

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE MODELOS PARA CALCULAR PROPIEDADES ÓPTICAS ATMOSFÉRICAS A PARTIR DE IMÁGENES DIGITALES

Martha Guzmán¹, Alejandro Restrepo²

¹M.Sc. (c). Docente en la Facultad de Ingenierías. martha.guzz@gmail.com

²Ph.D. Docente Investigador. alejandromartinez@itm.edu.co, Grupo de Investigación Automática y Electrónica. Instituto Tecnológico Metropolitano. Calle 73 No 76A -354 Vía al Volador. Medellín, Antioquia.

RESUMEN

Se presenta una revisión del estado del arte sobre los modelos para calcular propiedades ópticas atmosféricas con la intención de determinar su aplicabilidad en la formulación de indicadores de la calidad del aire a partir de imágenes digitales. Los modelos revisados fueron los de las propiedades: profundidad óptica, opacidad y visibilidad; obteniéndose como resultado que todos ellos presentan moderados niveles de complejidad y podrían ser utilizados para definir indicadores de calidad del aire; sin embargo, se encontró que para definir indicadores de la calidad del aire desde imágenes digitales, la visibilidad ofrece ventajas comparativas respecto a las demás propiedades ópticas atmosféricas. Luego, se presenta un examen de los modelos para la cuantificación de la visibilidad desde el análisis digital de imágenes; apreciándose que no se han establecido las condiciones para la captura de las imágenes tales como: las características de la escena, las características ópticas de la cámara, las condiciones climáticas de iluminación, ni la resolución de la imagen.

Palabras clave: Visibilidad atmosférica, Profundidad óptica, Opacidad, Análisis digital de imágenes, Visión por computador.

Recibido: 18 de abril de 2013.

Aceptado: 21 de Junio de 2013.

Received: April 18th, 2013.

Accepted: June 21st, 2013.

MODELS FOR CALCULATING ATMOSPHERIC OPTICAL PROPERTIES FROM DIGITAL IMAGES: A STATE OF THE ART REVIEW

ABSTRACT

A review of the state of the art models for estimating atmospheric optical properties to determine their applicability in developing indicators of air quality from digital images is presented. The reviewed models were the properties: optical depth, opacity and visibility. The results indicate that all of them have moderate levels of complexity and could be used to define indicators of air quality from digital images. However, the findings showed that the visibility offers advantages compared to other atmospheric optical properties. Then, a review of the models for the quantification of visibility from digital images is presented, to appreciate that the conditions for capturing images such as the characteristics of the scene, the optical characteristics of the camera, the climatic conditions of illumination, and the resolution of the image have not been established yet.

Keywords: Atmospheric Visibility, Optical Depth, Opacity, Digital image analysis, Computer vision.

1. INTRODUCCIÓN

En el monitoreo de la calidad del aire resulta deseable el establecimiento de métodos que permitan hacer rastreos a través de la *web* debido a sus características de accesibilidad y velocidad [23]; pero, para lograrlo resultaría necesaria la definición de índices de la calidad del aire usando modelos con pocas variables para que su ejecución sea rápida y permita su medición en tiempo real utilizando la misma red. En este sentido, actualmente se tiene una propuesta de la comunidad científica, [7], [21], [10], [11], que consiste en usar las propiedades ópticas atmosféricas (profundidad óptica, opacidad y visibilidad) combinadas con la extracción de información significativa por medio de técnicas de procesamiento de imágenes [2], para la definición de índices de calidad del aire; sin embargo, no se ha establecido todavía cuál de las propiedades ópticas de la atmósfera resulta más conveniente para la definición de los índices, ni se han establecido las ventajas o desventajas comparativas de los métodos propuestos.

Las razones que justifican la definición de índices de calidad del aire, a partir de propiedades ópticas atmosféricas (POA), son varias: La primera es que las POA son indicadores visibles, para las personas, de la contaminación del aire [1] porque se refieren a la transparencia de la atmósfera. La segunda es que un aumento en la concentración de material particulado suspendido (PM) en la atmósfera incide en los valores de las propiedades ópticas de la misma: aumentando la profundidad óptica [4], [5], [6], [7]; aumentando la opacidad [8], [9], [10], [11]; y disminuyendo la visibilidad [12], [13], [14], [15], [18], [19], [27]. La tercera razón es que, realizando procesamiento digital sobre las imágenes es posible cuantificar cambios relacionados con las POA, [21], [10], [22], [37].

Para medir propiedades ópticas atmosféricas, ó parámetros ópticos, se ha utilizado habitualmente la estimación de la radiación, o de la intensidad de la luz, con sensado remoto a través de espectro-radiómetros instalados en satélites [22], [33], [38], [62], y/o mediciones desde tierra con Radiómetros, Fotómetros, Telefotómetros, y Espectrómetros para profundidad óptica [6], [7], [21], [50], y con Transmisómetro de pila y Lidar para opacidad [9], [59]; pero estos equipos presentan alguno de estos inconvenientes: pequeño rango dinámico, gran tamaño, elevado costo [24], modelos de cálculo

complejos [4], [7], [20]. Actualmente se encuentra en la literatura una tendencia a medir las POA a través del análisis digital de imágenes capturadas con cámaras fotográficas de sensor CCD (*charge-coupled device*) y sensor CMOS (*Complementary metal-oxide-semiconductor*), [25], [26], [39], [40], [49], [53], [54], [58], que son más pequeñas y menos costosas que los equipos mencionados.

Se considera pertinente, y esto es lo que desarrollaremos en este documento, una revisión del estado del arte de: los modelos de medición de las propiedades ópticas atmosféricas (POA), de las correlaciones de las medidas de las POA con las concentraciones de material particulado suspendido en la atmósfera, y de las metodologías que cuantifican desde las imágenes digitales aquella propiedad que presente las mejores correlaciones. La intención es establecer: las condiciones de aplicación de los métodos, los avances en los nuevos desarrollos, además de, las ventajas y las limitaciones de los procedimientos propuestos en la literatura científica.

