

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO (CIIEMAD)

Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite GOES.

Tesis que presenta:

Ingeniero en Biónica Edgar Josué Arellano Hernández

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Directora de tesis:

DRA. MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO



México, D. F.

Noviembre 2011

Vo.Bo.

Dra. Ma. Eugenia Gutiérrez Castillo



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

 En la Ciudad de
 México, D.F.
 siendo las
 11:00
 horas del día
 18
 del mes de

 noviembre
 del
 2011
 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada

 por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de
 CIIEMAD

 para examinar la tesis titulada:
 "Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite

 GOES"

Presentada por el alumno:

Arellano	Hernández	ez Edgar Josué							
Apellido paterno	Apellido materno	Nombre(s)							
		Con registro:	A	1	0	0	0	7	2

aspirante de:

Maestro en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

Direct	tor de tesis
DRA. MARÍA EÚGEN	HA GUTIÉRREZ CASTILLO
DRA. MINERVA REBOLLAR PLATA	DR. VICTOR FLORENCIO SANTES HERNANDEZ
DR. ENRIQUE PÉREZ CAMPUZANO	DLEGIO DE PROFESORES
DRA. NORMA PAR	RICIA MUÑOZ SEVILLA PUBLICA INSTITUTO POLITECINICO
	CITEMAD DIRECCION



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de México el 9 de noviembre del año 2011, el que suscribe Edgar Josué Arellano Hernández, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad, con el número de registro A100072 adscrito al CIIEMAD – IPN, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo, y que cede los derechos del trabajo titulado: "Evaluación de aerosoles troposféricos del AMCM por medio de imágenes de satélite GOES", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directora del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: saho encb@yahoo.com.mx, mgutierrezc@ipn.mx, ciiemad@ipn.mx.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Edgar Josué Arellano Hernández

Índice General	Páginas			
Créditos	i			
Agradecimientos	ii			
Unidades, Acrónimos y Abreviaciones	iii			
Lista de Figuras	v			
Lista de Tablas	vi			
Resumen y Abstract	2,3			
1. Introducción.	4			
Hipótesis Objetivos: General y específicos	10			
2. Antecedentes.	11			
2.1 Evaluación de aerosoles vía satelital	11			
2.2 Monitoreo atmosférico en el AMCM	16			
3. Los aerosoles y los satélites	20			
3.1 Características de los aerosoles atmosféricos	20			
3.2 Características de los satélites				
3.3 Métodos de evaluación de aerosoles vía satelital	29			
4. Materiales y métodos	31			
4.1 Área de estudio	31			
4.2 Diseño estudio	33			
4.3 Fuentes información	33			
4.4 Tratamiento de imágenes y obtención de pixeles	38			
4.5 Desarrollo de algoritmo de AOD	39			
4.6 Construcción de la base final de datos	46			
4.7 Análisis estadístico	46			
5. Resultados y discusión	48			
5.1 Características de las variables atmosféricas medidas en campo	48			
5.2 Características y comportamiento de la profundidad óptica de los aerosoles (AOD)	54			
5.3 Correlación entre datos de campo de PA, contaminantes gaseosos y AOD.				
6. Conclusiones y perspectivas futuras				
7. Bibliografía				
Anexos : Productos de investigación derivados del trabajo				
Ponencias en congreso internacional y nacional				

Créditos

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Maestría fue realizado en las instalaciones del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, bajo la dirección de la Doctora María Eugenia Gutiérrez Castillo con el apoyo financiero de los proyectos de investigación CIIEMAD-IPN proyecto SIP número 20080469, 20100868 y 20113232 y de las becas Institucional de posgrado periodo Agosto 2010 y Diciembre 2011 y la Institucional de formación de investigadores periodo Febrero – Diciembre 2011.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Dr. Ángel Refugio Terán Cuevas y al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionar las imágenes que se empelaron en esta investigación y que sin su cooperación no se habría podido realizar.

También quiero agradecer profundamente a mi padre que me ha apoyado siempre, a mis hermanos (todos ellos) y al resto de mi familia en general por su apoyo que desde que inicie esta etapa estuvieron allí conmigo y que este triunfo es tanto mío como de ellos.

Y quiero hacer un agradecimiento especial a mi asesora la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo, primero por creer en mí desde el comienzo y por creer que este proyecto era posible, por apoyarme y guiarme en toda la maestría, segundo por verme acompañado en todos los momentos buenos y malos, y finalmente porque gracias a ella conocí a mi actual novia "la cosa "que quiero mucho, además de nuevos amigo en el CIC, y la ENCB.

Para terminar quiero dedicar este trabajo a la memoria del padre de mi amigo José Luis Bernabé Garduza, amigo no te rindas sigue adelante.

Acrónimos y abreviaturas

Siglas	Descripción
ADEOS	Advanced Earth Observing Satellite
AERONET	Aerosol Robotic Network
ACE	Atmospheric Chemistry Experiment
AMCM	Área Metropolitana de la Ciudad de México
AOD	Aerosol Optical Depth
AOT	Aerosol Optical Thickness
AVHRR	Advanced Very High Resolution
CALIOP	Cloud-Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization
CALIPSO	Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
ENVISAT	The Environmental Satellite
EOS	Earth Observing System
ERS-2	European Remote Sensing Satellite
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
HIRDLS	High Resolution Dynamics Limb Sounder
IASI	Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
LandSat	Land Satellite
MERIS	MEdium Resolution Imaging Spectrometer
MeteoSat	Meteorological Satellite
MetOP	Meteorological Operational Satellite (polar satellite series)
MHS	Microwave Humidity Sounder
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MODIS	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	Measurement of Pollution in the Troposphere senssor
MTSat	Multifunctional Transport Satellites
NASA	Nacional Aeronautics and Space Administration
NESDIS	National Environmental Satellite Data and Information Service
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

NPOESS	National Polar-orbiting Operational Environmental Satellite System
OMI	The Ozone Monitoring Instrument
PA	Partículas atmosféricas
PARASOL	Satelite Frances
PM _{2.5}	Partículas menores o iguales a 2.5 µm
PM ₁₀	Partículas menores o iguales a 10 µm
POLDER	POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
REDMA	Red manual de Monitoreo Atmosférico
REDMET	Red de Meteorología y Radiación Solar
SCIAMACHY	Scanning, imaging, and absorption spectrometer for atmospheric cartography
SCISAT	Scientific Satellite
SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
TSP	Total de Partículas Suspendidas
VIRS	Visible Infrared Imager Radiometer Suite

Lista de Figuras

Figura	Título	Página
1	Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de la RAMA, imagen obtenida de la página oficial del SIMAT	18
2	Interacción de la luz con los aerosoles	22
3	Esquema que ejemplifica algunos de los fenómenos ópticos que se producen por la interacción de la luz solar en una nube compuesta por diferentes partículas y elementos	22
4	Ubicación del área de estudio (Área Metropolitana de la Ciudad de México).	32
5	Diseño de investigación. Se muestra la estructura general de la metodología aplicada.	34
6	Base datos de parámetros atmosféricos de la RAMA.	35
7	Imágenes originales de la República Mexicana enviadas por el GOES. Despliegue de la imagen en formato vish.pcx (a) con nubosidad y b) sin nubosidad en el AMCM.	39
8	Proceso de georeferenciación y recorte de imágenes GOES de la republica Mexicana	40
9	Diagrama de flujo para la recuperación de AOD de las imágenes GOES	45
10	Distribución de la información en la base de datos general	46
11	Comportamiento anual de PM _{2.5} en las estaciones del AMCM para el año 2010.	51
12	Comportamiento anual de PM_{10} en las estaciones del AMCM para el año 2010.	52
13	Imágenes subsecuentes del satélite GOES y del mapa de AOD. Observación de la señal y dispersión de una nube de aerosol en el Estado de México mayo 2010.	57
14	Histogramas de distribución de las variables de estudio	60
15	Coeficientes de correlación lineal del modelo AOD GOES versus concentración de partículas en campo y covariables meteorológicas y gaseosas. Análisis de la base de datos completa y por agrupación espacial y temporal	63
16	Coeficientes de correlación lineal del modelo AOD GOES versus concentración de partículas en campo y covariables meteorológicas y gaseosas Análisis de la base de datos en subconjuntos por regiones.	65
17	Grafico de correlación entre la AOD y las PM _{2.5} de las tres estaciones en estudio durante el año 2010. A) ajustado y B) sin ajuste	66

Lista de Tablas

Tabla	Título	Página
1	Satélites empleados para medir parámetros de calidad	11
	del aire	
2	Estudios de evaluación de aerosoles atmosféricos vía	13
	imágenes de satélite MODIS	
3	Estudios relevantes relacionados con el objetivo de la	15
	investigación	
4	Sensores y satélites que envían datos continuos de	28
	aerosoles	
5	Características espectrales. Sensor IMAGER, a bordo	37
	del GOES 12 y 13	
6	Características de las imágenes multiespectrales del	37
	satélite GOES, de México en el periodo enero-diciembre	
	2010.	
7	Parámetros estadísticos descriptivos de los datos	53
	mensuales de las PA en estudio	
8	Análisis de Varianza de promedios anuales de PA	54
9	Parámetros estadísticos descriptivos de los datos	58
	mensuales de la AOD-GOES visible.	
10	Total de variables atmosféricas en estudio. Datos útiles y	59
	perdidos.	
11	Coeficientes de correlación lineal para modelo múltiple	62
	AOD vs PA y gases criterio y variables meteorológicas	
12	Coeficientes de correlación lineal para modelo múltiple	64
	AOD vs $PM_{2.5}$, PM_{10} y gases criterio y variables	
	meteorológicas por estación.	

Resumen

La evaluación de aerosoles urbanos vía percepción remota ha incrementado su interés debido a las evidencias del efecto de los aerosoles en la transferencia de la radiación solar, el clima, la calidad del aire y la salud humana. La calidad del aire en las megaurbes se monitorea tradicionalmente vía redes de monitoreo que emplean datos de concentración de PA y gases criterio para evaluar las emisiones y los cambios en la calidad del aire, en estaciones puntuales. La percepción remota proporciona una moderna herramienta para monitorear los aerosoles y gases a escala local y regional justo porque está en constante actualización y desarrollo, lo que permite la observación de ciudades con instrumentos de alta resolución espacial-temporal. Este estudio explora la capacidad del Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES) para detectar aerosoles urbanos en localizaciones dispersas a lo largo del Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM). La profundidad óptica de los aerosoles (AOD) recuperada del canal 1 (visible, 0.52-0.71 µm) del GOES 12 y 13 se compara con las observaciones hechas en tierra por las estaciones de monitoreo de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México, tanto de PM₁₀ y PM_{2.5} como de gases criterio y variables meteorológicas para apreciar su efecto sobre esta propiedad. Además, se utilizó información del canal 4 (infrarrojo, 10.2-11.2 µm) para remover señales remanentes de nubosidad y vapor de agua. Las imágenes satelitales multi-temporal libres de nubosidad y el algoritmo basado en el análisis de la reflexión solar mostraron variación local y estacional del AOD de los aerosoles. El modelo de regresión lineal múltiple empleado permitió explicar la variabilidad temporal, aunque no capturo toda la variabilidad espacial de las tres regiones del AMCM. Las regresiones lineales múltiples tienen un poder de predicción juzgado por r^2 ajustado en el rango de 0.4 - 0.6. Los resultados obtenidos permiten afirmar que la profundidad óptica obtenida del canal visible del satélite GOES es capaz de predecir la variabilidad de la concentración diaria de PM_{10} y $PM_{2.5}$ a escala regional.

Palabras Clave: Aerosoles urbanos, GOES, percepción remota, profundidad óptica del aerosol, AMCM.

Abstract

Urban aerosol assessment by remote sensing arouses increasing interest due to the mounting evidence of the aerosol effects on radiative transfer, climate, air quality and human health. Urban air quality has traditionally been monitored with networks of ground monitoring stations that use PM and criteria gases concentration to evaluate emissions and changes in air quality at discrete points. Remote sensing provides a modern way to monitor aerosols and gases at local and regional scale just because it is currently in significant development thanks to the achievement of instruments allowing the observation of cities at high spatial temporal resolution. This study explores the ability of the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) to detect urban aerosol for locations scattered in Mexico City Metropolitan Area (MCMA). The aerosol optical depth (AOD) retrieved from GOES 12 and 13 channel 1 (the visible, 0.52-0.71 µm) is used to compare with ground-based observations particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) measured as part of the Atmospheric Monitoring Network from Mexico City (SIMAT, GDF) and meteorology parameters are considered like contributors to this aerosol optical property. In addition, information from channel 4 (infrared, 10.2-11.2 µm) are used to remove remaining clouds signal from the comparisons using spectral difference and spatial uniformity tests. The multitemporal satellite cloudfree images and algorithm based on the analysis of solar reflectance show seasonality and aerosols local variations in AOD. The multiple linear regressions have a predicting power judged by adjusted r^2 in the range 0.4 – 0.6. The AOD model explains the temporal variability, but not captures all the aerosol spatial variability in the three discrete regions of MCMA. AOD GOES visible is able to predict the temporal variability in daily PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at regional scale.

Keywords: Urban aerosols, GOES, remote sensing, Aerosol Optical Depth (AOD), MCMA.

1. Introducción

Los aerosoles atmosféricos tienen un efecto crítico en la calidad del aire y en la salud humana (Pope y Dockery, 2006; Liu et al., 2009), aunado al impacto aún no bien definido en el balance de la energía radiante en el sistema tierra atmósfera y por tanto en el clima a escalas regional y global (Löndahl et al., 2010). Numerosos avances científicos y tecnológicos en materia de contaminación por partículas atmosféricas (PA) han sido documentados a fin de mejorar el entendimiento de las causas, impacto y control de este contaminante criterio que es persistente en muchas regiones del mundo (USEPA, 2004).

La creciente atención y alta prioridad que la comunidad científica, las agencias ambientales, las autoridades y los tomadores de decisiones han otorgado al monitoreo, investigación y control de los aerosoles atmosféricos, se relacionan principalmente a la defensa de la salud humana debido a que este contaminante se ha tipificado como factor de riesgo en la morbilidad y mortalidad cardiopulmonar y cáncer pulmonar (Pope et al., 2002). Más recientemente y en menor proporción ha preocupado el cambio que la contaminación por partículas atmosféricas (PA) produce en la propagación de la radiación solar, la visibilidad, el albedo global y su acción como agentes nucleantes lo que deriva en modificaciones de las características nube/precipitación y por tanto en los patrones de la precipitación pluvial y el clima (Kaufman y Koren, 2006; Yu et al., 2008).

A pesar de los múltiples esfuerzos, este contaminante atmosférico todavía permanece poco comprendido, un conocimiento científico más profundo de las propiedades de los aerosoles y su comportamiento espacio - temporal es esencial para la reducción de la emisiones y el mejoramiento de la calidad del aire. De especial urgencia es el entendimiento del comportamiento de las PA en megaciudades densamente pobladas como el Área Metropolitana de la Ciudad de México, región donde los estándares de calidad se exceden frecuentemente (SMA-DF, 2010).

El monitoreo de los aerosoles atmosféricos se efectúa a través de la valoración de alguna (s) de sus propiedades físicas y químicas, que pueden ser medidas in situ o vía percepción remota desde la superficie terrestre, aeroplanos o satélites. Tradicionalmente, la contaminación por partículas atmosféricas y su impacto en la calidad del aire se ha delimitado a través de observaciones puntuales en la superficie terrestre, utilizando métodos bien establecidos que evalúan de manera confiable el tamaño y concentración de las PA en estaciones fijas (*in situ*) que forman parte de extensas redes de monitoreo, la capacidad de estos muestreos depende del tipo de contaminante y de las condiciones meteorológicas y topográficas de las regiones. Diversas agencias ambientales en distintas partes del mundo dan seguimiento cotidiano a la concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} en numerosos sitios sobre todo a través de sus jurisdicciones urbanas, aún a pesar de que estas densas redes tienen una limitada cobertura geográfica, un alto costo de instalación y mantenimiento. Las mediciones puntuales aportan información de la amplia variedad de procesos naturales y antropogénicos que dan origen a los aerosoles y de la variación de sus características con respecto de la localización geográfica de las regiones y con el tiempo (Kaskaoutis et al., 2010), pero no son necesariamente representativas de la concentración regional y la variabilidad regional de las PA. Esta situación hace oportuna la investigación y desarrollo de otros procedimientos de evaluación que permitan la interpolación de las observaciones *in situ* y la posibilidad de complementarlas con otras fuentes de datos, la revisión de las metodologías sugiere que la percepción remota es un procedimiento valorable para su exploración debido a su menor costo y a las repetitivas y amplias observaciones que se realizan de las mismas áreas (Emili et al., 2011).

La aplicación de observaciones satelitales a la atmósfera terrestre ha avanzado considerablemente, por lo que la evaluación global de los aerosoles vía percepción remota promete complementar y mejorar substancialmente la estimación de los parámetros espaciales y temporales de las PA y por tanto los escenarios de exposición de la población. En particular, los procedimientos de

monitoreo de aerosoles a través de percepción remota han incrementado su uso sobre todo para la construcción de mapas de aerosoles en la atmósfera. Las imágenes de satélite se han empleado para visualizar y seguir la contaminación a larga escala, para estudiar la distribución espacial y las propiedades ópticas de los aerosoles sobre todo en episodios críticos de contaminación donde es importante dar seguimiento al crecimiento y dispersión de las nubes de aerosoles. Algunos beneficios adicionales están relacionados con el logro de una visión más real, completa y sinóptica de grandes áreas, es una herramienta poderosa, moderna y de uso relativamente reciente que evalúa las propiedades ópticas de los aerosoles, es más rápida y menos costosa comparada con los métodos tradicionales empleados en las campañas *in situ* (van Donkelaar et al., 2010).

El uso de imágenes de satélite para la caracterización global de aerosoles troposféricos tiene una larga historia, diversos satélites con múltiples sensores a bordo han posibilitado la percepción remota de gases y aerosoles desde el espacio, dentro de los primeros dispositivos espaciales que aportaron información relacionada con las propiedades físicas de los aerosoles se tiene a los enviados en 1978 por Estados Unidos, país que inicio con la serie NOAA 7, 9 y 11 que integraban el sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution), hasta los sofisticados sensores MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) desarrollados por la NASA y enviados a bordo del Terra EOS (Earth Observing System) en 1999, seguidos por la serie de satélites de la Agencia Espacial Japonesa ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) enviados en 1996 y los manejados por la Agencia Espacial Europea en el programa Envisat-1 desde 1999 (King et al., 1999).

