los filtros de paso bajo existen en muchas formas, y diferentes tipos, los más usados en percepción remota son:

I. Filtro de la media

Asignan al píxel central la media de todos los píxeles que forman la matriz de filtrado, que está conformada por unos; el divisor es el número de los elementos que son parte de la matriz.

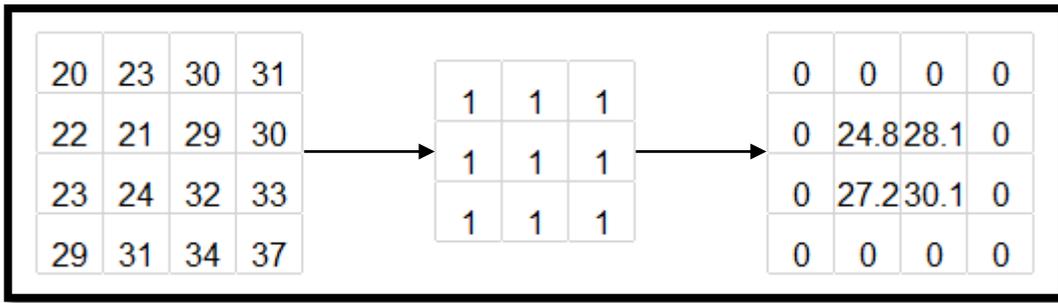


Figura 8. Ejemplo de un filtro de la media

II. Filtro de la media ponderada

Funciona de manera similar al anterior. La excepción radica en que la matriz de los elementos no está formada exclusivamente de unos; en cambio, hay un valor al que se le da más peso, generalmente al que se encuentra en el centro. De esta manera el resultado tiene mayor fidelidad a la imagen original, con lo que se evita que parezca borrosa.

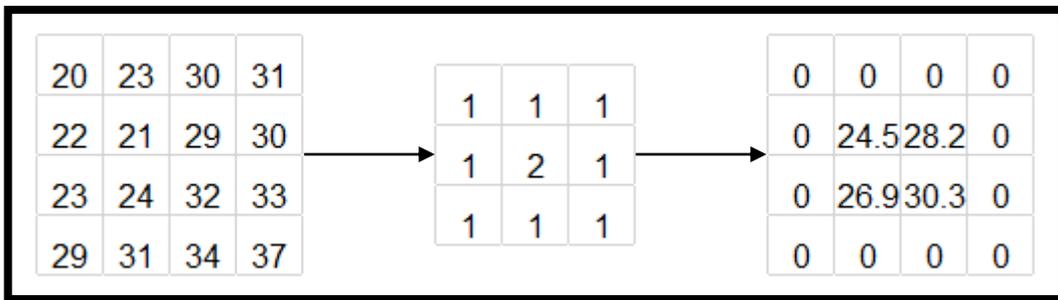


Figura 9. Ejemplo de un filtro de la media ponderada

III. Filtro de la mediana

Es el menos sensible a valores extremos. Además, tiene la ventaja de que el valor final del píxel es un valor real presente en la imagen y no un promedio, por lo que el efecto borroso que afecta a otros filtros se reducirá. La desventaja que tiene frente a sus múltiples beneficios es que es complejo de calcular, ya que se deben ordenar los diferentes valores de los píxeles incluidos en la matriz de mayor a menor, y tomar aquel que se encuentre en el medio, consumiendo por tanto más recursos que otros filtros.

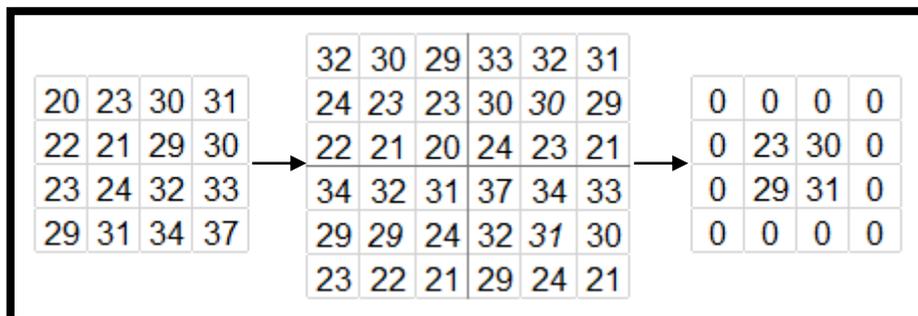


Figura 10. Ejemplo de un filtro de la mediana

Dentro del ámbito de los filtros de paso bajo existen también los filtros adaptativos y los filtros gaussianos, aunque no se entrará en detalle. Los primeros son más complejos, si cabe, ya que los coeficientes de ponderación de cada píxel se recalculan en función de

un histograma generado a partir de los NDs. Los segundos operan al simular una distribución gaussiana bivalente. El valor máximo es el central y disminuye a los extremos, resultando pues un grupo de valores entre 0 y 1, que se deben transformar a números enteros.

Los filtros de paso alto

Son socorridos cuando se requiere resaltar las zonas de mayor variabilidad, generalmente los bordes, eliminando la componente media, ya que así se logra incrementar los detalles geométricos de una imagen. Precisamente, los bordes no son otra cosa que límites lineales en donde se presentar cambios abruptos en los ND.

También sirven para eliminar la contaminación entre pixeles. Cada pixel está contaminado por otros pixeles vecinos ya que, considerando a la superficie terrestre como lambertiana, la radiación que un pixel refleja se puede repartir entre pixeles vecinos. Entre estos filtros se pueden resaltar:

I. Los filtros direccionales

Se emplean para identificar estructuras que están siguiendo una dirección definida en el espacio, al resaltar el contraste existente entre pixeles situados en ambos lados de la matriz. Generalmente se emplean matrices de 3x3, pero se pueden crear filtros con matrices mayores para resaltar otras direcciones.



Figura 11. Algunos filtros direccionales

II. Los filtros Laplacianos

Se consideran omnidireccionales ya que realza las características, en este caso los bordes, en todas direcciones. Son elegidos cuando se requiere enfatizar la variación de los ND, pero su rendimiento se ve afectado en presencia de ruido, que predominará sobre los bordes. La operación de este filtro se basa en la tasa de cambio de la pendiente del brillo en un kernel de pixeles. La matriz usada es casi siempre de 3x3 con un valor cualquiera en la posición central, y cercano al 0 en las restantes, garantizando con ello que las frecuencias altas maximicen la diferencia entre pixeles vecinos.

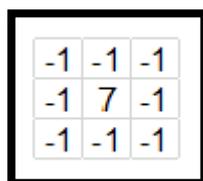


Figura 12. Ejemplo de un filtro laplaciano

III. Los filtros de gradiente

Conocidos también como filtros de primera derivada, son útiles cuando se desean detectar cambios significativos en los ND, como fronteras continuas, en el caso de ríos, líneas de costa o caminos, entre varios más. A consecuencia de que para los datos obtenidos de imágenes satelitales no se puede calcular una derivada continua, se obtiene una derivada finita. Una derivada finita representa el valor de la diferencia entre 2 píxeles contiguos, y los mismos principios son aplicables en la localización de fronteras aleatorias.

Estos filtros se sustentan en que las derivadas de cualquier punto de la imagen son funciones del nivel de brillo de, prácticamente, todos los puntos que la componen, aunque diferentes aproximaciones pueden tener más o menos precisión. Hay diferentes filtros u operadores de gradiente que pueden ser utilizados, entre ellos se encuentra el Sobel, el Roberts y el Prewitt, cuyas componentes se muestran en la Tabla 2.

Filtro	Componente Horizontal (Sx)	Componente Vertical (Sy)
Prewitt	$\begin{vmatrix} -1 & 1 & 1 \\ -1 & -2 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$
Roberts	$\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{vmatrix}$
Sobel	$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{vmatrix}$

Tabla 2. Componentes de filtros de gradiente (Basado en Lillesand, 2008 y Sepúlveda, 2011)

El filtro Roberts fue uno de los primeros desarrollados para detectar y exaltar bordes. Se vale de las direcciones diagonales de la matriz para poder calcular el vector gradiente. La idea de este operador cruzado es aproximar el gradiente de una imagen a partir de la diferenciación discreta, lograda al calcular la suma de los cuadrados de las diferencias entre píxeles diagonales adyacentes.

Por su parte, el filtro de Sobel es uno de los más efectivos y el más empleado para realzar bordes, debido a que crea una imagen que los resalta. El operador usa 2 matrices de 3x3, los cuales se convolucionan con la imagen original, para así calcular las aproximaciones de las derivadas, una para cambios horizontales y otra para los verticales. El gradiente puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$|R| = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

Donde:

R – Magnitud del Gradiente

X, Y – Kernels direccionales

Finalmente, el operador Prewitt, al igual que el Sobel, se vale de 2 matrices de 3x3. En este caso el gradiente de la intensidad de imagen se calcula en cada punto, encontrando la dirección del incremento más grande, de más claro a más oscuro, y su magnitud. De esta manera, se muestran los cambios de imagen abruptos y graduales en un punto, y por tanto, la probabilidad de que el punto represente un borde, así como la orientación de este.

3.5 Ventajas y limitantes

Comparada con otras técnicas también usadas en recursos de la Tierra, la percepción remota ha empezado a usarse únicamente con fines no militares desde hace 4 décadas, por lo que con todo y su rápido desarrollo, no está exenta de inconvenientes, aunque evidentemente tiene algunos privilegios en comparación a otras técnicas.

I. Ventajas sobre otras técnicas

- Obtención de información a distancia
- Operación en sitios de acceso restringido
- Flexibilidad de aplicación en distintos campos de conocimiento
- Acceso a información actualizada e histórica
- Creación de base de datos para estudios de larga duración
- Fácil análisis e interpretación gracias a su visión sinóptica del medio
- Visión conjunta del objeto de estudio y su entorno

II. Limitantes con otras técnicas

- Dependiente de la órbita del satélite
- Recolección de información condicionada por condiciones meteorológicas
- Disponibilidad de información únicamente de la superficie del objeto
- Técnica con resolución espacial pobre
- Requiere personal capacitado y software específico
- Costo económico en función del sensor y plataforma
- Procesamiento de datos tedioso

Capítulo 4. Parámetros de Calidad del Aire

Los parámetros de calidad del aire indican que tan contaminado se encuentra el aire y por consiguiente, que tan apto es para ser respirado ya que la contaminación puede causar efectos adversos en la salud y el ecosistema, entre los que se pueden destacar la bronquitis, el asma, ataques cardiacos e incluso autismo, además de reducción en la visibilidad y entorpecimiento del proceso de fotosíntesis. Tan sólo en 2010, 21 594 personas murieron en México como consecuencia de enfermedades asociadas a la polución atmosférica.

Según la SEDEMA, el transporte es el sector que mayormente contribuye a la emisión de contaminantes con casi 50 por ciento; los otros dos que “ayudan” de manera más significativa son la industria y el sector habitacional con más del 40 por ciento entre ambos. De acuerdo a datos de la SEMARNAT, el consumo energético de la ZMVM es de 554 petajoules anuales, de los cuales 245 son de gasolina.

Los contaminantes atmosféricos se dividen de acuerdo a su origen en 2 grandes grupos: los primarios, que se emiten directamente a la atmósfera y los secundarios, formados por medio de procesos químicos en la atmósfera. A su vez, los contaminantes pueden ser de 2 clases: los gaseosos, cuya principal fuente artificial es la quema de combustible y los aerosoles, formados por una mezcla entre partículas que se encuentran suspendidas en un gas. La localización de las estaciones de monitoreo ambiental, que miden a los contaminantes en la ZMVM se muestra en la Figura 13.

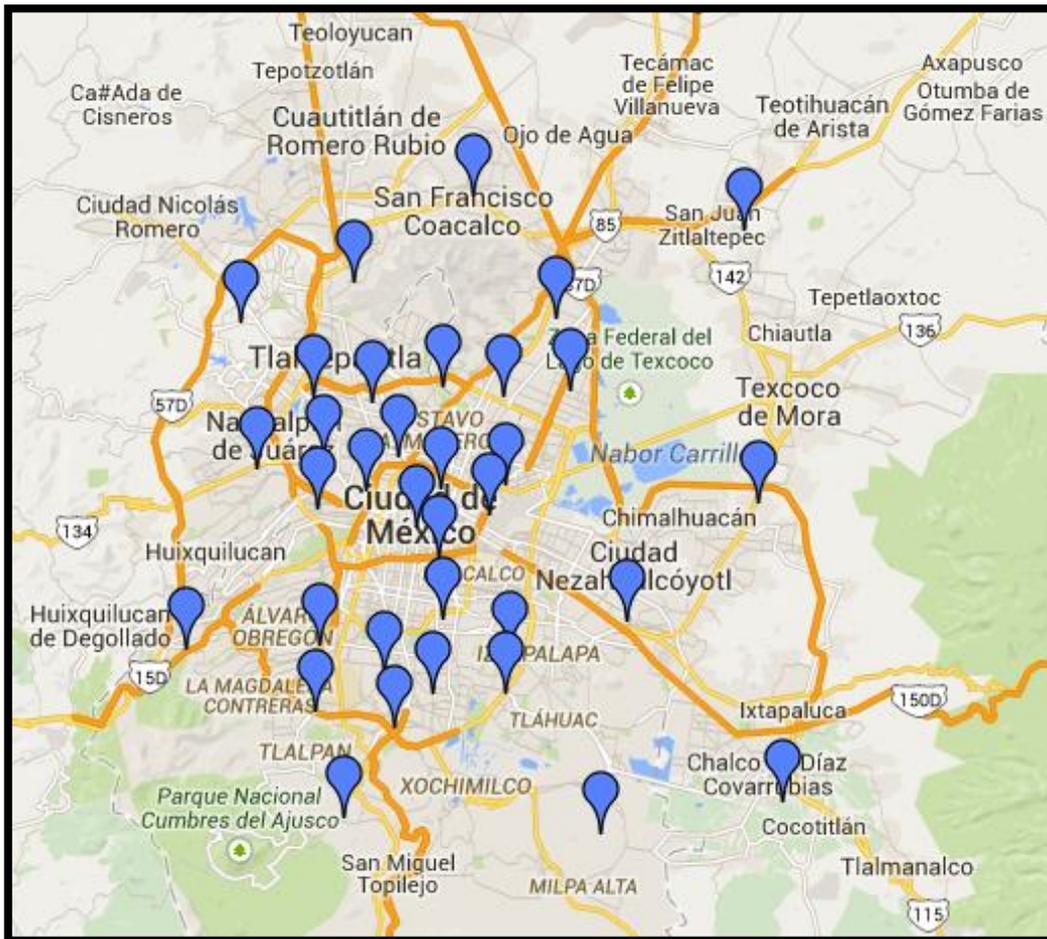


Figura 13. Estaciones de monitoreo ambiental en la ZMVM (Fuente: INECC)

Los contaminantes gaseosos

Hay una gran variedad de gases capaces de causar contaminación en la atmósfera, no obstante 4 son los compuestos que afectan más rotundamente a la ZMVM:

- I. **Compuestos de Carbón**
Se emiten principalmente durante la quema de combustibles o de cualquier material orgánico que se realice en la atmósfera con una cantidad de oxígeno limitada, situación que propicia una combustión incompleta. Su presencia en altas concentraciones es mortal, ya que su ingesta evita el paso de oxígeno en el organismo.
- II. **Compuestos de Azufre**
La principal fuente es la combustión de sustancias que contienen azufre como el carbón, la madera y los combustibles, además de ser producido por los volcanes. Los óxidos de sulfuro (SO_x) reaccionan y producen ácido sulfúrico, que a su vez genera lluvia ácida.
- III. **Compuestos de Nitrógeno**
Integrados por átomos de oxígeno y nitrógeno, emitidos por los escapes de automóviles, estufas y otras fuentes. Son formados por la combustión generada debido a la reacción del oxígeno con nitrógeno. Los NO_x (Óxidos de Nitrógeno) son precursores de las partículas suspendidas, y pueden contribuir a la lluvia ácida.
- IV. **Compuestos Fotoquímicos**
El O_3 (ozono) es un gas incoloro y oloroso, y muy reactivo, además de ser una de las maneras en que el oxígeno se encuentra en la naturaleza. Pese a ello, su nivel aumenta considerablemente debido a la presencia de gases emitidos por los escapes de automóviles y la radiación solar; afectando a las plantas y las actividades agrícolas.

4.1 Aerosoles

Es material sólido o líquido suspendido en la atmósfera y su tamaño puede variar de unos pocos nanómetros a decenas de micrómetros. Para que una partícula pueda ser clasificada como PM (Particulate Matter), es decir, que sea una partícula suspendida en el aire, debe tener un diámetro menor a $10 \mu\text{m}$, ya que si es mayor su lapso de tránsito en la atmósfera es muy corto debido a la inercia, teniendo un grado de depósito de casi 100 por ciento, por lo que no llega a formar parte del aerosol. Para dar una idea, el máximo diámetro de PM será por lo menos 7 veces menor al diámetro de un cabello. En cuanto a los efectos que pueden causar en la salud, un diámetro mayor a $10 \mu\text{m}$ indica que no podrá ser inhalado, ya que mientras más pequeña la partícula, mayor será el grado de intromisión que tendrá en el sistema respiratorio, pudiendo llegar hasta el sistema circulatorio.

Aunque hay varios métodos de caracterización, uno de los más aceptados es el basado en su diámetro aerodinámico: PM10 o partículas gruesas si son menores de $10 \mu\text{m}$, PM2.5 o partículas finas si son menores de $2.5 \mu\text{m}$ y PM0.1 o partículas ultra-finas si son menores a $0.1 \mu\text{m}$. Su distribución es mostrada en la Figura 14.

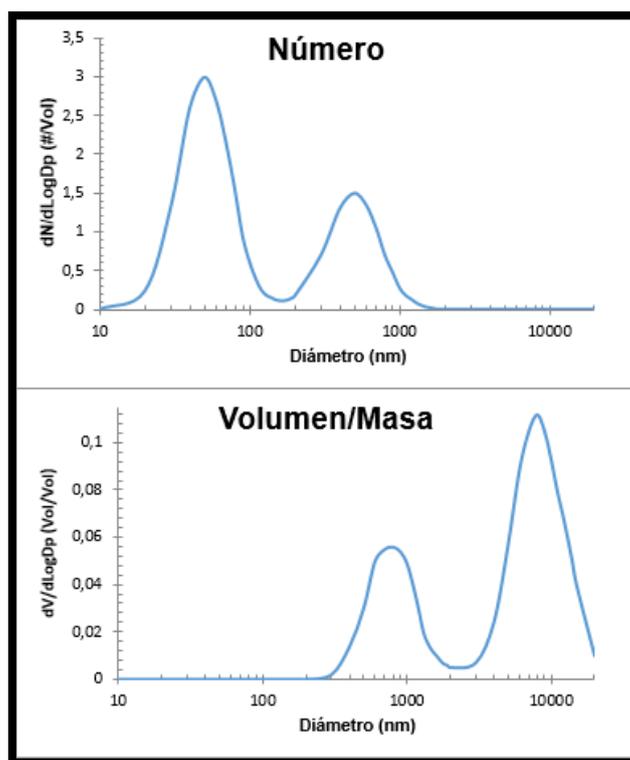


Figura 14. Distribución por tamaño de PM (Basado en Hasheminassab, 2014)

PM10 y PM2.5

En este estudio los esfuerzos se concentraron en medir PM10 y PM2.5. LAS PM10 son generalmente producidas por procesos mecánicos como viento o erosión, mientras que las PM2.5 son resultado de las fuentes de emisiones primarias o la coagulación de partículas menores. Por lo tanto, en un ambiente urbano como la ZMVM, las partículas gruesas surgen por el desgaste de los neumáticos, suelo arrastrado por el viento y bioaerosoles, como el polen; entretanto, las partículas finas se originan principalmente de emisiones vehiculares. Las propiedades físicas y químicas de PM cambian con la variación espacial y temporal, que afectan su toxicidad; la mayoría de estas partículas son producto de fuentes secundarias.

Las PM10 son generadas principalmente, como ya se mencionó, por medios mecánicos. Sin embargo el transporte y la industria contribuyen a su producción. En cuanto a las PM2.5, el transporte, con más del 40 por ciento de la producción total, la industria, la vivienda y los servicios son los artífices. Las industrias que más aportan son la química y la alimentaria debido al manejo y transformación de sus materias primas. En cuanto al transporte, los tractocamiones, debido al uso de diésel generan el 12 por ciento de las PM10 y hasta el 25% de las PM 2.5; así mismo, el tránsito de vehículos contribuye con el 34 y 19 por ciento de las PM10 y PM2.5 respectivamente.

Países como Australia, Canadá, Estados Unidos, Japón, Corea del Sur y la Comunidad Europea han establecido sus propias regulaciones para la concentración de PM, siendo China el país más permisivo debido a su frenética industrialización. En México la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-2014), que entró en vigor en Octubre de 2014, es la que establece los indicadores para las partículas suspendidas, como se muestra en la Tabla 3.

	NOM-025-SSA1-2014	NOM-025-SSA1-1993
PM10		
Promedio anual	40 µg/m ³	50µg/m ³
Promedio diario (24 horas)	75 µg/m ³	120 µg/m ³
PM2.5		
Promedio anual	12 µg/m ³	15 µg/m ³
Promedio diario (24 horas)	45µg/m ³	65 µg/m ³

Tabla 3. Comparativa entre la normativa vigente y predecesora de PM en México
(Fuente: Secretaría de Salud)

Capítulo 5. Metodología

A pesar de que hay diferentes formas de medir PM10 y PM2.5 con equipos como el SPCI (Sioutas Personal Cascade Impactor), el SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), el CPC (Condensation Particle Counter) y el OPS (Optical Particle Sizer) además de otros en desarrollo como el Biosampler, estos no son de fácil acceso y no son mínimamente económicos. Por lo anterior, se decidió analizar la relación existente entre las mediciones de campo de PM10 y PM2.5 reportadas por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal y la reflectancia obtenida empleando la percepción remota, debido a la relevancia mundial que ha tomado la medición de parámetros del aire. Las imágenes utilizadas fueron obtenidas mediante el sensor OLI perteneciente a la plataforma Landsat-8.

5.1 Estado del Arte

Como la plataforma Landsat-8 se puso en órbita recientemente, hay poca literatura como trabajos y artículos académicos que verse sobre la medición de parámetros para determinar la calidad del aire, y en concreto de la medición y control de partículas suspendidas (PM2.5 y PM10 en el caso del presente trabajo) usando la percepción remota. A pesar de esto, Landsat-8 ha sido utilizado para otros fines y a su vez otras plataformas han sido empleadas para cuantificar PM2.5 y PM10.

Por una parte, H. D. Kambezidis et al. (1998) fueron pioneros en la cuantificación de la contaminación del aire usando percepción remota, ya que la topografía impedía recolectar datos confiables, y debido a esto, se usó un sistema de percepción remota que se encontraba anclado a una plataforma terrestre. Los resultados obtenidos, a pesar de no ser un fiasco, no fueron completamente confiables, ya que la precisión del sensor usado variaba con la altitud.

En su publicación de 1999, M-C. Robinson et al. exploraron el uso de la percepción remota en ambientes marinos, en un intento de proveer parámetros generales en las áreas de estudio. Ellos usaron una aeronave equipada con un sensor CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager). A pesar de que estas mediciones fueron geográficamente limitadas, se encontró que el modelo propuesto puede funcionar, en especial si se asume que la distribución de partículas es uniforme.

Chu et al. (2003) demostraron la relación existente entre el grosor óptico del sensor MODIS y PM10, la cual resultó ser sumamente cercana, y en el mismo año, Wang et al. encontraron una mayor relación entre el promedio mensual del grosor óptico y PM2.5. Liu et al. (2004) desarrollaron un método para estimar la superficie total de PM2.5 usando el sensor GOES. Adicionalmente, Chin et al. (2004), descubrieron que la relación existente entre el sensor y la superficie de PM es más fuerte durante verano y otoño.

Así mismo, P. Gupta et al. (2006), midieron durante un año la concentración de PM2.5, usando tanto el sensor MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) en los satélites Terra y Aqua, de la NASA, como mediciones en tierra en 26 lugares repartidos en Sydney, Nueva Delhi, Honk Kong, Nueva York y Suiza, siendo de los primeros en examinar la relación entre mediciones satelitales y en tierra. Los resultados mostraron fiabilidad si se desean hacer estudios de calidad del aire en áreas extensas donde mediciones por métodos tradicionales no están disponibles.

La percepción remota aplicada a la medición de PM2.5 fue usada por Gupta et al. (2007) en Sydney por un periodo de 5 años, empleando el sensor MODIS, en la plataforma

AOT (Aerosol Optical Thickness), y obteniendo resultados satisfactorios, ya que las mediciones realizadas con percepción remota y las realizadas con instrumentos tradicionales arrojaron los mismos resultados, por lo que se probó útil, especialmente para alertar de incendios en zonas amplias.

Por la otra parte, N. Pahlevan et al. (2014) emplearon el sensor OLI de la plataforma Landsat 8 para compararlo con sus predecesores. Al finalizar el estudio, encontraron que tiene un mejor desempeño en ambientes acuáticos, aunque OLI necesita ser caracterizado radiométricamente para mediciones puntuales. Finalmente, Q. Vanhellement et al. (2014) emplearon la plataforma para observar el desempeño de las turbinas de viento, y su impacto ambiental, a partir de la observación de sedimentos suspendidos. Las turbinas son altamente reflectivas, y se observó que la concentración de sedimentos en la superficie se extiende por kilómetros agua debajo de las turbinas.