2. PROPIEDADES ÓPTICAS ATMOSFÉRICAS

En esta sección se revisan las definiciones y los modelos matemáticos utilizados para la estimación de las POA con el objetivo de determinar el grado de complejidad de cada uno de ellos; también se señalan los instrumentos comúnmente utilizados en su medición, aunque, se anticipa que la mayoría utilizan sensado remoto con espectro-radiómetros instalados en satélites [4], [7], [32], [33], [50], y/o mediciones desde tierra con radiómetros, telefotómetros y espectrómetros [6], [12], [13], [14], [15], [16], [52]. Luego, se resumen las correlaciones lineales encontradas entre los valores estimados de las POA y las concentraciones de material particulado (PM) encontrados en las referencias científicas consultadas.

2.1. Modelos, para Estimar las Propiedades Ópticas Atmosféricas (POA), utilizados en las ciencias atmosféricas

Profundidad Óptica Atmosférica. La profundidad óptica atmosférica es una cantidad adimensional (τ) que mide el flujo luminoso atenuado en una trayectoria definida por la luz al atravesar la atmósfera [59]; y teóricamente se puede calcular con (1) para cada longitud de onda diferente (λ) de la luz incidente, [71], cuando se considera la

atenuación debida tanto a fenómenos de absorción como de esparcimiento de la luz.

Si $\tau \rightarrow 1$, el medio tiene elevada profundidad óptica, el medio bloquea el paso de la luz y se dice que la transparencia del medio es baja; en cambio si $\tau \rightarrow 0$, entonces el medio tiene poca profundidad óptica, el medio no bloquea el paso de la luz y es altamente transparente.

$$\tau(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(\lambda) ds \quad (1)$$

Donde $\sigma_{ext}(h)$ es el coeficiente de extinción de la luz, en la columna vertical de altura vertical s por encima de la superficie del terreno y sus unidades son m^{-1} o km^{-1} , representa una medida de la atenuación de la luz, [20], y equivale a la suma de una componente debida al fenómeno de absorción más otra debida al esparcimiento de la luz así: $\sigma_{ext}(\lambda) = \alpha_v(\lambda) + a(\lambda)$; y corresponde a la proporción de flujo luminoso, de un haz de luz colimado, que es atenuado mientras viaja por la atmósfera una distancia igual a la unidad de longitud, [59].

En la literatura científica se encuentran dos términos para el mismo concepto: profundidad óptica AOD, y espesor óptico del medio AOT. La diferencia entre los dos radica en que la profundidad óptica se calcula para la trayectoria completa del medio, y el espesor óptico solo para una trayectoria parcial.

En la Tabla 1, se presenta un resumen con los modelos para estimar profundidad óptica; donde puede apreciarse que los modelos dependen de: las características del tamaño de las partículas aerosoles, la temperatura, la humedad relativa, altura de la capa límite, el ángulo cenital solar, y la concentración molecular, [7], [20], [21], [38], [50].

Los equipos utilizados para la medición de la profundidad óptica atmosférica en las referencias revisadas son el fotómetro, el espectro-radiómetro digital y las cámaras digitales. El fotómetro es un instrumento para medir la intensidad (I) de la luz en candelas (cd), y su principio de funcionamiento se basa en el hecho de que cada material absorbe o emite energía lumínica de diferente longitud de onda. El espectro-radiómetro digital mide la luminancia (L) en cd/m^2 de fuentes y de objetos reflectantes utilizando mediciones de reflectividad

(fracción de la luz reflejada respecto de la luz incidente), [59].

Opacidad Óptica Atmosférica

Considerando que en un medio gaseoso la transmisión de la luz T_λ está definida como en (2), (donde I_0 es la intensidad de la luz incidente en el medio y que I es la intensidad que logra atravesarlo):

$$T_\lambda = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Y además considerando que el coeficiente de absorción de la luz es $\alpha_v = \rho k_v$; se define la opacidad (k_v) como el coeficiente de absorción másico de la luz, [72], que depende de longitud de onda (λ) y mide la cantidad de luz que no logra atravesar el medio gaseoso; y está relacionada con la transmisión de la luz según la ecuación (3) cuando se desprecia el fenómeno de esparcimiento de la luz

$$T_\lambda = e^{-\int_{x_0}^x \rho k_v dx} \quad (3)$$

Donde ρ que es la densidad del medio y k_v es la opacidad para una longitud de onda específica (λ), y tiene unidades de cm^2/kg cuando la trayectoria x se mide en cm. Cuando ρ y k_v son constantes para un medio, entonces:

$$k_v = \frac{\ln(\frac{1}{T_\lambda})}{\rho x} \quad (3a)$$

Otro modelo utilizado a nivel industrial es mostrado en (4), donde Θ_λ es la opacidad óptica del medio para una longitud de onda (λ) específica y T_λ es la transmitancia del medio.

$$\Theta_\lambda = 1 - T_\lambda \quad (4)$$

Si $\Theta \rightarrow 1$, se dice que el medio es opaco y la transmitancia es 0. En cambio, si $\Theta \rightarrow 0$ la transmitancia es máxima en esa longitud de onda, o sea 1, y se dice que el medio es transparente.

En la Tabla 2, se presenta un resumen con los modelos para estimar opacidad óptica; donde puede apreciarse que los modelos dependen en su mayoría de: la radiancia luminosa.

Tabla 1. Modelos utilizados en las ciencias atmosféricas para la Profundidad Óptica Atmosférica.