Numerosas mediciones obtenidas a través de diferentes sensores a bordo de los satélites y de variadas regiones geográficas se han enviado a tierra para su análisis, este escenario ha permitido mejorar el conocimiento que se tiene acerca de las ventajas y limitaciones de los sensores, además de posibilitar la identificación de las principales diferencias de los instrumentos. Por otra parte, la

disponibilidad y calidad de los datos aunada a la cobertura y resolución de los satélites, coadyuva al enriquecimiento de la experiencia en este tipo de tecnologías y a valorar la necesidad de contrastar la información con la proveniente de estudios en campo.

Basados en la información publicada, sabemos que la mayor cantidad de datos para la evaluación de aerosoles provienen de lo que rutinariamente envían: el sensor MODIS (que viaja sobre el satélite Aqua/Terra), el sensor MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer integrado al satélite Envisat) y el sensor MIRS (Multi-angle Imaging Spectroradiometer que viaja en el satélite Terra), este tipo de información se ha tornado de primordial relevancia en virtud de que estos instrumentos cuentan con una adecuada cobertura espacial y temporal, además operacionalmente tienen gran disponibilidad debido a que muchos de sus productos están distribuidos libremente, y de que han conservado la información histórica. Particularmente, las bases de datos de MODIS son muy atractivas porque permiten estimar la distribución de aerosoles sobre la tierra y el océano durante diferentes periodos, además de contar con información histórica en series de tiempo diarias y anuales de diversas regiones (que puede ser reprocesada), al mismo tiempo la operación de las distintas generaciones de satélites ha permitido aplicar múltiples pruebas de calidad para validación de la información, no obstante MODIS posee una limitada resolución temporal (Heiberg et al., 2010).

La alta resolución temporal requerida por muchas de las aplicaciones de calidad del aire, aunada a la necesidad de entender simultáneamente las variaciones temporales y espaciales de los aerosoles ha llevado a los investigadores a explorar los beneficios de la información proveniente de la serie de satélites GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), aprovechando que los sensores integrados a su plataforma proporcionan numerosas observaciones por día (Knapp et al., 2002). Este tipo de satélite inicio sus operaciones en 1978, diseñado inicialmente para enviar continuamente datos

de variables meteorológicos, evolucionó para proporcionar datos de plumas de humo generadas como consecuencia de incendios forestales. Aunque, los estudios relacionados con el monitoreo de aerosoles a través de instrumentos satelitales como el GOES, se documentan desde 1987, no es sino hasta la primera década de los años 2000 que se intensifica la caracterización de las propiedades ópticas, el análisis de la variabilidad y distribución de los aerosoles en la escala del tiempo, información crucial para el seguimiento en tiempo real de la calidad del aire. Actualmente, la NOAA / NESDIS (por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos realiza estudios rutinarios con el satélite GOES del Este para desarrollar productos relacionados con los aerosoles y humos que se generan en las distintas regiones de este país, con el propósito de proveer datos para el perfeccionamiento de los satélites de nueva generación, además de desarrollar aplicaciones que complementen la información de sus programas de calidad del aire (Laszlo et al., 2008).

En México, específicamente en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), la carga atmosférica de aerosoles se evalúa de manera rutinaria en 20 de 34 estaciones puntuales de la Red Automática de monitoreo atmosférico (RAMA), subsistema del SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico del D.F.). La información horaria y diaria que se reporta enfatiza en la valoración de aspectos como la concentración y el tamaño de las partículas. Las estaciones se encuentran ubicadas estratégicamente en el AMCM (21 ubicadas en el D.F. y 13 en el Estado de México), 11 de ellas proporcionan información de PM₁₀ y 9 de PM_{2.5} y solo tres de estas estaciones realizan mediciones simultáneas de partículas de ambos tamaños y de otros cuatro contaminantes criterio (O₃, CO, NOx y SO₂). El SIMAT ha realizado esfuerzos notables para proporcionar cotidianamente un panorama fiable de la calidad del aire en la región, adaptándose y evolucionando para atender las demandas y misiones del programa para mejorar la calidad del aire en el AMCM (SEMARNAT, 2003; SIMAT, 2010). A pesar de los ajustes aplicados en el sistema, en reiteradas ocasiones los criterios de localización y operación de las estaciones se ven

rebasados por cuestiones técnicas, económicas y/o políticas (ej. alto costo de la operación y mantenimiento de los equipos, vacíos de información en las bases de datos, la expansión desmedida, acelerada y no controlada de la región urbana entre otras).

En las condiciones de la evaluación actual de la calidad del aire en México, es importante valorar un mecanismo alterno y complementario de monitoreo de aerosoles que apoye la delimitación de un escenario más real de su variación y distribución espacio temporal, condición sin la cual es difícil dimensionar de manera certera la exposición de la población del AMCM. Indudablemente, el uso de herramientas modernas como la percepción remota son de gran utilidad para este propósito, desafortunadamente en México los estudios relacionados con la aplicación de estas tecnologías son incipientes. El trabajo más relacionado con este tipo de monitoreo se ha efectuado desde 1998 por el Servicio Meteorológico Nacional de la CONAGUA que en colaboración con la NOAA implantaron un sistema de detección y seguimiento de incendios forestales y de las densas plumas de humos derivadas de ellos, este protocolo de monitoreo emplea las imágenes GOES del canal visible (Terán et al., 2009), otros dos estudios presentan información correspondiente a la identificación y observación de aerosoles vía MODIS, pero en ninguno de los trabajos se practica la evaluación cuantitativa de ellos (Massie et al., 2006; de Almeida et al., 2007).

En este contexto, se exploró la capacidad del satélite GOES para evaluar los aerosoles urbanos emitidos al aire de diferentes subregiones del AMCM, por medio del parámetro de profundidad óptica y analizar su correlación con los niveles de concentración reportadas en el monitoreo en campo que realiza el SIMAT, para establecer un modelo cuantitativo de estimación de aerosoles, aprovechando que la plataforma de este satélite proporciona numerosas observaciones por día (un total de 48) lo que posibilitaría un seguimiento de estos contaminantes en alta resolución temporal.

Hipótesis

La reflexión de la radiación solar originada por los aerosoles troposféricos del AMCM y calculada de las imágenes del canal visible del satélite GOES, puede ser empleada para parametrizar su profundidad óptica y correlacionarla con la concentración de partículas atmosféricas de la región.

Objetivo General

Estimar la profundidad óptica de los aerosoles suspendidos en el aire del Área Metropolitana de la Ciudad de México, durante el año 2010, usando datos de radianza de las imágenes del canal visible del satélite GOES 12 y 13 y compararla con los datos de concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenida en campo en las estaciones de monitoreo del SIMAT.

Objetivos específicos

- Seleccionar datos de campo de PM_{2.5}, PM₁₀, gases criterio y variables meteorológicas del AMCM entre noviembre 2009 - diciembre 2010 y determinar las estaciones de monitoreo para estudio.
- Clasificar y seleccionar imágenes de México, libres de nubosidad, provenientes de los canales visibles e infrarrojo del satélite GOES para el periodo en estudio.
- 3. Procesar imágenes GOES 12 y 13: conversión de formatos, georeferenciación, recorte del área de estudio y cálculo de los pixeles.
- Desarrollar el algoritmo para el cálculo de la profundidad óptica de los aerosoles a partir de la conversión de radianza directa y que opere con series de tiempo.
- 5. Parametrizar la AOD de las tres regiones en el periodo de estudio.
- 6. Estudiar el comportamiento y relaciones de los contaminantes criterio, variables meteorológicas y AOD a través de procedimientos estadísticos.

2. Antecedentes

2.1 Evaluación de aerosoles vía satelital.

La primera aplicación de la percepción remota satelital a la observación de los aerosoles se realizó en 1976 usando el AVHRR, Landsat y los sensores del GOES para observar las partículas del desierto pasando sobre el océano, posteriormente en 1992 para observar el SO₂ volcánico y el sulfato que se había formado (Martin, 2008). Algunos otros sensores satelitales proporcionan información de diversos parámetros de la calidad del aire, en la Tabla 1 se presenta un resumen de las características de los principales satélites empleados para la percepción remota de aerosoles y gases reactivos en la tropósfera.

Instrumento	Plataforma	Periodo de medición	Cobertura global en (días)	Resolución espacial km	Rango espectral (µm)	Contaminante
GOME	ERS-2	1995-2003	3	40 x 320	0.23-0.79	NO2, HCHO, SO2, O3
MOPITT	Terra	2000-	35	22	4.7	CO
MISR	Terra	2000-	7	360	4 bandas	Aerosoles
MODIS	Terra y Aqua	2002-	2	0.250 (bandas 1-2) 0.500 (bandas 3-7) 1 (bandas 8-36)	36 bandas	Aerosoles
SCIAMACHY	ENVISAT	2002-	6	60 x 30	0.23-2.3	NO ₂ , HCHO, CO, SO ₂ , O ₃
OMI	Aura	2004-	1	13x24	0.27-0.50	NO ₂ , HCHO, CO, SO ₂ , O ₃ Aerosoles
PARASOL	PARASOL	2004-	1	6 x 6	9 bandas	Aerosoles
CALIOP	CALIPSO	2006-	16	5	0.53-1.06	Aerosoles
IASI	MetOP	2006-	0.5	25	3.6-15.5	CO, O ₃

Tabla 1. Satélites empleados para medir parámetros de calidad del aire

Modificado de Martin, 2008

Una revisión y análisis detallado de las investigaciones realizadas en materia de detección, observación y monitoreo de aerosoles vía imágenes de satélite muestra un desarrollo substancial en las pasadas dos décadas. El método más empleado para la obtención de información corresponde al análisis de

imágenes recuperadas, debido a que permite rescatar datos de la radiación atenuada por los aerosoles de la reflexión de la atmósfera y de la superficie terrestre. Este procedimiento ha proporcionado información de las propiedades de los aerosoles a escala global, aunque muchas de las características restantes son aún desconocidas para la mayoría de los satélites. Por otra parte, la mayoría de los estudios se han desarrollado a través del análisis de las imágenes MODIS y del MISR (Multi angle Imaging Spectro-Radiometer), debido a su gran potencial espectral (36 canales) para mapear la distribución global de los aerosoles, que proporcionan información de las condiciones de la atmósfera, tierra y océano.

En la Tabla 2, se integra información relevante de distintos estudios que han evaluado el comportamiento de aerosoles continentales, marinos, antropogénicos o de los derivados de la quema de biomasa, para diferentes partes del mundo con datos provenientes del sensor MODIS con la aplicación principal de inferir la concentración de PA en la tropósfera a partir de estas imágenes de satélite.

Un grupo líder en esta temática corresponde a Gupta et al. (2006, 2008) quienes lograron estudiar la fracción fina de los aerosoles (PM_{2.5}) en 26 diferentes lugares de distintos países. En esta misma tabla se puede distinguir también algunos puntos comunes como son el rango espectral y los parámetros ópticos en los que se basaron las evaluaciones. Se ha reportado también que esta tecnología enfocada al estudio de la contaminación permite: localizar plumas de humo como consecuencia de incendios y dar seguimiento a su dispersión, estimar las partículas de carbón en aeropuertos (Hadjimitsis et al., 2002; Gupta et al., 2006; Nu et al., 2006; Yu et al., 2008).

Algunos otros proyectos como el de la evaluación de la calidad del aire en el estado de Texas han empleado el satélite MODIS para apoyar la identificación de fuentes emisoras locales o foráneas (Hutchison, 2003), otros tantos están siendo enfocados a evaluar la intensidad e impacto de niebla, humo y polvo en regiones urbanas y suburbanas (Engel et al., 2004).

Tipo aerosol	Sensor	Plataforma	Rango espectral	Región	Periodo	Parámetro óptico	Referencia
PM _{2.5} y PM ₁₀	MODIS	Terra	0.55 µm	Beijing, china	2007-2008	AOT vs datos campo	Wang et al., 2010
CO y PM ₁₀	MODIS	Terra y Aqua	0.55 µm	Ciudad México	2003	AOD vs datos campo	Massie et al., 2006
Continental, marinos y polvo desierto	MODIS	Terra	0.55 µm	Mediterráneo	2001	AOT vs coeficientes extinción	Barnaba y Gobbi, 2004
PM ₁₀ , antropogénico, quema biomasa	MODIS	Terra y Aqua	0.47, 0.55,0.66 µm	Gwangju, Korea	2005	AOD vs coeficientes extinción y CO/CE	Noh et al., 2009
PM _{2.5}	MODIS	Terra y Aqua	0.47 y 0.67 µm	26 lugares	2002	AOTvs datos campo	Gupta et al., 2006
PM _{2.5}	MODIS	Terra y Aqua	0.47 y 0.67 µm	Birmingham, Inglaterra	2000-2006	AOTvs datos campo	Gupta, et al., 2008
Niebla continental, polvo del desierto e incendios	MODIS - IMAGER	Terra -GOES	0.469µm-645µm	Texas , EUA	2002	AOTvs datos campo	Hutchinson, K.D. 2003
Emisiones urbanas e incendios	MODIS	Terra	0.400µm-700µm	México	2006	No aplica	Crounse, J.D, et al. 2009
PM _{2.5} y PM ₁₀	MODIS	Aqua Y Terra	0.400µm-700µm	EUA	2002	AOD vs datos campo	Engel-Cox et al, 2004
PM, Industrial, y antropogénico	MODIS	Aqua Y Terra	0.400µm-700µm	EUA-ASIA	2002-2005	AOD vs simulación	Yu et al. 2008

Tabla 2 Estudios de evaluación de aerosoles atmosféricos vía imágenes de satélite MODIS

Además de los resultados obtenidos que apoyan la valoración de la contaminación en regiones remotas, existen aquellos obtenidos por otros métodos que llaman la atención, como los que generan los profesionales de atención médica (Weinhold, 2009), que permite la planeación de mejoras en el diseño de los satélites de nueva generación.

En otro orden de ideas es relevante distinguir, dentro del análisis del estado del arte del monitoreo satelital de aerosoles, las investigaciones que han aplicado al satélite GOES y/o en combinación con MODIS, aquellas que contrastan los datos satelitales con datos de campo y aquellas que han realizado sus estudios en la Ciudad de México, dadas sus posibles coincidencias con el estudios aquí descrito. En la Tabla 3 se observa que el grupo de trabajo de Hutchinson (2003), Liu et al. (2009) y Hoff et al. (2010) han proporcionado evidencias de la funcionalidad del satélite GOES para identificar y cuantificar los aerosoles, en tanto que Knapp et al. (2002, 2005) ha proporcionado información importante respecto al desarrollo de algoritmos para la parametrización de propiedades ópticas de los aerosoles.

Consideramos nuevamente al grupo de Gupta et al. (2006 y 2008) dado que en varios de sus estudios ha comparado la información satelital con los datos en campo generada por las redes de monitoreo de las distintas regiones evaluadas. Finalmente, se identifican tres trabajos realizados en la Ciudad de México en los que se empleo el sensor MODIS (Massie et al., 2006; de Almeida et al., 2007; Crounse, et al., 2009) y cuya primera aproximación es la observación de los aerosoles urbanos en la zona y el inicio del cálculo de parámetros ópticos que posibiliten la cuantificación de estos contaminantes.

El análisis del estado del arte, permitió identificar los grupos líderes, las metodologías más empleadas, las consideraciones para el desarrollo de los algoritmos que derivan en el cálculo de parámetros ópticos y de las cuales hablaremos en el siguiente apartado.

Tipo aerosol	Sensor	Plataforma	Rango espectral	Región	Periodo	Parámetro óptico	Referencia
PM urbanos, quema biomasa y gases	MODIS	TERRA	0.47 y 0.67 µm	México	Primavera 2006	-	Crounse et al., 2009
CO y PM ₁₀	MOPITT MODIS	Terra y Aqua	0.55 µm	Ciudad México	2003	AOD <i>vs</i> datos campo	Massie et al., 2006
PM _{2.5}	MODIS	NASA Terra y Aqua	0.47 y 0.67 µm	Birmingham, Inglaterra	Feb 2000 - Jun 2006	AOT <i>vs</i> datos campo	Gupta, et al., 2008
PM _{2.5}	MODIS	NASA Terra y Aqua	0.47 y 0.67 µm	26 lugares	Ene–Dic 2002	AOT <i>vs</i> datos campo	Gupta et al., 2006
PM _{2.5}	MODIS y GOES	NASA Terra y GOES	0.47, 0.67 y 0.55 µm	Baltimore, Washington,	2004-2005	AOD <i>vs</i> datos campo	Hoff et al., 2010
PM _{2.5}	IMAGER	GOES	0.469µm-645µm	Massachuset, USA	2009	AOD vs datos campo	Liu et al., 2009
Niebla continental, humos de incendios	MODIS - IMAGER	TERRA -GOES	0.469 - 645 µm	Texas , EUA	Septiembre 2002	AOTvs datos campo	Hutchinson, 2003
Nubosidad	IMAGER	GOES	0.52–0.72 µm	Chile	Otoño- invierno 2001	Umbrales de reflectividad	Farias et al., 2001
Aerosoles urbanos	IMAGER	GOES	0.52–0.72 µm	Sudamérica	2002	AOD vs datos campo	Knapp et al., 2005.
Aerosoles urbanos	IMAGER- MODIS	GOES- TERRA	0.469 - 645 µm	Estados Unidos	2001	Reflectancia de IMAGER y MODIS	Knapp et al., 2002.
Aerosoles urbanos	MODIS	TERRA	0.47 μm and 0.66 μm	México, D.F.	2002 - 2005	Reflectancia	de Almeida et al., 2007

Tabla 3 Estudios relevantes relacionados con el objetivo de la investigación

2.2 Monitoreo atmosférico en el Área Metropolitana de la ciudad de México

Para conocer los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos a los que la población puede estar expuesta y conocer los elementos que componen los aerosoles de la atmósfera es necesario tener instrumentos que proporcionen información confiable de la concentración de contaminantes, los procedimientos menos robustos corresponden a los inventarios de emisiones que se estructuran con información proporcionada por las fuentes emisoras o por cálculos de los materiales y equipos empleados en los distintos procesos, otros procedimientos incluyen la modelación de fuentes emisoras, que sirve para predecir una cantidad aproximada de aerosoles u otros contaminantes criterio en el aire dependiendo de la fuente que los emite. Este método hace una estimación de concentración de partículas basándose en las diferentes variables involucradas pero únicamente tomando en cuenta una sola fuente que pueda emitir las partículas, cuando en la modelación se desea analizar simultáneamente diversas variables, entonces el método se hace complejo en función del tipo de fuente, número y tipo de variables que se involucran (Economopoulos, 2002; Dragutin, 2009).