5.2 Zona de estudio

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra ubicada en el centro del país, al sur de la Cuenca de México, en la latitud 19° 25' 57.07" N y longitud 99° 7' 59.37" O, a una altitud media de 2240 msnm. Cuenta con una superficie de 7854 km², área repartida entre las 16 delegaciones del Distrito Federal y 60 municipios periféricos del Estado de México e Hidalgo y que representa menos del 0.25 por ciento de la superficie nacional; es, según la ONU, uno de los núcleos poblacionales más grandes del mundo con 21 millones de habitantes, de los cuales aproximadamente 9 millones se encuentran en el Distrito Federal.

Hidrológicamente se encuentra en la región XIII, está rodeada por sierras siendo por tanto endorreica. Los ríos y arroyos más importantes que descienden de las montañas son el Magdalena, el de la Piedad, el de los Remedios y el Cuautitlán, que junto a los manantiales contribuyen a la formación de los lagos de Chalco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango, además de los humedales de Xochimilco. El 98 por ciento de la población cuenta con alcantarillado y mientras que 97 por ciento tiene acceso a agua potable.

De acuerdo con la caracterización climática hecha por INEGI, el clima de la zona varía entre templado, templado húmedo y seco, dependiendo de la estación del año con una temperatura media de 16.6 °C. En cuanto a la precipitación, tiene una media anual de alrededor de 700 milímetros con un periodo de lluvias que va de junio a septiembre, con una disponibilidad natural media de agua de sólo 74 metros cúbicos por habitante; debido a ello y para poder satisfacer la demanda, se extrae agua del subsuelo y se importa de otras cuencas. En cuanto al viento, uno de los factores determinantes de la contaminación atmosférica debido al transporte de partículas, es constante y tiene su entrada principal en la zona norte del Valle aunque en invierno puede sumarse en el noroeste y sur.

En el Distrito Federal la mitad del suelo es considerado de uso urbano, y la otra mitad como de conservación ecológica, considerado como un patrimonio natural para el bienestar de las generaciones futuras; la línea limítrofe es declarada mediante la Declaratoria de Suelo de Conservación. Por su parte, el resto del uso del suelo de la ZMVM se puede clasificar como bosque, pastizal, matorral, urbano y agricultura, en la cual las tierras de temporal ocupan la mayor superficie, dispersándose desde las llanuras hasta las sierras altas.

La ZMVM es el centro financiero más importante del país, y a pesar de que ha sido la actividad económica dominante, se ha experimentado una desaceleración industrial y

se ha consolidado el sector de los servicios. No obstante, la SEDEMA indica que la industria cuenta con más de 5 mil grandes fábricas. Entre los principales giros son manufactureras, papel e impresión, química y de fabricación de productos derivados del petróleo y por último, la industria metal mecánica y de fabricación de productos eléctricos y electrónicos. Los principales solventes industriales utilizados son el benceno, el etanol y el xileno que totalizan un consumo anual de 829 488 toneladas.

A pesar de la implementación del programa Hoy No Circula, se tiene un fuerte problema de congestionamiento vehicular, ya que según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, dependiente de la SEMARNAT, la flota vehicular supera los 5 millones, y un tercio tiene una antigüedad que supera los 21 años. De los 5 millones 78 por ciento son autos particulares, 8 por ciento de transporte público y 14 por ciento de carga, y el 95 por ciento del parque vehicular utiliza gasolina.



Figura 15. Imagen satelital de la zona de estudio
(Fuente: Google Maps Engine)

Sitios de muestreo

Los datos con que se ha trabajado en este estudio no pudieron ser tomados en campo debido a limitada disponibilidad del equipo especializado requerido para llevarlo a cabo, y al alto costo económico que hubiese supuesto su adquisición. No obstante, debido a la importancia que ha ido adquiriendo el mantener la calidad del aire por encima de los estándares de calidad establecidos, el gobierno ha implementado, a través de la Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), un programa de monitoreo de calidad del aire, llamado Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT).

El programa cuenta con diversos puntos de recolección, los cuales están distribuidos en la ZMVM, teniendo la capacidad de cuantificar algunos de los parámetros que gobiernan la calidad del aire y reportándolos en tiempo real. A pesar de esto, los indicadores

recolectados no están uniformizados para todas las unidades y por tanto los parámetros medidos varían de sitio en sitio.

El equipo (o equipos) que se emplea(n) para medir los parámetros en cada estación no son citados por el SIMAT, que empero no deja de mencionar que estos cumplen con las especificaciones requeridas por el método de referencia o equivalente de la EPA, asegurando de este modo la generación de resultados confiables; los equipos que cumplen con los requisitos se pueden encontrar en el dominio electrónico <http://www.epa.gov/ttn/amtic/criteria>.

El método equivalente puede operar básicamente con dos principios. El primero, de gravimetría determina la masa de las partículas presentes en un flujo de aire al separar a las partículas de la corriente y depositarlas sobre un filtro donde el tamaño de las partículas se determina mediante la entrada selectiva y el flujo de la muestra. La atenuación de radiación beta, segunda posibilidad, atenúa dicha radiación con las partículas depositadas sobre un filtro continuo.

Los sitios tomados en cuenta en el estudio que reportan los promedios horarios máximos y mínimos de PM_{2.5} y PM₁₀ se enumeran en la Tabla 4.

Clave	Nombre de la Estación	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m.s.n.m.)	PM _{2.5}	PM ₁₀
ATI	Atizapán	19.5770	-99.2541	2341		x
CAM	Camarones	19.4684	-99.1698	2233	x	x
CHO	Chalco	19.2669	-98.8861	2253		x
COY	Coyoacán	19.3503	-99.1571	2260	x	
CUA	Cuajimalpa	19.3653	-99.2917	2704		x
FAC	FES Acatlán	19.4825	-99.2435	2299		x
HGM	Hospital General	19.4116	-99.1522	2234	x	x
IZT	Iztacalco	19.3844	-99.1176	2238		x
MER	Merced	19.4246	-99.1196	2245	x	x
NEZ	Nezahualcóyotl	19.3937	-99.0282	2235	x	
PED	Pedregal	19.3251	-99.2041	2326	x	x
SAG	San Agustín	19.5330	-99.0303	2241	x	x
SJA	San Juan Aragón	19.4526	-99.0861	2258	x	
SFE	Santa Fe	19.3574	-99.2629	2599	x	x
SUR	Santa Ursula	19.3145	-99.1500	2279		x
TAH	Tláhuac	19.2465	-99.0106	2297		x
TLA	Tlalnepantla	19.5291	-99.2046	2311	x	x
TLI	Tultitlán	19.6025	-99.1772	2313		x
UIZ	UAM Iztapalapa	19.3608	-99.0739	2221	x	x
UAX	UAM Xochimilco	19.3044	-99.1036	2246	x	
XAL	Xalostoc	19.5260	-99.0824	2160	x	x

Tabla 4. Localización geográfica de los sitios que reportan PM en la ZMVM (Fuente: SIMAT)



Figura 16. Estaciones de monitoreo ambiental en la ZMVM que reportan PM2.5 y PM10 (Fuente: Elaboración propia)

5.3 Plataforma seleccionada

Gracias a la existencia de múltiples satélites equipados con diferentes sensores, fue posible elegir entre una gama de diferentes plataformas. Landsat-8 fue puesto en órbita el 11 de Febrero de 2013 y surgió como la mejor alternativa ya que aunado a su gratuidad, cuenta con un sensor TIRS (Termal Infrared Sensor) que colecta información en dos bandas espectrales, pero sobre todo ha sido equipado con el sensor OLI (Operational Land Imager) haciéndolo diferente de todos los demás satélites para los propósitos del proyecto.

Incluso cuando OLI tiene las mismas bandas que su versión anterior (aunque mejoradas) se han integrado 3 bandas nuevas: banda 1, banda 9 y banda QA (Quality Assessment), por lo que cuenta con 11 bandas; de la 1 a 7 que son espectrales, la 8 que es pancromática, y la 9 que es también espectral. Finalmente, las bandas térmicas, la 10 y 11 son útiles proveyendo información acerca de la temperatura de las superficies.

La banda 9 es un canal infrarrojo para la detección de nubes formadas por cristales de hielo; por su parte, en la banda QA cada pixel contiene números enteros que representan combinaciones de bits que representan combinaciones de superficie, atmósfera y sensores que puedan afectar la utilidad general de dicho pixel.

A pesar de lo anterior, la banda que marca la inclinación por esta plataforma es la banda 1, un canal del visible azul profundo que opera en la parte más baja del espectro visible, entre 0.43 μm y 0.45 μm , diseñado específicamente para el estudio de costas y de aerosoles. La banda 1 puede ser utilizada junto a otras 2 bandas para una investigación más detallada en las estimaciones de la concentración de aerosoles en la atmósfera, aunque también pueden emplearse los valores de su radiancia.

La resolución espacial del sensor OLI es de 30 metros y los datos que recaba tienen una confiabilidad de 90 por ciento, con una resolución radiométrica de 16 bits. El tamaño

de la escena es de 170 kilómetros en la dirección norte-sur y de 183 en el sentido este a oeste. En cuanto a la plataforma, se debe mencionar que tiene una resolución temporal de 16 días, con una inclinación de órbita de 98.21° , y un tiempo de órbita alrededor de la Tierra de 98.83 minutos la cual es heliosíncrona, lo que quiere decir que pasa a la misma hora por un lugar determinado; Landsat-8 cruza al Ecuador a las 10 de la mañana \pm 15 minutos. La altitud es de 705 kilómetros. En la Tabla 5 se indican longitudes de onda y resoluciones en que opera cada banda del Landsat-8.

Banda	Longitud de onda (μm)	Resolución (m)
1 (Costa/Aerosol)	0.43 – 0.45	30
2 (Azul)	0.45 – 0.51	30
3 (Verde)	0.53 – 0.59	30
4 (Rojo)	0.64 – 0.67	30
5 (IR próximo)	0.85 – 0.88	30
6 (SWIR 1)	1.57 – 1.65	30
7 (SWIR 2)	2.11 – 2.29	30
8 (Pancromático)	0.50 – 0.68	15
9 (QA)	1.36 – 1.38	30
10 (IR Térmico (TIRS) 1)	10.60 – 11.19	100 * (30)
11 (IR Térmico (TIRS) 2)	11.50 – 12.51	100 * (30)

Tabla 5. Bandas operacionales de OLI y TIRS
(Fuente: USGS)

Fechas de muestreo

Los horarios y fechas de muestreo fueron determinados de acuerdo a la órbita del Landsat-8 que tiene un ciclo de 16 días. La USGS cuenta con un calendario donde están identificadas las fechas en que el satélite se encontrará en posición de capturar las imágenes del área estudiada; así mismo señala las ocasiones anteriores en que ha pasado por la misma zona.

En el periodo comprendido entre el 18 de abril de 2013 y el 27 de agosto de 2014 el satélite tuvo posibilidad de adquirir imágenes en 32 ocasiones. Sin embargo, y debido a las condiciones atmosféricas dominantes en el momento del paso del satélite, principalmente nubes, que impidieron una buena calidad de imagen, se tomaron en cuenta 14 fechas para el estudio. Con ello se logra que las imágenes sean de buena calidad y libres de nubosidad, permitiendo una mayor precisión en la recuperación de datos.

El USGS, por medio del dominio electrónico <http://glovis.usgs.gov>, pone a disposición de cualquier persona con una computadora y acceso a internet las imágenes tomadas por el Landsat 8 de manera gratuita, para cualquier región de interés que se seleccione. Las imágenes son actualizadas dentro de las primeras 24 horas sucesivas a su obtención, además de ser capturadas, para esta zona geográfica, en todas las ocasiones, a las 17 horas \pm 2 minutos del tiempo UTC, haciendo que su sincronización con las mediciones horarias en campo sea casi perfecta.

5.4 Pre-procesamiento y procesamiento de imágenes

Durante el desarrollo de este trabajo se recurrió al software IDRISI Selva debido a su amplia gama de funciones que se ajustaban a las necesidades específicas del proyecto. Se tomaron en cuenta las imágenes de las 14 fechas, proporcionadas por las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 del sensor OLI. Las bandas 10 y 11 fueron excluidas por pertenecer al

sensor TIRS, que cumple otros propósitos y aunque las bandas 8 y 9 forman parte del sensor OLI, fueron descartadas; la banda 8 debido a su resolución que es incompatible con la de las demás bandas, y la banda 9 por arrojar valores incorrectos ya que los datos recabados no se encontraban dentro de los límites de reflectancia de 0 y 1, probablemente consecuencia de una mala calibración.

El proceso inicia, primeramente, cuando la zona de interés debe ser acotada en la imagen debido a que el Landsat 8 proporciona imágenes “crudas” o “en bruto”, lo que entorpece los cálculos. Se logra así agilizar el ciclo gracias a la menor cantidad de información que se procesará. Esto se puede lograr mediante la creación de ventanas en cada una de las imágenes como se ve en la Figura 17. Todas las imágenes deben ser cortadas en los mismos puntos para facilitar agrupaciones posteriores, que pueden servir para comprobar la exactitud de los datos recabados.

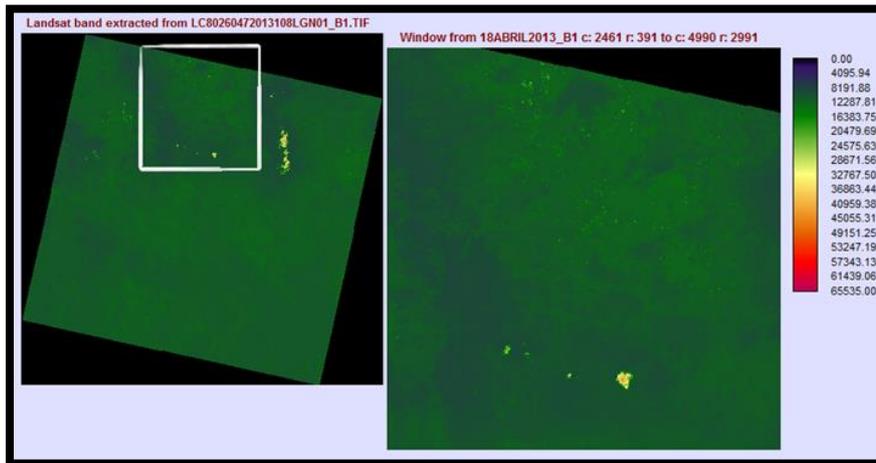


Figura 17. Ventana de la ZMVM

Una vez que se dio el formato requerido a todas las imágenes, se procede a componer una capa vectorial de puntos, la cual contiene todas las coordenadas de las estaciones que toman muestras de PM, como es posible apreciar en la Figura 18 (este proceso requiere transformar las coordenadas, dadas en grados, a UTM, ya que el programa opera con estas últimas). Esto es necesario para facilitar la posterior obtención de los ND. Es necesario obtener una capa vectorial distinta para PM2.5 y PM10, con la finalidad de evitar errores al momento de recabar los ND que arrojan los pixeles.

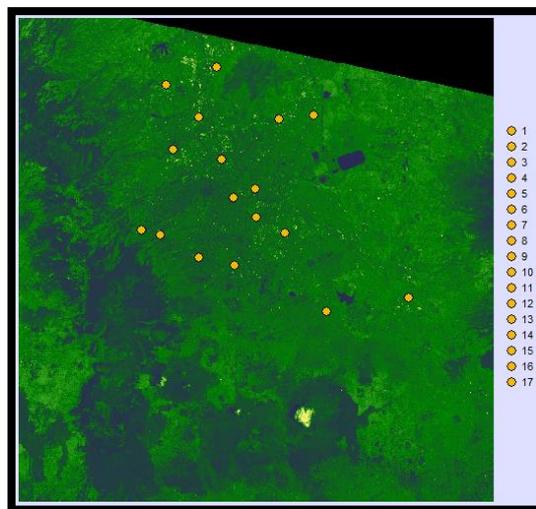


Figura 18. Capa vectorial de las estaciones de monitoreo de PM10 aplicadas a una imagen

Seguidamente, se obtuvieron los Niveles Digitales (ND) debido a que estas bandas son las que operan en el espectro visible y por tanto su resolución es similar, lo que conlleva a obtener valores congruentes. Esto se logra, para cada punto dado, en cada fecha evaluada, al analizar el valor arrojado por cada pixel que se encuentra en un punto donde hay una estación de monitoreo, es decir, 2058 puntos en total.

A partir de los ND obtenidos, que tienen un valor numérico entero variable entre 0 y 65,535, se puede obtener la reflectancia existente en todas las fechas evaluadas para cada punto dado, cuyos valores se encuentran entre 0 y 1.

Lo anterior se logra al emplear la fórmula, que es propuesta por el manual de operación de la plataforma Landsat-8:

$$p\lambda' = Mp \cdot Qcal + Ap \quad (6.1)$$

Donde:

$p\lambda'$ – Radiancia sin corrección por el ángulo solar (1)

Mp – Factor de cambio de escala multiplicativa específicos para cada banda (1)*

$Qcal$ – Número Digital (1)

Ap – Factor aditivo reescalar específico para cada banda (1)*

* Se obtienen de los metadatos

En virtud de que la rotación de la tierra y las estaciones del año evitan que el Sol mantenga una posición constante cada vez que el satélite se encuentra en posición de capturar datos, el valor de la radiancia obtenido anteriormente se debe corregir. Esta se conoce como corrección para el ángulo del Sol, y se realiza empleando la fórmula siguiente:

$$p\lambda = p\lambda' / \sin(\theta se) \quad (6.2)$$

Donde:

$p\lambda$ – Radiancia (1)

$p\lambda'$ – Radiancia sin corrección por el ángulo solar (1)

θse – Ángulo Solar local (°)*

* Se obtiene de los metadatos

Para comprobar los datos obtenidos de todas las bandas en cada punto, es preciso hacer inicialmente una composición de color. Las composiciones permiten resaltar las características de una imagen (como delimitar efectivamente un cuerpo de agua, y diferenciar entre vegetación y suelo), y se refieren, en percepción remota, al nivel del brillo en las diferentes regiones del espectro electromagnético. El nivel de brillo depende de la asignación de los colores.

La imagen lograda por la composición, la cual está formada a su vez por 3 imágenes, puede ser una composición en color real, como se muestra en la Figura 19, o en falso color. Esto se logra al asignar a cada color (rojo-R, verde-G, azul-B) la imagen de una banda determinada, las cuales compondrán a su vez una única imagen de contraste con

los puntos de saturación en cada pixel, haciendo posible descifrar el ND que el satélite capturó en cada sitio de muestreo.

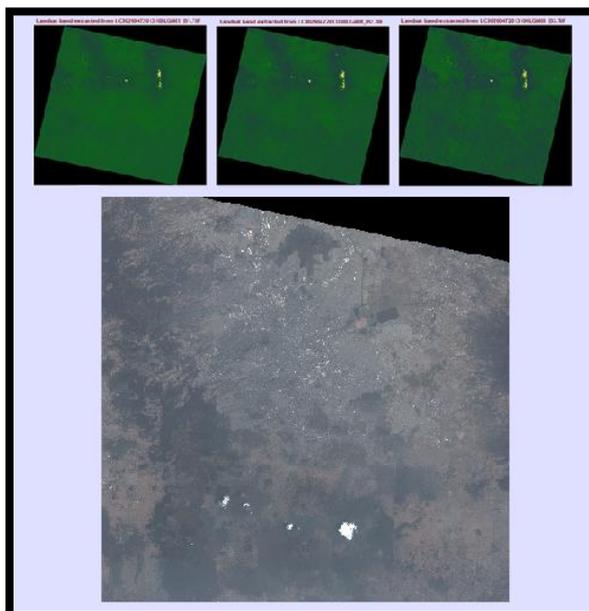


Figura 19. Composición en Color Real (RGB=321)

Para las composiciones en falso color, la asignación de cada canal RGB a cada banda que ofrece el sensor no tiene limitaciones en el orden de despliegue como se muestra en la Figura 20. Sin embargo se han aceptado algunas convenciones ya que la práctica ha demostrado la utilidad de algunas combinaciones sobre otras. Específicamente, los objetos que presentan más reflectividad en alguna banda resaltan al aplicar composiciones de color en donde esa banda es desplegada.

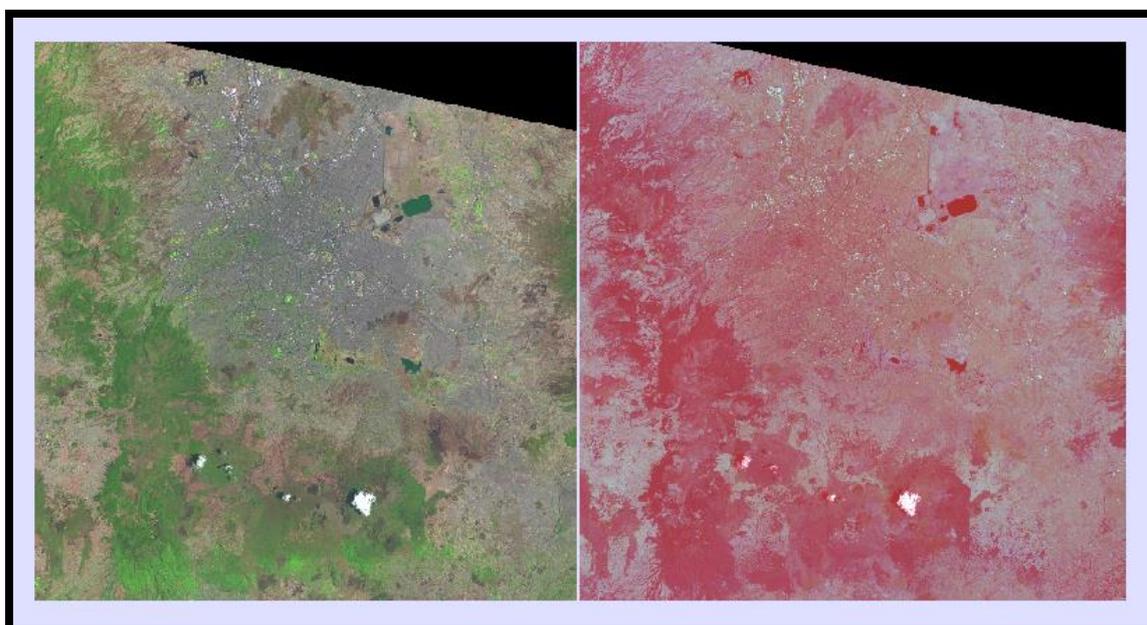


Figura 20. Composiciones en falso color (Izquierda: RGB=654, derecha: RGB=976).

Finalmente, una vez comprobados los valores, se procedió a realizar gráficas con los valores obtenidos, con la idea de poder analizar la mejor manera de relacionar los valores obtenidos mediante el uso de Percepción Remota y los obtenidos mediante

mediciones de campo, además de poder analizar los datos obtenidos y posteriormente buscar patrones que permitan realizar recomendaciones. Las gráficas mencionadas se muestran a continuación de la Figura 21 a la 41, por orden alfabético de los 21 sitios evaluados.