Modelo	Ref	Variables
$\tau(\lambda) = \int_0^{\infty} \sigma_{ext}(\lambda) dx$	[71]	Modelo utilizado en las ciencias de la atmósfera, que incluye extinción debida a fenómenos de absorción y de esparcimiento de la luz.
$\tau(\lambda) = \sigma_{ext}(\lambda) x; \text{ cuando: } \sigma_{ext} = cte$		Donde: $\sigma_{ext}(\lambda)$ Es el coeficiente de extinción debido tanto a la absorción como al esparcimiento de la luz.
$\tau(\lambda) = \frac{1}{m} \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right) = \cos(\theta) \ln\left(\frac{1}{T(\lambda)}\right)$	[21]	Modelo que incluye el término $m = \sec(\theta)$, que es la masa óptica del aire, para la trayectoria de la luz que tiene ángulo cenital igual a θ . λ es la longitud de onda, τ es la profundidad óptica total de la columna vertical de aire, I_o es la intensidad incidente en el medio, I es la intensidad remanente que logra cruzar la trayectoria, T es la transmitancia o Transmisión de la luz = $\frac{I(\lambda)}{I_o(\lambda)}$
$\tau_v(\lambda) = \int_{x_0}^x \alpha_v(\lambda) dx$	[72]	Modelo que solo considera el aporte de la atenuación debida al fenómeno de absorción de la luz.
$\tau(\lambda) = \alpha_v(\lambda) x; \text{ Cuando: } \alpha_v(\lambda) = cte$	[5]	Donde: $\alpha_v(\lambda)$ es el coeficiente de absorción (cm^{-1})
$\tau(\lambda) = \rho k_v(\lambda) x; \alpha_v(\lambda) = \rho k_v(\lambda)$	[50]	cuando x es la longitud de la trayectoria en cm , ρ es la densidad del medio, y $k_v(\lambda)$ es el coeficiente de atenuación másico en cm^2/kg .
$\tau(\lambda) = \tau_R + \tau_{o1} + \tau_{o2} + \tau_w + \tau_a$	[21] [38]	τ : Como la suma de las contribuciones por esparcimiento y absorción, generadas por las moléculas de los gases y por los aerosoles. Donde: τ_R es la fracción de τ debida al esparcimiento de Rayleigh por moléculas de los gases, τ_{o1} es la porción originada por la absorción de moléculas de ozono, τ_{o2} es la parte por la absorción de moléculas de oxígeno, τ_w es la fracción por la absorción de moléculas de vapor de agua, y τ_a es la fracción por la absorción la debida a los aerosoles.
$\tau_a(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_e(r, \lambda, m_c) n(r) dr$	[21]	τ_a es la fracción de la profundidad óptica debida a la absorción por los aerosoles, r es el radio de la partícula, Q_e es el factor de extinción de Mie, m_c es el índice complejo de refracción del aerosol, $n(r)$ es la distribución de tamaño de las partículas aerosoles en la columna vertical atmosférica.
$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$	[21]	τ_a es la fracción de la profundidad óptica debida a la absorción por los aerosoles. El exponente α una constante que depende del tamaño del aerosol y β es el coeficiente de turbidez.
$AOT_{\lambda=550nm} = \frac{3.9449}{V} + 0.08498$	[7] [50]	AOT es espesor óptico del aerosol en la longitud de onda de los 550 nm en la columna vertical; y V es visibilidad horizontal en kilómetros.

Tabla 2. Modelos, utilizados en las ciencias atmosféricas, para la Opacidad Óptica Atmosférica.

Modelo	Ref	Variables
$T_\lambda = e^{-\int_{x_0}^x \rho k_v dx}$ $\tau_\lambda = \int_{x_0}^x \rho k_v dx$	[72]	<p>Modelo que relaciona la transmisión de la luz T_λ con la opacidad k_v (también llamado coeficiente de absorción másico), en los medios gaseosos.</p> <p>Modelo que relaciona la profundidad óptica τ_λ con la opacidad k_v.</p>
$\Theta_\lambda = 1 - T_\lambda$ $\Theta_\lambda = 1 - \frac{I}{I_o}$	[73]	<p>Modelo utilizado en los opacímetros de uso industrial que miden la atenuación de la intensidad de radiación visible por absorción y dispersión de humo, en una longitud fija; se utiliza directamente sobre la fuente de emisiones contaminantes.</p> <p>Donde Θ es opacidad, y T es la transmisión de la luz.</p>
$K = - \frac{WL}{\rho \ln\left(\frac{I}{I_o}\right)}$	[8]	<p>Modelo utilizado en equipos que miden la opacidad a nivel industrial, correspondiente a humos, que se ubican directamente sobre la chimenea emisora de humos.</p> <p>Donde: K representa la opacidad de la pluma como la relación entre el volumen específico de las partículas sobre el coeficiente de extinción de la luz. W es la masa total de las partículas en la pluma, I_o es la intensidad luminosa incidente en el medio, I es la intensidad luminosa que logra cruzar el medio, L es el diámetro de la chimenea o pila, ρ es la densidad del medio</p>
$\Theta^{(c)} = 1 - \frac{N_{wp} - N_{bp}}{N_w - N_b}$	[10] [11]	<p>Modelo utilizado sobre imágenes digitales:</p> <p>Donde $\Theta^{(c)}$ es la opacidad óptica calculada por contraste, N_{ij} son valores de radiancia luminosa estimada como el valor del pixel en la imagen digital. Siendo radiancia equivalente a la emitancia luminosa con unidades de lux=lumen/m².</p>
$\Theta^{(t)} = 1 - \frac{N_{t1}}{N_0}$	[10]	<p>Modelo utilizado sobre imágenes digitales:</p> <p>Donde $\Theta^{(t)}$ es la opacidad óptica calculada por contraste, N_{ij} son valores de radiancia luminosa estimada como el valor del pixel en la imagen digital.</p>

Visibilidad Óptica Atmosférica. La propiedad óptica denominada visibilidad (V) es una medida de la transparencia del medio que es cruzado por la luz. Por lo tanto para la atmósfera como medio: si $V \rightarrow \infty$ la transparencia atmosférica es alta, en cambio si $V \rightarrow 0$ la transparencia de la atmósfera es nula.

La visibilidad puede medirse [59] con modelos de: rango óptico meteorológico (MOR), visibilidad meteorológica para el día o para la noche, rango visual meteorológico (MR), alcance visual o rango visual, visibilidad reinante o prevalente, y otros; todas estas definiciones con unidades de distancia en metros o en kilómetros.

Por ejemplo, el alcance visual o, rango visual (V_a) es la máxima distancia a la que puede distinguirse un objeto negro de su fondo y generalmente es estimada por observadores humanos entrenados. El rango óptico meteorológico (MOR) es la longitud x requerida de la trayectoria para reducir el flujo luminoso ϕ_o del rayo colimado de una fuente incandescente (con un tipo de luz equivalente al que tendría un radiador perfecto a una temperatura de 2700K) hasta 5% de su valor original [59], ver (5); el MOR considera que el coeficiente de extinción σ_{ext} (6) es constante a lo largo de la trayectoria en la longitud de onda $\lambda = 0.55 \mu m$ que es la longitud de onda estándar donde la eficiencia luminosa del ojo humano es máxima durante el día, y considera como factor de transmisión $T = 0.05$, [59].

$$MOR = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.05}\right)}{\sigma_{ext}}; [m] \quad (5)$$

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \alpha_v(\lambda) + a(\lambda); [m^{-1}] \quad (6)$$

Donde $\alpha_v(\lambda)$ es el coeficiente de absorción de la luz, y $a(\lambda)$ es el coeficiente de esparcimiento de la luz.