Otro método que se emplea tradicionalmente en el AMCM es el monitoreo en campo (in situ), este método se basa en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. establece los procedimientos determinar que para las concentraciones de partículas en el medio ambiente (SEDESOL, 1994). La Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, ha diseñado y operado su propia red de monitoreo para conocer la calidad del aire en el AMCM, esta red tiene su antecedente histórico desde hace 40 años cuando se realizaban mediciones de forma rutinaria, desde esa fecha hasta la actualidad se han establecido diferentes tipos de redes que han dado seguimiento a la calidad del aire en conjunto con parámetros meteorológicos que se han unido para brindar información a la población.

Actualmente, la entidad responsable de la evaluación de la calidad del aire en esta región es el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT, GDF), que está integrada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) que contiene 34 estaciones; la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) con 12 estaciones y la Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) que opera con 16 estaciones.

La Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), es el subsistema encargado de hacer mediciones continuas y permanentes de seis contaminantes criterio ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5}); todos a través de métodos estandarizados y validados internacionalmente. La información que se proporciona es primordial para calcular el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) y declarar los niveles de cumplimiento de la normatividad mexicana. Sus 34 estaciones de monitoreo se encuentran ubicadas en diferentes partes de la Ciudad de México, con 21 estaciones dentro de Distrito Federal y 13 en el Estado de México como se ilustra en la Figura 1. Los criterios en los que se basaron para la colocación de las estaciones es: densidad de población, distribución de fuentes de emisión, meteorología y topografía.

La REDMET es el subsistema del SIMAT que proporciona información de datos meteorológicos para elaborar el pronóstico meteorológico del día y de modelos de dispersión, cuenta con 16 estaciones de monitoreo dispersas en diferentes puntos, 10 en el Distrito Federal y 6 en el Estado de México.

Las diferentes redes de monitoreo del SIMAT, han sido auditadas por EPA lo que da certeza de que sus evaluaciones se realizan con métodos certificados. A pesar, de que estos subsistemas de redes, se encuentran operando normalmente y han cumplido con las auditorías externas e internas, existen algunos vacíosde información en las estaciones.



Figura 1. Distribución espacial de las estaciones de monitoreo de la RAMA, imagen obtenida de la página oficial del SIMAT.

Uno de los puntos más críticos, del diseño actual del las redes es la cobertura completa de la región, debido a que: la mayor parte de las estaciones de monitoreo se encuentran ubicadas dentro del D.F. y en menor proporción se ubican en los municipios de la zona conurbada (Figura 1), lugar donde actualmente se encuentran residiendo entre 10 y 12 millones de habitantes, evidentemente esto no es responsabilidad de la SMA-D.F., dado que su área de jurisdicción está cubierta y ha venido apoyando las actividades de monitoreo en los centros conurbados. Por otra parte, de las 34 estaciones que integran la RAMA, solo 3 proporcionan información completa de los seis contaminantes

criterio y de variables meteorológicas, en tanto que en el resto de los lugares se miden solo algunos de ellos y no todos simultáneamente y en muchas ocasiones, existen vacíos de información. Es decir, en diversas ocasiones no se reportan datos de los contaminantes por problemas técnicos (ligados a la operación y/o mantenimiento de los equipos), esta situación tienen impacto en el conocimiento que se requiere respecto a la exposición poblacional real, dado que no es posible tener una idea clara y precisa del comportamiento de la calidad del aire en toda la región.

De manera específica, para al monitoreo de aerosoles las mediciones se realizan empleando analizadores TEOM PM₁₀ y/o Thermo Andersen PM_{2.5} Beta Attenuation y los datos se reportan de manera continua en forma de promedios horarios, diarios y anuales. De acuerdo a lo informado por el SIMAT (2010) los niveles de concentración de PA para los últimos años muestran que se ha logrado una disminución de los días con excedencia de los límites máximos permisibles para el umbral de exposición aguda, por ejemplo para el año 2010 la norma de PM₁₀ se rebasó en 25 % del total de días al año, no obstante el límite anual (exposición crónica) sigue excediéndose dado que se duplicó la concentración permisible. Esta situación es de mayor importancia para las estaciones de la zona norte del AMCM donde sigue presentándose los niveles más altos de concentración tanto de PM₁₀ como de PM_{2.5}. Como consecuencia las regiones noreste y noroeste del AMCM están tipificadas como zonas de mayor riesgo tanto de generación de aerosoles como de exposición para la población urbana.

3. Los aerosoles y los satélites

3.1 Características de los aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos se definen como el conjunto de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un medio gaseoso, que poseen tamaño típico entre 0.01 y 10 micrómetros (µm), cuyos tiempos de residencia en la atmósfera son de al menos de varias horas (USEPA, 2004). Este término algunas veces se ha asociado erróneamente con los aerosoles liberados por los sprays y cuya definición queda conceptualizada por lo descrito por la IUPAC (2001) que delimita simplemente al aerosol como la dispersión de partículas sólidas o líquidas en un gas.

Los aerosoles atmosféricos corresponden a mezclas complejas de partículas tanto de origen natural como antropogénico, pueden ser emitidos directamente de las fuentes (primarios) o formarse por reacciones químicas en la atmósfera (secundarios, ej. conversión gas a partículas), debido a la variabilidad de sus fuentes y depósitos y a su interacción con el medio gaseoso adquieren características físicas, ópticas V químicas que resultan en grandes heterogeneidades espaciales y temporales ej. diferentes tiempos de residencia atmosférica, de distribución vertical en diferentes áreas geográficas (Yu et al., 2006).

Su distribución en el aire depende principalmente de su tamaño, que varía sobre un amplio rango de escalas, las diferentes fracciones de tamaños identificadas poseen formas y tiempos de residencia también variables y corresponden a mezclas de diversos tipos de compuestos orgánicos e inorgánicos consistentes de partículas sólidas, gotas de líquidos y vapores de componentes semivolátiles. Las categorías definidas hasta hoy como contaminantes atmosféricos corresponden al termino denominado como partículas atmosféricas en los tipos de TSP (<100 μ m), las PM₁₀ (<10 μ m) ambas integradas a la fracción gruesa, las finas a las PM_{2.5} (< 2.5 μ m), la fracción ultrafina que describe a las menores de 100 nm. Las agencias ambientales de diversos países tienen

reguladas dos principales categorías las PM_{10} y las $PM_{2.5}$ (USEPA, 2004; Valavanidis et al., 2008).

Con relación a la composición química de las PA, sabemos que depende de muchos factores, como las fuentes de combustión, el clima, la estación del año, el tipo de contaminación urbana o industrial, los principales componentes químicos adsorbidos en las PA pueden ser especies orgánicas volátiles y semivolátiles, (ej. hidrocarburos poliaromáticos (HAPs), derivados nitro-HAPs, quinonas), metales y sales de transición (ej. Fe, Ni, V, Cu, etc), cationes y aniones (ej. Sulfato, nitrato, amonio, hidronio), gases y vapores reactivos (ej. O₃, peróxidos, aldehídos), núcleos de material carbonáceo (principalmente derivado de procesos de combustión y de emisiones vehiculares), material biológico (ej. endotoxinas, bacterias, virus, desechos y fragmentos de animales y vegetales), minerales (ej. cuarzo, asbesto, polvo de suelo). La composición de la fracción gruesa consiste principalmente de material mineral insoluble, sales marina y material biológico, en contraste la fracción fina y ultrafina está principalmente constituida por agregados carbonáceos con metales y especies orgánicas adsorbidas (USEPA, 2004; Valavanidis et al., 2008).

Las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos, que son de primordial importancia para los estudios vía percepción remota, están definidas por su interacción con la radiación electromagnética que también es compleja. Los aerosoles absorben y emiten calor, absorben, transmiten, reflejan y dispersan la luz (Figura 2) y dependiendo de sus propiedades puede enfriar o calentar la atmósfera. Particularmente, la dispersión en el medio atmosférico está descrita por la dispersión de Rayleigh y Raman (debida a los átomos y moléculas), la dispersión Mie (derivada de los aerosoles) y la no selectiva (por interacción con las nubes) (Figura 3). Es decir, cuando la radiación electromagnética se propaga a través de la atmósfera, se presentan diversos procesos: parte de la radiación cambia de dirección (dispersión = difracción + refracción + reflexión), parte de la radiación se absorbe y dependiendo de la temperatura de los gases y de las partículas, la luz también se emite (Heintzenberg, 2009), de tal forma que:

a. La atenuación total de la radiación queda descrita por

Coeficiente de extinción = coeficiente dispersión + coeficiente absorción.

b. La fracción que se conserva de la atenuación se describe por

Albedo de dispersión simple = coeficiente de dispersión / coeficiente de extinción.



Figura 2. Interacción de la luz con los aerosoles



Figura 3. Esquema que ejemplifica algunos de los fenómenos ópticos que se producen por la interacción de la luz solar en una nube compuesta por diferentes partículas y elementos.

Generalmente, las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos pueden ser comprendidas a través de tres parámetros ópticos: profundidad óptica de los aerosoles (AOD), el albedo de dispersión simple (que mide la atenuación de la radiación debida a la dispersión) y la función de fase (que describe la dirección de la energía dispersada), juntas integran las propiedades fundamentales de absorción y dispersión de los aerosoles, varían con la longitud de onda de la radiación, también dependen fuertemente de la distribución del tamaño de las partículas y de diferencias en las condiciones ambientales como la humedad relativa, precisamente este último factor es crítico dado que algunos aerosoles son higroscópicos situación que conduce a su crecimiento en la medida que se hidratan con moléculas de vapor de agua (Yu et al., 2006).

Todos estos fenómenos ópticos dependen también de la cantidad de energía que llegue a dicho medio, esto es sí suponemos que la energía que llega al medio son unos 15 fotones, una parte de ellos (podrían ser 5) son absorbidos, la parte reflejada otros 3 fotones, otros 2 son transmitidos, otros 5 son dispersados y refractados. De los 5 absorbidos 3 son empleados para excitar electrones y hacer reacciones entre elementos, los otros 2 son absorbidos y dispersados en forma de calor, es por eso necesario referirnos que la cantidad de luz (fotones) que llegan para interactuar con la materia es importante ya que si llega muy poca energía es posible que el medio absorba toda y la disperse (dependiendo de la materia con la que interactué) o si es demasiada es muy probable que muchos fotones pasen sin ser absorbidos, de este factor también depende que los fenómenos se presenten o no (Sear y Zemansky, 1978; Shackelford, 2005).

Por último, se ha discutido que los aerosoles pueden influir sobre el clima en dos formas: directamente a través de la dispersión y absorción de la radiación e indirectamente al actuar como núcleos de condensación resultando en la formación de nubes o modificando las propiedades ópticas y la vida media de las nubes.

La compleja naturaleza de los aerosoles indica que su monitoreo presenta problemas y retos tecnológicos debido a:

- Alto grado de heterogeneidad y variabilidad espacio temporal (Kaufman, et al, 2002). La mayoría de los aerosoles son de naturaleza regional debido a sus cortas vidas media, a la distribución regional de las fuentes, la variabilidad de sus propiedades y las condiciones meteorológicas estacionales determinan que tan lejos se transportan de las fuentes que los originan y como se distribuyen (vertical y horizontalmente a través de la atmósfera).
- 2. Concentran cerca de la superficie de la tierra con diferentes tiempos de residencias (segundos meses).
- 3. Dependiendo de su fuente, tamaño y reactividad conforman categorías con diferencias en sus propiedades morfológicas, ópticas, químicas, etc.
 - a. Urbano-industriales
 - b. Provenientes de quema de biomasa
 - c. Biogénicos
 - d. Marinos

La complejidad química y naturaleza lábil de los aerosoles atmosféricos, impulsa el desarrollo de técnicas de monitoreo en tiempo real sin tener que colectar, almacenar y transportar las muestras, lo que requiere del desarrollo de instrumentos en tiempo real que valoren algunas de estas las propiedades físicas, situación que puede ser convenientemente cubierta por instrumentos satelitales.

3.2 Características de los satélites

En la segunda mitad del siglo XX la percepción remota se desarrolló como una técnica encaminada a proporcionar datos para el conocimiento de la atmósfera, de la superficie terrestre y marina. Se impulsó el lanzamiento de diversos satélites cuyos movimientos se encuentran gobernados por el balance entre la fuerza gravitacional y la centrífuga debida a la velocidad del satélite en su órbita. Para tener una referencia de los satélites que actualmente se manejan, se debe primero clasificarlos en dos grandes grupos (Badrinath, 2010):

- Satélites de observación de la tierra
- Satélites de telecomunicación

Los satélites de observación, se transformaron muy pronto en instrumentos de gran aplicación, debido a sus múltiples y diversificadas características que permite a su vez clasificarlos en:

- Satélites de observación terrestre o de recursos naturales con una alta resolución espacial diseñados para la cartografía y la explotación de los recursos terrestres.
- 2. Satélites meteorológicos (observación de la atmósfera).
- 3. Satélites militares, para observación y espionaje.

El primer grupo son satélites que están enfocados en la observación de la tierra con diferentes instrumentos y por lo regular son satélites con órbita polar, rodean la tierra a una altura típica de 850 km en dirección norte sur pasando sobre los polos en su continuo vuelo, se ubican en orbitas sincrónicas al sol, lo que significa que el satélite puede ser dirigido hacia aquella zona en donde se necesite una imagen, pueden como consecuencia observar cualquier lugar de la tierra y observar cada localización en un tiempo determinado. De entre los satélites de observación podemos encontrar una gama para uso militar, científico y particular para empresas, también es importante mencionar que existen más de 50 de este tipo de satélites en ellos se encuentran: Aqua, Terra, IKONOS, Spot, Landsat, CALIPSO, EXPLORER, Cosmos, CERES, etc.

El segundo grupo se refiere a satélites con una finalidad diferente y que es la de monitoreo del clima en diferentes partes del mundo, los instrumentos a bordo de las plataformas de satélite están enfocados a la obtención de información como: humedad, temperatura y cantidad de lluvia, los principales objetos de donde se obtiene la información son de episodios de tormentas tropicales, huracanes, tornados y lluvia. Orbitan la tierra arriba del ecuador a una altitud de 35,889 km, porque su órbita geoestacionaria permanece estacionaria con respecto a la rotación de la tierra, fueron diseñados con la finalidad de dar seguimiento continuo a una zona en particular y registrar y transmitir imágenes continuamente del hemisferio entero con sus sensores en la región visible e infrarroja. Algunos de estos son USA GOES-10 colocado sobre el río Amazonas y proporciona mayor información del clima, el satélite japonés MTSAT-1R ubicado sobre la mitad del pacífico, el Europeo Meteosat-8 y el Meteosat-9 colocado sobre el océano atlántico, el Meteosat-6 y Meteosat-7 puesto sobre el océano de la India, el ruso GOMOS ubicado sobre el ecuador al sur de Moscú y China con el Fen-Yu FY-2C y FY-2C. Este grupo de satélites meteorológicos geoestacionarios, pioneros en la observación espacial, se consideran ampliamente consolidados y sus datos son, en la actualidad imprescindibles en los modelos meteorológicos.

El tercer grupo que pertenece a la gama militar, cuyo uso de los satélites tiene una finalidad totalmente diferente.

Las observaciones hechas por los satélites a la tierra cubren diferentes regiones del espectro electromagnético, con diferentes resoluciones espaciales, temporales y espectrales. En la Tabla 4 se presenta información relacionada con los sensores colocados en diferentes satélites que actualmente están en capacidad de detección y/o medir alguna propiedad de aerosoles troposféricos y estratosféricos, algunos de ellos están integrados a programas que se encuentran enviando actualmente datos continuos para el monitoreo de aerosoles.

Todos los satélites mencionados abarcan la región del espectro electromagnético correspondiente al rango visible, exceptuando aquellos montados en los satélites AURA y METOP, las PA tienen una importante interacción con la luz visible, por esta razón la AOD se calcula con información que proviene de los canales visibles de los satélites, como se denota en la tabla 4 la mayoría de los sensores son capaces de proporcionar información de AOD de los aerosoles, está situación proporciona una ventaja importante a cada satélite.

Pero, para nuestro estudio algunos no son aplicables debido al área en la que operan como por ejemplo: Europa y Canadá, otro factor importante es que debido a su órbita el número de imágenes que proporcionan al día es menor comparado con las que proporciona el satélite GOES, estas son dos limitaciones que tienen todos los satélites en la tabla 4 para poder usarse en él estudio y que son importantes para dar un seguimiento continuo a los aerosoles en atmósfera.

Es importante mencionar que el monitoreo satelital de PA, tiene sus ventajas y limitaciones: Dentro de las segundas podemos comentar que los datos satelitales no siempre están disponibles (ej. nubosidad), existen imprecisiones en las imágenes recuperadas (ej. reflectividad de la superficie) y la medición no es siempre posible debido a la corta vida de los aerosoles, compleja composición química e interacción con la atmósfera que resulta en heterogeneidades espacio – temporales.