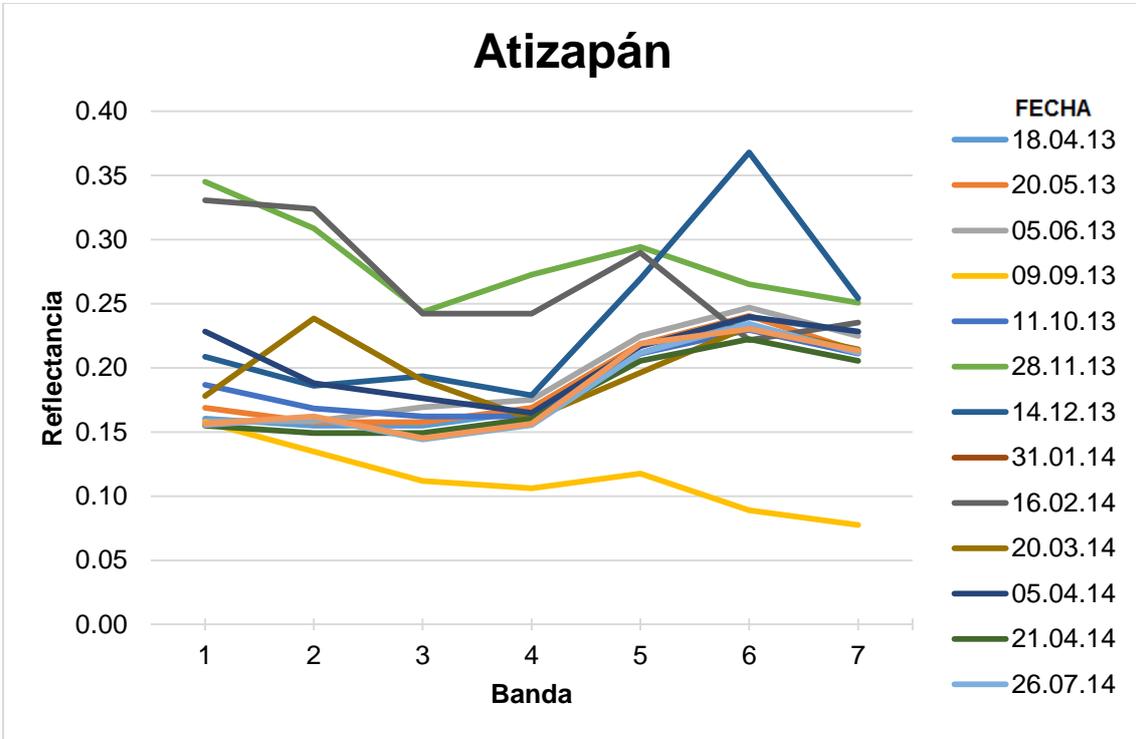


Figura 21. Gráfica reflectancia Atizapán

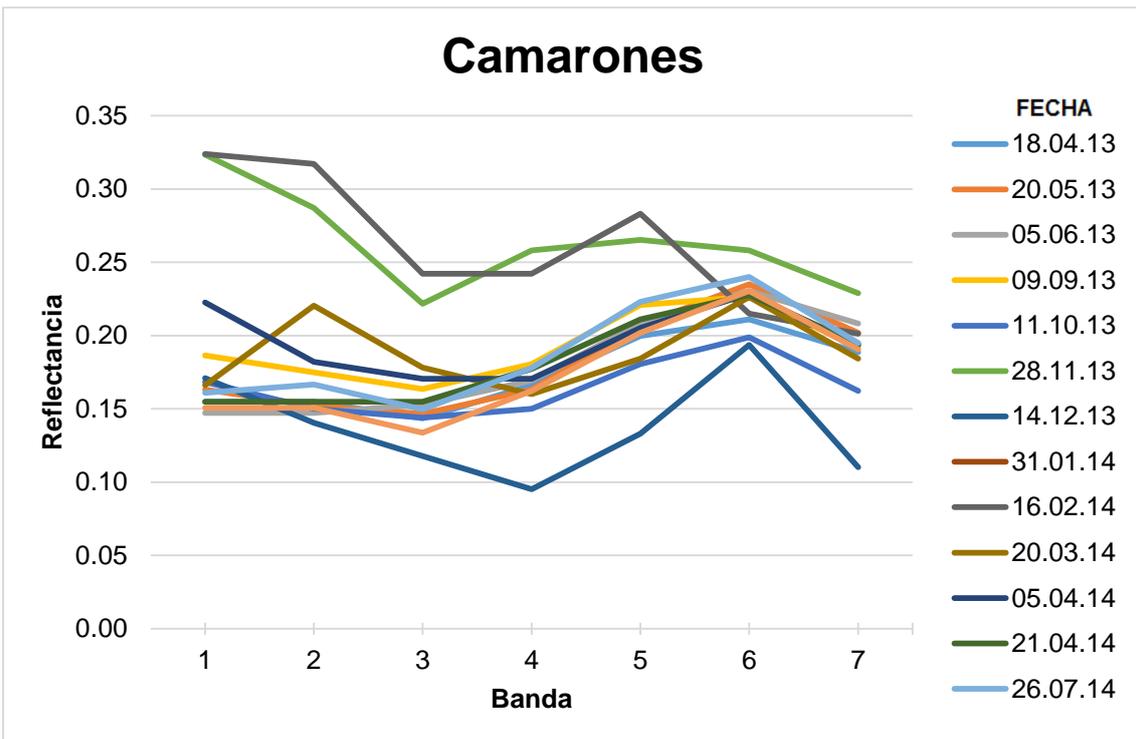


Figura 22. Gráfica reflectancia Camarones

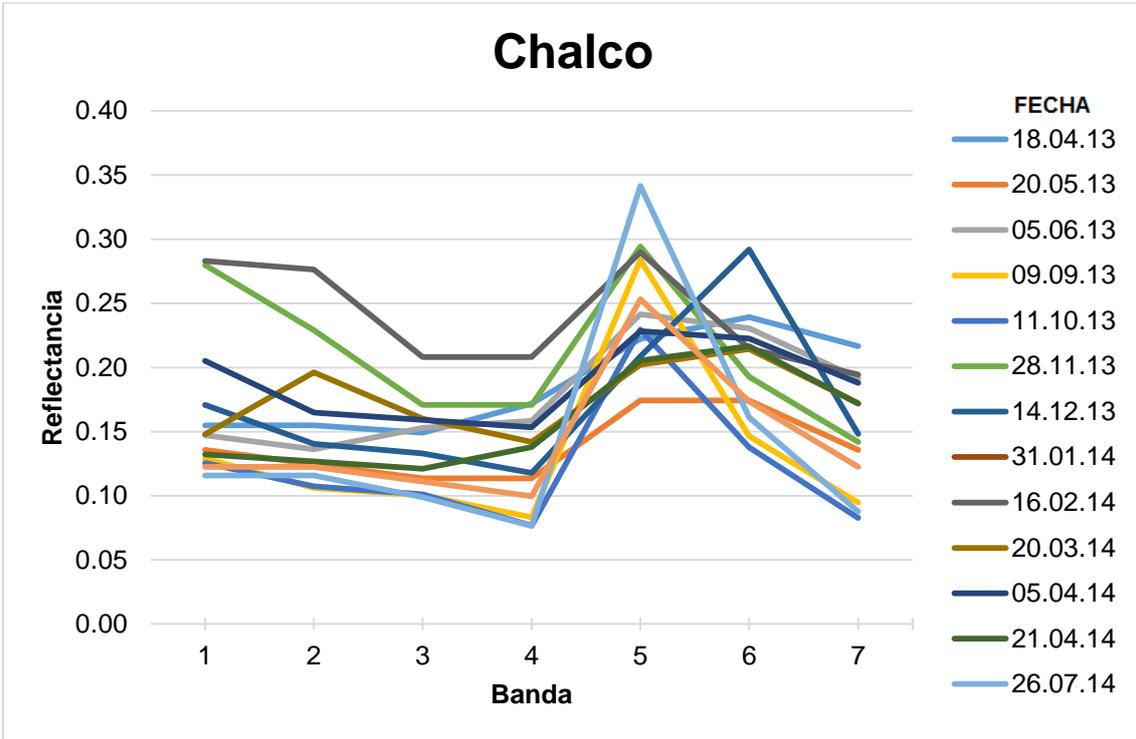


Figura 23. Gráfica reflectancia Chalco

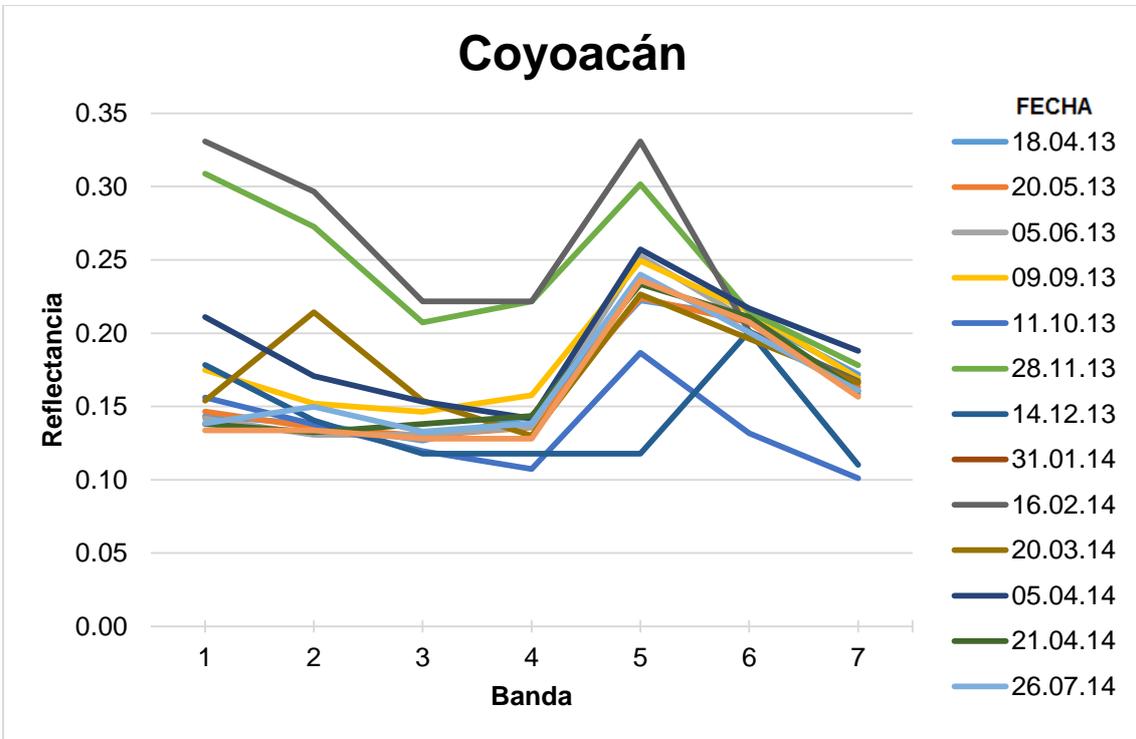


Figura 24. Gráfica reflectancia Coyoacán

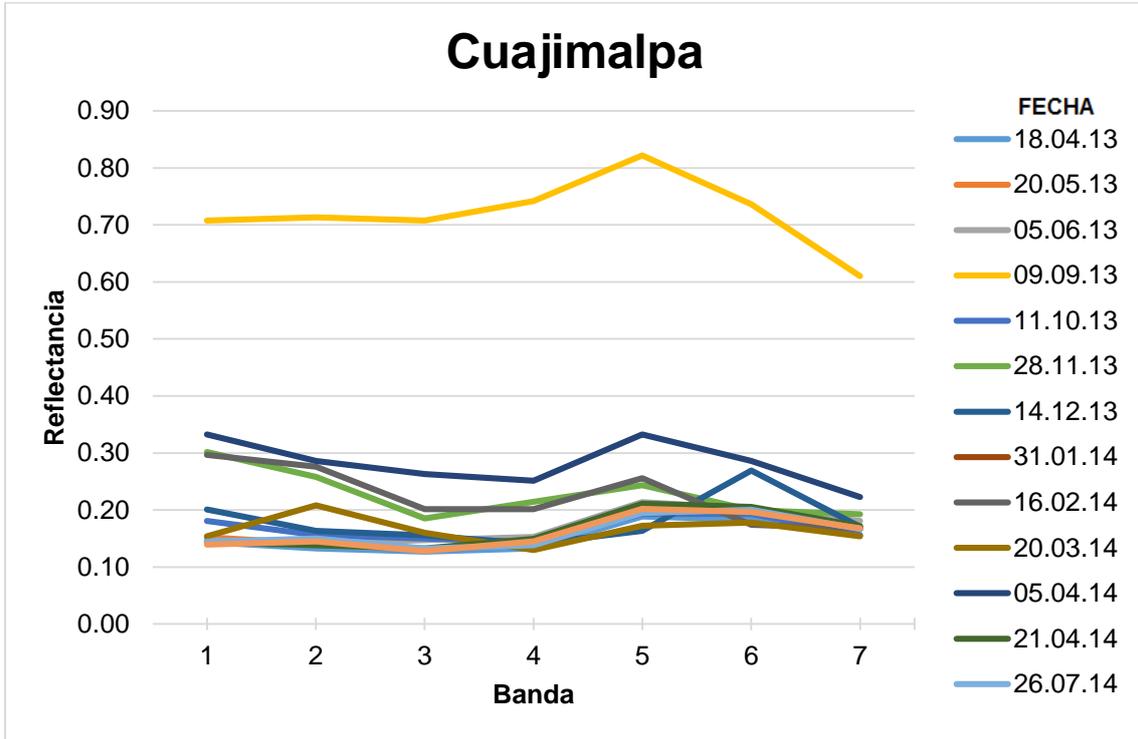


Figura 25. Gráfica reflectancia Cuajimalpa

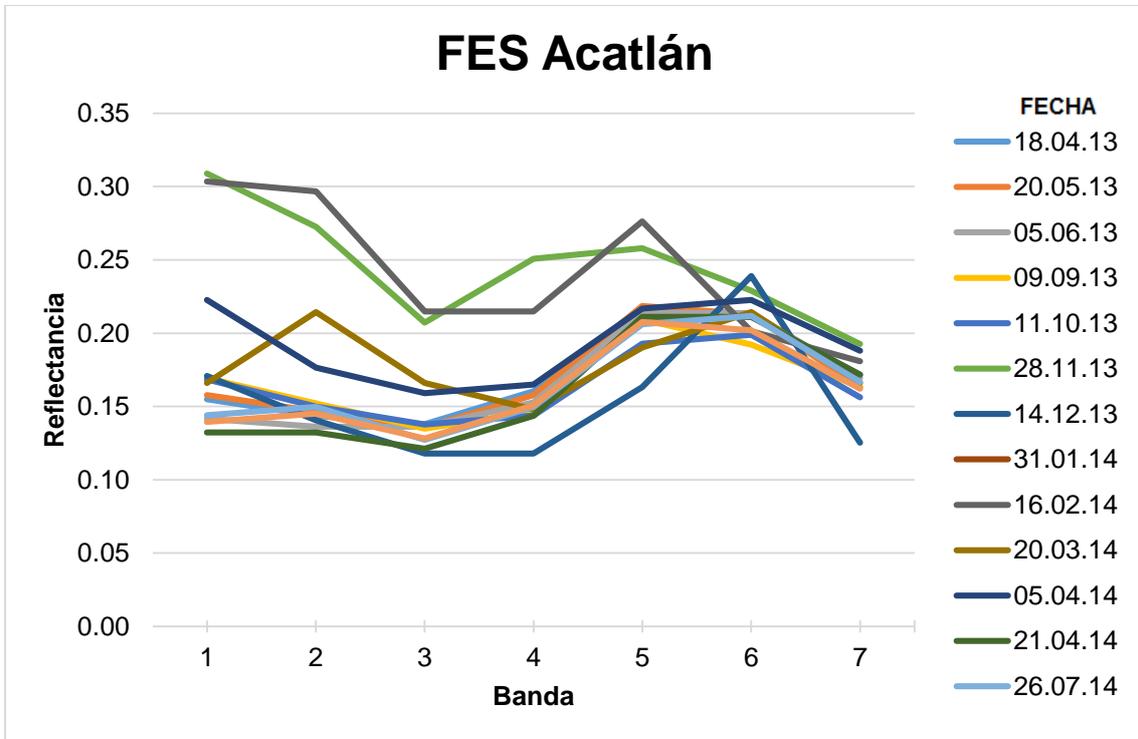


Figura 26. Gráfica reflectancia FES Acatlán

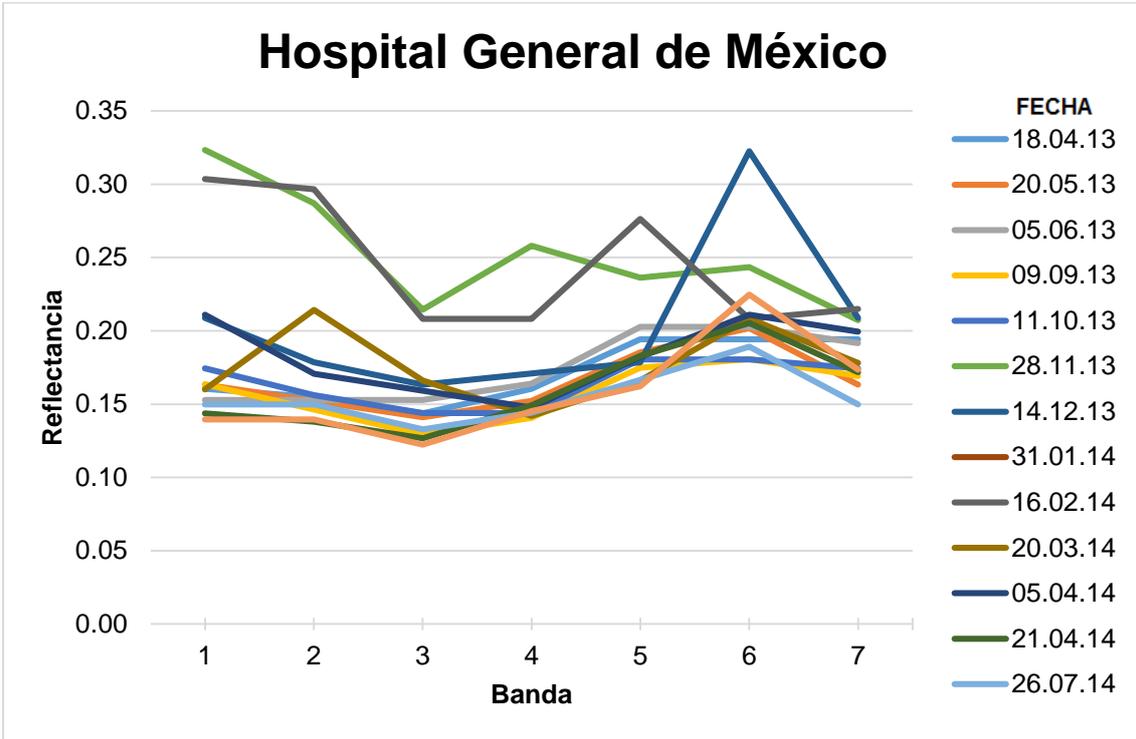


Figura 27. Gráfica reflectancia Hospital General de México

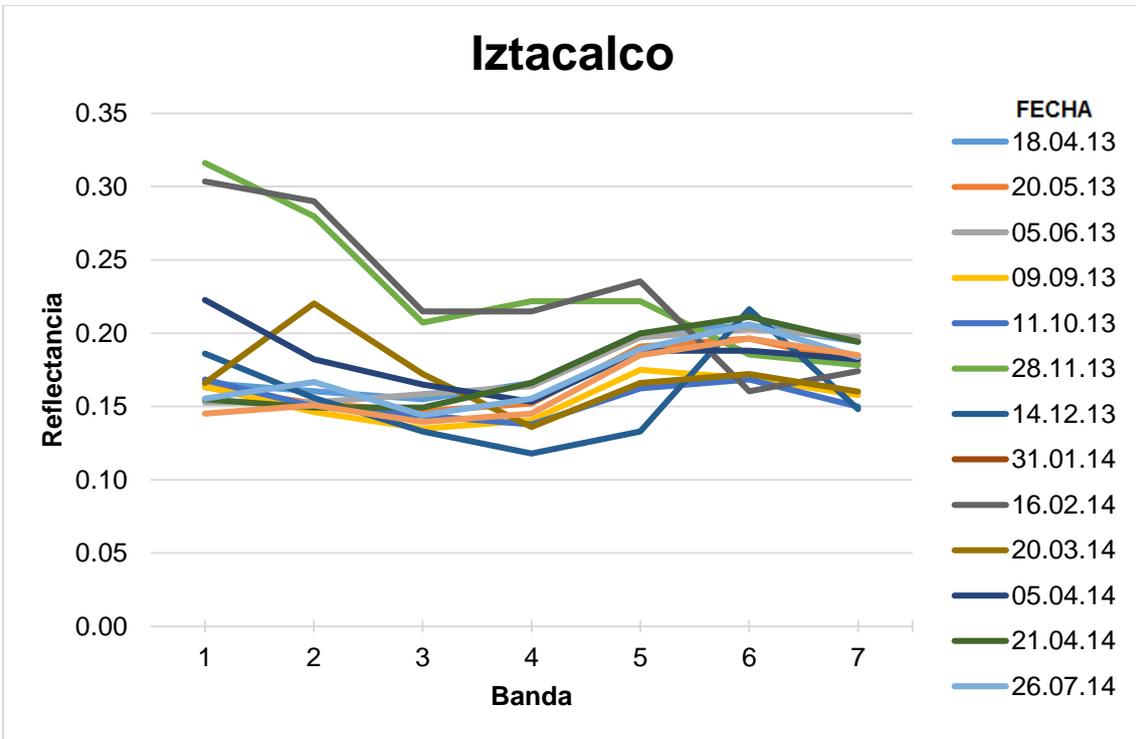


Figura 28. Gráfica reflectancia Iztacalco

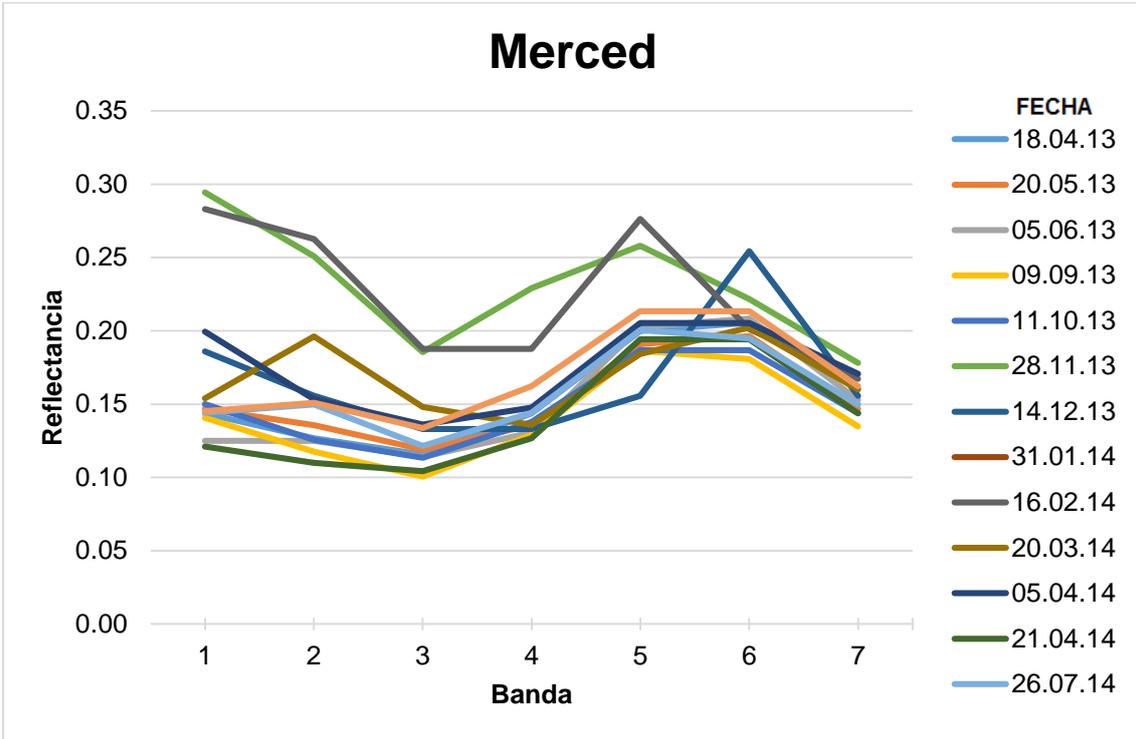


Figura 29. Gráfica reflectancia Merced

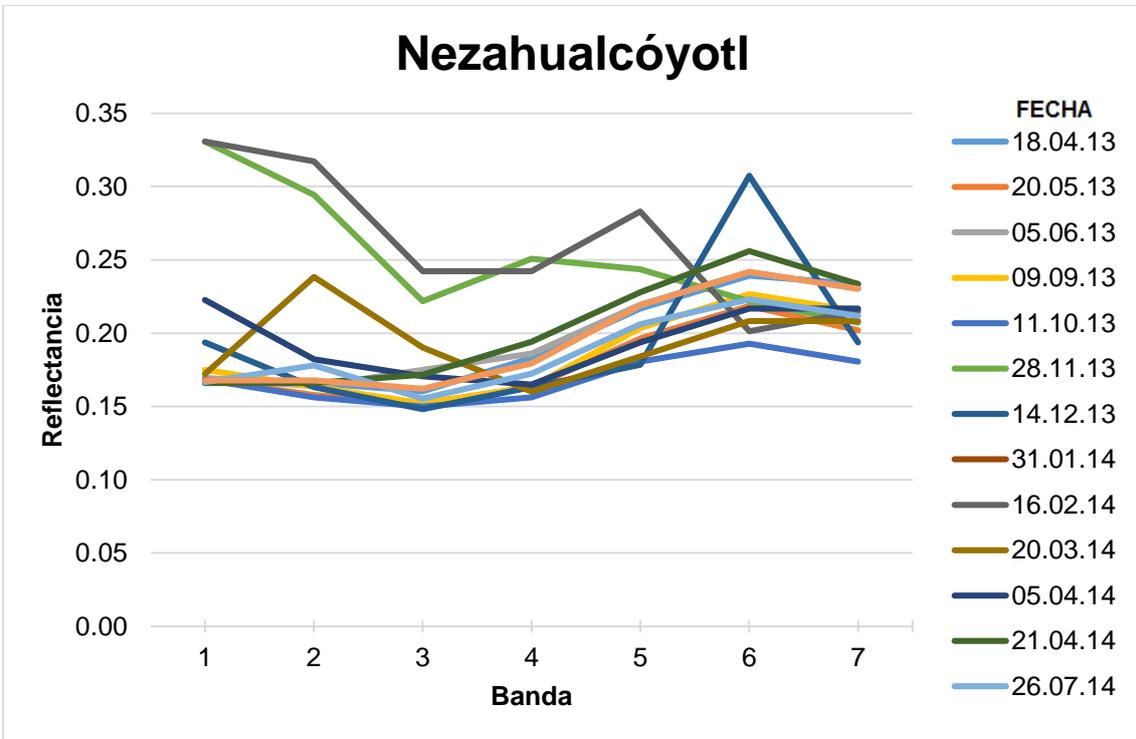


Figura 30. Gráfica reflectancia Nezahualcóyotl

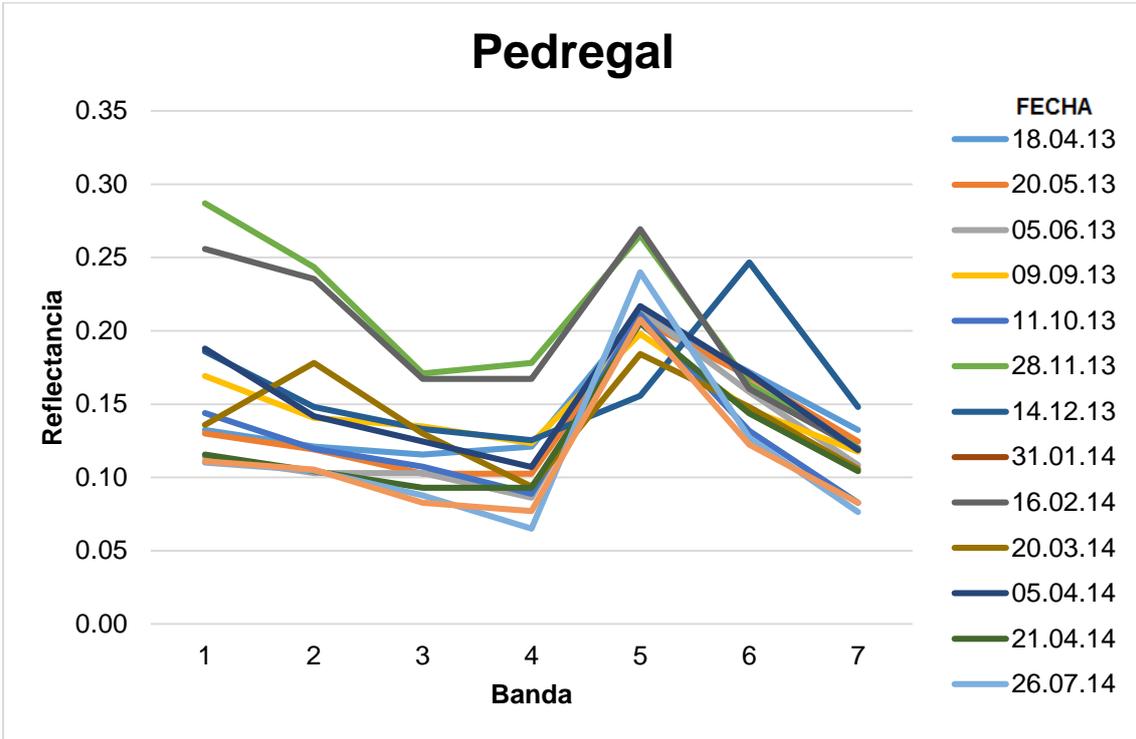


Figura 31. Gráfica reflectancia Pedregal

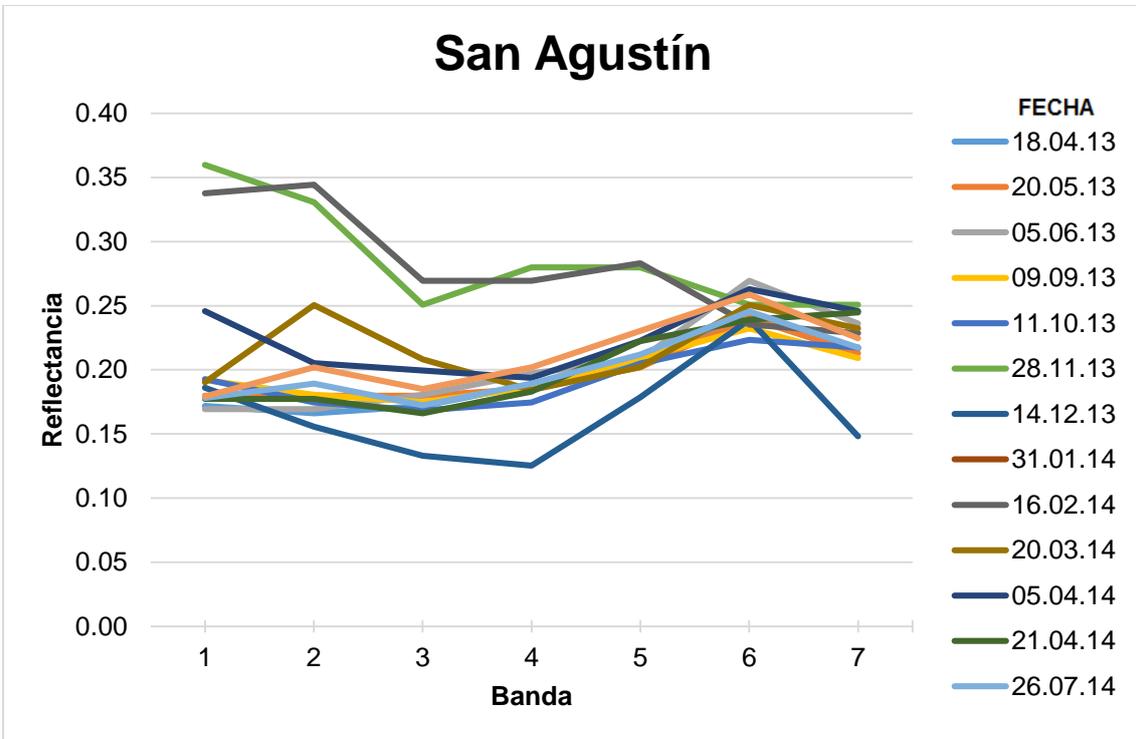


Figura 32. Gráfica reflectancia San Agustín

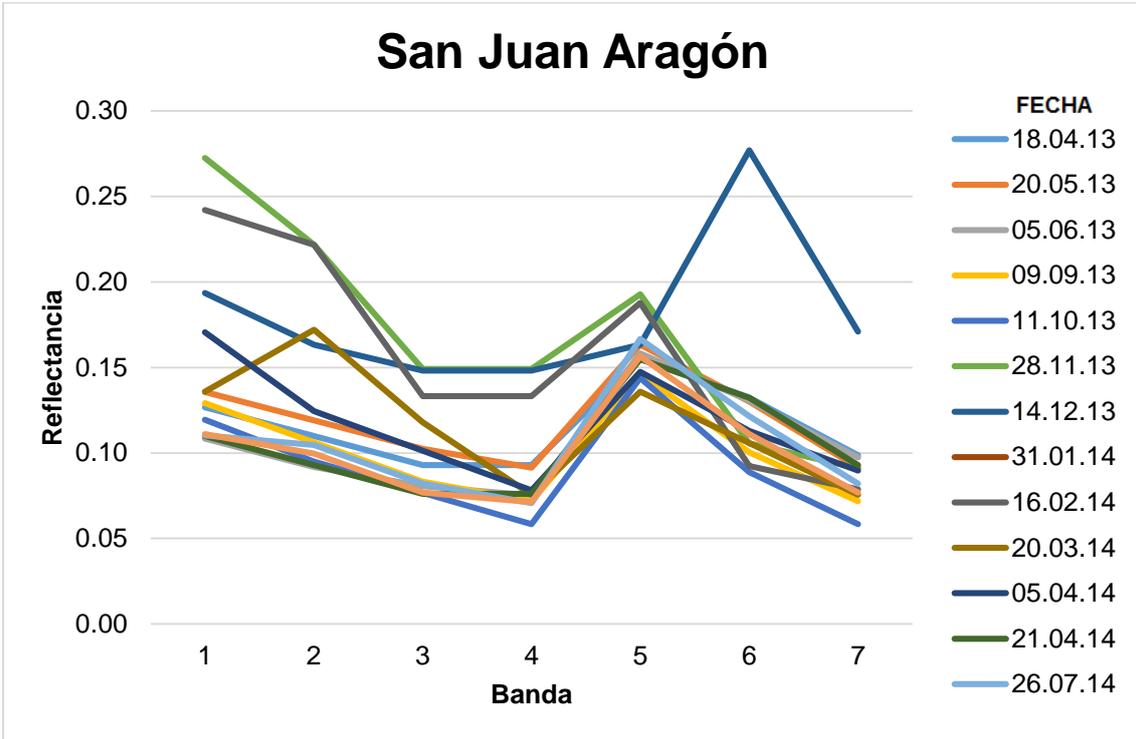


Figura 33. Gráfica reflectancia San Juan Aragón