En la Tabla 3 se presenta un resumen con los modelos encontrados para la medición de la visibilidad donde puede verse que, los modelos dependen en su mayoría del coeficiente de extinción total de la luz y el contraste de luminancias [22], [24], [29], [41]. Y en la Tabla 4 se muestran las formulaciones encontradas para la medición del contraste (C) que se menciona en la

Ley de Koschmieder incluida en los modelos para medir visibilidad de la Tabla 3.

Se destaca en esta sección que según las referencias: el fenómeno de la “luz del aire” I_{air} (o esparcimiento de la luz atmosférica I_B) hacia el sensor, afecta las mediciones de las POA, [28], [35], [44], [45], [46], [48]; al producir un aumento de la intensidad luminosa aparente I del objeto cuando se aumenta la distancia de observación x , [72]. Ver (7) y (7a).

$$I_{air} = I_B (1 - e^{-\sigma_{ext} x}) \quad (7)$$

$$I = I_0 e^{-\sigma_{ext} x} + I_B (1 - e^{-\sigma_{ext} x}) \quad (7a)$$

Tabla 3. Modelos usados en las ciencias atmosféricas para la Visibilidad Óptica Atmosférica.

Modelo	Ref	Variables
$I = I_0 e^{-\sigma_{ext} x} + I_B (1 - e^{-\sigma_{ext} x})$	[74]	Ley de Koschmieder: Sobre la intensidad aparente I de un objeto observado a una distancia x ; que incluye fenómenos de atenuación por la ley de Beer-Lambert ($I_0 e^{-\sigma_{ext} x}$) de la intensidad del objeto (I_0); y de incremento de la intensidad de la intensidad de la escena (o la atmosfera I_B) por la “luz del aire” ($I_B (1 - e^{-\sigma_{ext} x})$). Donde I_0 es la intensidad del objeto, y la I_B es la intensidad de la escena o de la atmósfera.
$\frac{C_x}{C_0} = e^{-\sigma_{ext} x}$	[75] [45]	Duntley, según [75], propone que la relación de contrastes decrece exponencialmente con la distancia al observador x .
$\frac{C_x}{C_0} = 0.02$	[24]	Según [24] y [30], se propone la mínima relación de contrastes para distinguir un objeto del fondo.
$\frac{C_x}{C_0} = 0.05$	[30]	C_x es el contraste aparente de un objeto Negro ubicado a una distancia x desde el observador, C_0 es el contraste inherente del objeto, o sea, a una distancia $x = 0$.
$MR = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.02}\right)}{\sigma_{ext}}$	[59]	Rango Visual Meteorológico ó Rango Meteorológico: Implica una mínima relación de contrastes visible del 2%. Donde σ_{ext} es el coeficiente de extinción total para la longitud de onda $\lambda = 0.55 \mu m$ cercana al color verde.
$MR \cong \frac{3.91}{\sigma_{ext}}$		
$MOR = \frac{\ln\left(\frac{1}{0.05}\right)}{\sigma_{ext}}$	[59]	Rango Óptico Meteorológico: Implica una mínima relación de contrastes visible del 5%. Donde σ_{ext} es el coeficiente de extinción total para la longitud de onda $\lambda = 0.55 \mu m$ cercana al color verde.
$MOR \cong \frac{3}{\sigma_{ext}}$		
x	[59]	Visibilidad meteorológica del día = Alcance Visual = Rango Visual. Estimada por observadores entrenados. Máxima distancia a la que un objeto Negro se diferencia del fondo.
x	[59] [47]	Visibilidad reinante o prevalente. El mayor Rango Visual de al menos la mitad del círculo del horizonte.

Tabla 4. Formulaciones para el contraste.

	FORMULACIÓN	VARIABLES
WEBER [66]	$C = \frac{L_h - L_b}{L_h}$ $C = \frac{I_h - I_b}{I_h}$	<p>Donde L_b es la Luminancia, o intensidad luminosa por unidad de área en cd/m^2 o en $lm/(sr m^2)$ del objeto observado, y donde L_h es la luminancia del fondo.</p> <p>Esta formulación también suele encontrarse como relación de intensidades luminosas (I) en candelas (cd).</p> <p>La relación de contraste también se encuentra, con signo contrario en el numerador, en [72].</p>
MICHELSON [66]	$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$	<p>I_{max} y I_{min} son los valores de intensidad máximo y mínimo de la rejilla sinusoidal que representa señales periódicas, en unidades de candelas (cd).</p>
PELI [66]	$C_j^P = \frac{BP_j(x, y)}{LP_j(x, y)}$	<p>$BP_j(x, y)$ es la imagen filtrada pasabanda en la banda de frecuencias j y la $LP_j(x, y)$ es la imagen filtrada pasabajo en una octava por debajo de la banda j.</p>
BABARI [75]	$C_{texture} = \frac{I_{b2} - I_{b1}}{I_h}$ <p>Con: $C_0 = \frac{R_2 - R_1}{A_\infty}$</p>	<p>Definen Textura de Contraste: Para dos objetos (1 y 2) ubicados a la misma distancia x desde la cámara. Donde I_{bi} intensidad del objeto I_h intensidad del fondo.</p> <p>Donde R corresponde al valor del pixel del objeto, A_∞ corresponde a la intensidad del cielo o del fondo o I_h</p>
[74]	<p>Entonces:</p> $C = C_0 e^{-\sigma_{ext} x}$	

2.2. Correlaciones entre las POA y la concentración de Material Particulado (PM)

El material particulado atmosférico consiste en pequeñas partículas sólidas o líquidas excepto del agua ($< 100 \mu m$) presentes en suspensión en la atmósfera; están compuestos de proporciones variables de: carbono, hollín, sulfatos, nitratos, cloruros (zonas costeras), silicatos, oxi-hidróxidos de Fe, carbonatos, y otros, [70].