Por otra parte también se pueden discutir las siguientes ventajas: El desarrollo de satélites nos ha permitido observar y seguir diferentes fenómenos que ocurren en el planeta, podemos observar los fenómenos como huracanes, terremotos, teniendo una cobertura global y precisa, pero además nos permite escalar las dimensiones de los fenómenos ocurridos, como es el caso de inundaciones, la cobertura de la expansión de la población en nivel terrestre o la formación de nubes, dimensiones de una fumarola de volcán a nivel de estratósfera. Una sencilla imagen de satélite nos puede mostrar cómo se distribuye la contaminación del aire por un continente, tener cobertura de los efectos de un terremoto o un incendio forestal, todo esto con una cobertura en el espacio- tiempo para que podamos ver los fenómenos que ocurren en los cuales en tierra no se puede tener acceso (ESA, 2010).
Soncor	A bordo del	Daís opora	Resolución espectral	Información	Resolución temporal	
3611501	Satélite	Pais Opera	Región del espectro	Proporciona		
CALIOP	CALIPSO	USA (NASA), Francia	2 bandas espectrales en las regiones visible e infrarrojo	Concentración de aerosoles, vapor de nubes	Cobertura global en 16 días	
MODIS	AQUA, TERRA	USA (NASA)	36 bandas espectrales en las Regiones visible e infrarrojo	Temperatura del océano y el suelo, concentración de aerosoles y cobertura vegetal	Cobertura global en 2 días	
MERIS	ENVISAT	Europa (ESA)	15 bandas espectrales en las regiones visible e infrarrojo cercano	Concentración de clorofila y sedimentos, coloración del océano y aerosoles marinos	Cobertura global en 3 días	
MISR	EOS-AM1	USA (NASA)	4 bandas espectrales en las regiones visible e infrarrojo cercano	Aerosoles, nubes y distribución de la vegetación en la superficie	Cobertura global en 9 días	
POLDER-P	ADEOS	Francia	8 bandas espectrales en las regiones visible e infrarrojo cercano	Aerosoles, superficie de la tierra, el océano y nubes	Cobertura global en 41 días	
ACE	SCISAT-1	Canadá	3 bandas espectrales en las regiones UV cercano hasta infrarrojo cercano	Procesos químicos en la atmósfera, ozono	Cobertura global en 97 minutos	
HIRDLS	AURA	USA (NASA), UK	21 bandas espectrales en las regiones del infrarrojo lejano	Distribución de la temperatura y concentraciones de O ₃ , H ₂ O, CH ₄ , N ₂ O, NO ₂ , HNO ₃ , N ₂ O ₅ .	Cobertura global en 12 horas	
SCIAMACHY	ENVISAT	Europa (ESA)	3 bandas espectrales en las regiones UV e infrarrojo	Mediciones de gases traza, temperatura de las nubes, aerosoles y la radiación solar	Cobertura global en 6 días	
GOMOS	ENVISAT	Europa (ESA)	3 bandas espectrales en las regiones UV, visible e infrarrojo	Mediciones de ozono, temperatura de las nubes, aerosoles y la radiación solar	Cobertura global en 6 días	
AVHRR/3	NOAA-15	USA (NOAA)	6 bandas espectrales en las regiones visible, infrarrojo cercano y medio	Cobertura vegetal, nubes, hielo y temperatura de superficie y océano	Cobertura global en 102 minutos	
MHS	METOP	Europa (ESA)	5 bandas espectrales en la región microondas	Detecciones de humedad en la atmósfera, cobertura de hielo, nieve y lluvia	Cobertura global en 90 días	
VIIRS	NPOESS	USA (NOAA)	22 bandas espectrales en las regiones visible e infrarrojo	Nubes, radiación solar, superficie del océano, temperatura y color	Cobertura global en 102 minutos	

Tabla 4. Sensores y satélites que envían datos continuos de aerosoles (Badrinath, 2010).

3.3 Métodos de evaluación de aerosoles vía satelital

La forma en cómo los satélites observan lo aerosoles, se fundamenta en la interacción de la energía solar con la nube de aerosoles, es decir en su huella de radiación. Así, la energía entrante de la luz solar puede regresar como energía radiante emitida tanto por la atmósfera como por la superficie terrestre, la manera en que regresa esta energía depende de la firma espectral de ambos medios, de la longitud de onda entrante, de las propiedades angulares y de polarización de esta energía. El principio fundamental del monitoreo satelital remoto parte del hecho de que cada tipo de característica del planeta como la atmósfera suelo, rocas, vegetación, agua absorben y reflejan la radiación solar de una manera específica y que también emiten las radiaciones electromagnéticas en diferente grado de acuerdo a la temperatura. Los sensores satelitales pueden entonces identificar y cuantificar las propiedades atmosféricas y de la superficie terrestre (Shimizu, 2004; Bradinath, 2010).

En la actualidad, existen muchas formas de procesar imágenes y diversas técnicas de análisis para la interpretación de los datos extraídos, la elección de ella depende del objetivo del estudio, además la tecnología de imágenes satelitales ha desarrollado sensores hiperespectrales (conjuntos de datos compuestos de entre 100 a 200 bandas con anchos de banda de 5 – 10 nm) y multiespectrales (conjuntos de datos compuestos de entre 5 a 10 bandas y de anchos de banda grandes entre 70 – 400nm), de los que puede ser extraída múltiple información. Pero el principio de la detección se desarrolló para una sola longitud de onda y un solo ángulo de información y hay que recordar que la percepción de la profundidad depende del ángulo de observación. Así por ejemplo los satélites AVHRR, GOES y METEOSAT utilizan una sola longitud de onda que se encuentra centrada en 5. 91 μ m y con un solo ángulo de observación; otros satélites como el Aqua y Terra que tienen abordo dos instrumentos MODIS y MISR emplean la huella espectral de los aerosoles en un rango de 0.47 – 2.1 μ m para distinguir partículas pequeñas de partículas de aerosol marino y de polvo,

para ello estiman sobre la tierra la reflectancia de la superficie a longitudes de onda visibles derivando la reflectancia residual de la superficie de las nubes (Kaufman et al., 2002).

Los procedimientos de recuperación de información de aerosoles de las imágenes de satélite se encuentran bien desarrollados y básicamente se apoyan en distinguir la radiación atenuada por el aerosol de la reflexión de la superficie, el procedimiento es complejo porque las reflectancias de la superficie son difíciles de distinguir de la señal total recibida por el satélite. Luego entonces, la estimación de las reflectancias de la superficie es un factor clave en la recuperación de la información del aerosol (Kaufman, 2002).

Las primeras y más prominentes técnicas de recuperación de información de las imágenes de satélite para asociarlas a la concentración de aerosoles han empleado la estimación de la profundidad óptica AOD (por sus siglas en inglés Aerosol Optical Depth) y/o del espesor óptico AOT (por sus siglas en inglés Aerosol Optical Thickness) en la región del espectro visible (King et al., 1999).

Como los aerosoles pueden variar de 3 a 102 µm dependiendo de la fuente y el mecanismo de producción, la profundidad óptica (AOD) es un adecuado parámetro para estimar la concentración de los aerosoles, la AOD es una cantidad que define la combinación de efectos de dispersión y absorción en una columna vertical de la atmósfera que se obtiene al substraer la contribución de las moléculas de aire, el AOD se deriva de reflectancia medida por el satélite de la parte más alta de la atmósfera en las bandas visibles del espectro, por lo tanto en el principio de recuperación de datos de aerosoles del espacio el componente de radianza observado por el satélite lleva información del aerosol, para una reflexión en una superficie isotrópica observada por el satélite y separada del componente Rayleigh y de los gases. Por otra parte, se han diseñado y aplicado un amplio rango de algoritmos porque los sensores tienen diferentes características en términos de información espectral, espacial, polarización y angular (Kawata et al., 1998; Bradinath, 2010).

4. Materiales y métodos

4.1 Área de estudio

El Área Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra en lo que se denomina la "cuenca de México", ocupa la parte nororiental del estado de México, el sur del estado de Hidalgo, el suroeste de Tlaxcala y todo el Distrito federal (Figura 4); tiene una superficie de entre 7,500 y 8,058 km² y se encuentra ubicada entre los 19°03'15" y los 19°36'22" de latitud norte, 98°56'45" y los 99°22'04" de longitud oeste (Correa, 2009).

La cuenca de México está rodeada de cadenas montañosas, al norte se encuentra la sierra de Guadalupe, al este la sierra de Santa Catarina y al suroeste las sierras de Las Cruces, Ajusco y Chichinautzin lo que limitan la dispersión horizontal de contaminantes. Hacia el Noroeste (NE) el AMCM, está rodeada por extensas áreas de agricultura no irrigadas que permanecen sin cultivarse entre febrero y mayo (cuando la lluvia es escasa) y que se comportan como regiones de erosión eólica durante la época seca caliente. La meteorología prevaleciente está caracterizada por un clima templado a lo largo del año y seco con promedio mensual de temperatura de 20 °C en mayo - junio (época seca caliente) y de 11 °C entre noviembre y diciembre (época seca fría), pero con intensas lluvias entre junio y octubre aunque en los últimos 10 años el régimen de lluvias ha disminuido, tornando al AMCM en una región más seca y en mayor proporción hacia donde se expande la zona conurbada. Como consecuencia del estancamiento natural y temporal de las masas de aire en la atmósfera de la región, se presentan frecuentes inversiones térmicas en la época seca-fría, aunque los inviernos de estas sean ligeramente fríos y con vientos de débiles a moderados $(0.5 - 3 \text{ ms}^{-1})$ con origen en el NE. Todos estos factores intensifican los periodos de contaminación conduciendo con frecuencia a la mala dispersión de contaminantes atmosféricos y procesos internos de transporte de contaminantes y mayores tiempos de residencia y por tanto de exposición de la población. En la Figura 4 se identifican las tres estaciones de monitoreo seleccionadas para el estudio de los

aerosoles circundantes, mismas que corresponden a las únicas que reportan datos completos de niveles de concentración de gases criterio y PA, junto con información meteorológica, los datos de las estaciones son los siguientes:

Tlalnepantla (TLA): ubicada en la Glorieta de Atlacumulco, Avenida Toluca s/n, Glorieta Atlacomulco, Colonia Tlalmex, Municipio de Tlalnepantla, Estado de México, 19°31'42.2" N latitud, 99°12'15.2" W longitud. Los monitores están colocados a una altura de 2 metros en el noroeste del AMCM (la entrada de los muestreadores es 6.8 m arriba del nivel del suelo), se trata de una típica zona residencial, no hay muchas vialidades adyacentes, viento abajo de la zona industrial norte.



Figura 4. Ubicación del área de estudio (Área Metropolitana de la Ciudad de México). Imagen cortesía de Google Maps. Estaciones de estudio
★Tlalnepantla, ★San Agustín y ★ Merced

Merced (MER): ubicada en Avenida Congreso de la Unión No. 148, Colonia Merced Balbuena, Delegación Venustiano Carranza, México D. F., 19°31'27.8" N latitud, 99°07'09.4" W longitud. Muy cercana al centro de la Ciudad de México en la azotea de un centro de salud, rodeada de avenidas intensamente transitadas, los edificios bloquean los vientos que vienen del sur, la toma de muestra está colocada a 4.5 m arriba del suelo.

San Agustín (SAG): ubicada en Calle "Sur 88" esquina con Calle "Sur 90", Col Nuevo Paseo de San Agustín, Municipio Ecatepec de Morelos, Estado de México., 19°31'56.1" N latitud, 99°01'47.8" W longitud, con influencia residencial al noroeste del AMCM, no existen calles principales que la rodeen y la toma de muestra tiene lugar a 6.2 m sobre el nivel del suelo.

4.2 Diseño del estudio.

En términos de adoptar una estrategia práctica, la metodología se esquematizó en etapas y como se observa en la Figura 5, los datos de campo y las imágenes fueron analizadas de forma paralela para poder determinar posteriormente su correlación estadística. Este marco metodoógico se estructuró tomando como base los casos de estudio de Liu et al. (2009) y de Wu et al. (2006) quienes comparten objetivos semejantes al enfoque del estudio.

4.3 Fuentes de información:

4.3.1 <u>Niveles de contaminantes atmosféricos</u>: De la base de datos del SIMAT se recopilaron concentración horaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} , gases criterio (NO_x , SO_x , CO) y parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) correspondientes a los mismos días de las imágenes seleccionadas, se identificó además su concordancia con las horas de toma de las imágenes visibles del satélite para las tres estaciones de monitoreo seleccionadas. El horario de trabajo útil correspondió al rango de 6:00 - 17:00 h.



Figura 5.Diseño de investigación. Se muestra la estructura general de la metodología aplicada.

La información proveniente de la RAMA para el año en estudio presentó muchos vacíos para los datos de campo, esta situación es un imponderable del monitoreo atmosférico de las redes en campo (que se debe a datos perdidos, inválidos o no registrados y no reportados). Los datos de contaminantes y variables atmosféricas disponibles se organizaron en 8 archivos, cada uno de los cuales está dividido en 12 páginas que representan los meses del año 2010 y finalmente cada página contiene únicamente la información de las tres estaciones en un mes, el día y la hora. Los datos filtrados e integrados a una base general (Figura 6) arrojaron un total de 70,080 datos para el año 2010, si bien se recolectó el 100% de los datos, existe el problema de la pérdida y falta de información, la proporción anual de datos oscila normalmente entre el 65 % y el 85 % según reporta Correa (2009), lo cual es frecuente en las estaciones de monitoreo de todo el mundo y no es exclusivo de la RAMA de la Ciudad de México.



Figura 6. Base datos de parámetros atmosféricos de la RAMA.

4.3.2. <u>Imágenes del satélite GOES</u>: Los satélites GOES tienen la característica de proveer información necesaria para el análisis del clima en la tierra. Circulan alrededor de la tierra en una órbita geoestacionaria se sitúan encima del Ecuador terrestre y tienen una velocidad similar al de la rotación de la

tierra, esto permite tener un continuo monitoreo de una zona en la tierra. La órbita Geosincrona de los satélites GOES se encuentra a 35,800 km sobre la tierra esta característica permite una vista de un disco completo de la tierra, debido a que permanece fijos sobre la superficie provee una constante vigilancia de las condiciones umbrales climáticas de la atmósfera como son: tornados, inundaciones, tormentas de nieve y huracanes.

El satélite GOES tiene a bordo 2 instrumentos principales el IMAGER y el SOUNDER que son los encargados de tomar mediciones de la tierra. El instrumento IMAGER está compuesto por un canal visible y 4 canales infrarrojos que censan la radiación y la energía solar reflejada de un área de la tierra. El IMAGER consiste en los componentes electrónicos, la fuente de energía y los módulos de sensores. El módulo de sensor contiene un telescopio, con un ensamble de escaneo y sensores, todo montado en una base que se una a la estructura de la plataforma espacial, junto con escudos y controles térmicos. La Tabla 5 describe las características del principal sensor de los satélites GOES 12 y 13.

Las imágenes satelitales empleadas provienen del satélite GOES 12 y 13, corresponden a la captura continua de imágenes de la República Mexicana en el periodo de enero a diciembre del 2010 (fecha adquisición GOES 01-01-10 a 14-04-2010 y GOES13 desde 15-04-2010), fueron provistas por el SMN de la CONAGUA haciendo uso del convenio que tienen con la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) organismo que envía la información vía la infraestructura del SMN y que está integrada por: 208 redes de monitoreo, distribuidas a nivel nacional conformada por redes de estaciones meteorológicas automáticas, red de estaciones de recepción de imágenes NOAA, red de estaciones de radio sondeo atmosférico, red de radares meteorológicos, red de observatorios y la estación de imágenes TIROS. Las características de las imágenes se resumen en la Tabla 6, están conformadas por 4 archivos con

Número de canal	1 (Visible)	2(Onda corta)	3 (Humedad)	4 (IR 1)	5 (IR 2)		
Rango de longitud de onda (µm)	0.55-0.75	3.80-4.00	6.50-7.00	10.20-11.2	0 11.50-12.50		
Resolución espacial	1 km	4 km	8 km	4 km	4 km		
Calibración radiométrica	En el espacio y 290 K* de infrarrojo para cuerpos oscuros						
Frecuencia de la calibración	Espacio: 2.2 segundos (disco completo), 9.2 o 36.6 segundos (sector/área), Infrarrojo: de forma típica 30 minutos.						
Sistema de precisión	Canales infrarrojos: Menos o igual a 1 K, Canal visible: 5% máximo de la escena de irradiación.						
Tiempo de captura de imagen	Para disco completo, menos o igual a 26 minutos.						
Fenómeno observable	Nubes y aerosoles	Discriminación de nube en noche, incendios nubes agua/hielo	Vapor de agua tropósfera superior	Radianzas termales	Bajos niveles vapor agua, temperatura superficie mar, cenizas volcánicas		

Tabla 5. Características espectrales. Sensor IMAGER, a bordo del GOES 12 y 13

Nota: Características del instrumento IMAGER. * Las unidades de temperatura se expresan en grados kelvin. Datos traducidos del reporte técnico del satélite GOES (NOAA, 2010).

Tabla 6. Características de las imágenes multiespectrales del satélite GOES, de México en el periodo enero-diciembre 2010

Canal	Tiempo de registro	Dimensión	Formato original	Formato de Conversión	Tamaño después de conversión	No. archivos
Visible	12 horas	2405 X 1696 pixeles	PCX	JPEG	560 -750 KB*	8,760
Infrarrojo H₂O	24 horas	2405 X 1696 pixeles	PCX	JPEG	30-60 KB	17,520
Infrarrojo canal 4	24 horas	2405 X 1696 pixeles	PCX	JPEG	150-230 KB	17,520
Infrarrojo canal 2	24 horas	2405 X 1696 pixeles	PCX	JPEG	100-290 KB	17,520

*Corresponde a las unidades de espacio en memoria kilobytes y equivale a 10³ bytes.

diferentes etiquetas (Vis, ir4, ir2, h2o) que permiten diferenciar el canal al que pertenece cada imagen.

Cada paquete de imágenes fue guardado en un disco duro y etiquetado como imágenes por mes, de tal manera que se formó un archivo con 12 carpetas correspondientes a cada mes del año 2010. Todas las características del satélite GOES y sus funciones fueron obtenidas del reporte técnico creado por NOAA del año 2010.

4.4. Tratamiento de imagen y obtención de los pixeles

Las imágenes GOES se convierten a un formato diferente para que puedan ser visualizadas y trabajadas por ese motivo las imágenes que vienen en formato PCX (PiCture eXchange) son convertidas a JPEG, al realizar esta conversión no hay perdida de información ya que las imágenes en formato PCX tiene una resolución radiométrica igual al formato convertido de JPEG. En el siguiente punto es necesaria una filtración de las imágenes respecto a las condiciones atmosféricas libres de nubosidad, debido a que las nubes pueden interferir con la extracción de información, para esto se sugiere una filtración manual de las imágenes (Figura 7), o bien a través de un algoritmo que asegure que no se está extrayendo pixeles de una nube o su sombra como lo menciona Lira (1991), Knapp (2002) y Yoon (2006) en los trabajos desarrollados para percepción remota.

La georeferenciación de la imagen se realiza con ayuda de una capa base con división política de México (con coordenadas geográficas Longitud y Latitud), como se puede ver en la figura 8 parte superior, el proceso inicia con puntos de referencia tanto en la imagen como en la capa, estos puntos son necesarios para poder insertarlos en un polinomio de segundo grado que ajusta los datos en la capa y la imagen para que coincidan lo mejor posible, el resultado de la georeferenciación se muestra en la figura 8 parte inferior, donde se señalan los puntos en el recuadro derecho inferior, con las estaciones de color rojo y las referencias de color azul. Por medio de este proceso se ubicaron las tres

estaciones de monitoreo en la imagen, una vez representados estos puntos de muestreo se procesa imagen por imagen para obtener los valores de pixeles de cada estación. Los datos geográficos y mallas con la división política también fueron proporcionados por el SMN.



a) Imagen 18ene 22:15h



b) Imagen 26ene 18:15h

Figura 7. Imágenes originales de la República Mexicana enviadas por el GOES. Despliegue de la imagen en formato vish.pcx (a) con nubosidad y b) sin nubosidad en el AMCM.