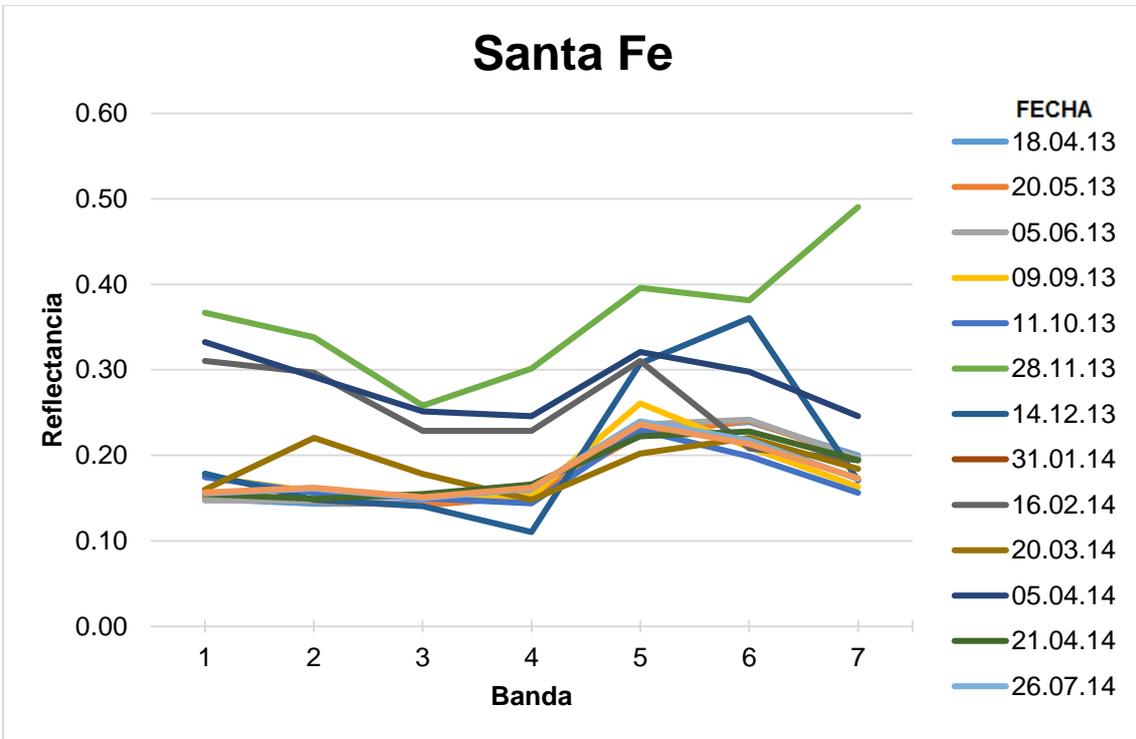


Figura 34. Gráfica reflectancia Santa Fe

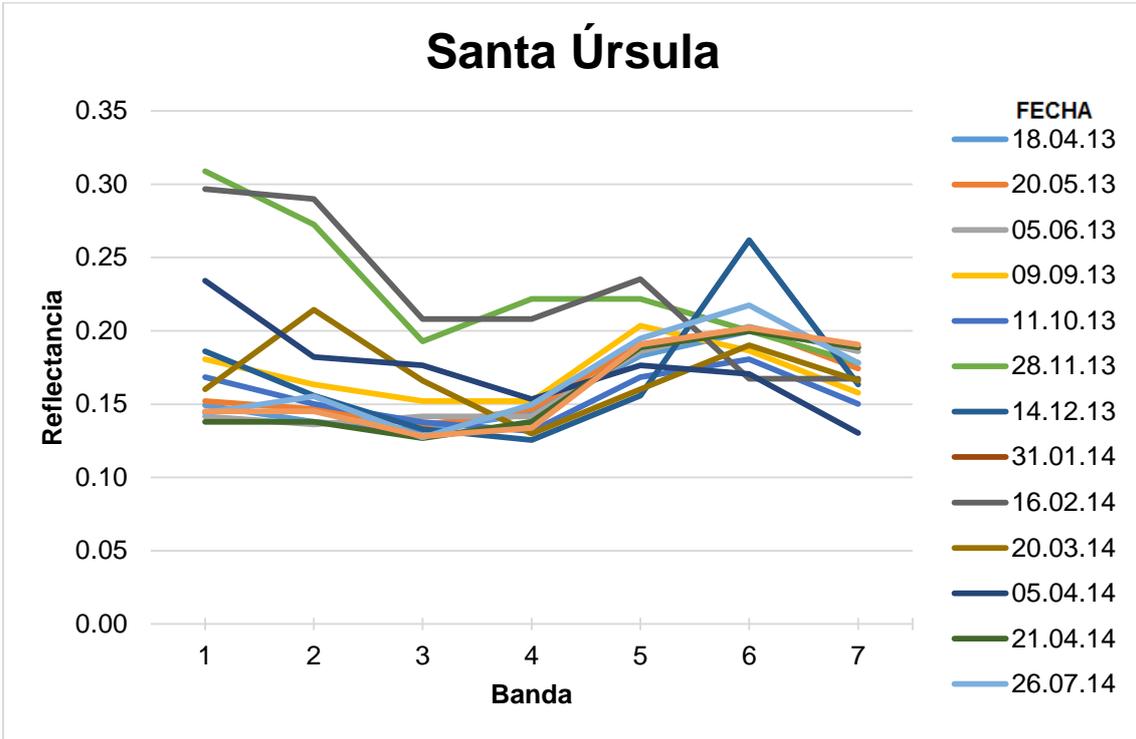


Figura 35. Gráfica reflectancia Santa Úrsula

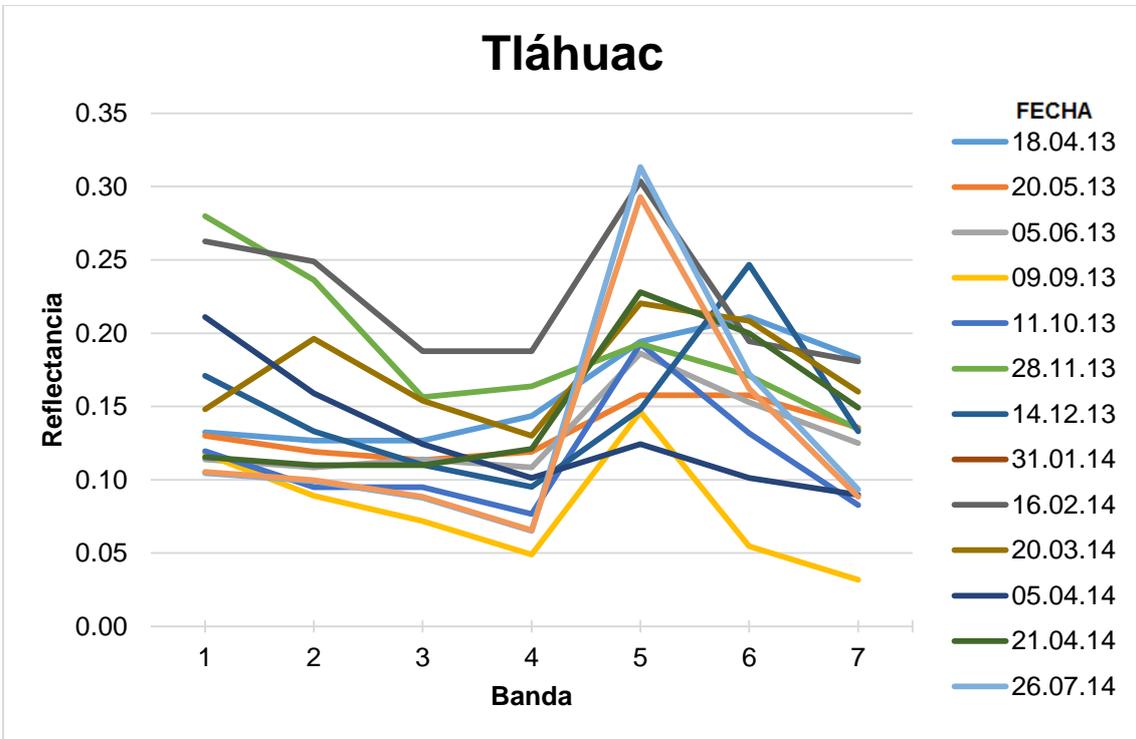


Figura 36. Gráfica reflectancia Tláhuac

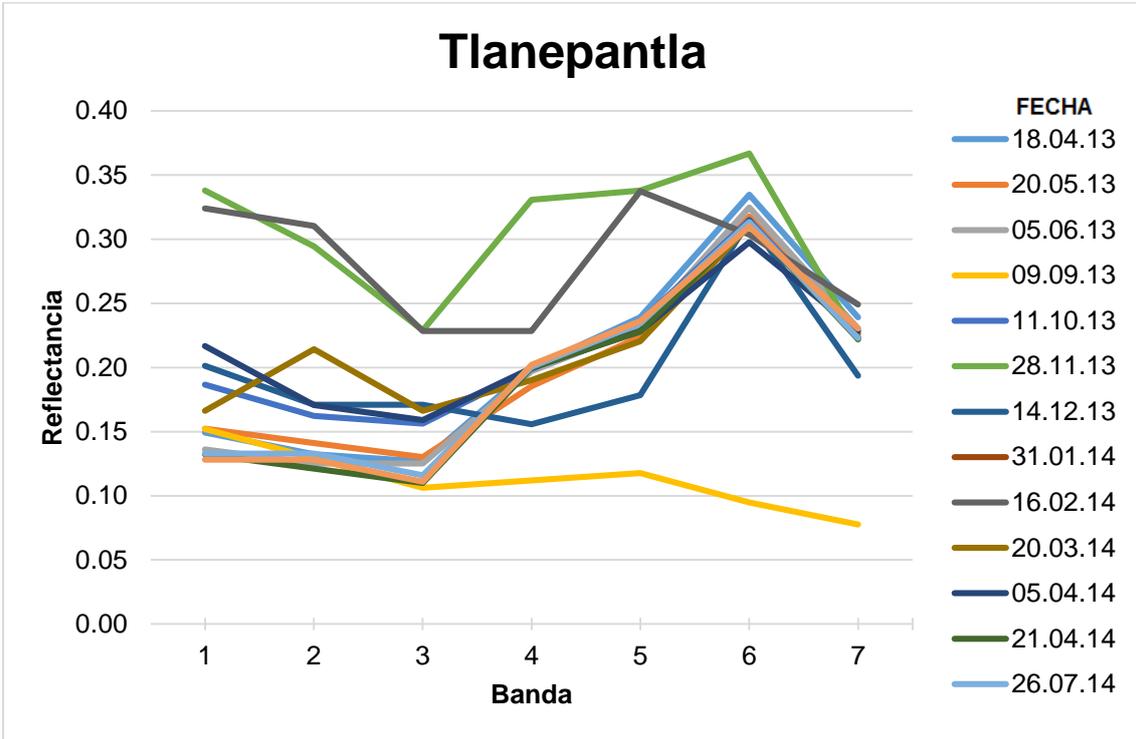


Figura 37. Gráfica reflectancia Tlanepantla

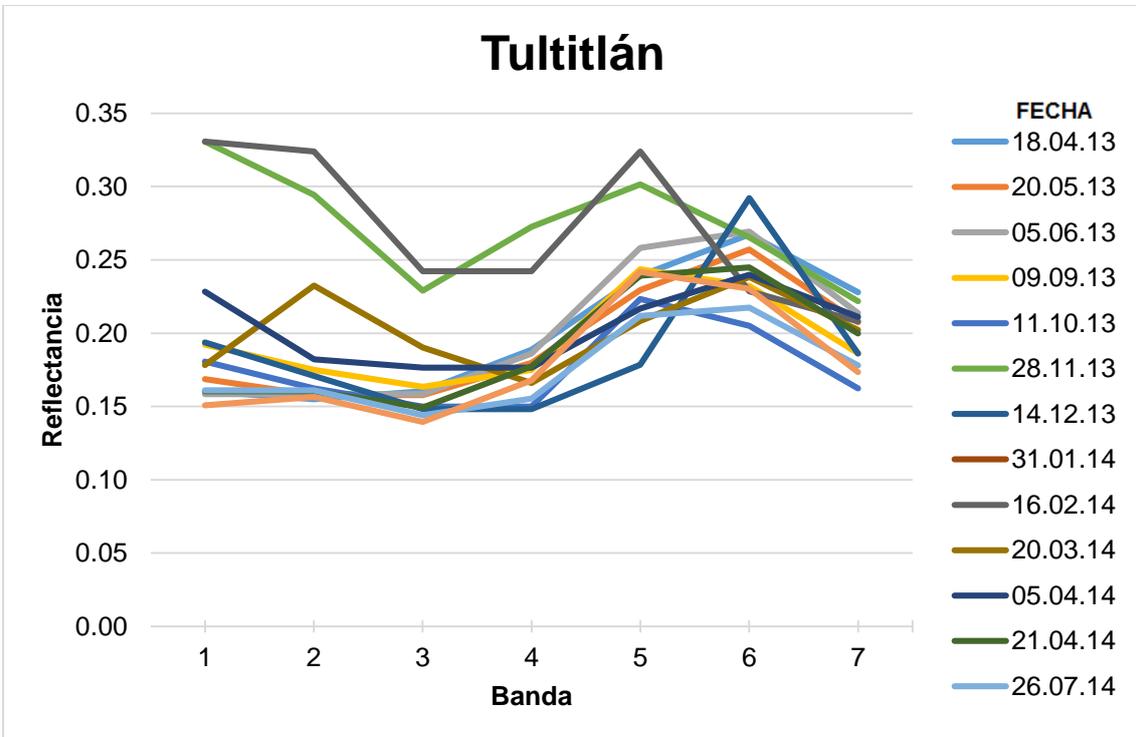


Figura 38. Gráfica reflectancia Tultitlán

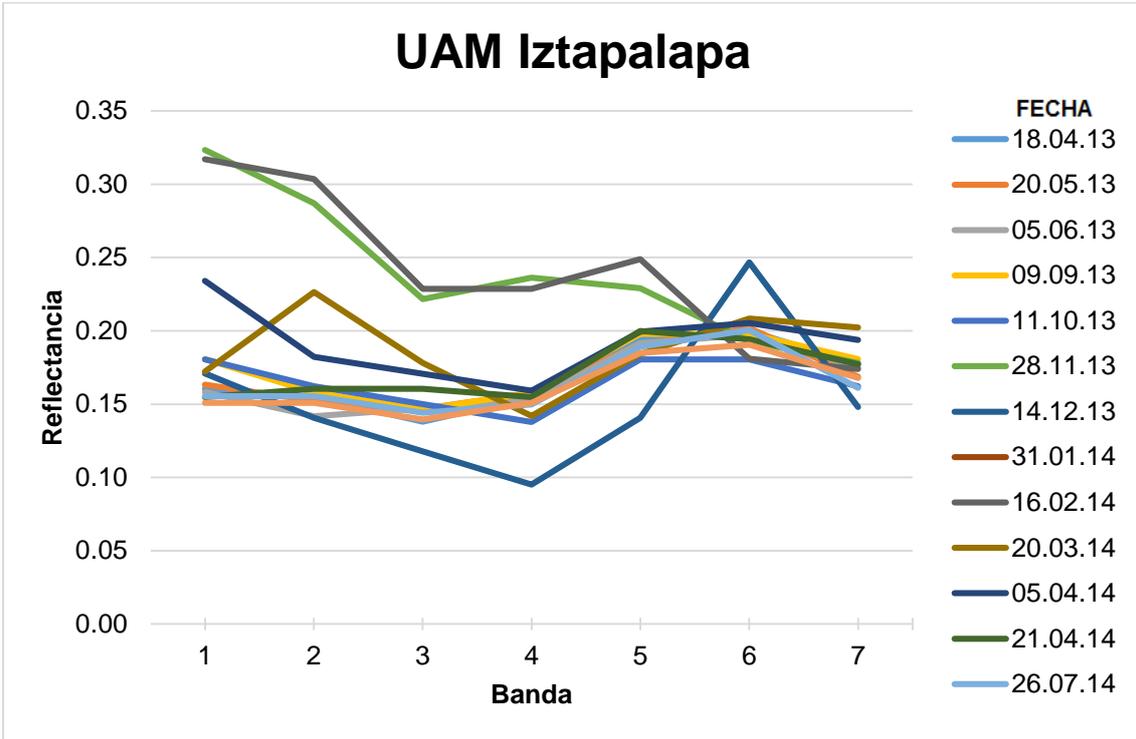


Figura 39. Gráfica reflectancia UAM Iztapalapa

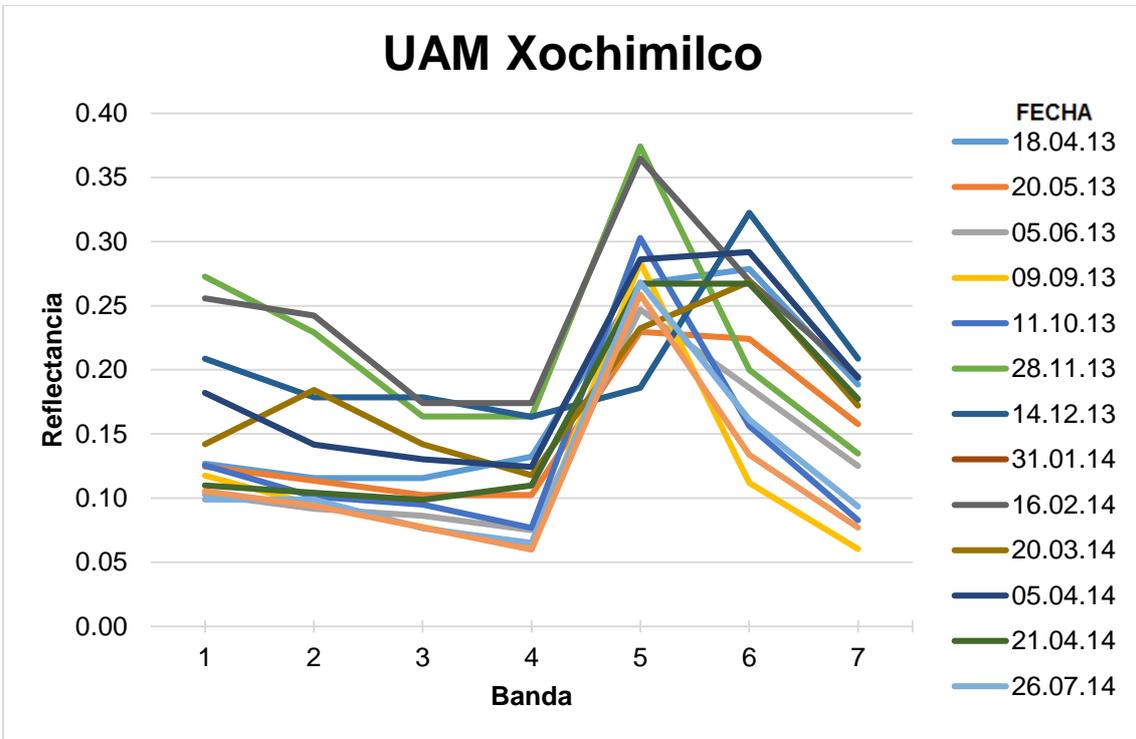


Figura 40. Gráfica reflectancia UAM Xochimilco

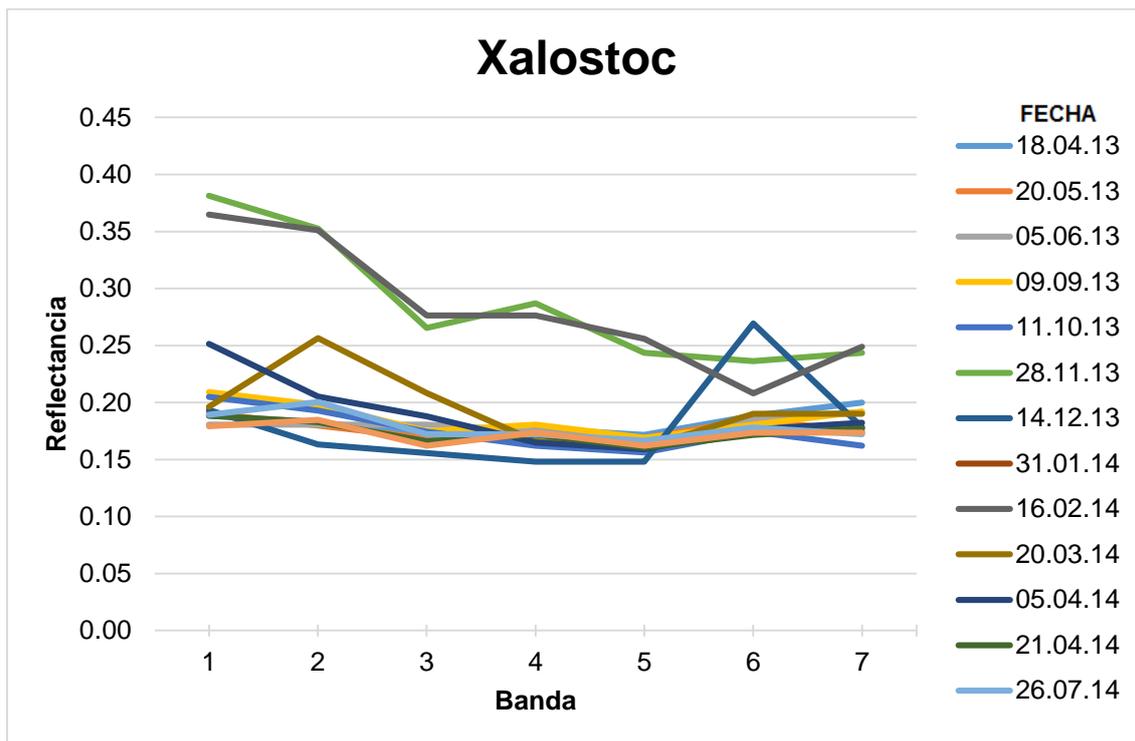


Figura 41. Gráfica reflectancia Xalostoc

Por una parte, en las gráficas anteriores se puede observar que en la mayoría de los casos, la mayor reflectancia se obtiene a partir de las mediciones realizadas por la banda 1, que es la de mayor importancia para la presente investigación, debido a que es la nueva banda implementada en el sensor OLI que se ocupa de medir aerosoles, lo que podría ser indicador de una alta presencia de partículas suspendidas.