Cuando su diámetro no supera los $10 \mu m$ se les denomina PM10, cuando no superan los $2.5 \mu m$ se llaman PM2.5. A continuación, en la Tabla 5, se muestran correlaciones encontradas entre las POA y las concentraciones de aerosoles atmosféricos.

También puede decirse, observando la Tabla 5, que las mayores correlaciones entre las POA y las concentraciones de PM se obtienen para el coeficiente de esparcimiento (relacionado con la visibilidad) y la visibilidad; y que los datos de correlación lineal entre el PM y la opacidad son los más bajos de todos los reportados.

2.3. Ventajas comparativas de la Visibilidad Atmosférica para definir índices de calidad del aire desde imágenes digitales

El análisis digital de imágenes requiere que los modelos a utilizar sean lo más sencillos posibles para disminuir el tiempo computacional de cálculo [23]; considerando sencillez del modelo como el menor número de variables involucradas. En la revisión del nivel de complejidad de los modelos de medición de las POA, en este trabajo, se encontró que: Los modelos para medir profundidad óptica dependen de las características del tamaño de las partículas aerosoles, la temperatura, la humedad relativa, altura de la capa límite, el ángulo cenital solar, y la concentración molecular, [5], [6], [7], [21], [38], [50], [55]; los modelos para opacidad dependen de la radiancia [8], [10], [11], densidad del medio y la masa total de partículas [8]; los modelos para estimar visibilidad dependen del coeficiente de extinción total de la luz [17], [29], [31], [41], [59].

Tabla 5. Correlaciones entre las POA y las concentraciones de PM. El coeficiente de correlación lineal de Pearson es r .

Variable	Ref	Equipo	Notas	r
τ	[5]	Cámara digital Kodak DC 290. Estación Meteorológica.	Entre el PM10 medido en estación meteorológica y el PM10 estimado con modelo que involucra profundidad óptica.	0.7744
AOT	[6]	Espectro-radiómetro satelital MODIS. Estaciones AIRBASE.	Entre el PM2.5 y el AOT.	0.6
Espeador Óptico.	[6]	Espectro-radiómetro satelital MODIS. Estaciones Meteorológicas.	Entre el PM10 y el AOT.	0.46
AOD = τ	[7]	Espectro-radiómetro satelital MODIS.	Entre el PM2.5 medido en estación meteorológica y el PM2.5 estimado con modelo que involucra profundidad óptica.	0.64
Profundidad Óptica.	[62]	Estaciones Meteorológicas.		
θ	[64]	Opacímetro de flujo parcial	Entre Material Particulado Diesel PM1 y la opacidad	0.102
Opacidad óptica.	[64]	Opacímetro de flujo parcial	Entre Material Particulado Diesel PM1 y la opacidad	0.23
θ	[65]	Opacímetro de flujo parcial	Entre Material Particulado Diesel PM1 y la opacidad	0.23
$a(\lambda)$	[12]	Telefotómetro.	Entre PM2.5 y el coeficiente de esparcimiento de la luz.	0.987
Coefficiente Esparcimiento.	[12]	Telefotómetro.	Entre PM2.5 y el coeficiente de esparcimiento de la luz.	0.987
V	[17]	Nefelómetro. Fotómetro.	Entre el AOT y la V .	-0.9
AOT	[17]	Nefelómetro. Fotómetro.	Entre el AOT y la V .	-0.9
V	[13]	Estaciones Meteorológicas.	Entre coeficiente de extinción y NO ₃ , NH ₄ , K, (componentes del material particulado).	-0.6 a -0.8
V	[14]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y SO ₃ (en el PM10)	-0.87
V	[15]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y PM2.5 constituido de sulfatos.	-0.91
V	[15]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y PM2.5 constituido de sulfatos.	-0.91
MOR	[18]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y PM2.5 constituido de sulfatos.	-0.68
Rango óptico Meteorológico	[18]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y PM2.5 constituido de sulfatos.	-0.68
V	[19]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y: PM10	-0.71
V	[19]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y: CO	-0.659
V	[19]	Estaciones Meteorológicas.	Entre V y: NO ₂	-0.604

Esto significa que todas las propiedades ópticas atmosféricas (POA) revisadas, podrían utilizarse en la conformación de índices de calidad del aire gracias a que todas presentan algún modelo que depende de un número reducido de variables. Sin embargo, en este documento se considera que la visibilidad atmosférica tiene ventajas comparativas para definir índices de calidad del aire a partir de imágenes digitales, porque: sus modelos de cálculo son relativamente sencillos ya que solo dependen del coeficiente de extinción de la luz, y además tiene significativas correlaciones lineales con las concentraciones atmosféricas de (PM). Este hallazgo concuerda con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) que, según [56], ha identificado la visibilidad como una característica atmosférica que permite reconocer los efectos de la contaminación del aire.

A continuación se presenta una revisión del estado del arte de la medición de la visibilidad, POA que se considera en este documento como la más viable para definir índices de la calidad del aire, a partir de imágenes digitales.

2.4. Tipología de las Estimaciones de la Visibilidad a partir de Imágenes Digitales

Como resultado de la revisión bibliográfica se construye una tipología de la medición de la visibilidad atmosférica con imágenes digitales. Los hallazgos muestran que esta medición tiene dos tendencias identificables en las referencias: por medición de Contrastes, y por detección de Bordes. A continuación se muestra la tipología en la Fig. 1.