4.5 Desarrollo del Algoritmo de AOD

La recuperación del AOD de las observaciones del GOES se basa en la aplicación de un algoritmo de recuperación en un solo canal, el planteamiento inicial fue descrito por Knapp (2002) y Knapp et al. (2005), en este método se tabulan las reflectancias para el canal visible del GOES como función del AOD y de la reflectancia de la superficie terrestre. Incorpora tres pasos básicos, compilación de escenas compuestas base, corrección de efectos atmosféricos y recuperación del AOD, adicionalmente se aplicó filtrado de imágenes con nubosidad por métodos manuales y a través de la prueba de umbral con combinación de los canales IR, a continuación se presenta una descripción de lo desarrollado para la recuperación de AOD en tres regiones del AMCM.



Figura 8.Proceso de georeferenciación y de recorte de imágenes GOES de México.

Creación del pixel base

El pixel base se genera de las observaciones de series de tiempo de las imágenes del satélite GOES, se encuentra al pixel más oscuro en la escena y se toma como referencia para las demás observaciones, todas las distancias de ese punto a las observaciones es el concepto de AOD según lo reportan Knapp, 2002; Yoon, 2006 y Ciren et al., 2008; para nuestro caso de estudio el periodo de tiempo es todo el año 2010 y las series de tiempo corresponde a los 12 meses del año, para establecer el pixel base se estudio todos los pixeles obtenidos por mes y estableció el nivel mínimo de valor radiométrico sin presencia de nubes. Este proceso se repite para cada locación seleccionada de tal manera que el pixel base es diferente en cada mes del año y cada estación. En este punto es importante la filtración de nubes y sus sombras en las imágenes ya que las sombras pueden producir falsos pixeles base.

Corrección atmosférica de los valores de pixel

El segundo paso del algoritmo es convertir los valores de pixel de escena a valores de radiancia y reflectancia respectivamente. La AOD se mide con la diferencia de un valor de reflectancia base con otro medido en una observación (Knapp, 2002; Yoon, 2006), para el caso de las imágenes del satélite GOES los valores de pixel obtenidos de la imagen se corrigen con factores de decaimiento y de flujo solar convirtiendo los valores de pixel crudos (ó cuentas de pixel) en valores radiométricos de Radiancia (R), y con los valores de radiancia a su vez se construyen los de Reflectancia (A). Como observamos en la ecuación 1 la radiancia (R) está relacionado con los factores de corrección por uso y decaimiento (m y b) respectivamente ofreciendo una calibración, a su vez esta relación es aplicable a cada valor de pixel DC (Digital Count) de la imagen convirtiéndola en escena de radiancia.

 $R = (DC \times m) + b \tag{1}$

Donde:

R =radianza.

DC= cuentas digitales ó valores de pixel.

m= valor de corrección de decaimiento por uso del sensor.

b = valor de corrección de decaimiento por uso del sensor.

Los efectos de la atmósfera como absorción de gases y dispersión molecular son removidos por la conversión de valores de radiancia a reflectancia, en el caso de la reflectancia (A) la ecuación 2 nos indica que está en función de los valores de radiancia previamente calculados y de los factores de corrección de la distancia del sol a la tierra (δ (D)) en un día del año, el coseno del ángulo zenit solar μ_0 y de la función F₀ que expresa la relación entre el flujo solar en lo alto de la atmósfera y la respuesta espectral de instrumento.

$$A = \frac{\pi \times R}{\delta(D) \times \mu_0 \times F_0} \tag{2}$$

Donde:

 δ (D)= es la corrección de la distancia del sol a la tierra en función de un día del año D.

 μ_0 = Ángulo del zenit solar.

 F_0 = Relación entre el flujo solar en lo alto de la atmósfera y la respuesta espectral de instrumento.

Este paso requiere asumir ciertas condiciones como estabilidad en la atmósfera y que no exista nubosidad presente en la escena, también es necesario introducir la definición de albedo ya que esto no lo es, el albedo sugiere la integración de todo el ángulo de la superficie reflectora y por tanto la reflectancia, vista en todos los ángulos, es la observación de la reflexión del flujo solar en un determinado tiempo con un ángulo determinado, con esta consideración el modelo se convierte en unidireccional y depende solo de la geometría del sol-tierra (Rao, 2001; Knapp, 2002; Yoon, 2006; Weinreb, 2009; NOAA, 2010; Chang et al., 2011). Estas dos ecuaciones previas caracterizan la calibración de las imágenes GOES y proveen los elementos para la conversión de datos crudos en valores de radiométricos útiles para la obtención de la profundidad óptica.

Recuperación de la Profundidad Óptica de Aerosol

En este último paso se realizan comparaciones de las imágenes de la reflectancia de la superficie, donde el cambio en la radiancia se asume que se debe al incremento de aerosoles en la superficie, por tal motivo con el pixel base se realizan comparaciones de tal forma que todas las diferencias entre éste y los otros pixeles de la escena corresponderán a la profundidad óptica debido a la presencia de aerosoles (Knapp, 2002; Yoon, 2006). Una vez transformada la imagen de reflectancia a profundidad óptica se obtiene todos los valores AOD de las tres estaciones de monitoreo y se colocan en una base de datos general junto con los datos de campo para poder ser comparados. La Figura 9 muestra el diagrama del flujo del algoritmo completo empleado para recuperación de la AOD, en el canal visible (0.5 µm).

Las imágenes que se emplean para la AOD no son las mismas que se utilizan para obtener información del canal infrarrojo, es por eso que la obtención de información en este rango espectral requiere de un algoritmo distinto. Es por tanto necesario convertir los valores de pixel DC a un valor de radiancia (Ri), como se muestra en la ecuación 3, la relación entre esta nueva radiancia y los coeficientes de calibración es diferente, incluso los valores de b y m son distintos, produciendo valores radiométricos con una valor distinto.

$$Ri = \frac{(DC-b)}{m}$$
(3)

Donde:

Ri = radianza del canal infrarrojo.

DC = cuentas digitales ó valores de pixel del canal infrarrojo.

m = valor de corrección de decaimiento por uso del sensor del canal infrarrojo.

b = valor de corrección de decaimiento por uso del sensor del canal infrarrojo.

El segundo paso de la conversión es a través de la ecuación 4, que tiene su base teórica en la función de Plank (Weinreb, 2009), convierte los valores de radiancia en una temperatura efectiva (Teff).

$$Teff = \frac{(c2 \times v)}{\ln[1 + (c1 \times v^3)/Ri]}$$
(4)

 $c_1 = 1.191066 \times 10^{-5} [mW/(m^2-sr-cm^{-4})]$

 $c_2 = 1.438833 (K/cm^{-1})$

Donde:

Teff = Temperatura efectiva.

C1 y C2 = Constantes de radiación

V = número de onda central del canal infrarrojo utilizado.

El último paso es la conversión de la temperatura efectiva a temperatura en grados Kelvin (ecuación 5). La medición de esta temperatura está limitada a los valores que adquieren los pixeles cuando se toma la imagen desde satélite. Esto quiere decir que existen niveles de sensibilidad en la medición de la temperatura por lo que para valores bajos de radianza en la imagen (medida en los pixeles), no es posible determinar un dato de temperatura, lo que limita el rango de medición de temperatura a un valor mínimo basal.

$$T = \alpha + \beta \times \text{Teff}$$
(5)

Donde:

T= temperatura recuperada.

 α y β = son coeficientes de conversión que dependen del canal infrarrojo y su respuesta espectral.



Figura 9. Diagrama de flujo para el algoritmo de recuperación de AOD de las imágenes GOES.

4.6 Construcción de la base final de datos

Con los datos de la RAMA y los datos de profundidad de las imágenes se creó una base de datos general donde se integró toda la información. Está organizada por estación, esto se refiere a que todos los datos de la estación Merced (PM_{2.5}, PM₁₀, NOx, CO, SO₂, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura) se encuentran en un solo archivo incluyendo los valores correspondientes de pixel de AOD recuperados de las imágenes. La Figura 10 muestra como está integrado cada archivo, que maneja las 8 variables de la RAMA y otras 4 correspondientes a los cálculos en la imágenes además de las 2 variables extra pertenecientes a el canal infrarrojo.



Figura 10. Distribución de la información en la base de datos general.

4.7 Análisis estadístico

Para el análisis de las variaciones entre las estaciones y épocas del año se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) de un solo factor cuando se buscaban diferencias significativas en las medias de más de dos poblaciones de datos. Para obtener el coeficiente de correlación se trabajaron los métodos de regresión lineal, y regresión lineal múltiple, los gráficos de correlación y las diferencias que se consideraron significativas solo cuando p < 0.05. Los análisis estadísticos se ejecutaron con los programas Open STATA 10.0 (Stata, College Station, TX) y Para el análisis de la correlación y regresión múltiple se empleó el paquete estadístico SIGMA PLOT 12.

Análisis de correlación y regresión lineal múltiple

El grado de correlación entre tres o más variables se llama correlación y regresión múltiple, sus principios son semejantes a los de la regresión lineal simple e intenta determinar o explicar la relación que existe entre las variables involucradas.

El coeficiente de correlación esta denotado por la ecuación:

$$\sqrt{\frac{\Sigma(y_{est-\breve{y}})^2}{\Sigma(y-\breve{y})^2}}$$
(6)

Donde:

 $\Sigma(y-\breve{Y})^2$ =la variación total.

 $\Sigma(y_{est}-\breve{y})^2$ =la variación explicada que deriva de de la variación total.

Donde la variación total de y se define como $\Sigma(y-\breve{y})^2$, que es la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores de (y) respecto a la media (\breve{y}).

Y la variación explicada $(\Sigma(y_{est}-\breve{Y})^2)$ que deriva de la variación total.

Así bien, si se supone una ecuación lineal (ecuación 6), el valor calculado de r mide el grado de relación de la variables dependiendo del tipo de ecuación que se adopte, valores negativos o cercanos a cero no significan que no exista relación entre las variables, de manera reciproca un valor cercano a 1 no significa una fuerte relación entre ellas, por tanto el coeficiente de correlación mide la bondad del ajuste entre la ecuación tomada y el ajuste de los datos (Correa, 2009).

5. Resultados y discusión

La concentración de las partículas atmosféricas es una variable clave para determinar la calidad del aire en las regiones urbanas, en consecuencia una etapa crucial para la evaluación de los aerosoles por medio de imágenes de satélite GOES es la conversión de la AOD a datos de concentración de PA. Para alcanzar este propósito fue necesario aplicar un algoritmo de recuperación de la AOD -GOES. No obstante, que este método ha sido descrito por Knapp and Vonder Haar (2002) y aplicado primordialmente en diversas ciudades de Estados Unidos (Farias et al., 2001; Knapp et al., 2002; Hutchinson, 2003; Knapp et al., 2005; Liu et al., 2009; Hoff et al., 2010), la descripción detallada del procedimiento no se encontró disponible en la literatura científica. Por esta razón, uno de los principales desafíos del trabajo fue el desarrollo del algoritmo, para su aplicación en la recuperación de información de aerosoles de imágenes GOES del AMCM durante el periodo enero - diciembre 2010 y el subsiguiente estudio de la correlación del AOD con datos de concentración de PA medidos por el SIMAT en sus estaciones de monitoreo.

Por tanto, el primer punto fue determinar las estaciones de la RAMA que se constituirían en puntos de referencia en la superficie terrestre para el acopio de información. El análisis de los datos horarios de contaminantes criterio (CO, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, NOx) y los parámetros meteorológicos como velocidad del viento, humedad relativa y temperatura, para todas y cada una de las estaciones de la RAMA, tuvo por objetivo determinar que regiones del AMCM cuentan con medición simultánea de todas estas variables, dado que se sabe que la relación entre AOD y la concentración de PA puede ser modificada por estos parámetros (Liu et al., 2009), a continuación se describen las principales características de la base de datos de PA.

5.1. Características de las variables atmosféricas medidas en campo

El análisis de la información del SIMAT, para el periodo de estudio, mostró que únicamente tres estaciones de la RAMA del SIMAT, Tlalnepantla, San Agustín

y Merced, cumplían con los requisitos del diseño de la investigación, asimismo se delimitó que los datos de campo se reportan como promedios horarios, en tanto que las imágenes GOES son enviadas cada media hora, como resultado se procedió a comparar la coincidencia en los horarios, para hacer compatible la contrastación de imágenes con las variables de campo. Se analizó también el comportamiento horario de las partículas, para ubicar los periodos (horas y meses) con mayor presencia de luz solar y región con mayores concentraciones.

La exploración de la información mostró que los valores de concentración de PA, reportados por la RAMA, para el año 2010 asumen la típica variabilidad espacio temporal de las regiones urbanas, en las Figuras 11 y 12 se presentan graficas que esquematizan el comportamiento de las PA por tamaños, regiones, horas y meses. En estas figuras se observa una distribución temporal horaria bimodal para las PM₁₀ y unimodal para las PM_{2.5}, con mayores niveles promedio para la estación Merced (estación con mayor flujo vehicular que las dos restantes), seguidos de Tlalnepantla y de San Agustín. De igual forma se distinguen meses con más altas concentraciones de PA, noviembre y diciembre que forman parte de la época seca-fría, periodo en el que los fenómenos de dispersión son más lentos, la afluencia vehicular incrementa por la época decembrina y por el aumento de gasto energético asociado a la época de frio, otro factor determinante en este periodo son las inversiones térmicas y cuyo mayor numero (17 días) ocurrió en el mes de diciembre (SIMAT, 2010).

Por otra parte, los meses con más baja concentración de partículas correspondieron a febrero, junio, julio, agosto y septiembre que concuerda con los meses en los que concluye la época seca caliente y se presenta la época húmeda, asimismo en las graficas A y C de la Figura 10 se puede observar bajos niveles de PA en la estación Merced y San Agustín para los meses de agosto –septiembre y mayo.

La variabilidad horaria confirmó que las horas pico del tránsito vehicular influyen en las concentraciones reportadas entre 7 - 12 PM, todas estas

observaciones concuerdan con la información histórica proporcionada por el SIMAT, quienes discuten también acerca de la importancia del clima, debido a que sus variaciones condicionan la concentración o dispersión de contaminantes en el aire. El clima permite por tanto delimitar épocas climáticas y su relación con el comportamiento de los contaminantes (Correa, 2009; SIMAT, 2010). De acuerdo al SIMAT se han tipificado para el AMCM tipos de épocas climáticas que definen la persistencia de ciertos contaminantes: seca-caliente (marzo-mayo) donde se disparan las mayores concentraciones de ozono, seca-fría (noviembre-febrero) en la que predominan las PA y la época de lluvia (junio -octubre) que corresponde a una época de sensible disminución de la contaminación atmosférica. El análisis del comportamiento en campo de las PA permitió ubicar momentos y regiones de mayor importancia para su visualización vía imágenes GOES.

Otro punto importante a discutir en este apartado corresponde al cumplimiento de la normatividad en materia de contaminación atmosférica y exposición de la población a las PA y que se detalla en la NOM 025. Para ello en la Tabla 7 se resumen los datos del análisis estadístico descriptivo de las PA para las tres estaciones. Esta norma oficial de salud establece que para una calidad del aire aceptable la concentración anual de $PM_{2.5}$, no debe exceder los 15 µg/m³, sin embargo como observamos las tres regiones rebasaron el promedio anual límite máximo permisible de PA.

El análisis de varianza de la concentración de los aerosoles troposféricos durante el periodo enero – diciembre 2010, mostró diferencia significativa en el comportamiento temporal de los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5} de las estaciones Tlalnepantla - Merced y Tlalnepantla - San Agustín, pero no dio evidencia de diferencias significativas entre las estaciones San Agustín – Merced (Tabla 8), esto sugiere un aire circundante más homogéneo entre estas, situación que concuerda con lo reportado en los patrones de viento promedio anual para el AMCM, que muestran una mayor influencia de los campos del viento del NE sobre la masa del aire de la región centro del DF (SMA-GDF, 2004).



Gráfica C. Estación San Agustín, datos PM_{2.5.}



Figura 11. Comportamiento anual de las PM_{2.5}, en las estaciones del AMCM para el año 2010.





Figura 12. Comportamiento anual de las PM₁₀, en las estaciones del AMCM para el año 2010.

PERIODO	PM _{2.5}											
		MER	CED		-	TLALNE	PANTLA			SAN AG	SUSTIN	
	Ν	Х	SD	Max	N	Х	SD	Max	Ν	Х	SD	Max
Enero	744	21.65	15.55	101	744	25.45	17.6	154	744	22.09	15.89	148
Febrero	672	14.63	11.6	98	672	17.36	13.26	80	672	13.02	10.74	52
Marzo	744	15.15	12.23	65	744	23.82	15.26	87	744	19.9	14.18	114
Abril	720	17.98	10.36	88	720	23.16	14.81	87	720	19.46	13.75	68
Мауо	744	22.17	12.74	82	744	26.15	14.61	84	744	0	0	0
Junio	720	10.8	13.78	78	720	21.79	15.45	83	720	10.78	11.31	53
Julio	744	15.49	11.53	76	744	18.39	11.75	103	744	13.96	10	79
Agosto	744	1.44	6.08	60	744	14.64	10.48	65	744	11.5	8.38	50
Septiembre	720	1.35	4.94	51	720	11.86	11.46	56	720	10.29	11.38	159
Octubre	744	22.87	16.99	84	744	21.01	12.89	72	744	18.91	13.26	67
Noviembre	720	33.12	20.78	175	720	26.21	14.14	88	720	30.69	18.26	184
Diciembre	744	31.68	26.79	175	744	28.27	18.89	190	744	36.95	23.2	221
Total	8760	17.4	17.61	175	8760	21.55	15.2	190	8760	17.32	16.59	221
						P	M ₁₀					
Enero	744	37.73	26.08	147	744	45.62	31.98	209	744	43.87	33.49	218
Febrero	672	32.71	22.88	148	672	36.84	29.85	169	672	34.47	33.07	210
Marzo	744	44.25	28.48	387	744	50.35	32.96	433	744	52.54	36.79	214
Abril	720	44.5	25.03	147	720	45.49	30.99	173	720	51.72	36.48	176
Мауо	744	52.62	35.54	264	744	61.32	31.95	199	744	0	0	0
Junio	720	37.71	24.85	199	720	48.41	28.57	177	720	27.47	25	113
Julio	744	27.41	21.5	114	744	38.25	20.58	142	744	32.52	19.36	116
Agosto	744	2.96	11	85	744	35.27	19.44	108	744	31.74	18.84	125
Septiembre	720	26.97	19.64	107	720	28.7	25.22	172	720	27.08	20.04	214
Octubre	744	57.3	44.1	381	744	52.69	28.09	167	744	55.72	43.42	589
Noviembre	720	77.56	42.93	296	720	63.89	29.88	176	720	78.96	42.01	308
Diciembre	744	76.54	56.71	246	744	61.63	32.53	260	744	100.3	54.07	501
Total	8760	43.24	38.16	387	8760	47.47	30.77	433	8760	44.77	41.66	589

Tabla 7. Parámetros estadísticos descriptivos de los datos mensuales de las PA en estudio.