Seguidamente, se muestra un decremento constante en los niveles de reflectancia en las bandas 2, 3 y 4. Una posible explicación para este fenómeno podría ser la influencia que ejerce el momento del día en que se realiza la medición, así como la zona urbana en que se lleva a cabo, lo que favorecería la reflectancia del azul sobre el verde, y del verde sobre el rojo. Aún más, la banda 1 refleja en presencia de aerosoles y partículas suspendidas totales, en general, que difractan la energía de la banda 1, y al alejarse, la longitud de onda crece, y el rango de la longitud de onda para medir aerosoles es menor, y por tanto, hay una disminución en la reflectancia porque las bandas mencionadas dejan de medir los últimos reflejos de los aerosoles.

La banda 5 (IR próximo), sin embargo, en muchos casos muestra un repunte en la reflectancia medida respecto a las 3 bandas anteriores, y en algunos pocos casos es incluso mayor que la arrojada por la banda 1. Esto puede ser consecuencia de la firma espectral de la mancha urbana combinada con la vegetación existente.

En algunos casos la banda 6 muestra un incremento, por lo que la reflectancia es mayor que la reportada por las bandas 2, 3 y 4, pero menor que aquella de la banda 5, lo que podría deberse a es capaz de diferenciar las partículas de agua y humedad originadas por el suelo y la vegetación, además de ser capaz de penetrar nubes finas; esto podría deberse, por tanto, a que aunque no hay vegetación suficiente para elevar su reflectancia en demasía, que es el mismo caso de las bandas 2, 3 y 4, el poder hacer con el suelo, aunque ese encuentre cubierto con concreto y asfalto, hace que la reflectancia medida incremente.

Finalmente, la banda 7 muestra un marcado decremento, y sus valores oscilan entre aquellos obtenidos por la banda 3 y la banda 4. Aunque se concentra en medir prácticamente los mismos factores que los que mide la banda 6, lo hace de una manera más profunda, lo que hace que ignore las partículas más grandes; además, es posible que el espectro en el que opera sea demasiado grande en comparación a las otras bandas que se estudiaron.

Por otra parte, las fechas evaluadas muestran una tendencia casi uniforme. La mayor reflectancia se obtuvo los días 28 de noviembre de 2013 y 16 de febrero de 2014, con la excepción de algunas fechas, en que la mayor reflectancia fue medida por la banda 6, el 14 de diciembre de 2013. El 11 de octubre de 2013 es generalmente la fecha en la que se exhiben menores niveles de reflectancia.

El registro más inusual es el obtenido en la delegación Cuajimalpa el 9 de noviembre de 2013, pero es posible que esto se pueda adjudicar a un fallo del sensor, ya que en las demás fechas y localizaciones, la reflectancia reportada es bastante estable.

Por último, los valores de la reflectancia más altos son prácticamente constante en todas las zonas, y van desde 0.32 hasta 0.38, correspondientes a lo reportado por las bandas 1, 5, y en ocasiones, la banda 6; las excepciones son lo obtenido en Merced, Pedregal y San Juan Aragón, que nunca alcanza picos mayores a 0.28, que podría atribuirse a la zona geográfica en la que se localizan, ya que a pesar de que no se encuentran en colindancia, los factores externos que se encuentran en ellas, como asfalto, concreto y áreas verdes son una constante.

En cambio, los valores más bajos obtenidos fluyen entre 0.09 y 0.15, dejando a Chalco, Pedregal, San Juan Aragón, Tláhuac y Xochimilco fuera de esta afirmación, ya que su reflectancia llega a decaer hasta 0.05. Aunque no hay una explicación obvia para esto, todas están en zonas poco industriales, lo que podría inhibir la producción de partículas suspendidas en gran cantidad, o simplemente los contaminantes no son transportados hasta esta zona.

Como se puede observar, la reflectancia, tanto mayor como menor, medida en Pedregal y San Juan Aragón se encuentra por debajo de la media. Una teoría podría ser que ambas son zonas tienden a ser residenciales.

Capítulo 6. Resultados

Debido a que no hay mucha literatura sobre los parámetros de la calidad del aire obtenidos mediante Percepción Remota, ni su comparación con datos obtenidos en campo, una vez analizadas las bandas escogidas, y teorizado acerca de algunas de las posibles causas de su comportamiento al medir la reflectancia, se realizó una comparación gráfica entre la reflectancia medida por la banda 1, implementada en la plataforma Landsat 8 para la medición de aerosoles, y las mediciones de campo obtenidas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo para PM2.5 y PM10, en los diferentes puntos de interés localizados en la ZMVM, y aunque en ocasiones un punto puede otorgar la medición de ambos parámetros en la misma localización, algunas veces el equipo utilizado se limita al reporte de uno de los dos parámetros, por lo que las gráficas están agrupadas en relación al parámetro medido, y no a la estación de monitoreo presente en un punto geográfico.

Además, hay que recordar que, aunque en todos los casos hay una mayor cantidad de PM2.5 que la existente de PM10, la masa de PM10 es mayor, y por lo tanto, su concentración volumétrica es siempre más grande que la de PM2.5. La explicación más aceptada es que las partículas más grandes se sedimentan rápidamente debido a la inercia, mientras que las más pequeñas pueden durar un periodo de tiempo más prolongado siendo transportadas antes de poder asentarse; por esto mismo, PM10 medidas fueron generadas *in situ* en casi todos los casos, mientras que se puede albergar mayor incertidumbre sobre el origen de PM2.5.

En cuanto a los resultados plasmados en las gráficas, se mantuvieron apegados a los datos recolectados y la única omisión en la comparativa de datos se da cuando no hay datos existentes recolectados por la estación de monitoreo con los cuales comparar los obtenidos con PR.