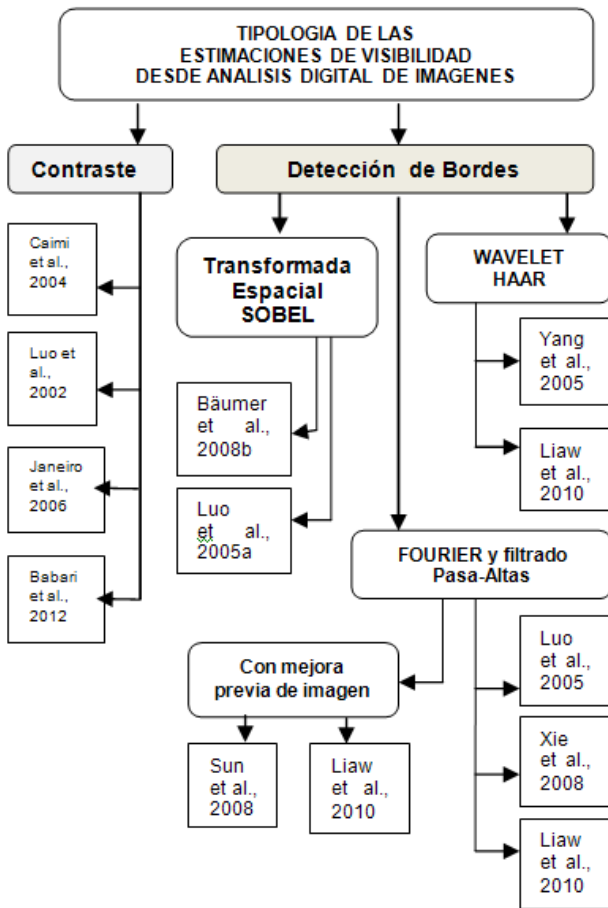


Fig. 1. Tipología de la estimación para la visibilidad atmosférica desde imágenes digitales.

2.5. Revisión de los Métodos de Estimación de la Visibilidad Atmosférica a partir de Imágenes Digitales.

Medición de Visibilidad por Contrastes

El contraste es un índice de la diferencia de intensidad entre zonas adyacentes de la imagen, ver Fig. 2. Por ejemplo, cuando el contraste es alto los detalles son claramente distinguibles, y cuando el contraste es bajo se pierden detalles de la escena porque la imagen se vuelve uniforme y ofrece poca información sobre los detalles de la escena [67]; aunque algunos autores mencionan que es posible mejorar los contrastes de la imagen compensando las diferencias de iluminación de la escena [36], [51], [57].

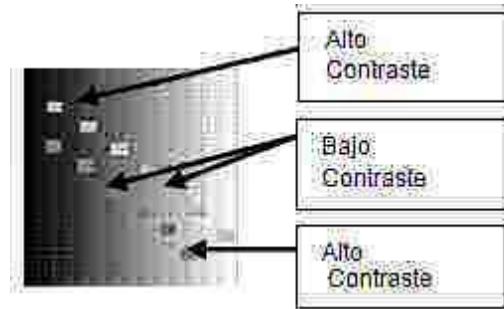


Fig. 2. El Contraste en Imágenes.

En la Tabla 6 se presenta un resumen con las referencias más relevantes sobre el tema.

Medición de Visibilidad por Detección de Bordes en el dominio espacial. La visibilidad atmosférica tiene algunas definiciones que involucran objetos negros distinguibles respecto de su fondo; y las metodologías para su estimación por bordes implican que un objeto es distinguible si: el procesamiento digital detecta sus bordes en la imagen. En la Fig. 3a se observa la imagen de una escena urbana diurna, en la Fig. 3b se muestra el resultado de un procesamiento de imagen que logra la detección de los bordes presentes en la escena.

En esta sección, se consideran los artículos científicos que detectaron bordes a través de operadores en el dominio del espacio.



a)



b)

Fig. 3. (a) Imagen original. (b) Bordes detectados.

Tabla 6. Medición de Visibilidad, sobre imágenes digitales, por Contraste.

Ref	Formulación	Descripción
[24]	$C = \frac{I_b - I}{I_b} = e^{-\sigma_{ext} x}$ $MR = \frac{3.912}{\sigma_{ext}}$	<p>Versión de la Ley de Beer donde: $\sigma_{ext} = cte$ Con Ley Weber estiman contraste (C), Siendo I_b la intensidad de gris del fondo y la I la intensidad de gris del objeto. Utilizan objetivos fijos que tienen distancias conocidas hasta el sensor de la cámara. Con Ley Koshmieder calculan σ_{ext}. Luego calculan en rango meteorológico de toda la imagen (MR). Ángulos cenitales del sol $< 30^\circ$ producen sobre estimación (V).</p>
[31]	$\frac{C(x_2)}{C(x_1)} = e^{-\sigma_{ext} (x_2 - x_1)}$ $MOR = \frac{3}{\sigma_{ext}}$	<p>Con Ley Weber estiman Contraste (C) y luego, con una modificación de Koshmieder calculan el coeficiente de extinción total σ_{ext} Modificación de Ley Lambert–Beer. Requiere la selección de dos objetivos de color similar a distancias conocidas: x_1 el más cercano y x_2 el más lejano. Con el coeficiente de extinción estiman Rango Óptico Meteorológico (MOR).</p>
[41]	$B_g = \log\left(\frac{ B_t - B_b }{B_b}\right)$ $ B_g = -0.2186 V_a + 2.7035$	<p>Visibilidad como Brillo específico digital: B_g Donde B_t es el brillo digital o nivel de gris del objetivo, y B_b es el brillo digital del fondo que es el cielo.</p> <p>Correlacionan el valor del B_g con V_a o visibilidad prevalente estimada por observadores entrenados.</p>
[60]	$C = \frac{\frac{1}{\# pix Encima} \sum_{pix Encima} f(p)}{\frac{1}{\# pix Encima} \sum_{pix \in Encima} f(p)}$ $- \frac{\frac{1}{\# pix Debajo} \sum_{pix Debajo} f(p)}{\frac{1}{\# pix Encima} \sum_{pix \in Encima} f(p)}$ $\sigma'_{ext} \sim \ln(C)$	<p>Conocida la línea del horizonte se pueden medir intensidades de gris en regiones, con diferentes valores de ancho de franja d, por encima y por debajo de la línea horizonte, para calcular el contraste (C) del horizonte.</p> <p>pix: Píxeles $f(p)$: Valor de Intensidad de gris del píxel.</p> <p>Estiman el coeficiente de extinción σ'_{ext} con diferentes anchos franja d. Y correlacionan con los datos de un Transmisómetro.</p>
[75]	<p>Con: $C_0 = \frac{R_2 - R_1}{A_\infty}$</p> $E^{all} = \sum_{(i,j)} C_0 e^{-\sigma_{ext} x}$	<p>Segmentan las Superficies Lambertianas, en una imagen previamente transformada con Sobel. Y calculan un mapa de probabilidades, $P^L_{i,j}$, de que el píxel (i,j) pertenezca a una superficie Lambertiana.</p>
[74]	$E^L = \sum_{(i,j)} P^L_{i,j} C_0 e^{-\sigma_{ext} x}$ $\tilde{E}^L = A + B \log(V_{met})$	<p>Luego calculan tres estimadores diferentes: E Donde σ_{ext} es el coeficiente de extinción, y V_{met} es la visibilidad medida con Transmisómetro.</p>

Medición de Visibilidad por Detección de Bordes en el dominio espacial. La visibilidad atmosférica tiene algunas definiciones que involucran objetos negros distinguibles respecto de su fondo; y las metodologías para su estimación por bordes implican que un objeto es distinguible si: el procesamiento digital detecta sus bordes en la

imagen. En la Fig. 3a se observa la imagen de una escena urbana diurna, en la Fig. 3b se muestra el resultado de un procesamiento de imagen que logra la detección de los bordes presentes en la escena.