PM _{2.5}							
Estación	Media	Diferencia con Merced	Diferencia Con Tlalnepantla				
Merced	36	—	—				
Tlalnepantla	43	SI	—				
San Agustín	37	NO	SI				
	PI	VI ₁₀					
Merced	14	—	—				
Tlalnepantla	19	SI	—				
San Agustín	14	NO	SI				

Tabla 8. Análisis de Varianza de promedios anuales de PA

5.2 Características y comportamiento de la profundidad óptica de los aerosoles (AOD)

Cuando se desea usar imágenes de satélite para observar y cuantificar un fenómeno o parámetro atmosférico es esencial entender su significancia, sus capacidades, limitaciones e incertidumbres. En nuestro estudio una de las preguntas centrales era ¿qué tan representativas podían ser las imágenes recuperadas del GOES del estado prevaleciente de los aerosoles en la atmósfera del AMCM?, para determinar sí ellas eran capaces de capturar las variaciones temporales y regionales (ej. las fluctuaciones horarias y diarias), era importante darse cuenta que la respuesta a esta pregunta dependía importantemente de las condiciones de la atmósfera (ej. presencia de nubosidad, cielo claro, limpio o contaminado).

La literatura describe que un apropiado cálculo de AOD requiere de condiciones de libre nubosidad y bajas reflectancias en la superficie, lo que en principio tiende a estar asociado con bajos niveles de humedad y viento (Liu et al., 2009). Tomando en consideración esta información se procedió a realizar una selección manual de aquellas imágenes que fueron tomadas por el GOES en el horario con presencia de luz solar, las que se encontraban libres de nubosidad, así como las que se encontraban libres de distorsiones después de su recuperación. De la cantidad inicial de 17520 imágenes originales (crudas es decir sin

procesamiento alguno) enviadas por el GOES durante el año 2010, fue factible recuperar un total de 8400 en el intervalo del horario que cuenta con luz solar, posteriormente al término de la inspección visual para detección de nubosidad el numero de imágenes se restringió a 1533 libre de nubes de agua. Este análisis evidenció que el porcentaje de días perdidos debido a nubosidad fue alto y como consecuencia la base final de datos, con imágenes potencialmente útiles, quedó integrada exclusivamente por información de los meses de: enero febrero, marzo abril, mayo, junio, noviembre y diciembre, mismos que se asocian a las épocas seca caliente y seca fría del año 2010 con mayores concentraciones en PA, de acuerdo a lo descrito en el análisis de los datos de campo.

La recuperación de información de aerosoles, a través de datos de imágenes de satélite no es sencilla debido a que un solo algoritmo puede no funcionar con todos los tipos de superficies del suelo, así por ejemplo sí el aerosol se encuentra sobre el océano los valores de radiancia cambian, esto tiene como consecuencia que el AOD cambie debido a que la variación entre el suelo y los aerosoles difiere de la variación con el océano por el tipo de reflexión, otro factor que afecta el algoritmo corresponde a la variación regional, horaria, diaria y mensual de la luz solar, por citar un ejemplo en las mañanas (6 a.m.-7 a.m.) la zona Este de la República Mexicana se encuentra iluminada, al mismo tiempo existen zonas al noroeste que aún se encuentran en la oscuridad y que inicia su iluminación conforme transcurre el día.

El algoritmo AOD del GOES desarrollado para estudiar el aire del AMCM partió de considerar imágenes libres de nubosidad, el AOD en un punto se compone del promedio de cinco pixeles circundantes, la base de la obtención del parámetro es la caracterización de la superficie reflectora libre de aerosoles (pixeles oscuros de la superficie) que se realiza con la obtención de pixeles de al menos 5 imágenes diferentes a la misma hora, todo esto en acuerdo a lo descrito por Knapp et al. (2002), quién ha desarrollado y probado algoritmos similares.

Todas las imágenes GOES previamente seleccionadas fueron entonces procesadas para parametrizar el AOD del canal visible a partir del algoritmo descrito en la Figura 9, los resultados demostraron que el algoritmo permitió recuperar la información de los aerosoles de las imágenes visibles del GOES, situación que se ejemplifica en la Figura 13 por medio de la visualización del AOD. En esta figura aparecen organizadas imágenes secuenciales del canal visible del GOES originales (A), las imágenes de la AOD recuperada y calculada a través del algoritmo desarrollado (B), las imágenes de la AOD GOES visibles filtradas con la información proveniente de los canales infrarrojo que eliminan restos de nubosidad (C).

Las imágenes de la Figura 13 muestran como se realza la dispersión de los aerosoles que conforman el humo producido por un incendio que tuvo lugar en la zona centro de México el 8 de mayo del 2010, se delimita además el respectivo nivel de profundidad óptica del aerosol que coincide con la misma secuencia de escenas del GOES y la dispersión que se observa en la imagen original del visible, en esta figura se observa cómo se logró la completa separación de la señal proveniente de los aerosoles troposféricos en la región de estudio.

El conjunto de datos del AOD de las tres regiones y periodo de estudio exhiben valores que van desde 0.05 a 0.15 comparables a los rangos promedios reportados para otros estudios (Liu et al., 2009), con variaciones horarias, diarias y regionales. Los valores de profundidad óptica más bajos se presentaron en SAG comparado con las otras dos estaciones. La Tabla 9 resume los parámetros estadísticos descriptivos de los datos mensuales de AOD para las estaciones del estudio. Al igual que en los trabajos de Liu et al. (2009), se encontraron algunos valores negativos de AOD causados por errores de reflectividad de superficie, que son indicativos de escenas con bajos niveles de aerosoles. El análisis estadístico de los datos de AOD reveló variabilidad espacio temporal, asimismo el análisis de varianza para esta variable demostró diferencias significativas entre los datos estimados para las regiones y los tiempos de estudio.



Figura 13. Imágenes subsecuentes del satélite GOES y del mapa de AOD. Observación de la señal y dispersión de una nube de aerosol en el Estado de México mayo 2010 A) imagen GOES original, B) mapa del AOD y C) mapa AOD filtrado con información canal infrarrojo.

PERIODO	AOD											
	MERCED					TLALNEPANTLA			SAN AGUSTIN			
	Ν	Х	SD	Max	Ν	Х	SD	Max	Ν	Х	SD	Max
Enero	65	0.08	0.02	0.12	74	0.08	0.02	0.11	62	0.05	0.02	0.09
Febrero	31	0.1	0.02	0.14	32	0.09	0.02	0.13	27	0.05	0.03	0.1
Marzo	46	0.09	0.03	0.14	72	0.1	0.03	0.14	65	0.06	0.03	0.11
Abril	41	0.06	0.02	0.09	41	0.06	0.02	0.08	30	0.015	0.015	0.04
Мауо	86	0.08	0.015	0.09	100	0.07	0.02	0.09	1	0.04	-	0.04
Junio	20	0.08	0.014	0.09	26	0.07	0.017	0.09	0	-	-	-
Noviembre	121	0.07	0.018	0.09	110	0.07	0.02	0.09	119	0.045	0.02	0.07
Diciembre	167	0.06	0.02	0.09	179	0.05	0.02	0.08	185	0.03	0.03	0.06

Tabla 9. Parámetros estadísticos descriptivos de los datos mensuales de laAOD-GOES visible.

5.3 Correlación entre datos de campo de PA, contaminantes gaseosos y AOD.

Para probar la funcionalidad del algoritmo que calcula la AOD, fue necesaria la comparación de datos estimados de profundidad óptica con las concentraciones de PA en campo, a través del análisis de regresión lineal múltiple. Previo a este momento, se determinaron los datos útiles para la comparación junto con los histogramas de distribución de las diferentes variables. La Tabla 10 y la Figura 14 presentan una descripción de esta información, que demostró que los histogramas y los resúmenes estadísticos de las variables fueron comparables con sus correspondientes conjuntos de datos. Justo aquí es preciso recordar que se emplearon los valores de la profundidad óptica calculados para los mismos tiempos de las mediciones en campo.

La información descrita proviene del análisis de 8760 datos de cada variable (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NOx, CO, HR, WSP y TEMP) lo que significa un total de 70,080 datos de la RAMA por estación, a pesar de que estas estaciones monitorean de forma continua los contaminantes, se evidenciaron algunos

problemas en la información reportada por el SIMAT para el año 2010, vacíos e inconsistencias (ej. relaciones de PM_{2.5}/PM₁₀ mayores a uno). Algunos de los problemas encontrados en las estaciones del SIMAT son reconocidos por ellos en sus informes y la gran mayoría están ligados a problemas de operación y mantenimiento de las estaciones e incertidumbre en la evaluación de las PA en días con bajos niveles de concentración. Esta situación ha sido previamente analizada por Correa (2009), quien reporta la existencia de este mismo tipo de contrariedades con las estaciones de las redes de monitoreo en todo el mundo. Por tanto la RAMA no es la excepción, la Tabla 10 presenta un resumen de la muestra total de los parámetros a correlacionar, en ella se observan la información perdida y la que presentó potencial uso.

Estación	Variables en	Total de datos	Datos	Datos
	estudio	recolectados	utilizados	eliminados
Merced	8	70,080	26,280	43,800
Tlalnepantla	8	70,080	26,280	43,800
San Agustín	8	70,080	26,280	43,800
Total	24	210,240	78,840	131,400

Tabla 10. Total de variables atmosféricas en estudio. Datos útiles y perdidos.

De las variables obtenidas de la RAMA las de mayor importancia para el estudio son PM_{2.5} y PM₁₀, corresponden a los componentes principales de los aerosoles (Correa, 2009; SIMAT, 2010) por lo que fueron ligadas directamente a la reflectancia en las imágenes para la calibración del algoritmo de AOD (Knapp, 2002).

La variación espacio temporal de las PM₁₀ y PM_{2.5} correspondió con la variabilidad de los datos de la AOD GOES, situación que concuerda con lo reportado en el estudio realizado por de Almeida et al. (2007), quienes realizaron

el seguimiento observacional de los aerosoles en la ciudad de México. Algunas variables del estudio se alejaron del comportamiento de distribución normal y aunque esta situación puede ser causal de incertidumbre en el análisis de regresión lineal, el diagnóstico de homocedasticidad (procedimiento que informa sobre la estabilidad e idoneidad del modelo) se reportó dentro de los lineamientos de cumplimiento.





Figura 14. Histogramas de distribución de las variables de estudio

La utilidad del AOD para la estimación cuantitativa de los aerosoles se valoró al aplicar el modelo de correlación lineal múltiple. Este tipo de paradigmas se ha empleado recientemente (Liu et al., 2009) para explorar la influencia de más de una variable explicativa X (PM_{2.5} y PM₁₀, además de la inclusión de parámetros meteorológicos como covariantes) en los valores que toma la variable dependiente Y (AOD). El procedimiento se realiza con fines predictivos o de validación del parámetro óptico calculado, ofreciendo la ventaja de utilizar más información en la construcción del modelo y, consecuentemente, realizar estimaciones más precisas.

En el caso particular de este trabajo las medidas de concentración de PA proporcionaron los puntos de referencia para la aplicación del modelo de regresión lineal múltiple, la ecuación de regresión y las correlaciones lineales se calcularon conjugando los valores de AOD en especial con las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, pero realizando también correcciones debidas otras variables explicativas que correspondieron tanto a los parámetros meteorológicos como a la concentración de gases criterio, debido a que mejoraron el nivel explicativo de la prueba.

La aplicación del método de correlación lineal a la base completa de datos, (es decir incluyendo todas las regiones, los meses y las horas) derivó en valores de coeficientes de regresión lineal r y de determinación R² (que mide el poder explicatorio del modelo lineal) por debajo de 0.5, esta situación probablemente se relaciona con la variación espacio temporal de las variables atmosféricas, suceso que es difícil de resolver e interpretar en los modelos predictivos (ver Tabla 11 y Figura 15). Tomando en consideración estos bajos valores de correlación se decidió explorar las variabilidades espaciales y temporales de forma separada con la finalidad de identificar las posibles fuentes de cambio y poder discutir acerca de los factores de incertidumbre y/o situaciones específicas en las que el modelo tiene una mayor validez.

Se procedió entonces a la selección de subgrupos de datos que incluyeran la exploración por regiones y por tiempos (horas del día y meses), debido a que la calidad de la información del satélite GOES puede estar influenciada por situaciones específicas como mayor albedo superficial, bajos niveles de aerosoles

y intensidad de luz solar, este tipo de subdivisión de datos es ampliamente manejada por los grupos de investigación que realizan este tipo de estudios (Knapp, 2002; Knapp et al. 2005 y Lie et al., 2009), para optimizar los algoritmos y encontrar los momentos de mayor efectividad de la estimación del AOD.

Conjunto de datos		AOD vs PM _{2.5}	AOD vs PM ₁₀	AOD vs PM _{2.5} , PM ₁₀
	Ν		R ²	
Todos los datos	1376	0.15	0.15	0.3
		Regiones		
Merced	422	0.33	0.25	0.3
Tlalnepantla	580	0.2	0.21	0.21
San Agustín	374	0.2	0.15	0.33
		Meses		
Enero	162	0.3	0.21	0.4
Febrero	70	0.43	0.4	0.45
Marzo	112	0.34	0.3	0.34
Abril	97	0.24	0.5	0.56
Мауо	80	0.41	0.4	0.47
Junio	24	0.96	0.95	0.96
Noviembre	339	0.14	0.1	0.32
Diciembre	492	0.31	0.24	0.4
		Horas		
8 AM	103	0.47	0.5	0.52
9 AM	204	0.3	0.33	0.4
10 AM	206	0.2	0.3	0.3
11 AM	193	0.35	0.42	0.44
12 PM	159	0.5	0.6	0.6
13 PM	138	0.4	0.5	0.5
14 PM	119	0.45	0.6	0.6
15 PM	107	0.42	0.5	0.5
16 PM	87	0.53	0.62	0.65
17 PM	72	0.6	0.61	0.61

Tabla 11. Coeficientes de correlación lineal para modelo múltiple AOD vs PA, gases criterio y variables meteorológicas

Todos los valores mostraron p < 0.05

La comparación de los coeficientes de correlación y de determinación obtenidos con la subdivisión de conjuntos de datos se detalla también en la Tabla 11 y se ilustran además en la Figura 15. El análisis detallado de la información

contenida en esta tabla indica que los valores de los coeficientes varían ampliamente dentro del rango de 0.2 a 0.9, que son más bajos cuando se diferencian los datos por región, en tanto que la magnitud de los coeficientes mejora cuando la exploración ocurre con la agrupación de los datos por tiempo tanto por hora como por mes. Los mayores valores de correlación se obtuvieron cuando el AOD GOES se relacionan con la concentración de PM₁₀, para los meses de abril a junio y para el horario entre las 12 a las 17 PM, este escenario puede estar asociado con la reducción de la señal del aerosol debida a menores flujos de luz solar en estos periodos o con meses y horas en los que predomina un mayor flujo de radiación solar (Yoon, 2006).



Figura 15. Coeficientes de correlación lineal del modelo AOD GOES *versus* concentración de partículas en campo y covariables meteorológicas y gaseosas. Análisis de la base de datos completa y por agrupación espacial y temporal.

Cuando el análisis de los coeficientes de correlación y determinación se realiza por estación y por tiempo se observan regiones con mejores grados de predicción del AOD (ver Tabla 12 y Figura 16), la Merced se caracteriza por presentar un comportamiento más uniforme en sus coeficientes con mayores
valores hacia los meses de abril y mayo y en el horario de entre las 12 y 17 p.m., una importante ausencia de información se evidencia en los meses de mayo y junio, justo cuando esta correlación es más alta para los aerosoles de la estación de Tlalnepantla. El caso de San Agustín es un poco distinto dado que las mejores correlaciones se observaron entre febrero y mayo.

Conjunto de datos	onjunto de datos			AOD vs PM _{2.5} , PM ₁₀			
	Merced Tlalnepantla San Agustín		Agustín				
	N	R ²	N	R ²	N	R ²	
			N	leses			
Enero	43	0.6	68	0.24	51	0.68	
Febrero	31	0.43	27	0.52	12	0.99	
Marzo	37	0.68	65	0.33	10	0.99	
Abril	33	0.64	37	0.57	27	0.74	
Мауо	-	-	80	0.47	-	-	
Junio	-	-	24	0.96	-	-	
Noviembre	118	0.32	108	0.39	113	0.38	
Diciembre	160	0.45	171	0.31	161	0.42	
			ŀ	loras			
8 AM	31	0.49	45	0.64	26	0.41*	
9 AM	63	0.3	83	0.18	58	0.18*	
10 AM	63	0.34	86	0.1*	57	0.1*	
11 AM	57	0.5	80	0.24	54	0.2*	
12 PM	46	0.66	68	0.40	41	0.3*	
13 PM	41	0.65	57	0.24*	37	0.3*	
14 PM	37	0.77	49	0.48	31	0.54	
15 PM	33	0.67	46	0.40	28	0.5	
16 PM	27	0.75	37	0.64	23	0.67	
17 PM	24	0.64	29	0.6	19	0.63*	

Tabla 12. Coeficientes de correlación lineal para modelo múltiple AOD vs PM_{2.5}, PM₁₀ y gases criterio y variables meteorológicas por estación.

* valores no significativos p > 0.05

Un comportamiento generalizado de los coeficientes se observa en los meses de noviembre y diciembre, caracterizado por bajos valores, situación que puede tener su explicación en la disminución del flujo solar en la época de fin de año. Por otra parte un mayor sesgo y perdida de significancia estadística se

observa en los valores de los coeficientes cuando las concentraciones de las PA son bajas y en regiones donde se presentan un mayor numero de vacíos de información, pero esta situación también puede estar asociada con diferencias en la reflectancia de la superficie donde se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo o reducción de señal debido a un incremento de reflectancia de la superficie (Knapp, 2002).