→ GRÁFICAS DE PM2.5

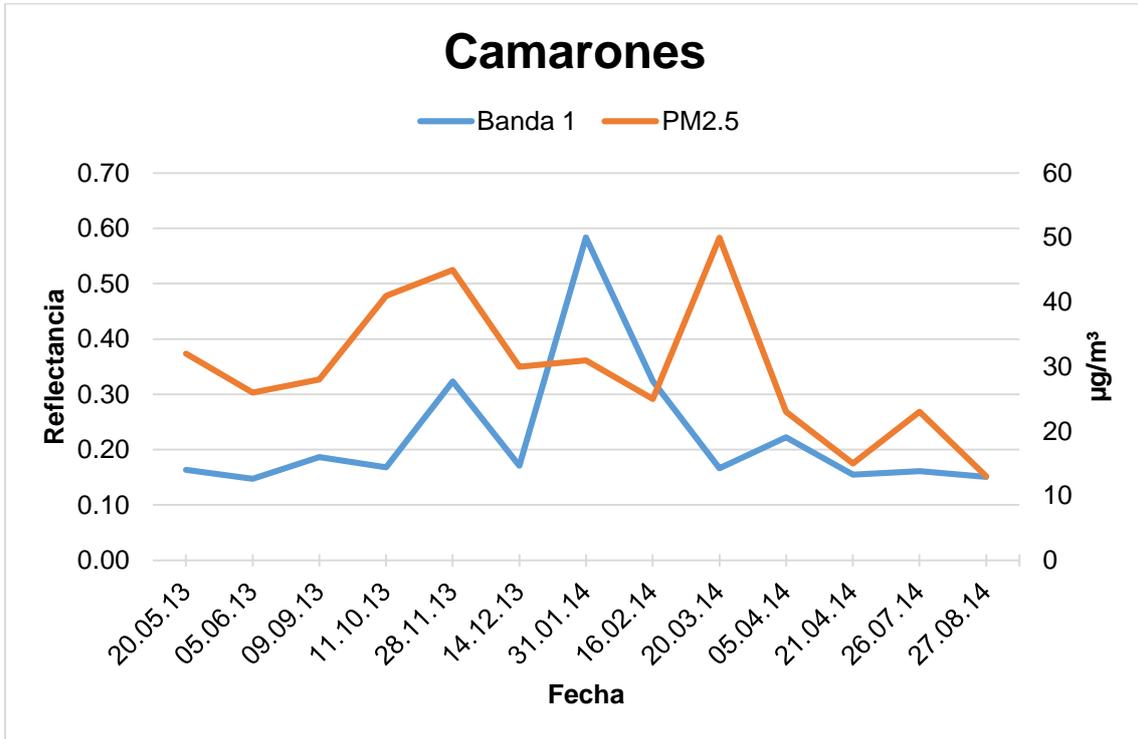


Figura 42. Gráfica comparativa Camarones PM2.5

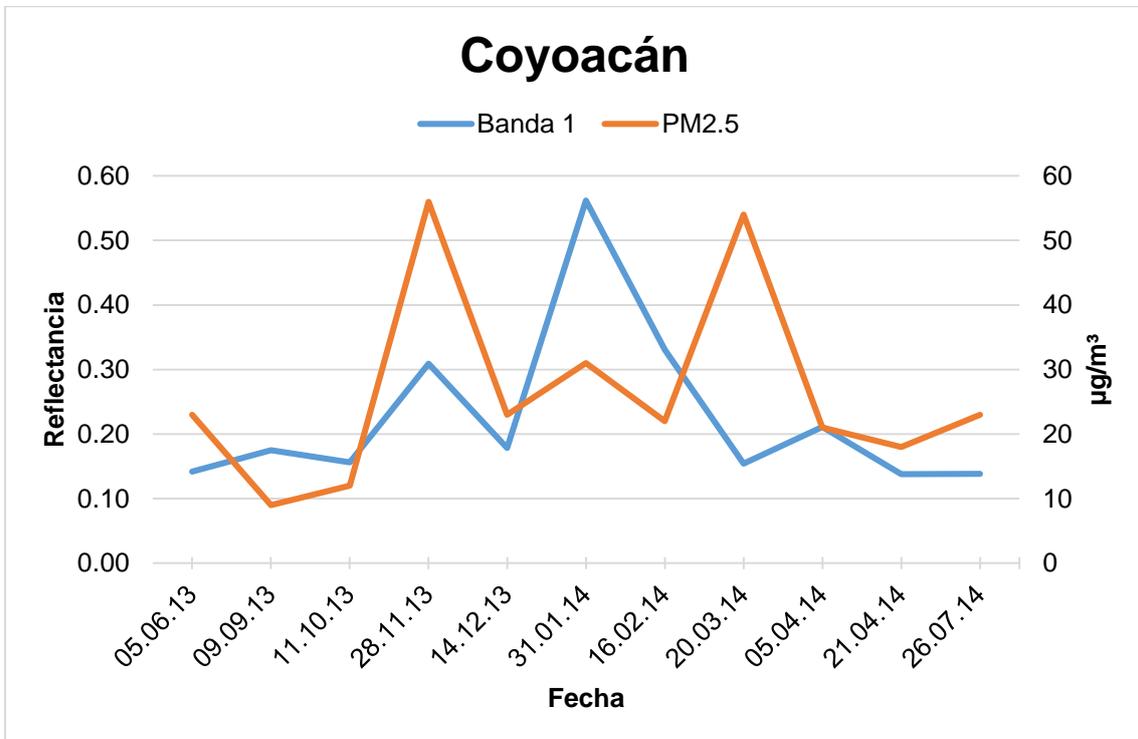


Figura 43. Gráfica comparativa Coyoacán PM2.5

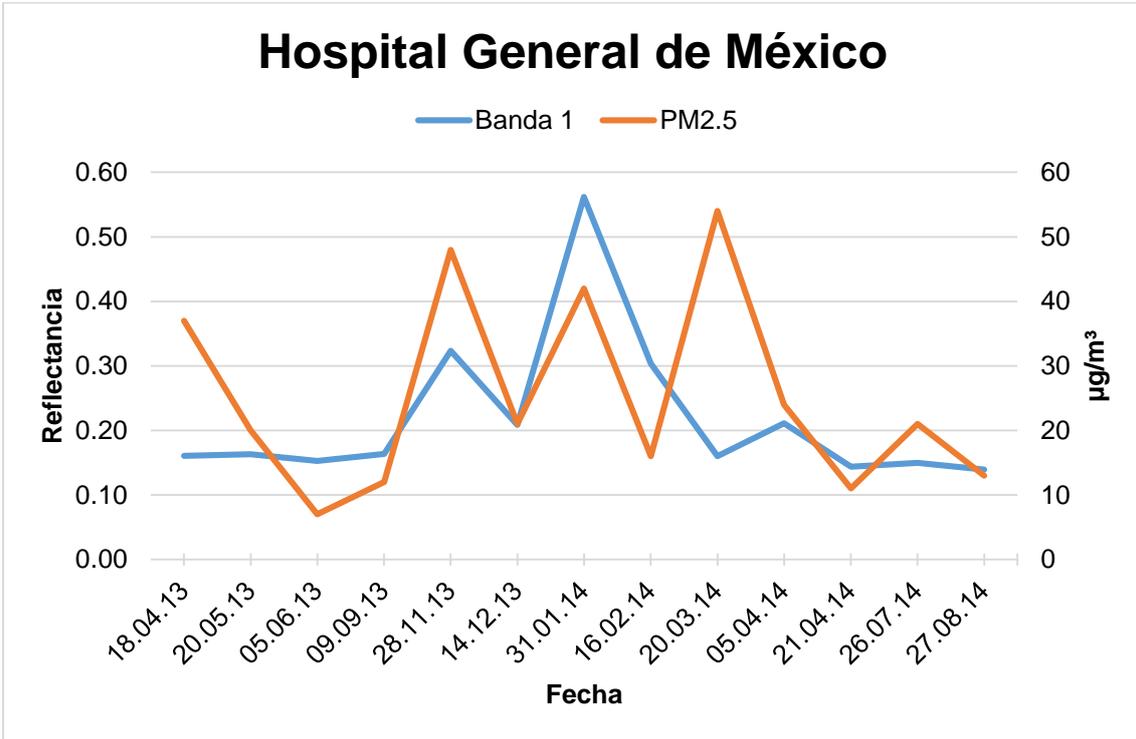


Figura 44. Gráfica comparativa Hospital General de México PM2.5

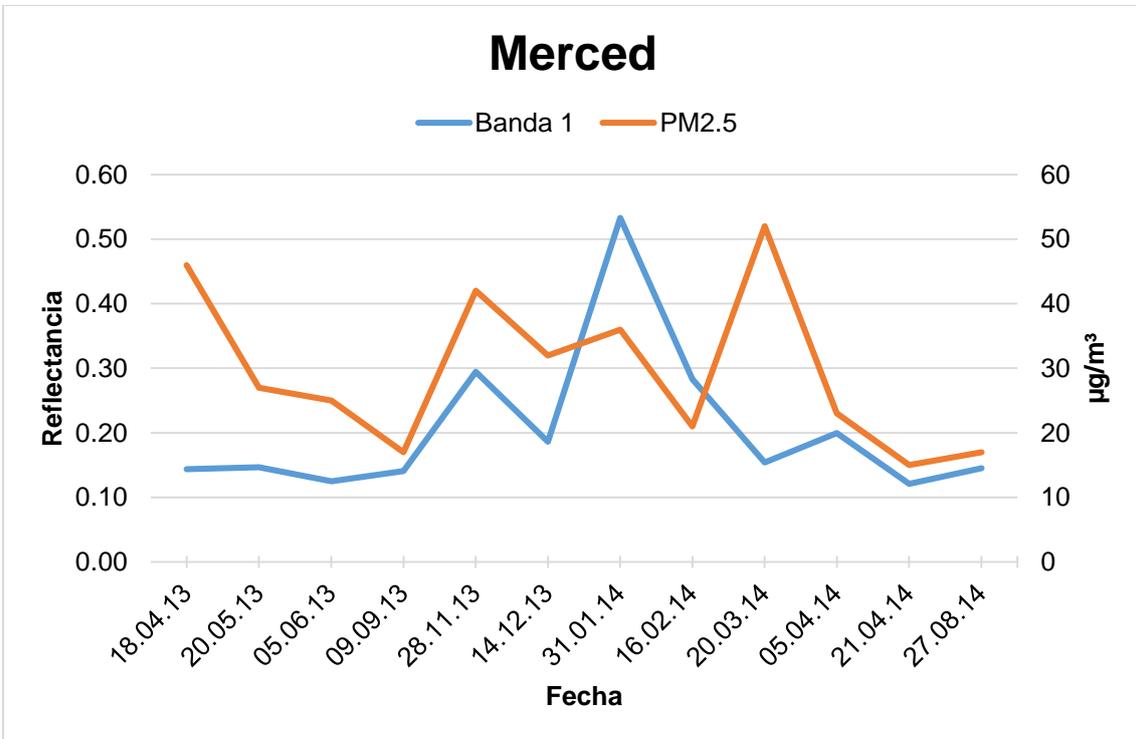


Figura 45. Gráfica comparativa Merced PM2.5

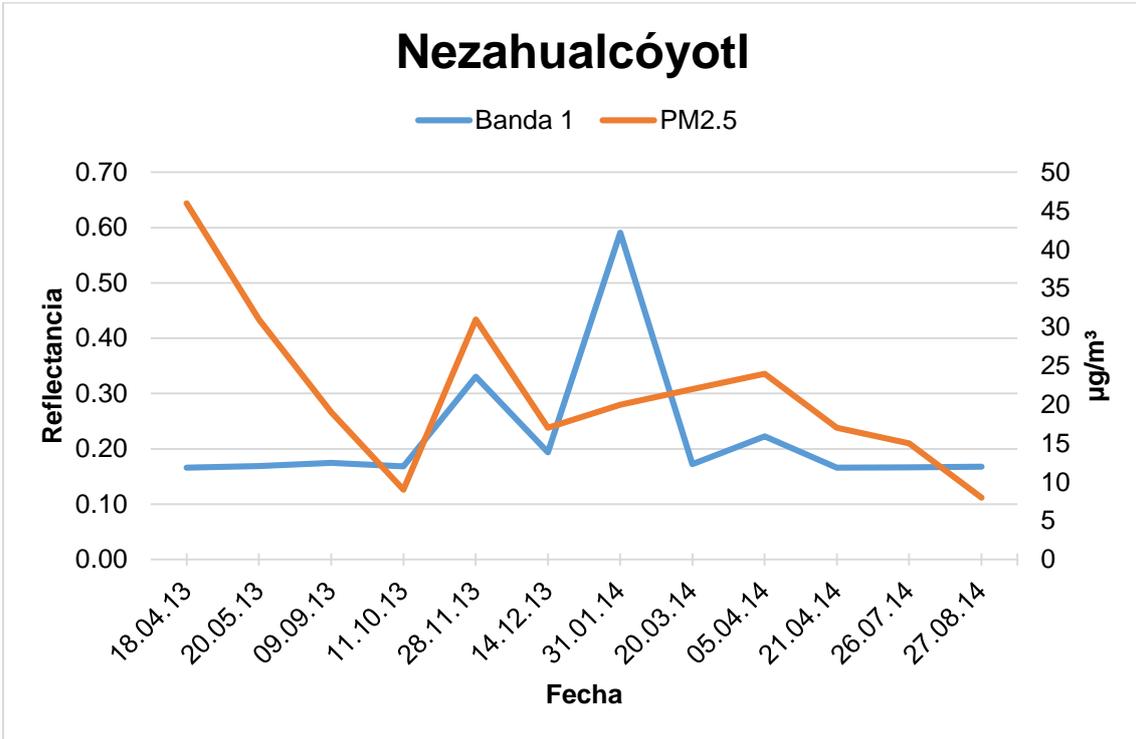


Figura 46. Gráfica comparativa Nezahualcóyotl PM2.5

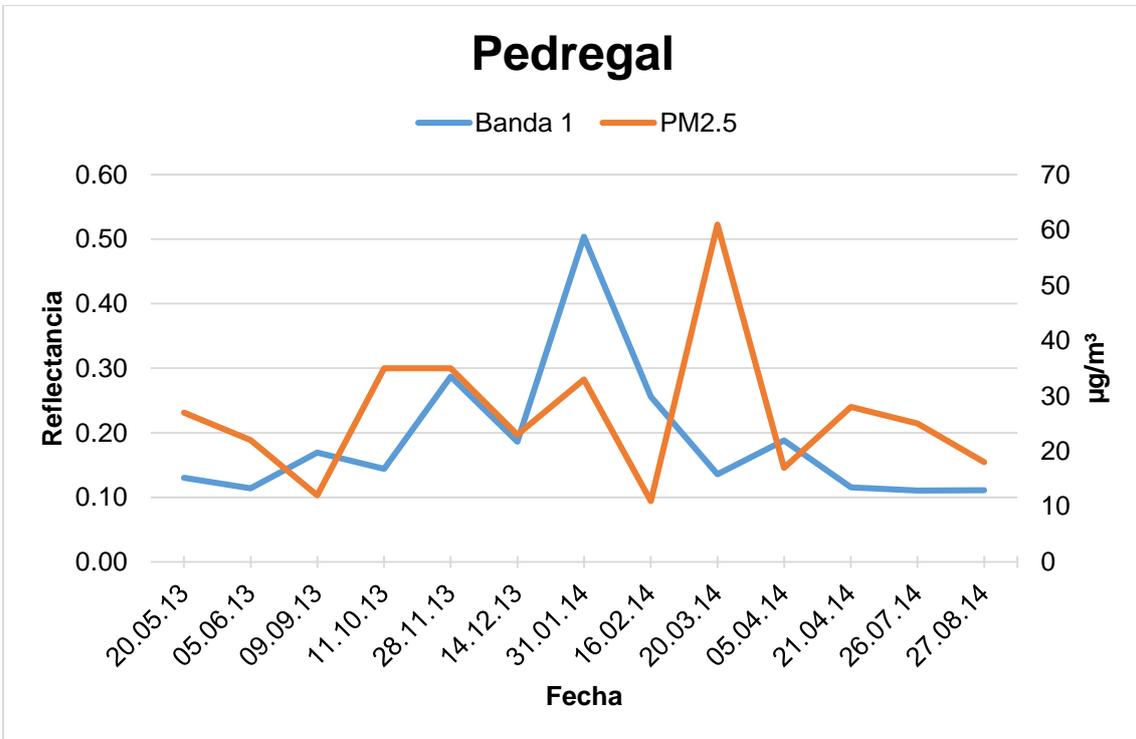


Figura 47. Gráfica comparativa Pedregal PM2.5

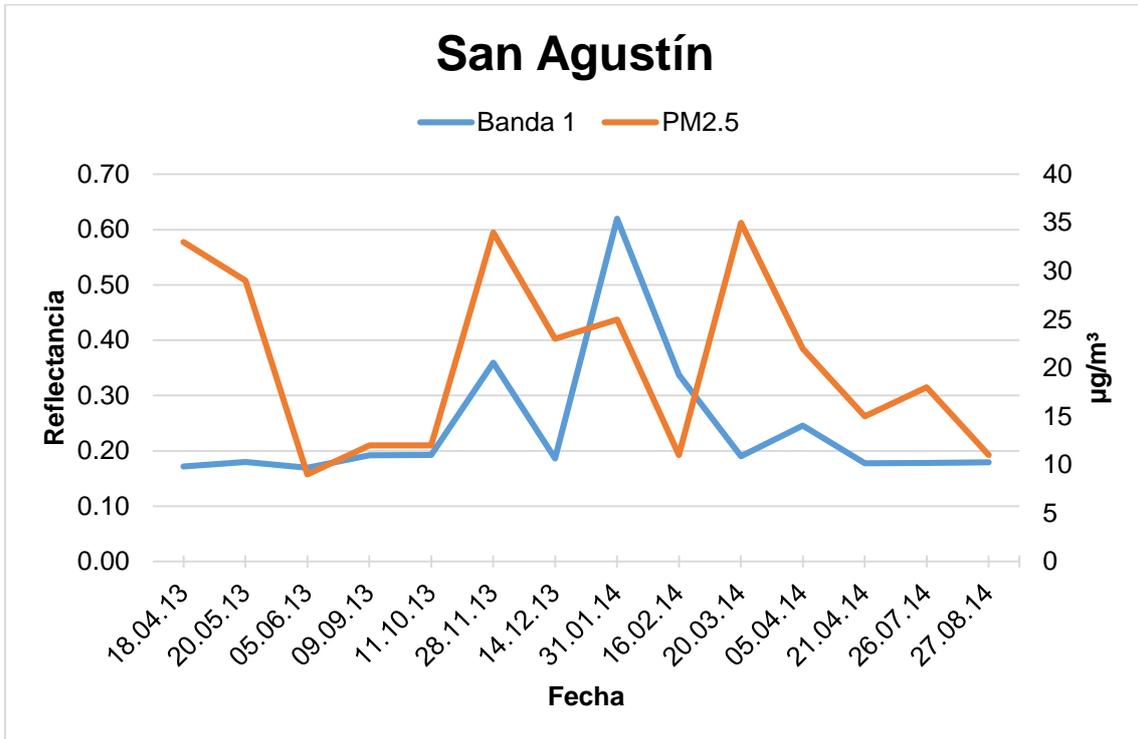


Figura 48. Gráfica comparativa San Agustín PM2.5

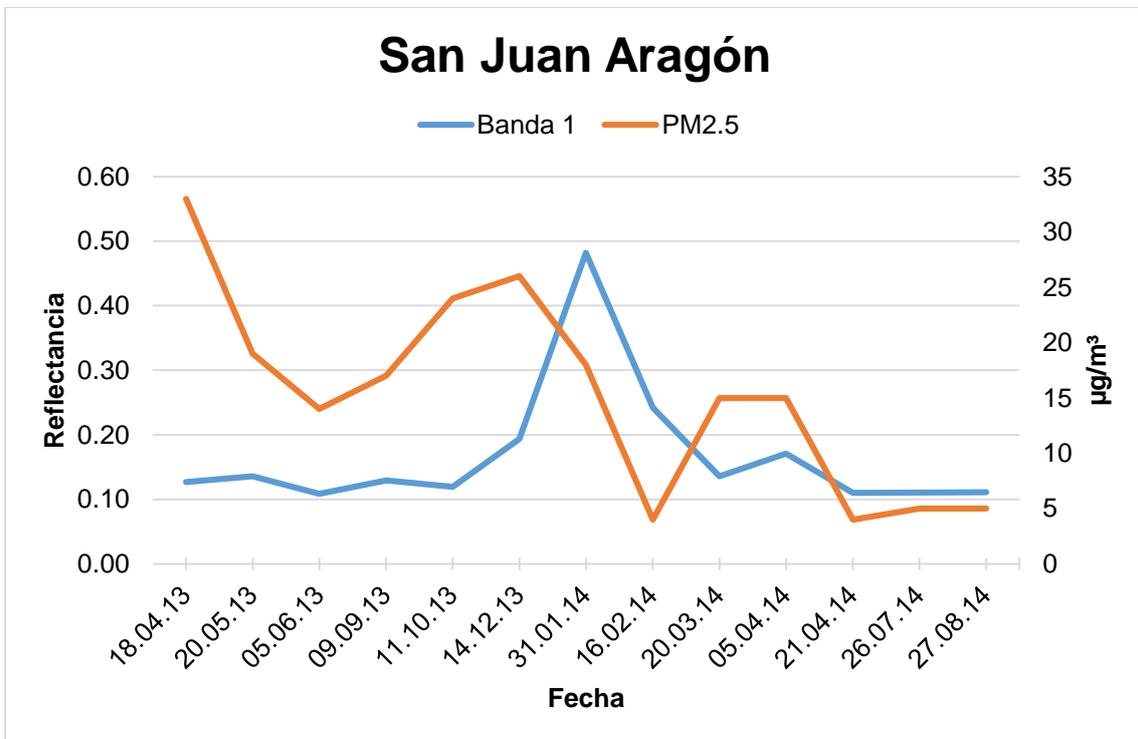


Figura 49. Gráfica comparativa San Juan Aragón PM2.5

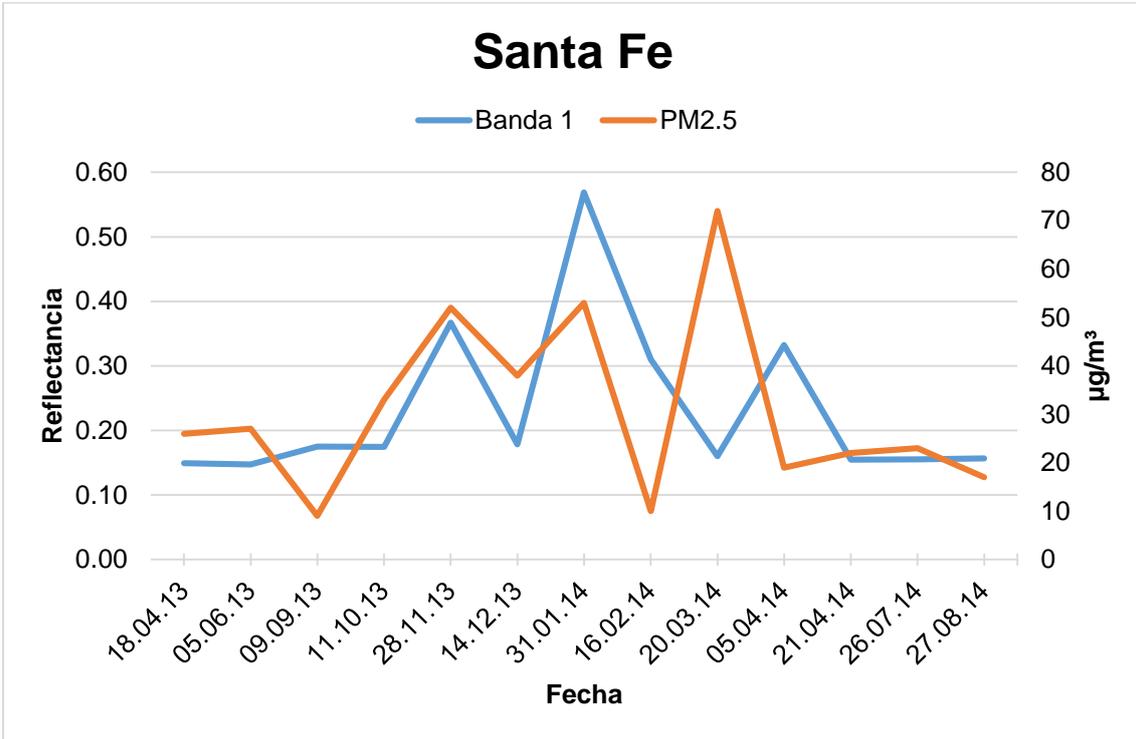


Figura 50. Gráfica comparativa Santa Fe PM2.5

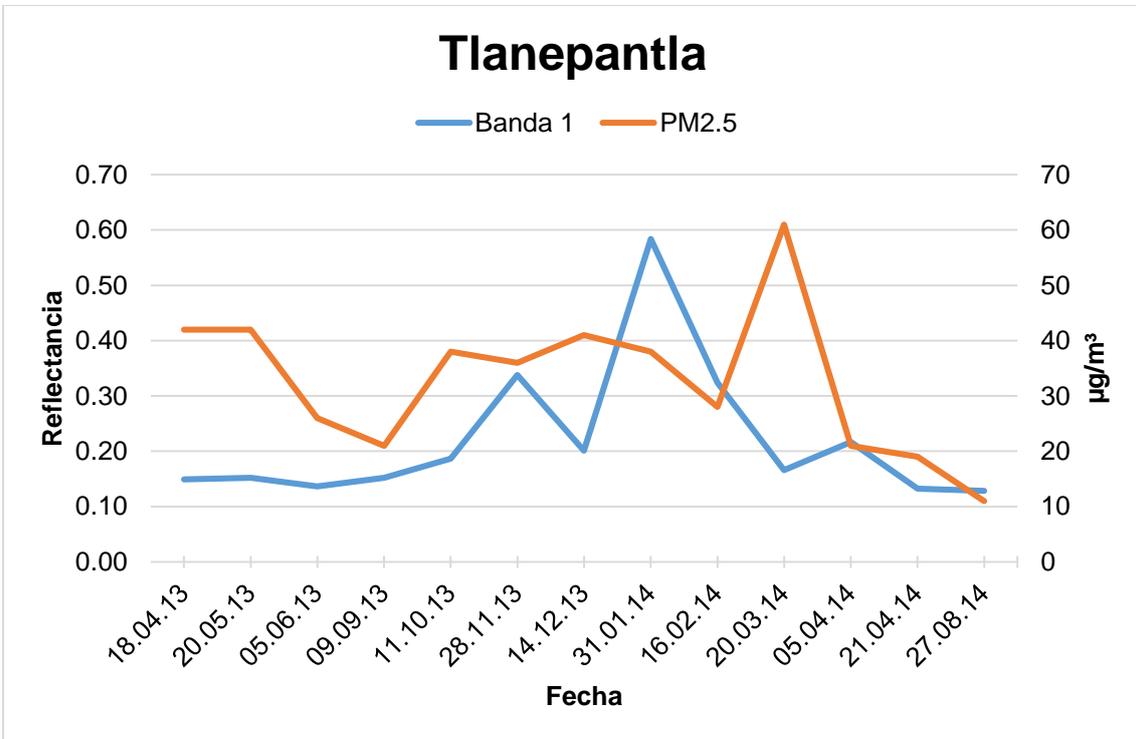


Figura 51. Gráfica comparativa Tlanepantla PM2.5

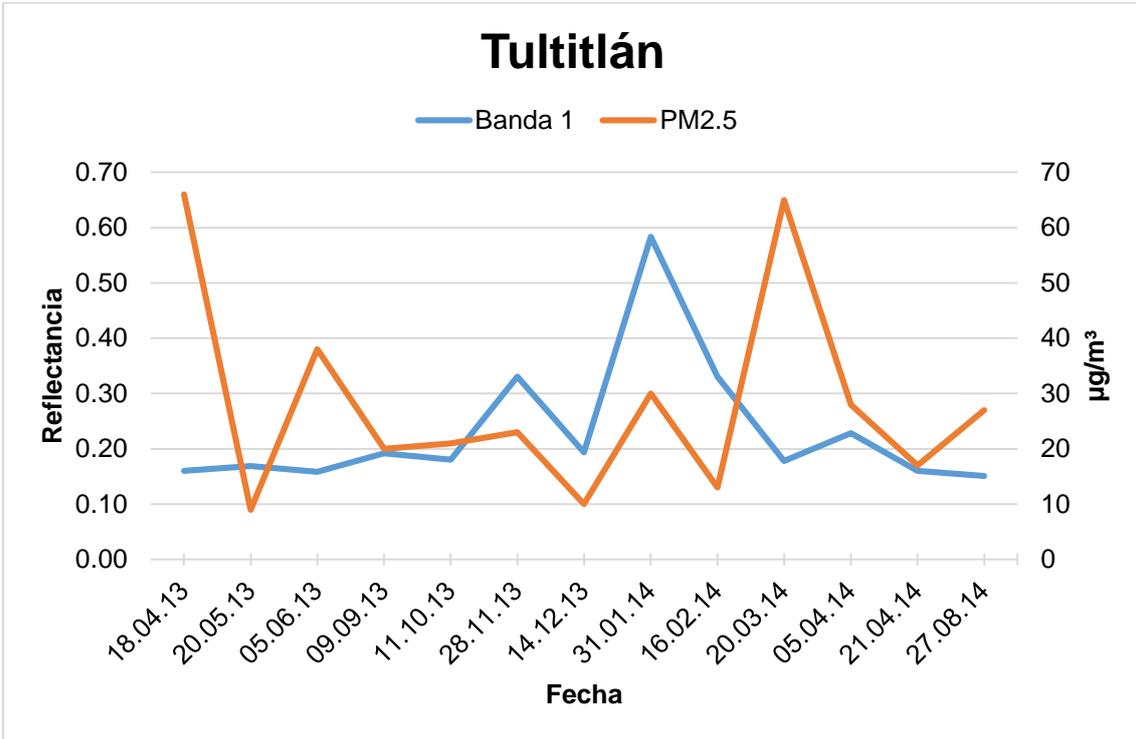


Figura 52. Gráfica comparativa Tultitlán PM2.5

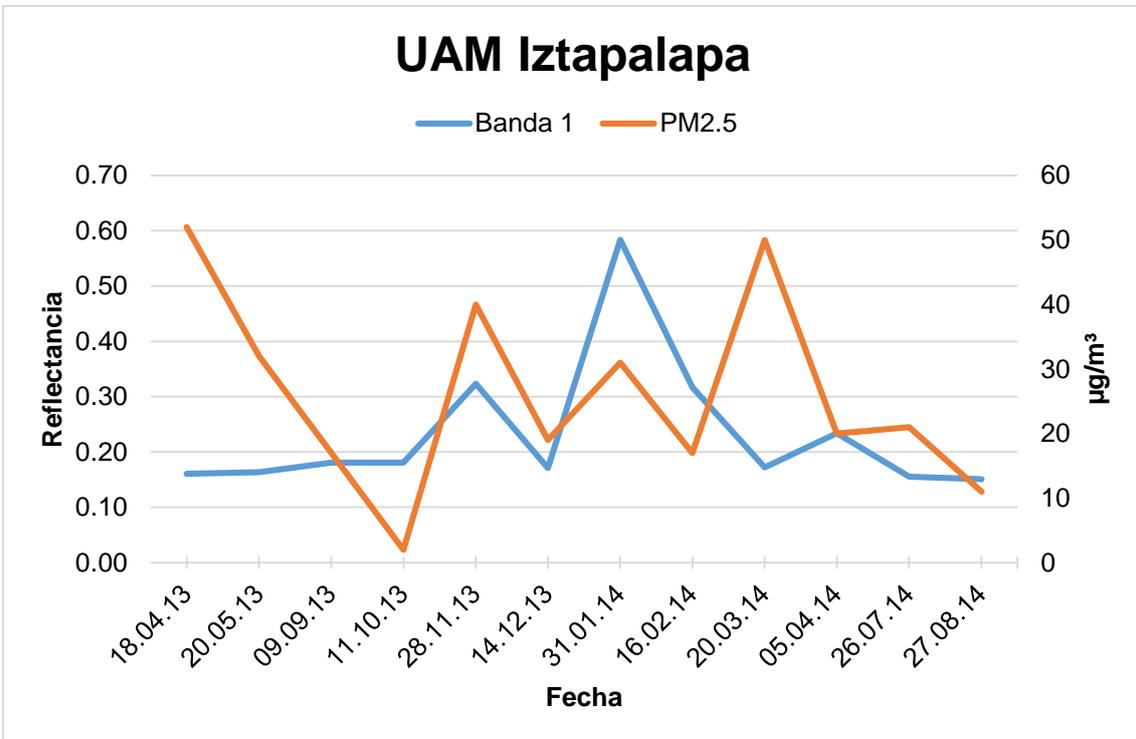


Figura 53. Gráfica comparativa UAM Iztapalapa PM2.5

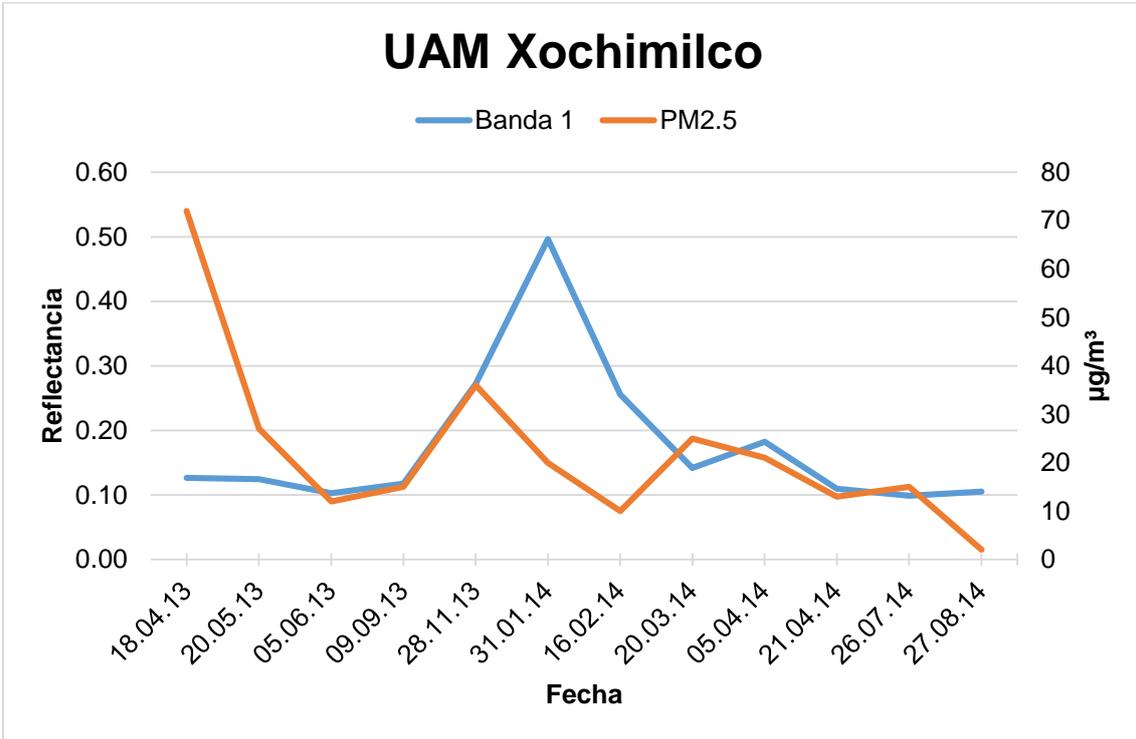


Figura 54. Gráfica comparativa UAM Xochimilco PM2.5

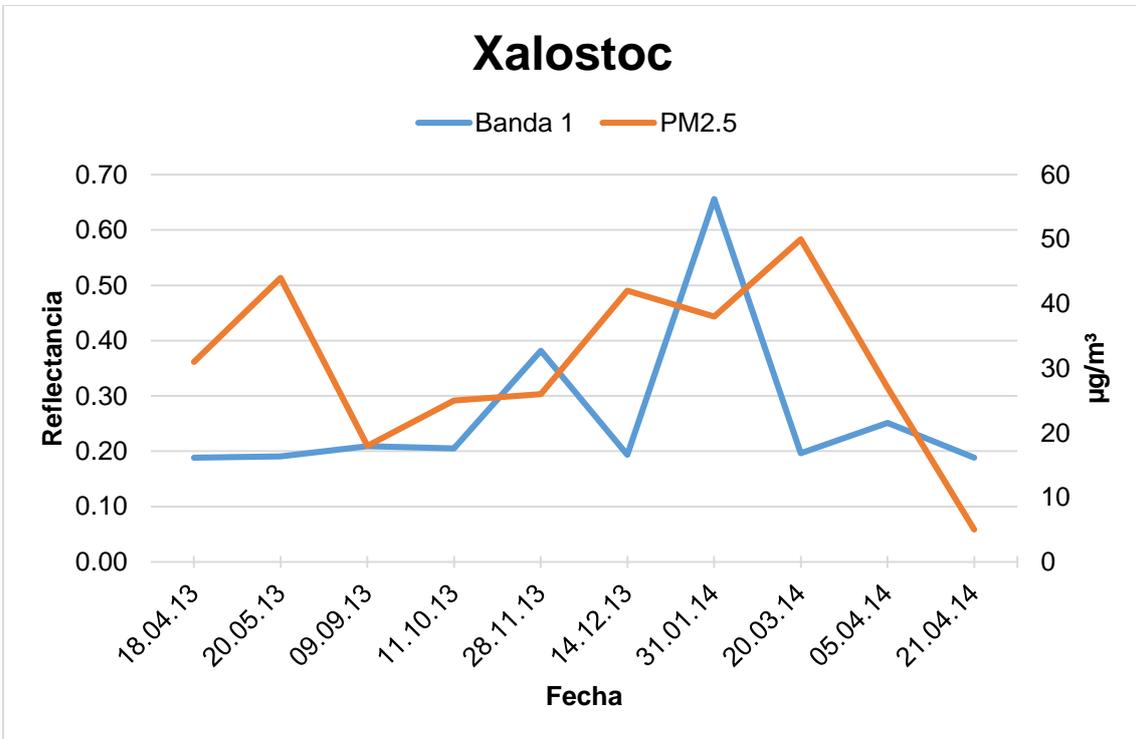


Figura 55. Gráfica comparativa Xalostoc PM2.5

→ GRÁFICAS DE PM10

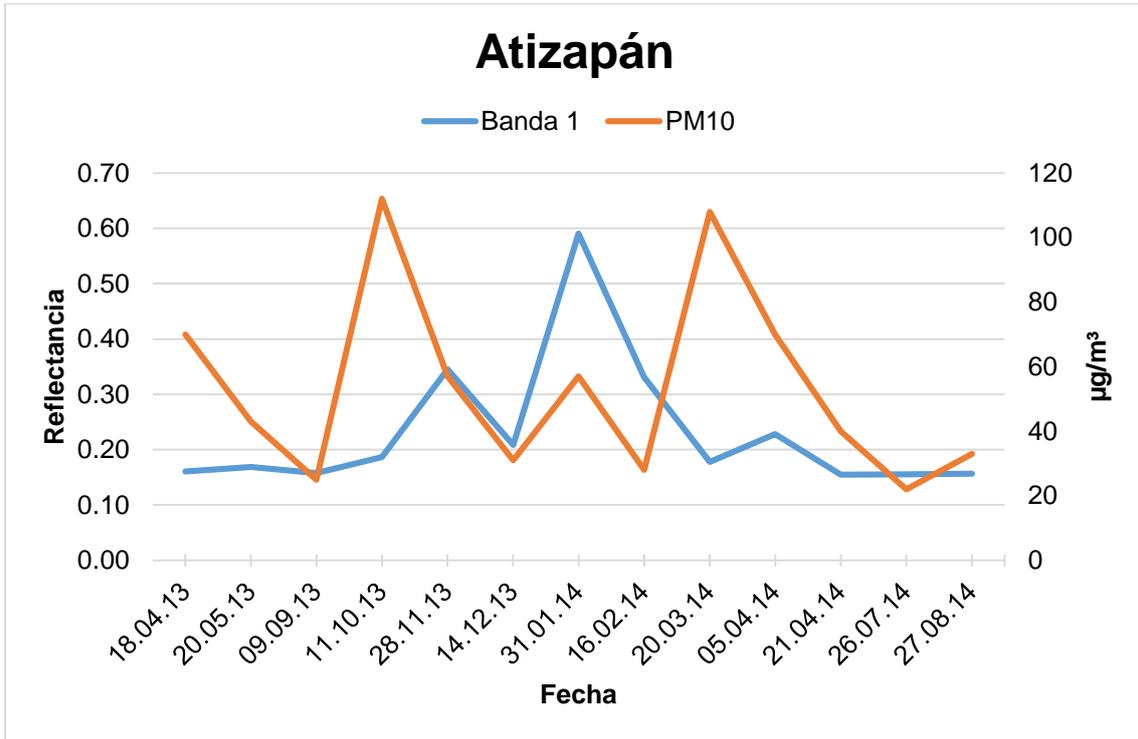


Figura 56. Gráfica comparativa Atizapán PM10

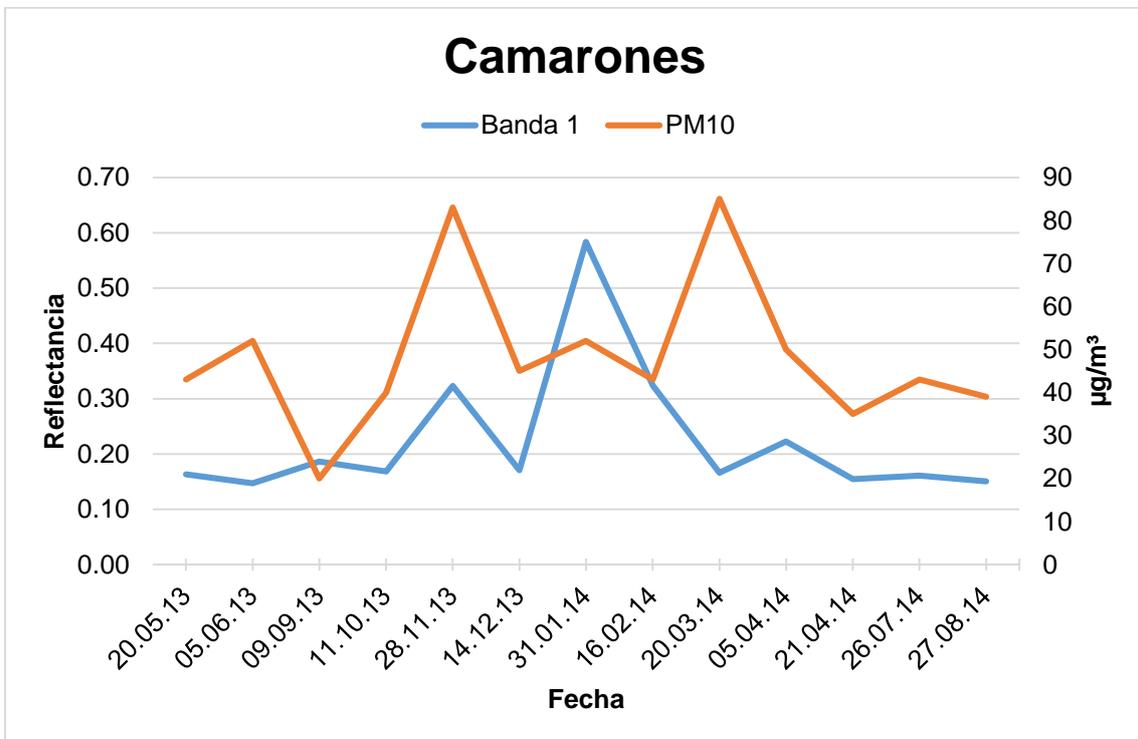


Figura 57. Gráfica comparativa Camarones PM10

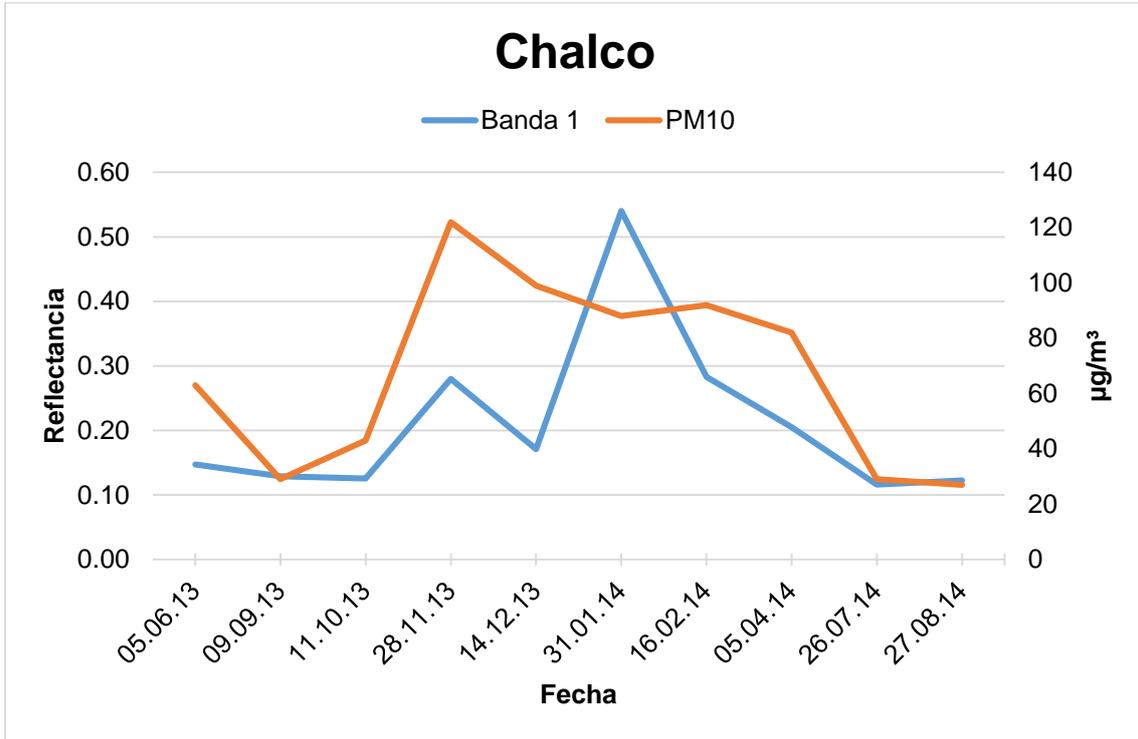


Figura 58. Gráfica comparativa Chalco PM10

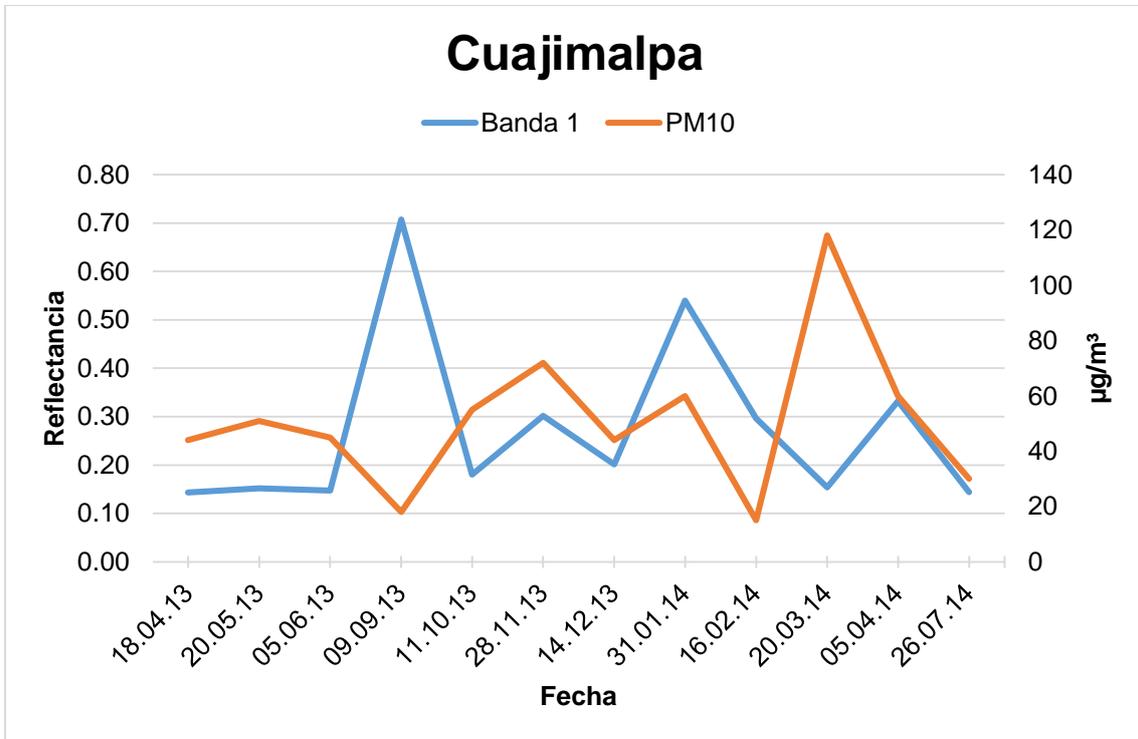


Figura 59. Gráfica comparativa Cuajimalpa PM10

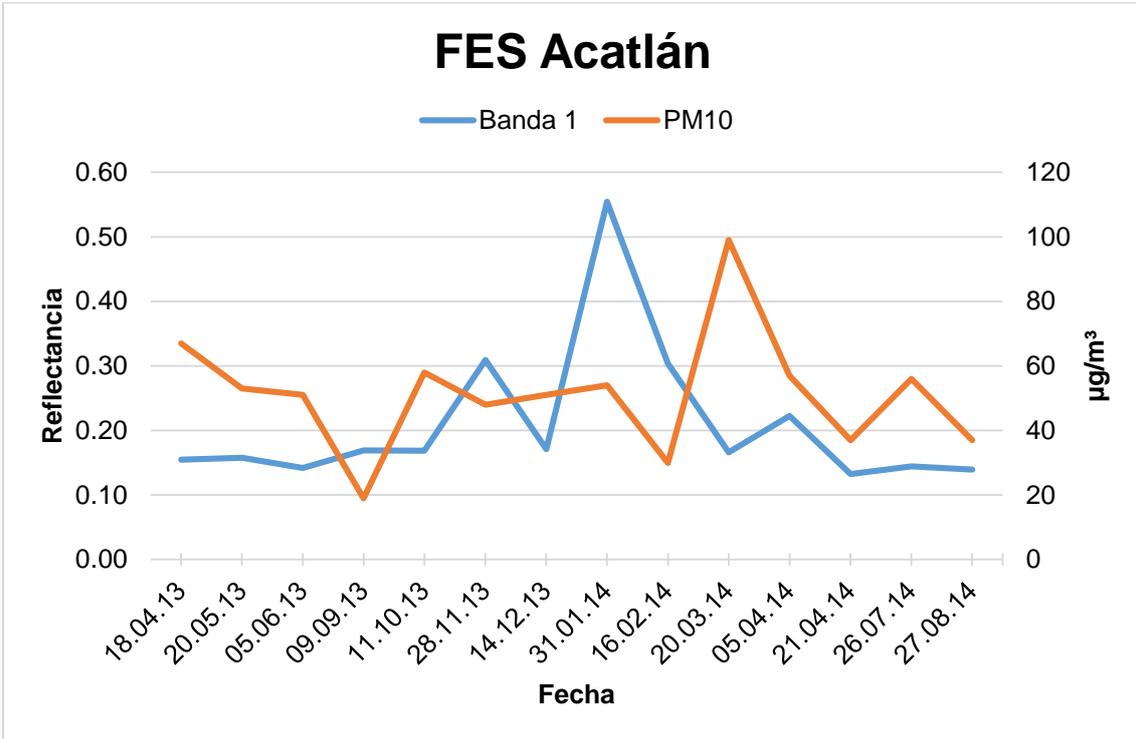


Figura 60. Gráfica comparativa FES Acatlán PM10

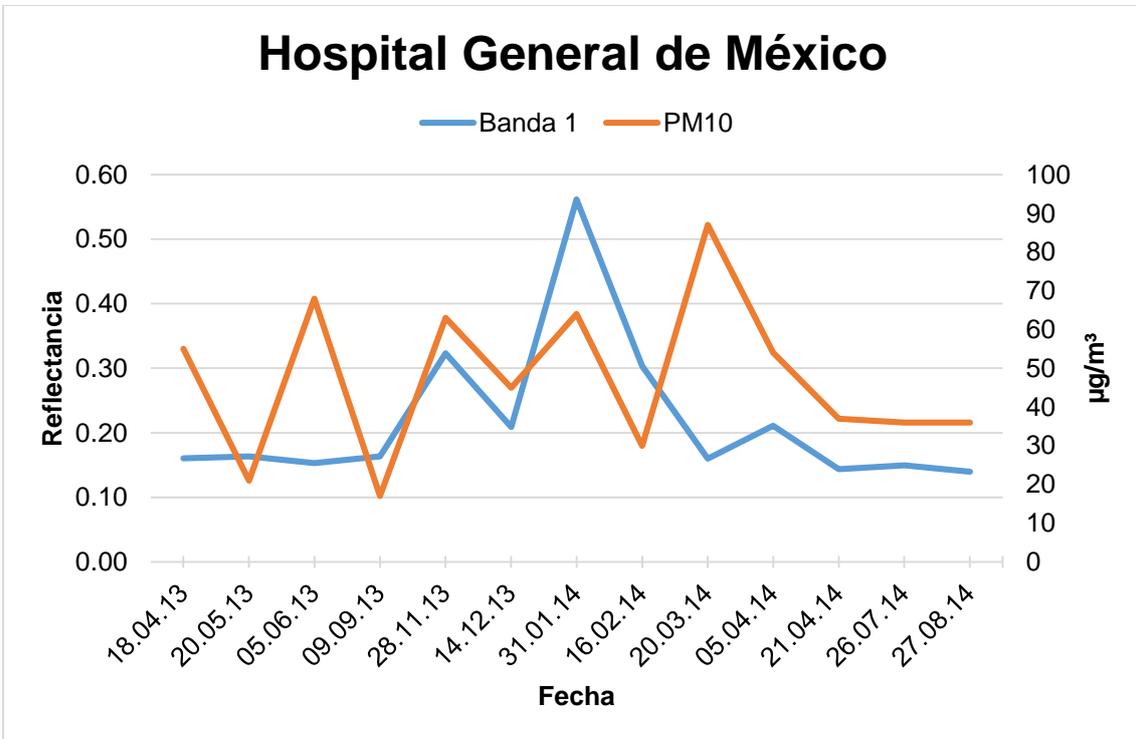


Figura 61. Gráfica comparativa Hospital General de México PM10

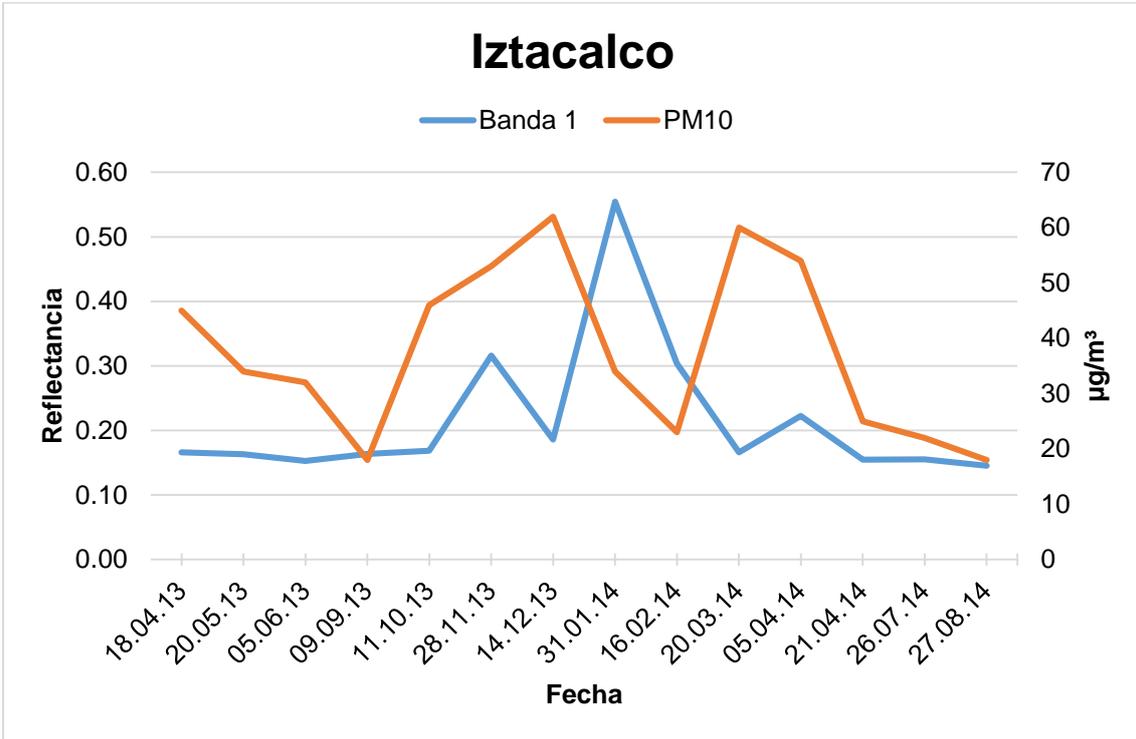


Figura 61. Gráfica comparativa Iztacalco PM10

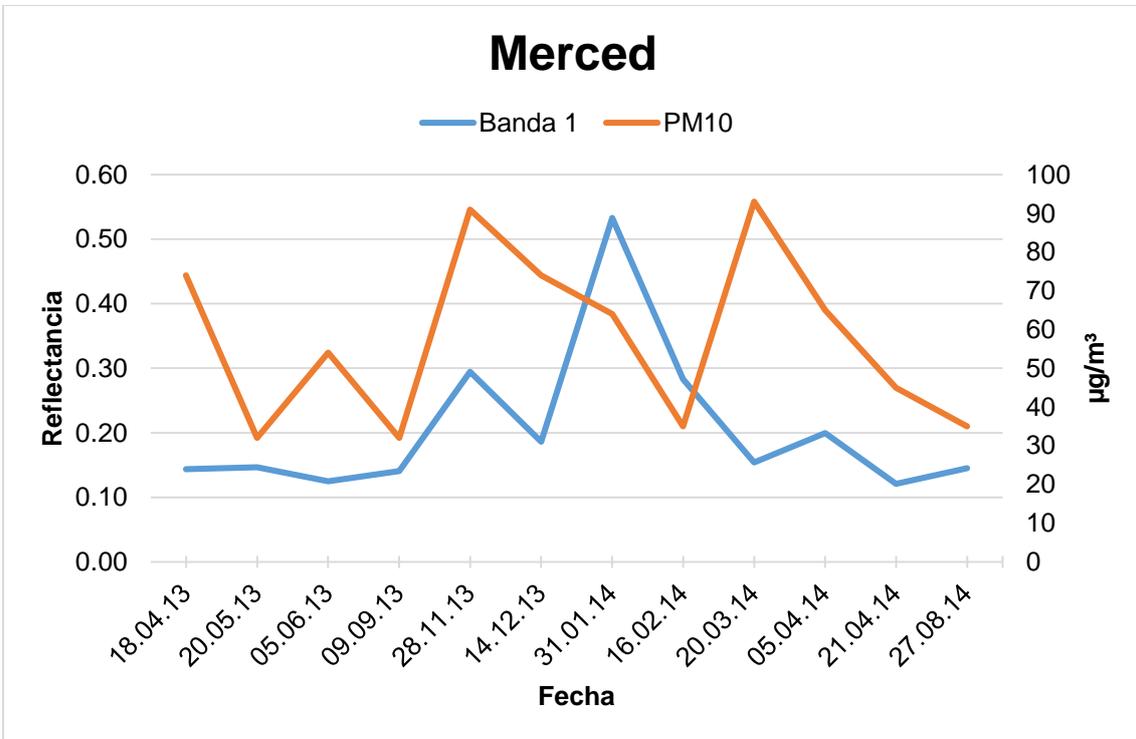


Figura 62. Gráfica comparativa Merced PM10

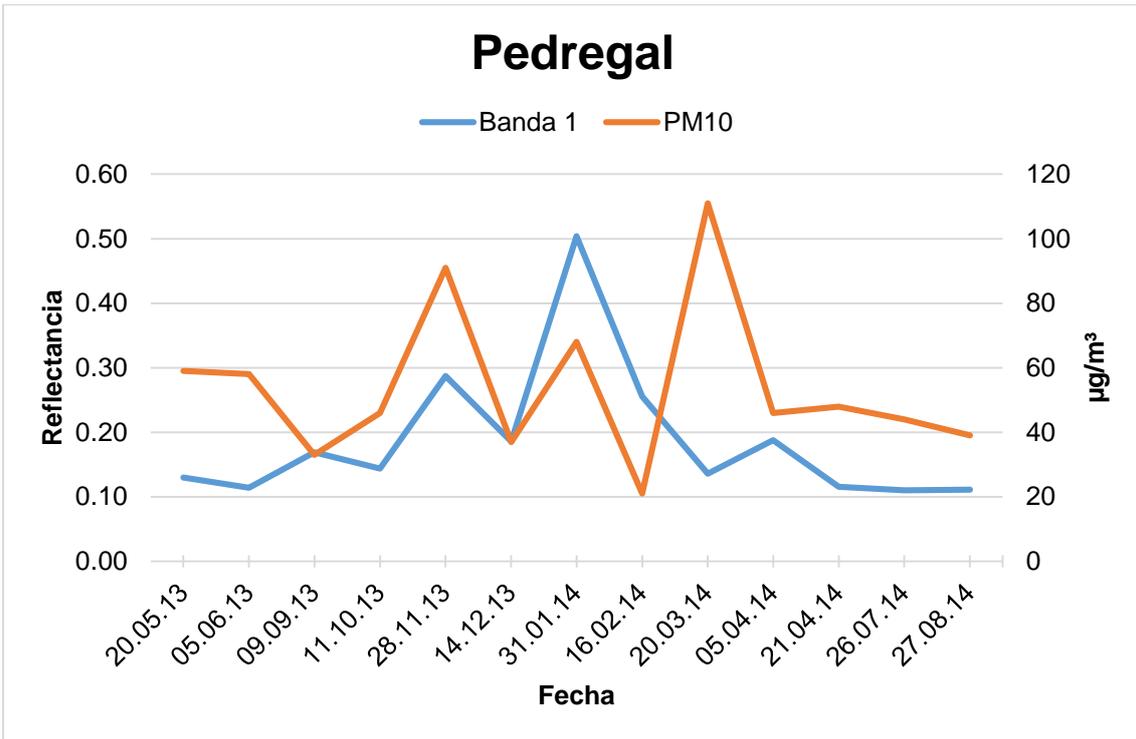


Figura 63. Gráfica comparativa Pedregal PM10

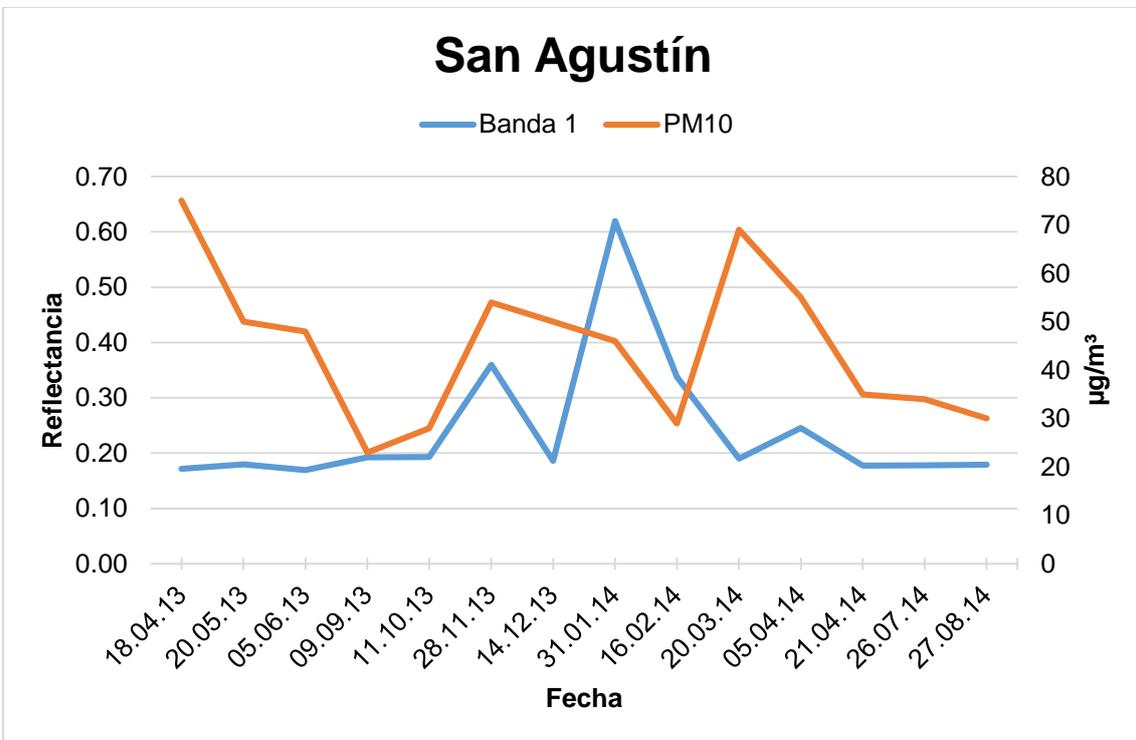


Figura 64. Gráfica comparativa San Agustín PM10

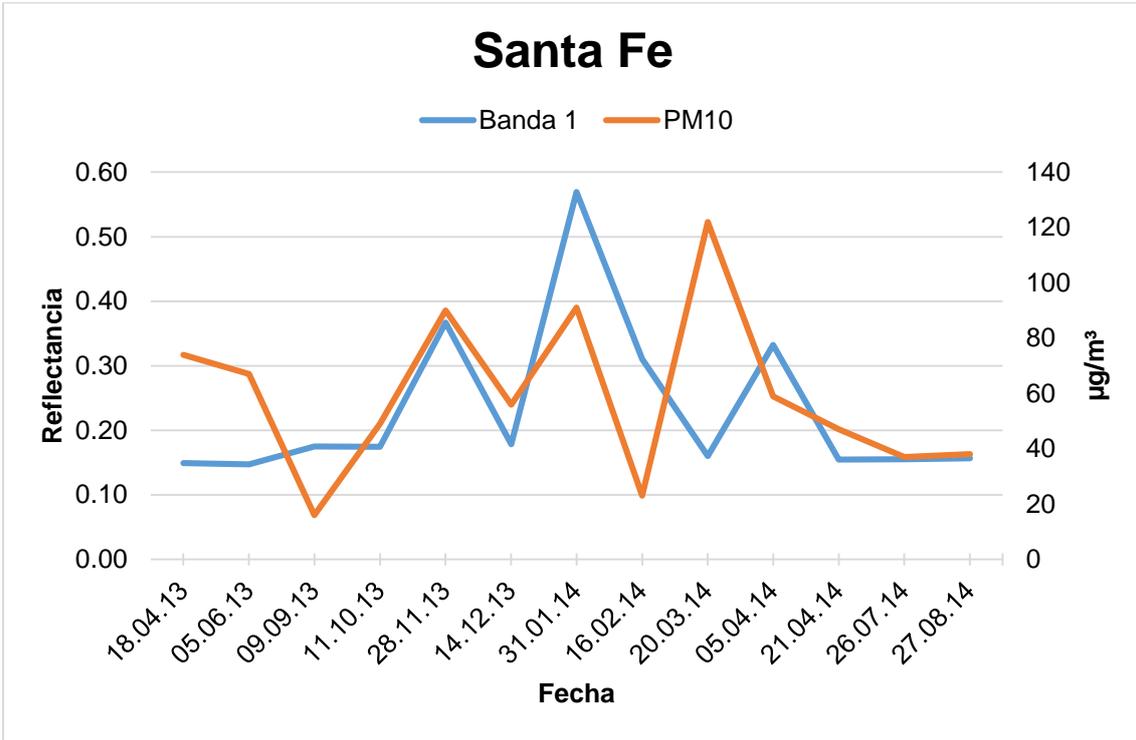


Figura 65. Gráfica comparativa Santa Fe PM10

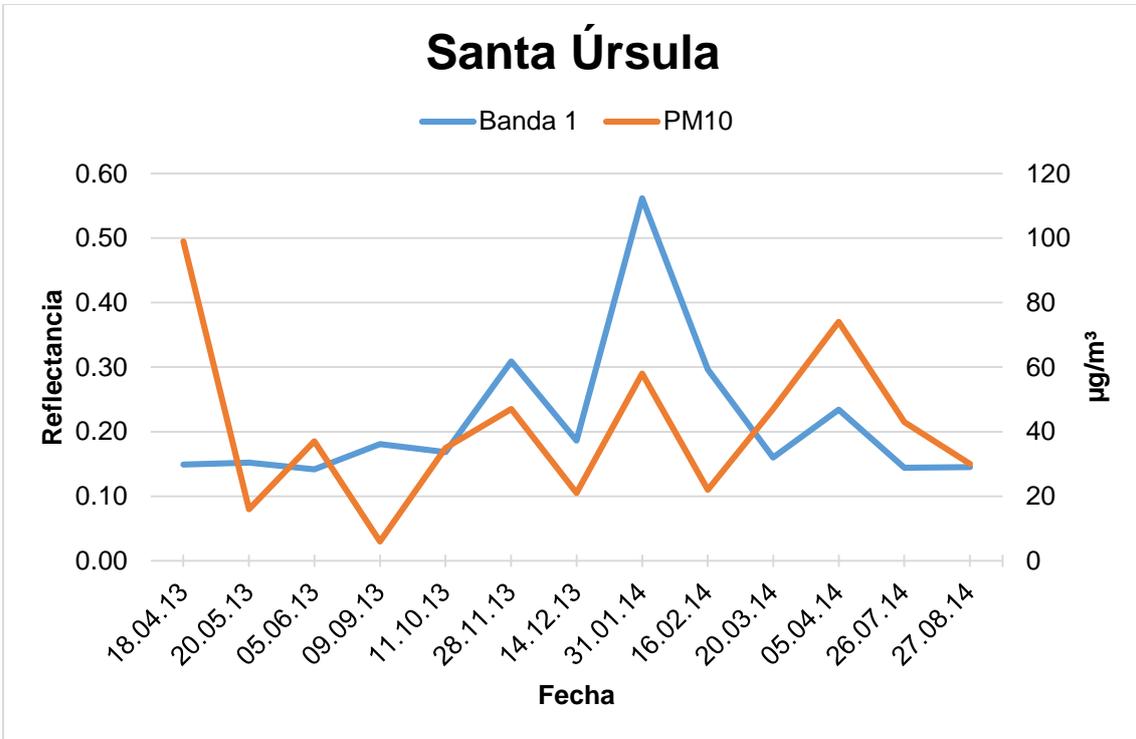


Figura 66. Gráfica comparativa Santa Úrsula PM10

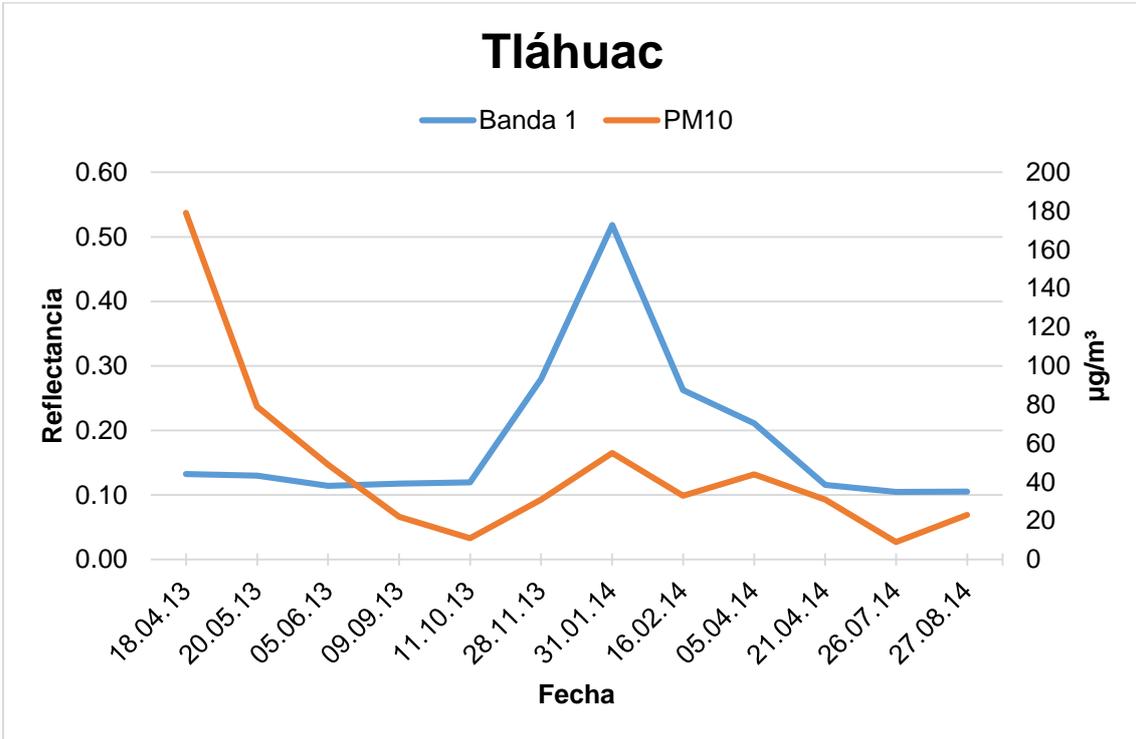


Figura 67. Gráfica comparativa Tláhuac PM10

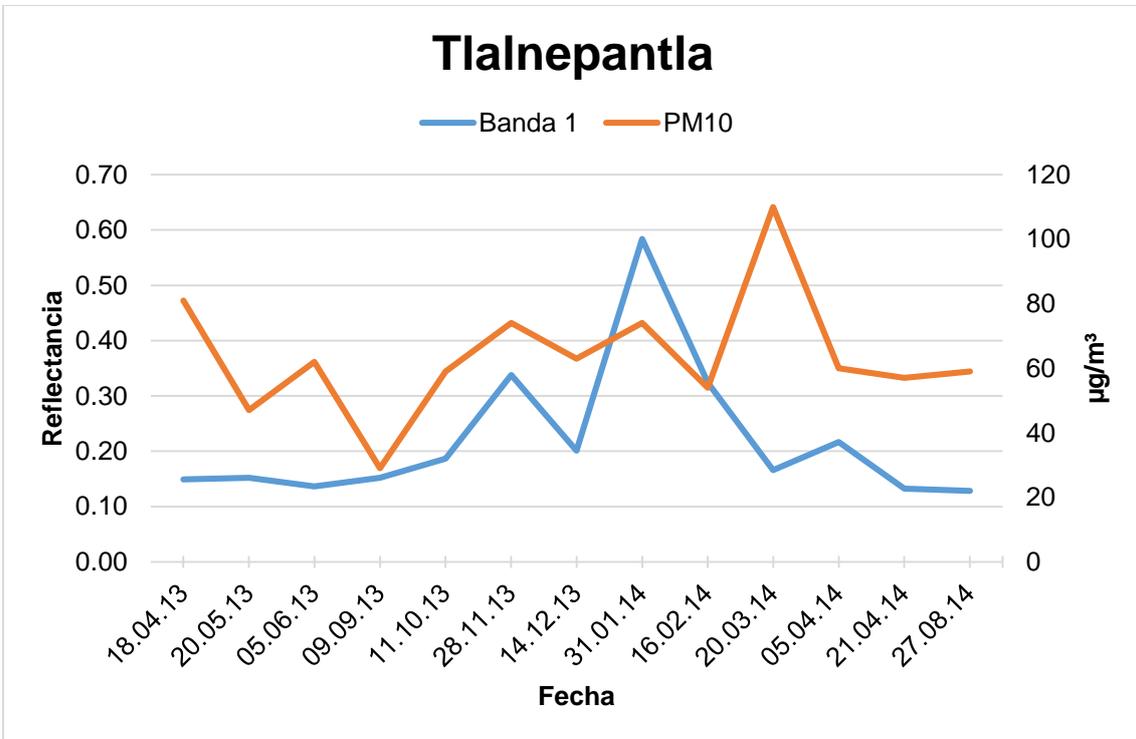


Figura 68. Gráfica comparativa Tlalnepantla PM10

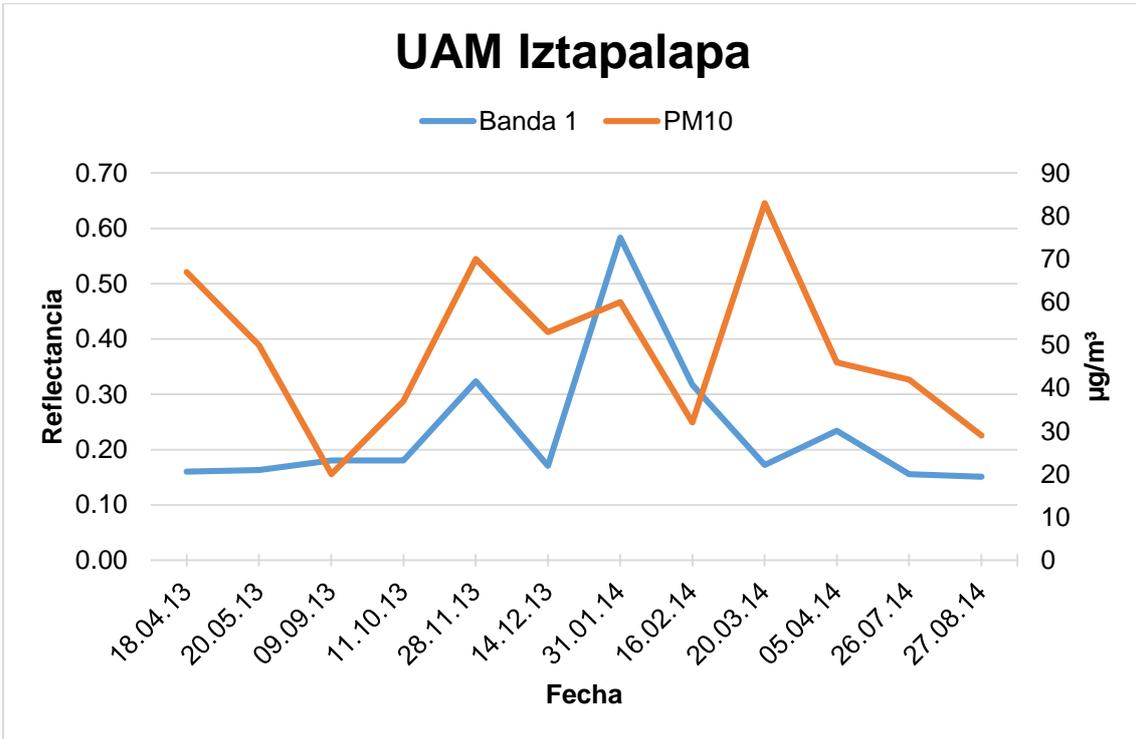


Figura 69. Gráfica comparativa UAM Iztapalapa PM10

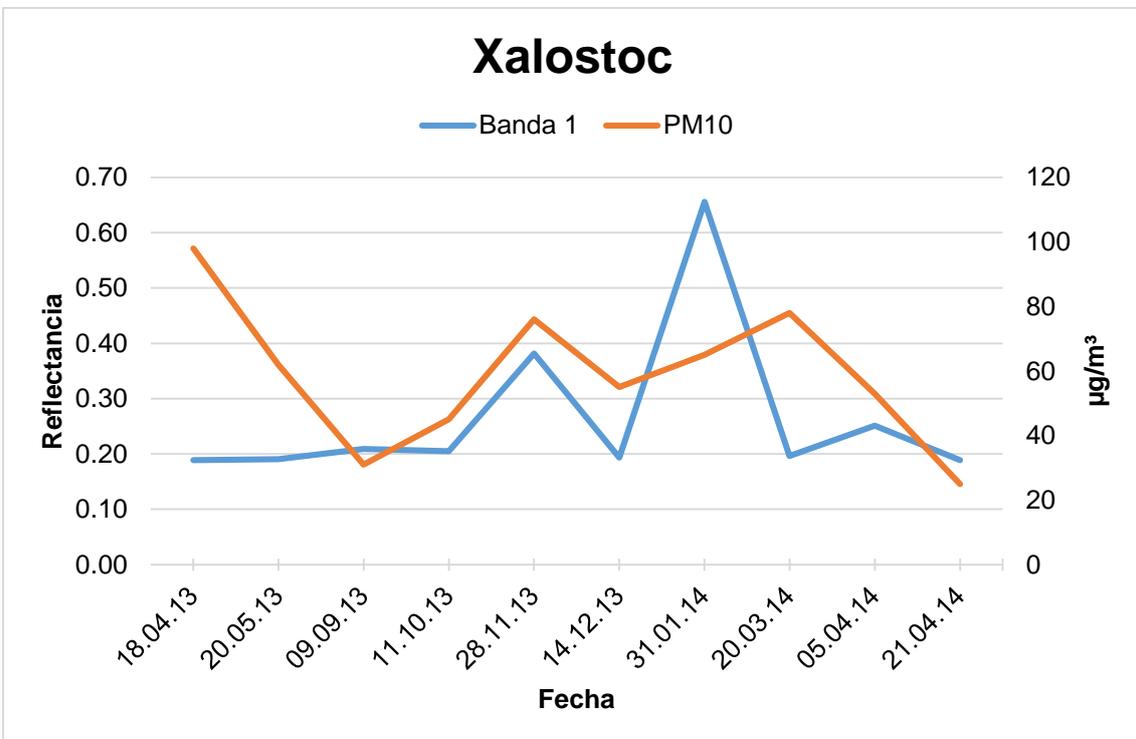


Figura 70. Gráfica comparativa Xalostoc PM10

6.1 Análisis

A partir de lo observado, se puede concluir que el momento en el que los resultados arrojados son más dispersos tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀, es durante la primera medición, el 18 de marzo de 2013. Sin embargo esto podría atribuirse a que fue una medición experimental y a partir de ese momento la recolección de datos se fue calibrando y afinando.

Es importante resaltar que las mediciones que arrojan resultados más afines son las últimas dos, del 5 y 21 de abril de 2014 pero la tendencia hacia una similitud y estabilidad de resultados se va acentuando conforme el tiempo avanza.

Generalmente, las mediciones de campo tienden a tener picos menos pronunciados que aquellas que se obtuvieron por percepción remota. Sin embargo, la fecha del 31 de enero de 2014 es una excepción casi constante. Debido a que las condiciones atmosféricas imperantes este día estuvieron dentro de lo común, la explicación más probable puede ser el inusual incremento en los niveles de PM que rigieron desde el 29 de enero hasta el primero de marzo; el hecho de que las mediciones satelitales no lo resentan de igual manera (aunque se nota un incremento respecto a otras fechas) puede deberse a una concentración alta de PM_{2.5} y PM₁₀, pero normal en cuanto a aerosoles se refiere.

Por otra parte, las mediciones del 20 de marzo de 2014 muestran lo contrario: una alta reflectancia y a su vez, una baja concentración de PM. La concentración de PM está dentro de lo que podría considerarse normal y la reflectancia se encuentra muy arriba del promedio. Lo más razonable sería asumir que debido a una presencia anormal de nubes, que son altamente reflectivas, las bandas hayan reportado esto último, conjuntamente con la reflectancia captada en la zona de interés.