El filtrado espacial se realiza trasladando una matriz de ponderaciones (llamada Kernel de convolución, núcleo, máscara, u operador) por cada uno de los pixeles de la imagen y asignándole un nuevo valor de acuerdo a los valores de sus pixeles vecinos y los correspondientes valores de ponderación de la matriz; el filtrado modifica el valor de cada pixel de acuerdo con los pixeles que lo rodean transformando los valores originales para que se parezcan más, o se diferencien más, a los valores de los pixeles más cercanos.

Los resultados de la revisión bibliográfica se muestran en la Tabla 7, donde se muestra una tendencia a la utilización del operador Sobel para el filtrado de la imagen en el dominio espacial; aunque podrían utilizarse otros operadores tales como: Roberts, Prewitt, Laplaciano, Cruce por Cero, y Canny [68], pero, en las referencias no se reportan resultados usando estas transformadas espaciales.

Tabla 7. Medición de Visibilidad por Bordes en el dominio Espacial.

Ref	Formulación	Descripción
[22]	$ G(x,y) $ $F = \begin{cases} 1; & G \geq T \\ 0; & G < T \end{cases}$	El gradiente de SOBEL es utilizado para detectar bordes. Y sobre los datos de magnitud del gradiente $ G(x,y) $: Se utiliza un umbral, $T=20$, para definir una nueva imagen F . Sobre esta imagen se detectan objetivos preseleccionados con distancias conocidas; el detectado más lejano se establece como el valor de V en Km.
[42]	$G = G_x + G_y $	Gradiente G de SOBEL para transformar la imagen y detectar bordes. Se define un Índice de Visibilidad de Sobel IS como el promedio de todos los niveles de gris en la imagen transformada.

Medición de Visibilidad por Detección de Bordes, previa extracción y realce de las altas frecuencias, con Transformadas Fourier

Estos métodos consisten en la detección de bordes en el dominio espacial, pero con una previa extracción de altas frecuencias espaciales en el dominio de la frecuencia. La alta frecuencia espacial se relaciona con áreas en la imagen de rápidas transiciones en los valores de intensidad de gris y por lo general corresponde a zonas de alto contraste local, o sea información de bordes, y al detalle fino [69]. La extracción de altas frecuencias es un método de realce de los bordes o detalles que se refiere al borrado, o reducción, de las bajas frecuencias espaciales y a la selección de las altas frecuencias en la imagen. Generalmente se realiza con Transformada de Fourier más un filtrado pasa altos, o Kernels de convolución pasa altos.

En la Tabla 8, se presenta un resumen con las referencias encontradas sobre este tema; donde se muestran formulaciones y se describen brevemente los métodos.

Medición de Visibilidad por Detección de Bordes, previo realce de las altas frecuencias, con Transformadas Wavelet. Estos métodos consisten en la detección de bordes en el dominio espacial,

pero con el previo realce de las altas frecuencias de la imagen, mediante transformaciones Wavelet multi-resolución; que localizan espacialmente las fluctuaciones de los niveles de gris, utilizando comúnmente la Haar en su imagen de detalles D1.

En la Tabla 9, se presenta un resumen con las referencias encontradas sobre este tema; donde se muestran formulaciones y se describen brevemente los métodos por Transformadas Wavelet.

2.6. Ventajas y Desventajas de los Métodos de estimación de Visibilidad desde Imágenes digitales

En la Tabla 10, se presenta el resultado de un análisis comparativo realizado sobre todos los métodos encontrados en las referencias para la estimación de la visibilidad desde imágenes digitales. En ella se incluye: la referencia bibliográfica correspondiente, el coeficiente de correlación de Pearson (r) o el coeficiente de determinación (R^2) reportado en cada referencia, las limitaciones de distancia reportadas en cada referencia, y el aporte de este trabajo que corresponde a un análisis crítico de las ventajas y desventajas de cada método.

Tabla 8. Medición de Visibilidad por Extracción de altas frecuencias con Transformada Fourier y filtrado Pasa-Altas.

Ref	Formulación	Descripción
	<p>Transformada Fourier:</p> $F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp[-j2\pi (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})]$	<p>Transformada rápida de Fourier $F(u, v)$ y luego se aplica el filtro paso alto $H(u, v)$ Ideal con: $5 < D_0 < 30$.</p>
[42]	<p>Filtro Ideal:</p> $H(u, v) = \begin{cases} 0 & D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & D(u, v) > D_0 \end{cases}$	<p>Donde: D es la distancia desde el pixel (u, v) hasta el punto central del filtro. D_0 es el radio de corte.</p>
	<p>Filtrado de la Imagen:</p> $F(u, v) = F(u, v) \cdot H(u, v)$	<p>Luego se usa la transformada inversa de Fourier y sobre ella se define el Índice de Visibilidad:</p>
	<p>Anti-Transformada de Fourier:</p> $f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp[j2\pi (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})]$	<p>Índice de visibilidad IFFT: como el promedio de los niveles de gris en la imagen anti transformada.</p>
[60]	$E(\lambda) = \ F_{\text{block}}(u, v) \cdot H(u, v)\ ^2 \sim \sigma'_{\text{ext}}$	<p>Se subdivide la imagen en regiones cuadradas grises que no se solapan y calculan la energía E de cada una.</p> <p>Donde: F_{block} es la transformada Fourier del bloque, H es un filtro selectivo de frecuencias pasa-bajas, pasa-bandas, pasa-altas, σ'_{ext} es el coeficiente de extinción estimado para el bloque.</p>
[54]	<p>Filtro Ideal:</p> $H(u, v) = \begin{cases} 0 & D(u, v) \leq D_0 \\ 1 & D(u, v) > D_0 \end{cases}$ <p>Filtro Gaussiano:</p> $H(u, v) = 1 - e^{-D^2(u, v)/2D_0^2}$ <p>Filtro Homomórfico Gaussiano:</p> $H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L) \left[1 - e^{-c \left(\frac{D^2(u, v)}{D_0^2} \right)} \right] + \gamma_L$	<p>Los filtros (H) utilizados son del tipo: Ideal: $D_0 = 10$, Gaussiano: $D_0 = 10$ Homomórfico-Gaussiano: $D_0 \equiv 0.157, \gamma_H = 0.8, \gamma_L = 0.5$ Donde γ_L e γ_H se utilizan para mejorar o atenuar las relaciones de la información de baja y alta frecuencia.</p> <p>Se define en cada caso el Índice de Visibilidad (I_{vis}) como el promedio de intensidades de gris en la imagen anti transformada o de la transformada inversa de Fourier.</p>