Los resultados en general deben ser considerados con prudencia, dadas las variabilidades espacio temporal de las PA y los factores que las afectan. Los coeficientes de correlación lineal mostraron variabilidad con el tamaño de la muestra, con la época del año y la hora del día, con el tipo de región valorada, algunos de los datos de correlación fueron congruentes con los reportados por diversos autores y que oscila entre 0.5 y 0.70 (Kanpp, 2002; Yoon, 2006; Ciren et al., 2008 y Liu, et al., 2009). Así mismo la variabilidad en los valores de R² por estación y tiempo también se ha reportado en los trabajos de Liu et al., (2009), por otra parte los datos empleados para comparación que se obtuvieron de la RAMA, tiene un error asociado de al menos un 20% para el año 2010 como lo reporta el

SIMAT, este resultado es congruente debido a que la incertidumbre asociada al algoritmo de AOD es grande.

Por último se trazo el grafico de dispersión del AOD *versus* la concentración de las PM_{2.5}, calculado por medio del ajuste por mínimos cuadrados, en la Figura 17 se ilustran estos gráficos sin ajuste y con ajuste estadístico.



Figura 17. Grafico de correlación entre la AOD y las PM_{2.5} de las tres estaciones en estudio durante el año 2010. A) ajustado y B) sin ajuste.

En resumen se observa un comportamiento regional, horario y mensual variable de la profundidad óptica de los aerosoles en la región de estudio, con tendencias a valores máximos hacia la primavera y verano, hacia horas posteriores al medio día, lo que sugiere una asociación con la dinámica del flujo de luz solar en la región.

El modelo de AOD probado tiene un poder de predicción de la concentración de PA, que mejora cuando el análisis se realiza en la escala temporal y disminuye cuando se aplica el análisis en la escala espacial, este hallazgo es congruente con los resultados del estudio realizado por Liu et al. (2009) quienes en su estudio proponen que una mejora de la escala espacial se puede lograr cuando las predicciones se realizan con valores promedios anuales, este procedimiento se aplica para amortiguar un poco las variaciones espacio temporales y se considera de utilidad dado que el nivel de exposición que más frecuentemente se rebaza en las zonas urbanas es el de exposición crónica.

Por último, de acuerdo a nuestros resultados la señal que el GOES envía de los aerosoles para las tres estaciones puntuales estudiadas en el AMCM, puede aplicarse para cuantificarlos bajo ciertas condiciones específicas, es particularmente sensible a altas concentraciones de PA, ciertas horas del día y algunos meses, no obstante se requiere incrementar la cantidad de datos para mejorar la resolución espacial de la respuesta, pues su eficiencia en distintas condiciones ambientales puede diferir y consecuentemente una optimización puede ser requerida, también es necesario encontrar las principales fuentes de error cuando el análisis se realiza en la escala del espacio y mejorar la calidad de la correlación como lo discuten en su trabajo Piters et al. (2011).

6. Conclusiones y perspectivas futuras

El estudio descrito en este documento se enfocó en explorar el potencial del satélite GOES para monitorear, cualitativa y cuantitativamente los aerosoles suspendidos en el aire del AMCM. Se realizó un análisis exploratorio de las posibles relaciones entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} reportadas en campo por la RAMA y los datos de profundidad óptica del canal visible del GOES

67

calculados para los mismos tiempos de monitoreo en campo, considerando otras variables de influencia como los gases criterio y las variables meteorológicas.

Los resultados y los productos generados durante el desarrollo del trabajo permitieron cumplir con los objetivos de la tesis y probar la hipótesis, así mismo proporcionaron evidencias que apoyan las siguientes conclusiones:

- El algoritmo desarrollado y aplicado en la recuperación de información de las imágenes GOES permitió calcular la profundidad óptica de los aerosoles dispersos en la tropósfera del AMCM, opera con la entrada de datos puntuales provenientes de imágenes que promedia para estimar un valor final.
- La recuperación del AOD del GOES y su comparación con los datos de campo reportados por el SIMAT muestra una tendencia de asociación positiva razonable sobre todo en la escala del tiempo.
- Se obtuvieron valores adecuados de correlación para situaciones específicas meses del año y horas del día.
- Se encontraron vacíos de información e inconsistencia en datos reportados por la RAMA para PM₁₀ y PM_{2.5}, sobre todo para la estación San Agustín ubicada al noreste del AMCM, que repercutieron en la disminución del poder explicatorio del modelo lineal, dado que fue adecuado para ciertas regiones, tiempos y marginalmente suficiente para otras.
- El uso de datos satelitales GOES puede complementar y apoyar la detección remota de los aerosoles, pero se requiere incrementar la población de datos, tanto en el espacio como en el tiempo, para optimizar el modelo de predicción temporal correspondiente.
- Estudios previos en México, lograron observar los aerosoles en el aire del AMCM, nuestro trabajo corresponde al primer acercamiento de la identificación y cuantificación de aerosoles vías imágenes de satélite GOES.

Perspectivas futuras. Una reflexión que se deriva del trabajo, se relaciona con la identificación de los factores determinantes de la variabilidad del AOD recuperada de imágenes GOES para el AMCM, los debidos a fenómenos naturales locales, regionales y globales y/o los debidos a la influencia de las actividades antropogénicas. Para dar respuesta a las interrogantes que se derivan de ella es necesaria la profundización del conocimiento en esta área, algunos estudios que pueden proporcionar elementos para dar respuesta son:

- a. La recuperación de información de aerosoles a través del uso de otros datos satelitales como el MODIS, que puede aportar mayor información de la aplicabilidad y validez de este tipo de herramienta.
- b. Continuar con el análisis de las series de datos de AOD generados por el sistema desarrollado, para optimizar los tiempos de respuesta y estar en posibilidad de proporcionar en un futuro información en tiempo real y su comparación con los datos históricos y cotidianos que reporta el SIMAT.

7. Bibliografía

- Badrinath, K.V.S. (2010). Atmosphere, In Roy, P.S., Dewivedi, R.S., Vijayan, D. (Ed), *Remote sensing applications (pp 251-272)*. India: National remote Sensing Centre by NRSC/ISRO.
- Barnaba, F. and Gobbi, P. (2004). Modeling the Aerosol Extinction versus Backscatter Relationship for Lidar Applications: Maritime and Continental Conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21, 428-442.
- Chang, I., Han, D., Dean, C., Wu, X. and Weinreb, M. (2011). Vicarious calibration of the GOES Imager visible channel. (Technical report). Camp Springs: NOAA/NESDIS, office of research and applications.
- Ciren, P. Kondragunta, S. Xu, C. and Green, M. (2008). Retrieval of aerosol optical depth from geostationary satellites and applications for air quality monitoring. Trabajo presentado en el congreso de AWMA, San Diego, USA.

- 5. Correa, G.A. (2009). Contaminantes atmosféricos en la zona metropolitana de la ciudad de México. México D.F.: Dirección de publicaciones IPN.
- Crounse J.D., DeCarlo P.F., Blake D. R., Emmons L. K., Campos T.L., Apel E.C., Clarke A.D., Weinheimer A.J., McCabe D.C., Yokelson R. J., Jiménez J.L., and Wennberg P.O. (2009). Biomass burning and urban air pollution over the Central Mexican Plateau. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 4929 – 4944.
- de Almeida C., Prinn, R., Martins, V., Herold, M., Ichoku, C., and Molina, L. T. (2007). Urban Visible/SWIR surface reflectance ratios from satellite and sun photometer measurements in Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 7, 8113-8139.
- 8. Dragutin, T., Mihailovic A. and Kiran. (2009). Chemical transport models. *Environmental Science and Pollution Research*, 16, 144–151.
- Economopoulos, A. (2002). Evaluación de fuentes de contaminación del aire. (Informe técnico no.1).Ginebra: Serie de tecnología ambiental de la OMS.
- 10. Emili E., Popp C., Wunderle S., Zebisch M., Petitta M. (2011). Mapping particulate matter in alpine regions with satellite and ground-based measurements: An exploratory study for data assimilation. *Atmospheric Environment*, 45 (26), 4344-4353.
- 11. Engel, J., Hollomanb, C., Coutantb, B., Hoffc, R. (2004). Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmospheric Environment*, 38, 2495–2509.
- 12. ESA (European Space Agency). *All about ESA, 2010.* European Space Agency: An ESA Communications Production. Recuperado de http://www.esa.int/esaCP/index.html.
- 13. Farias, M., Lagos, M., Cereceda, P., Larrain, H., Osses, P., Pinto, R. y Nuñez, R. (2001). *Metodología para el análisis del comportamiento espacio-*

temporal de nubes estratocúmulos mediante percepción remota, con énfasis en su penetración en el desierto costero de Tarapacá. Trabajo presentado en XXII Congreso Nacional y VII Internacional de Geografía, Chile.

- 14. Gupta, P. and Christopher, S.A. (2008). Seven year particulate matter air quality assessment from surface and satellite measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussion*, 8, 327–365.
- 15. Gupta, P., Christopher, S., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40, 5880–5892.
- 16. Hadjimitsis, D., Retalis, A. and Clayton, C. (2002). The assessment of atmospheric pollution using satellite remote sensing technology in large cities in the vicinity of airports. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 2, 631– 640.
- 17. Heiberg, H., Tsyro, S., Valdebenito, A., Schyberg, H. (2010). Strategic review of satellite products and recommendations for future comparison with model results and data assimilation. (Informe No. 5). Oslo: Norwegian Meteorological Institute.
- Heintzenberg, J. (2009). The SAMUM-1 experiment over Southern Morocco: overview and introduction, *Tellus series B*, 61, 2–11. doi:10.1111/j.1600-0889.2008.00403.x
- 19. Hoff, R.M. and Christopher, S.A. (2010). Remote Sensing of Particulate Pollution from Space: Have We Reached the Promised Land. *Journal Air Waste Management Association*, 59, 645–675.
- Hutchison, K. (2003). Applications of MODIS satellite data and products for monitoring air quality in the state of Texas. *Atmospheric Environment*, 37, 2403–2412.

- 21.IUPAC (2001). Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units. Washington DC: UIPAC.
- 22. Kaskaoutis, D.G., Sifakis, N., Retalis, A., and Kambezidis H.D. (2010). Aerosol Monitoring over Athens Using Satellite and Ground-Based Measurements. *Advances in Meteorology*, volumen: 2010, Article ID 147910, 12. doi:10.1155/2010/147910
- 23. Kaufman, Y.J. and Koren, I. (2006). Smoke and Pollution Aerosol Effect on Cloud Cover. *Science*, 313 (4), 655-658.
- 24. Kaufman, Y.J., Tanré D. & Boucher O. (2002). A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, 419 (12), 215 223.
- 25. Kawata, Y., Yamazaki, A., Imanaka, M. (1998). A new algorithm for estimating aerosol optical thickness from satellite image data and it's accuary. Proceedings of the international symposium on the atmospheric correction of satellite data and its application to global environment, Japan.
- 26. King MD, Kaufman YJ, Tanré D, and Nakajima T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2229 – 2259.
- 27. Knapp, k. R. and Vonder Haar, T. H., Kaufman, Y.J. (2002). Aerosol optical depth retrieval from GOES-8: uncertainty study and retrieval validation over South America. *Journal of the Geophysical Research*, 107, 1-12.
- 28.Knapp, K.R. (2002). Quantification of aerosol signal in GOES 8 visible imagery over the United States. *Journal of the Geophysical Research*, 107(D20), 4426.
- 29. Knapp, K.R. and Vonder Haar T.H. (2002). Aerosol remote sensing over The Battlefield using Geostationary visible sensors in the Battlespace Atmospheric and Cloud Impacts on Military Operations. Presented en Conference, Fort Collins, CO.

- 30. Knapp, K.R., Frouin, R., Kondragunta, S., Prados, A. (2005). Toward aerosol optical depth retrievals over land from GOES visible radiances: determining surface reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 4097-4116.
- Laszlo, I., Ciren, P., Liu H.; Kondragunta, S., Dan Tarpley, J.; Goldberg, M.D. (2008). Remote sensing of aerosol and radiation from geostationary satellites. *Advance Space Research*, 41, 1882–1893.
- 32. Lira, J. (1991). La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio.México DF: Fondo de Cultura Económica.
- 33. Liu, Y., Paciorek, C. J. and Koutrakis, P. (2009). Estimating regional spatial and temporal variability of PM_{2.5} concentrations using satellite data, meteorology and land use information. *Environmental Health Perspectives*, 6(117), 886-892.
- 34. Löndahl, J., Swietlicki, E., Lindgren, E., and Loft, S. (2010). Aerosol exposure versus aerosol cooling of climate: what is the optimal emission reduction strategy for human health?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 9441–9449.
- 35. Martin, R.V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42, 7823–7843.
- 36. Massie S.T.; J Gille, C.; Edwards D.P.; Nandi, S. (2006). Satellite observations of aerosol and CO over Mexico City. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 40, 6019-6031.
- 37. Nichol, J., Wong M.S., Lam, A., Fung, C., Leung, K.m. (2006). Assessment of urban environmental quality in a subtropical city using multispectral satellite images. *Environment Planning B: Planning and Desing*, 33(1), 39 -58.

- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2010). GOES-NO/P/Q the next generation. (Technical report). USA: Department of Commerce U.S.
- 39. Noh, Y. M., Muller, D., Shin, D.H., Lee, H.J., Jung, S., Lee, K.H., Cribb, M., Li, Z.Q., and Kim, Y.J. (2009). Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea. *Atmospheric Environment*, 43, 879-888.
- 40. Piters, A.J.M., Buchmann, B., Brunner, D., Cohen, R.C., Lambert, J.C., de Leeuw, G., Stammes, P., van Weele, M. and Wittrock, F. (2011). Data Quality and Validation of Satellite Measurements of Tropospheric Composition. En Burrows J.P., Platt U., Borrell P. Springer (Ed.), *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space,* (pp 315- 364). Berlin: Springer.
- 41. Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurston GD. (2002). Lung Cancer, cardiopulmonary mortality and longterm exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 287, 1132-1141.
- 42. Pope, C.A., and Dockery, D.W. (2006), Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 56, 709-742.
- 43. Rao, N. (2001). Implementation of the post-launch vicarious calibration of the GOES imager visible channel. (Technical report). Camp Springs : NOAA/NESDIS, office of research and applications.
- 44. Sears, F. W. y Zemansky, M. W. (1978). *Física General*. Madrid: Aguilar.
- 45. SEDESOL. (1994). Norma Oficial Mexicana NOM-CCAM-002-ECOL/1993.
- 46. SEMARNAT. (2003). "Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010" (PROAIRE). México D.F.: INE.

- 47. Shackelford, J. F. (2005). Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros. Madrid: Pearson.
- 48. Shimizu, E. (2004). Satellite Remote Sensing. Civil Engineering (Vol. I). Tokyo: Encyclopedia of Life Support Systems.
- 49. SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México). Informe anual de la calidad del aire, 2010. México D.F.:INE.
- 50.SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México). Recursos técnicos, 2010. México, D.F.: INE. Recuperado de: http://www.sma.df.gob.mx/simat2/index.php?opcion=65.
- 51. SMA-DF (Secretaria del Medio Ambiente). Informe anual de la calidad del aire en el AMCM, 2010. México D.F.: INE.
- 52. SMA-GDF (Secretaria del Medio Ambiente). Informe Climatológico Ambiental del Valle de México, 2004. México D.F.: INE.
- 53. Terán-Cuevas, A.R., Martínez-López K., Gutiérrez-Castillo M.E. (2009). The Forest Fire Detection in Mexico and Central America by Using Satellite. Trabajo presentado en congreso de A&WMA's, Detroit, Michigan.
- 54. USEPA (Environmental Protection Agency) (2004). *Air quality criteria for particulate matter (Vol.1)*. United States Washington DC: U.S. Office of research and development.
- 55. Valavanidis, A., Fiotakis, K. and Vlachogiann, T. (2008). Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms. *Journal of Environmental Science and Health*, 26(4), 339-362.
- 56. van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., and Villeneuve, P.J. (2010). Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical

Depth. Development and Application Environmental Health Perspectives, 118 (6), 847-855.

- 57. Wang, J., Susan, C., van den Heever, and Jeffrey, S.R. (2009). A conceptual model for the link between Central American biomass burning aerosols and severe weather over the south central United States. *Enviromental Research Letters*, 4(1), 12.
- 58. Weinhold, B. (2009). Alcance global de la contaminación. *Environmental Health Perspectives*, 116(8), A338-A345.
- 59. Weinreb, M. and Han, D. (2009). *Calibration of the visible channels of the GOES Imagers and Sounders*. (Technical report). Camp Springs: NOAA/NESDIS, office of research and applications.
- 60.Wu, J., Winer, A.M., Delfino, R.J (2006). Exposure assessment of particulate matter air pollution before during and after the 2003 Southern California wildfires. *Atmospheric Environment*, 40, 3333–3348.
- 61.Yoon, J. M. (2006). Effects of atmospheric and surface properties on the retrieval of AOD from geostationary satellite. (Master Thesis). Yonsei University, Corea.
- 62. Yu, H., Kaufman, Y.J., Chin, M., Feingold, G., Remer, L. A., Anderson, T. L., Balkanski, Y., Bellouin, N., Boucher, O., Christopher, S., DeCola, P., Kahn, R., Koch, D., Loeb, N., Reddy, M. S., Schulz, M., Takemura, T. and Zhou, M. (2006). A review of measurement-based assessments of the aerosol direct radiative effect and forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 613–666.
- 63. Yu, H., Remer, L.A., Chin, M., Bian, H., Kleidman, R.G. and Diehl T. (2008). A satellite-based assessment of transpacific transport of pollution aerosol. *Journal of Geophysical Research*, 113, D14S12.