Relativo a un análisis más específico por parámetros, las gráficas de PM₁₀ muestran, y con excepción de los casos ya mencionados, un paralelismo entre los resultados obtenidos con PR y en campo, ya que los incrementos y decrementos de PM en los datos reportados por el Sistema de Monitoreo Ambiental son secundados por la reflectancia reportada por la Banda 1 del Landsat 8.

Referente a las gráficas de PM_{2.5}, los resultados son menos contundentes; esto podría ser consecuencia de que, aunque dichos resultados no son incompatibles entre sí, el hecho de que la Banda 1 mida aerosoles en general, hace que el satélite capture y reporte mayormente PM₁₀, que a pesar de tener una menor presencia de partículas, es el parámetro que ocupa un mayor volumen, y por eso mismo, el que el sensor identifica más fácilmente, dando así la mayor parte de la reflectancia del conjunto de los aerosoles.

Entrando en el tema de los límites permisibles diarios de PM, los lugares evaluados se encuentran en la mayoría de las veces dentro de los límites deseables, significando esto que no contribuyen a elevar el promedio diario máximo reglamentado.

Finalmente, el hecho de que sea una plataforma reciente, hizo que los resultados no pudieran ser previsibles, haciéndolo más emocionante, y el haber operado en una ciudad que posee tantos diferentes microsistemas hizo que se pudieran incluir toda clase de ambientes en el estudio.

Capítulo 7. Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto de investigación, se pudo observar que la PR puede ayudar al área de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental para llevar a cabo revisiones en el estado de la contaminación del aire, aunque no de forma totalmente independiente a los métodos tradicionales por el momento, en virtud de que la percepción remota aplicada a aerosoles está todavía en fase experimental y aún se necesita realizar calibraciones.

La propiedad de la PR, de tener una visión sinóptica, permitirá crear un banco de datos enfocado al estudio de aerosoles, ya que imágenes generadas en diferentes fechas podrán aprovecharse junto con métodos tradicionales para profundizar en el mejoramiento de la Banda 1.

Debido a la reciente puesta en operación de la banda del espectro enfocada a los aerosoles, y con la captura de un mayor número de datos en diferentes tiempos y la mejora de las prestaciones de dicha banda, la PR se podrá utilizar para el monitoreo de los parámetros ambientales del aire con un alto grado de certeza, que podrían contribuir a una modelación futura.

Aunque durante la investigación se eligió estudiar partículas de tamaño PM_{2.5} y PM₁₀, hay otros indicadores tales como partículas de plomo, partículas suspendidas totales y los componentes químicos de las partículas a tomar en cuenta para el estudio de la contaminación del aire que podrían ser posibles de detectar por medio de la PR en el futuro cercano, con lo cual se logrará la creación de modelos cada vez más útiles y precisos.

Al inicio del proyecto había incertidumbre acerca de los resultados que se podrían obtener, especialmente al ser éste un estudio nuevo en el campo; fue difícil encontrar información durante el desarrollo, pero a pesar de esto y después de haberse realizado una exhaustiva revisión del estado del arte, se considera que en la presente investigación se obtuvo un grado de certeza similar a la de trabajos publicados en la literatura, sin perder de vista que todo esto es mejorable.

Se observó que los detonantes más importantes para la generación de contaminantes atmosféricos son el establecimiento de asentamientos urbanos, así como la existencia de industrias y carreteras cerca de la zona de estudio, con la existencia de pocas áreas verdes.

El estudio de los aerosoles tomará más importancia en el futuro próximo debido a los altos niveles de contaminación que se generan continuamente, y de no tomarse acciones preventivas y de remediación como programas de uso de transporte colectivo y establecimiento de estándares de operación más rígidos para las industrias, se podría llegar a tener un caos ambiental como el existente en varias metrópolis mundiales como el caso de Pekín, Los Ángeles y Nueva Delhi.

En Pekín hay una polución insana durante el 80 por ciento del tiempo y es común ver a los habitantes usando máscaras de gas; en Los Ángeles donde se ha comprobado que hubiera sido más barato prevenir los costos económicos y ambientales causados por la contaminación que lo que se está invirtiendo en repararlos. Nueva Delhi, declarada la ciudad más contaminada del mundo por la Organización Mundial de la Salud (OMS), es la capital de un país donde la contaminación atmosférica es ya la segunda mayor causa de muertes (1.3 millones el año pasado). Además, el hecho de que la ZMVM esté localizada en la base de cráter y rodeada de montañas aumenta el problema de la contaminación, al atrapar una capa de partículas suspendidas que cubre a la ciudad.