ANEXOS





Reunión Nacional de usuarios SIGSA-Esri 2011

Edgar J. Arellano Hernández (<u>hartiganzn@gmail.com</u>, Tel. 5523038123). CIIEMAD-IPN Natalia Meneses Garmendia. ENCB-IPN

Ángel R. Terán-Cuevas. SMN-CONAGUA Felipe A. Vázquez G. SMN-CONAGUA M. Eugenia Gutiérrez-Castillo. CIIEMAD-IPN

Actualmente se ha incrementado el interés de evaluar la contaminación a través de medios como la teledetección, esto debido a que existe evidencia de que los aerosoles tienen la capacidad de afectar el clima, la calidad del aire y la salud humana. La calidad del aire urbano se ha monitoreado con redes de estaciones y se ha usado modelos para evaluar la emisiones y predecir cambios en la calidad del aire en determinados puntos. Los sistemas de información geográfica, en especial la rama de teledetección proveen un nuevo camino para el monitoreo de aerosoles y gases en la atmosfera en una escala regional, esto gracias a instrumentos que permiten la observación de ciudades con una alta resolución espacial y temporal. Este estudio explora mediante el uso de herramientas de GIS la posibilidad de detectar aerosoles en la atmosfera en locaciones dispersas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) con alta densidad de población. La reflectancia solar detectada por el satélite en condiciones libres de nubes es comparada contra mediciones de partículas atmosféricas (PM₁₀ and PM_{2.5}) realizadas en tierra en tres estaciones de monitoreo de la red de monitoreo atmosférico de la ciudad de México (SIMAT, GDF). La información obtenida del satélite GOES 12 y GOES 13 del canal 1 (visible, 0.52-0.72 µm) es usada para comparase con mediciones en tierra mientras que los canales infrarrojos 2 (3.78-4.03 µm), 4 (10.2–11.2 µm), y 5 (11.5–12.5 µm) son utilizados para remover nubes de las escenas.

Palabras clave: Teledetección, Sistemas de Información Geográfica, aerosoles, partículas atmosféricas.

Mexico City Aerosol Satellite observations. A comparison of retrieval GOES images and ground-level particulate matter.

A&WMA's 104th Annual Conference & Exhibition 2011.

Edgar J. Arellano Hernández¹

¹Departamento de Ingeniería y Biociencias, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo- IPN, Calle 30 de Junio de 1520, Barrio la Laguna Ticomán C.P. 07340, México, D.F.

Natalia Meneses Garmendia²

²Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del IPN

Ángel R. Terán-Cuevas ³

³Servicio Meteorológico Nacional- CONAGUA, Av. Observatorio N° 192 Col. Observatorio Del. Miguel Hidalgo C.P. 11860 México, D.F

F. Adrián Vázquez Gálvez.³

M. Eugenia Gutiérrez-Castillo¹

¹Departamento de Ingeniería y Biociencias, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo- IPN, Calle 30 de Junio de 1520, Barrio la Laguna Ticomán C.P. 07340, México, D.F.

Urban aerosol assessment by satellite remote sensing arouses increasing interest due to the mounting evidence of the aerosol effects on radiative transfer, climate, air quality and human health. Urban air quality has traditionally been monitored with networks of ground monitoring stations and the use of models that evaluate emissions and predict changes in air quality at discrete points. Remote sensing provides a new way to monitor aerosols and gases at local and regional scale just because it is currently in significant development thanks to the achievement of instruments allowing the observation of cities at high spatial - temporal resolution. This study explores the ability of GOES to detect aerosol for locations scattered across to the densely populated Mexico City metropolitan area (MCMA), the cloud-free satellite detected solar reflectance is compared to ground-level particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) measured as part of the Atmospheric Monitoring Network from Mexico City (SIMAT, GDF). Data from GOES-13 channel 1 (the visible, 0.65 µm) is used to compare with ground-based observations while information from channels 2 (3.9 µm), 3 (6.5 µm), and 4 (11.7 µm) are used to remove clouds from the comparisons using spectral difference and spatial uniformity tests. The multitemporal and multispectral satellite images and algorithm based on the analysis of solar reflectance at the top-of-the-atmosphere show seasonality and aerosols local variations in aerosol optical depht measurements (AOD). An empirical relationship between AOD and PM_{2.5} mass is higher than PM₁₀.

Keywords: Satellite remote sensing, urban aerosols, GOES 12, Atmospheric optics

Mexico City aerosol satellite observations. A comparison of retrieval GOES images and ground-level particulate matter.

A&WMA's 104th Annual Conference & Exhibition 2011.

Extended Abstract Number: Control # 69

Edgar J. Arellano Hernández¹, Natalia Meneses Garmendia², Ángel R. Terán-Cuevas³, F. Adrián Vázquez Gálvez³ and M. Eugenia Gutiérrez-Castillo¹

¹Departamento de Ingeniería y Biociencias, Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo- IPN

Laguna Ticomán C.P. 07340, México, D.F.

²Escuela Nacional de Ciencias Biológicas -IPN

³Servicio Meteorológico Nacional- CONAGUA, Av. Observatorio N° 192 Col. Observatorio Del. Miguel Hidalgo C.P. 11860 México, D.F

INTRODUCTION

In response to growing attention over urban particulate air pollution, the international scientific community and the regulatory authorities have considered the aerosol monitoring and research as high priority by its regional and global effects on radiative transfer, climate, air quality and human health as major concern. Improved scientific knowledge of atmospheric particulate matter (PM) is especially urgent and current for target megacities like the Mexico City Metropolitan Area (MCMA), region where the aerosol particles National Ambient Air Quality Standards are frequently exceeded.^{1, 2}

MCMA urban aerosol loading has traditionally been assessed from *in situ* observations with the ground monitoring stations by the air quality monitoring network from Mexico City (SIMAT, GDF). The MCMA monitoring program focuses on mass and size aspect in different regions at discrete points.^{1, 2} Actually, more realistic and complementary PM level scenarios and spatial and temporal atmospheric aerosol parameters can be remotely sensed from satellite since provide a modern way to monitor aerosols and gases at local and regional scale and to understand temporal and spatial variation of aerosols just because it is currently in significant development thanks to the achievement of instruments. This allows the observation of cities and areas far from monitors (suburban and rural) at high spatial – temporal resolution.

Retrievals of aerosol optical depth from geostationary satellite measurements already have a long history³. The geostationary platform has improved spatial and spectral capabilities. One distinct advantage is the high temporal resolution when compared to polar orbiting (or other low earth orbit) satellite.⁴ Several studies have explored the potential of the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) to provide aerosol information for the US over South America and East Asian region. ^{3, 4, 5, 6, 7}

This study explores the ability of GOES to detect aerosol for locations scattered across to the densely populated Mexico City metropolitan area (MCMA). In this region the aerosol burden is high and MODIS aerosol studies just begin.^{8, 9} One-year (2010) record of aerosol data from GOES 13 channel 1 (the visible, 0.65 μ m) and channels 2 (3.9 μ m), 3 (6.5 μ m), and 4 (11.7 μ m) were used to detect cloud-free satellite solar reflectance which was compared with ground-level particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) measured as part of the Atmospheric Monitoring Network from Mexico City (SIMAT, GDF).

METHODS

Description of the area and datasets

Mexico City's metropolitan area is one of the world s largest metropolitan areas. It is located in a basin on the central Mexican plateau at an altitude of 2240m and latitude of 19°N. The basin occupies 3540 km² with a population of ~ 20 million, surrounded by even higher mountains, and is bordered on the east and west by mountains that rise 1,000 m above the valley floor, with low points to the north and south. The MCMA topography exacerbates the poor air quality ^{7,8}. The Atmospheric Monitoring Network (SIMAT, GDF) of Mexico City provide air-pollutant concentration and meteorological data for air quality assessment. The examined data refer to hourly concentration measurements of NO_x, SO_x, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, and temperature, relative humidity, wind speed and wind direction, from three ambient air quality monitoring stations within MCMA. These stations are representative of different environments. Downtown-Merced (MER) located with high vehicular emissions, Northeast-San Agustin (SAG) is a typical urban area and Northwest-Tlalnepantla (TLA), representing a large and complex industrial area with high traffic and poor vegetation (Figure 1). Moreover, we make use of the current GOES imagers (GOES 12 and 13) from one-year (2010), provided by the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).



Figure 1. Localization of MCMA and air quality monitoring stations

Selection of pixels

The retrieving process of GOES image (GOES 13) was performed with band in the visible (0.65 μ m) and three bands (3.9, 6.5 and 11.7 μ m). Considering that the nominal spatial resolution instantaneous geometric field of view is 1 km for the visible channel, and 4 km for the infrared channels, a rescaling was applied. Data from visible channel were used to compare with ground-based observations while information from infrared channels was used to remove clouds from the comparisons using spectral difference and spatial uniformity tests.

The retrieval process starts out with the observation of 89 days satellite images, between January 2010 and January 2011, next cloud-free scenes identification. A total of 17, 520 images were explored only 1533 were selected from the three studied regions (MER, TLA, SAG). The aerosol signal evaluation was done by estimating the mean surface ALBEDO from retrieval four adjacent GOES pixels only during daytime and for the cloud-free and dark pixels (figure 2). The detected solar reflectance was compared to ground-based observations. The database, where measurement, were indexed by geographic latitude, longitude, altitude and time. In addition, other criteria pollutants and meteorological data were included.

In order to convert the raw data collected by satellites into a form functional by scientists, an algorithm must be invoked. The Aerosol optical depth (AOD) assessment, a quantitative measure of PM abundance in the atmospheric column, can be estimated using surface reflectance calculated and solar zenith correction using clear-sky composite background images. The AOD calculated from a single visible channel allows the reduction of atmospheric effects. We calculated the AOD value for method applied on Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES) data.⁴

Statistical Analysis

Correlations among the different parameters were analyzed with Pearson's correlation coefficient as well as a linear regression. A one-way ANOVA was performed when more than two groups were compared. Statistical analyses were performed using STATA 8.0 (Stata, College Station, TX), and differences were considered significant when P < 0.05.

RESULTS AND DISCUSSION

We focused our analysis on three selected aerosol sites within MCMA (air quality monitoring stations) with well-known meteorological and environmental conditions. The results from this study were used to estimate correlations between MCMA surface PM_{2.5} concentrations and aerosol information derived from geostationary remote sensing instruments.

Results show a positive and low association between surface ALBEDO from retrieval GOES images with PM₁₀ and PM_{2.5} concentration measurements, lightly major for PM_{2.5}. The correlation analysis demonstrated spatial and temporal variability. Significantly, superior association was observed between surface ALBEDO and PM ground-based observations in SAG monitoring station. Monthly variation of correlation coefficients aerosol was indication of seasonal variability, the association increased notably in cold-dry periods (November – February) just when PM concentration in MCMA is highest. Similarly, it was observed a horary variability with superior correlation in the morning and the afternoon, this event may be caused by variation in solar zenith. Table 1 summary the correlation values between satellite pixel surface values related to ALBEDO and AOD and ground-based aerosol measurements and other criteria pollutants and meteorological data, in terms of different time and region from MCMA

Region	Mean ± SD			Correlation Pearson test	
	PM _{2.5}	PM ₁₀	Pixel	PM _{2.5} /Pixel	PM ₁₀ /Pixel
THREE ESTATION	39.5 ± 20.7	89.4 ± 41.9	103.3 ± 20.3	0.34	0.20
MER	41.9 ± 23.9	91.5 ± 47.4	105.3 ± 19.5	0.23	0.09
SAG	36.0 ± 17.3	78.6 ± 32.4	102.0 ± 20.7	0.38	0.24
TLA	41.2 ± 19.6	101.7 ± 42.1	102.6 ± 20.4	0.45	0.31

Table 1. Statistica	l descriptor	and Correlation	coefficient
---------------------	--------------	-----------------	-------------

n = 1530

GOES AOD map of the aerosols spatial distribution in the MCMA is illustrated in the figure 2, it correspond to 18 January 2010. The GOES image reveals the geographical extension of the dust plume moving. AOD and surface PM_{2.5} concentrations associations were higher than ALBEDO *versus* PM for the period analyzed. Consistently, correlations of AOD with PM_{2.5} showed spatial-temporal variability. Our data are consistent with the reported in studies realized in USA and South America. ^{3, 7} The association between the AOD and surface reflectance retrievals confirm that the consideration of atmospheric conditions can provide better lower boundary conditions to the radiative transfer model and reduce the uncertainty in the estimate of aerosol direct effect the incident angle of solar radiation.

Despite the different spatial resolutions and method inherent uncertainties compared to groundbased instruments, the satellite-based retrieval leads to satisfactory results in the majority of the cases.

SUMMARY

The analysis of correlations coefficients of AOD and surface reflectance with PM concentration, at selected sites/months, demonstrates that it is promising to detect aerosol for GOES information in the Mexico City metropolitan area. It is necessary to include season and satellite platform information for more accurate estimates of surface PM_{2.5} concentrations from satellite AOD data. The information on the surface reflectance is necessary for the retrieval of aerosol optical depth over land. GOES AOD could be associated to urban aerosol distribution. We need include parameters that allow the relationships to vary with season and satellite platform to provide more accurate results. Linear regression is used to determine the aerosol satellite signal detected with ground-based aerosol measurements because the relationship provide a measure for data validation. There is important to use different channels to analyze the atmospheric particles by using others bands such as thermal.



Figure 2. Mexico City metropolitan area map from GOES12 on 18 January 2010. a) raw GOES image Mexico. b) GOES data Mexico central sector. c) corresponding aerosol AOD in gray scale as part b. d) GOES-AOD for image in part c.

REFERENCES

- CAM: Programa para Mejorar la Calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Mexico 2002–2010, Capitulo 2, La Zona Metropolitana del Valle de Mexico, 25 pp., online available at: (<u>http://www.paot.org.mx/centro/libros/proaire/</u> cap02.pdf), last access: March 2010, 2002.
- Fast, J. D.; de Foy, B.; Acevedo Rosas, F.; Caetano, E.; Carmichael, G.; Emmons, L.; McKenna, D.; Mena, M.; Skamarock, W.; Tie, X.; Coulter, R. L.; Barnard, J. C.; Wiedinmyer, C.; and Madronich, S. Atmos. Chem. Phys. 2007,7, 2233–2257.
- 3. Laszlo, I.; Ciren, P.; Liu H.; Kondragunta, S.; Dan Tarpley, J.; Goldberg, M.D. Adv. Space Res. 2008, 41, 1882–1893.
- 4. Knapp, K.R. and Vonder Haar, T.H. J. Geophys. Res. 2002, 107, 4055.
- 5. Knapp, K. R.; Frouin, R.; Kondragunta, S. and Prados, A. Int. J. Remote Sens. 2005, <u>26</u>, 4097 4116.
- 6. Jong-Min, Y. Master Thesis Yonsei University at Seoul Korea. 2006.
- Paciorek, C.J.; Liu, Y.; Moreno-Macias, H.; and Kondragunta, S. Spatio-temporal Associations Between GOES Aerosol Optical Depth Retrievals and Ground-Level PM_{2.5}. 2007, Harvard University Biostatistics Working Paper Series Paper 74.
- 8. de Almeida Castanho A D.; Prinn R.; Martins V.; Herold M.; Ichoku C. and Molina L.T. Atmos. Chem. Phys. 2007, 7, 5467–5477.
- 9. Massie S.T.; J Gille, C.; Edwards D.P.; Nandi, S. Atmos. Environ. 2006, 40, 6019-6031.



Mexico City aerosol satellite observations. A comparison of retrieval GOES images and ground-level particulate matter.

Edgar J. Arellano Hernández¹, Natalia Meneses Garmendia², Ángel R. Terán-Cuevas³, F. Adrián Vázquez Gálvez³ and M. Eugenia Gutiérrez-Castillo¹

¹Departamento de Ingeniería y Biociencias. Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo- IPN

²Escuela Nacional de Ciencias Biológicas - IPN

³Servicio Meteorológico Nacional (SMN)- CONAGUA.

A&WMA`s 104th Annual Conference & Exhibition 2011. Extended Abstract Number: Control # 69



S DAL

INTRODUCTION

Several studies have explored the potential of the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) to provide aerosol information for the US over South America and East Asian region.

The concentration of aerosols in the atmosphere has an impact on human health and in areas of high concentration of population and mainly urban areas where they concentrate and create. It is therefore necessary to make a continuous monitoring of these aerosols

A viable option to assess concentrations of aerosols in urban areas and also to know the direction in which it moves and its impact on an area is through satellite observation.

GOALS

- This study explores the ability of GOES to detect aerosol for locations scattered across to the densely populated Mexico City metropolitan area (MCMA).
- Contrast the detected aerosol reflectance retrievals with ground-based aerosol measurements.

RESULTS AND DISCUSSIONS



Ground-level particulate matter follow temporal and spatial change. SAG and MER are regions with elevated PM level fluctuations. High PM concentrations are appraised daily and monthly (short periods between 5:OO AM and 14:00 PM and longer periods for cold dry season months).

A similar behavior is observed on the aerosol reflectance retrievals. The correlation values between satellite pixel values and ground-based aerosol measurements were low and significant. That correlation coefficients improved when they are analyzed at different MCMA times and regions.

METHODS



Study area

Three points of MCMA were selected, Down town-Merced (MER) located with high vehicular emissions, Northeast-San Agustin (SAG) is a typical urban area and Northwest-Tlalnepantla (TLA) is a industrial zone.

 NO_X , SO_X , CO, O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, hourly concentration data and temperature, relative humidity, wind speed and wind direction were used to compare with satellite image data.



Reflectance from GOES

One-year (2010) record of aerosol data from GOES 13 and 12 channel 1 (the visible, 0.65 μ m were used to detect cloud-free satellite solar reflectance which was compared with ground-level particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.6}).

The retrieval process starts out with the observation of 89 days satellite images, between January 2010 and January 2011.

A total of 8,720 images were explored only 1,533 were selected from the three studied regions (MER, TLA, SAG).

Flowchart of the algorithm AOD and retrieval of neinte



The aerosol signal evaluation was done by estimating the mean reflective surface from retrieval four adjacent GOES pixels only during daytime and for the cloud-free and dark pixels.

Statistical Analysis

Correlations among the different parameters were analyzed with linear regression. A one-way ANOVA was performed when more than two groups were compared. Significant differences when P < 0.05.

We calculated the AOD value for method applied on Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES) data.

AOD December 2010



AOD in study area



Acknowledgements: thanks to the SMN and NOAA for the images provided for this project.

Scatter plots and linear correlation of retrievals aerosol reflectance *versus* ground-level PM_{2.5}



Linear (Correlation coe	fficient
	PM _{2.5} /Pixel	PM ₁₀ /Pixel
	Month	
January	0.23	0.2
February	0.41	0.36
April	0.32	0.22
May	0.34	0.31
November	0.27	0.15
December	0.24	0.20
	Region	
Three stations	0.34	0.20
MER	0.23	0.09
SAG	0.38	0.24
TLA	0.45	0.31

ground-level PM_{2.5} points . January 2010



The next step is to calculate the aerosol optical depth AOD, and make new correlation with the data.

REFERENCES

Knapp, K.R. and Vonder Haar, T.H. J. Geophys. Res. 2002, 107, 4055.
Liu Y., Paclorek C. J. and Koutrakis P. Environ Health Perspect. 2009, 6

(117) 886-892. Wu, J., Winer, A.M., Delfino, R.J. Atmos Environ, 2006, 40, 3333–3348.