Con los datos obtenidos en este trabajo, se contribuye y abre el camino para que en México se realicen estudios de contaminación ambiental que sean más baratos, rápidos, precisos y eficientes, que permitan a las autoridades realizar acciones anticipadas, como la reubicación de industrias y la generación de nuevas normas para la emisión de gases contaminantes, que garanticen a la población respirar aire que contenga los parámetros de calidad adecuados con el mínimo de elementos dañinos a la salud.

Bibliografía

- Arbelo, Manuel. *Tutorial de Teledetección*. Universidad de La Laguna. España, 2004.
- Campbell, James et al. *Introduction to Remote Sensing*. Quinta Edición. USA. The Guilford Press, 2011.
- Clark, Pamela et al. *Remote Sensing Tools for Exploration*. USA. Springer, 2010.
- CONAGUA (2014). *Comisión Nacional del Agua*. Recuperado: 28 de Octubre de 2014. <http://www.conagua.gob.mx/>
- CSA (2014). *Canadian Space Agency*. Recuperado el 17 de Octubre de 2014. <http://www.asc-csa.gc.ca/eng/>
- Elachi, Charles et al. *Introduction to Physics and Techniques of Remote Sensing*. Segunda Edición. USA. Wiley, 2006.
- EPA (2014). *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 15 de Octubre de 2014. <http://www.epa.gov/>
- EPA. *List of Designated Reference and Equivalent Methods*. EPA, 2014.
- glovis (2014). *USGS Global Visualization Viewer*. Recuperado: 21 de Agosto de 2014. <http://glovis.usgs.gov/>
- Gupta, Pawan et al. *Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities*. Elsevier, 2006.
- Gupta, P. et al. *Multi Year Satellite Remote Sensing of Particulate Matter Air Quality over Sydney, Australia*. Taylor & Francis, 2007.
- INEEC (2014). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Recuperado: 13 de Septiembre de 2014. <http://www.inecc.gob.mx/index.php>
- INEGI (2014). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado: 25 de Septiembre de 2014. <http://www.inegi.org.mx/>
- ISRO (2014). *Indian Space Research Organization*. Recuperado: 17 de Octubre de 2014. <http://www.isro.org/>
- JAXA (2014). *Japanese Aerospace Exploration Agency*. Recuperado: 18 de Octubre de 2014. <http://global.jaxa.jp/>
- Kambezidis, H. D. et al. *Air Quality in the Athens Basin during Sea Breeze and Non-Sea Breeze Days Using Laser-Remote Sensing Technique*. Pergamon, 1998.
- Landsat (2014). *Landsat Missions*. Recuperado: 2 de Noviembre de 2014. <https://landsat.usgs.gov/>
- Lillesand, Thomas et al. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Sexta Edición. USA. Editorial Wiley, 2008.
- Martin, Randall V. *Satellite Remote Sensing of Surface Air Quality*. Elsevier, 2008.
- NASA (2014). *National Aeronautics and Space Administration*. Recuperado: 19 de Octubre de 2014. <http://www.nasa.gov/>
- Pahlevan, Nima et al. *On-orbit radiometric characterization of OLI (Landsat 8) for applications in aquatic remote sensing*. Elsevier, 2014.

Payan, Pakbin et al. *Spatial and Temporal Variability of Coarse (PM10-2.5) Particulate Matter Concentrations in the Los Angeles Area*. Taylor & Francis, 2010.

Ramos, Javier. *Obtención de Modelos de Calidad del Agua para el Embalse Villa Victoria, Estado de México, Aplicando Técnicas de Percepción Remota*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería. México, D.F. UNAM, 2013.

Robinson, M-C. et al. *Deriving Fluxes of Suspended Particulate Matter in the Humber Estuary, UK, Using Airbone Remote Sensing*. Pergamon, 1998.

SEMARNAT (2014). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado: 24 de Septiembre de 2014. <http://www.semarnat.gob.mx/>

SIMAT (2014). *Sistema de Monitoreo Atmosférico*. Recuperado: 28 de Octubre de 2014. <http://www.aire.df.gob.mx/default.php>

Sepúlveda, Rodrigo. *Diseño de Modelos de Calidad del Agua Mediante el Uso de la Percepción Remota*. Tesis de Maestría en Ingeniería. México, D.F. UNAM, 2011.

Sepúlveda, Rodrigo et al. *Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Técnicas de Percepción Remota*. Facultad de Ingeniería. México, D.F. UNAM, 2015.

Schowengerdt, Robert. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Tercera Edición. USA. Elsevier, 2007.

University of California Irvine. *Histogram Equalization*. Department of Mathematics. USA, 2008.

Vanhellmont, Quinten et al. *Turbid Wakes Associated with Offshore Wind Turbines Observed with Landsat 8*. Elsevier, 2014

Vázquez, Alba. *Evaluación de la Calidad del Agua Mediante Percepción Remota*. Tesis de Maestría en Ingeniería. México, D.F. UNAM, 2000.