Como resultado del análisis comparativo entre todos los métodos de estimación de visibilidad se encontró que existen diferencias en el establecimiento de la óptica de la cámara; porque, en algunos casos se prefijaron valores para la sensibilidad, la apertura del diafragma, y la velocidad de obturación [36]; en otros casos estas variables fueron determinadas automáticamente por el software propio de la cámara digital [31], [22], [41], [42], [43], [60]; y en los demás casos no se indica el tratamiento. También se encontró que

para realizar las mediciones usando cámaras digitales es necesario realizar una calibración radiométrica [34], [37], sin embargo no todos los autores la indican. Y de igual forma se encontró que en algunos trabajos no se consideran las diferencias de iluminación en la escena, aunque es posible realizar mejoras en la imagen para corregir esas diferencias [61].

Tabla 9. Medición de Visibilidad por Extracción de altas frecuencias con Transformadas Wavelet.

Ref	Formulación	Descripción				
[43]	<p>Mapeo multi_resolución de la imagen $f(x,y)$:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>$A_{2^j} f$</td> <td>$D^h_{2^j} f$</td> </tr> <tr> <td>$D^v_{2^j} f$</td> <td>$D^d_{2^j} f$</td> </tr> </table>	$A_{2^j} f$	$D^h_{2^j} f$	$D^v_{2^j} f$	$D^d_{2^j} f$	<p>Se realizan mapeos multi_resolución de una imagen de grises $f(x,y)$ con transformada Wavelet Haar: A: Imagen de Aproximación. D^h: Imagen Detalles Horizontales. D^v: Imagen Detalles Verticales. D^d: Imagen Detalles Diagonales.</p>
	$A_{2^j} f$	$D^h_{2^j} f$				
$D^v_{2^j} f$	$D^d_{2^j} f$					
<p>$A_{2^j} f = \left((f(x,y) * \varphi_{2^j}(-x) \varphi_{2^j}(-y)) (2^{-j} n, 2^{-j} m) \right)$ $D^h_{2^j} f = \left((f(x,y) * \varphi_{2^j}(-x) \psi_{2^j}(-y)) (2^{-j} n, 2^{-j} m) \right)$ $D^v_{2^j} f = \left((f(x,y) * \psi_{2^j}(-x) \varphi_{2^j}(-y)) (2^{-j} n, 2^{-j} m) \right)$ $D^d_{2^j} f = \left((f(x,y) * \psi_{2^j}(-x) \psi_{2^j}(-y)) (2^{-j} n, 2^{-j} m) \right)$</p>	<p>Dónde: $\varphi(x,y)$ es la función escalamiento, $\psi(x,y)$ la función wavelet, m es el número de filas y n es el número de columnas.</p>					
[36]	<p>Transformada de Fourier de la imagen $f(x,y)$:</p> $F(u,v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \exp[-j2\pi (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})]$ <p>Filtro Ideal Pasa-altas:</p> $H(u,v) = \begin{cases} 0 & D(u,v) \leq D_0 \\ 1 & D(u,v) > D_0 \end{cases}$ <p>Filtro Homomórfico Gaussiano Pasa-altas con: $c=1, YH=1.1, YL=0.5$:</p> $H(u,v) = (\gamma_H - \gamma_L) \left[1 - e^{-c \left(\frac{D^2(u,v)}{D_0^2} \right)} \right] + \gamma_L$	<p>Se realizan tres procesamientos diferentes sobre la imagen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Transformada de Fourier y filtrado pasa-altas con filtro ideal: $fri(x,y)$ 2. Por otro lado: Transformada de Fourier y filtrado pasa-altas con filtro Homomórfico Gaussiano en $YH=1.1, YL=0.5, c=1$, obteniendo la $frh(x,y)$. 3. Se realizan mapeos multi_resolución de una imagen de grises $f(x,y)$ con Wavelet Haar: A, D^h, D^v, D^d. Y se calcula una nueva imagen S: como la suma de los 4 mapeos. Luego, se combinan las dos imágenes en una <i>IMG</i> utilizando un coeficiente de ponderación de 0.78 seleccionado por mayor correlación con la visibilidad estimada por humanos. 				
	<p>Transformada de Fourier filtrada: $F(u,v) = F(u,v) \cdot H(u,v)$ Transformada Inversa de la filtrada: $fr(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u,v) \exp[j2\pi (\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})]$</p> <p>Mapeo multi_resolución de la imagen $f(x,y)$:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>$A_v f$</td> <td>$D^h_v f$</td> </tr> <tr> <td>$D^v_v f$</td> <td>$D^d_v f$</td> </tr> </table> <p>$S = A + D^h + D^v + D^d$ $IMG = S + 0.78 fr(x,y)$</p>		$A_v f$	$D^h_v f$	$D^v_v f$	$D^d_v f$
$A_v f$	$D^h_v f$					
$D^v_v f$	$D^d_v f$					

Tabla 10. Ventajas y Desventajas de los Métodos de medición de Visibilidad desde imágenes digitales.

A)	Ref	Ventajas	R ²	Km	Desventajas
CONTRASTE	[24]	Demuestra la formulación para medir coeficiente de extinción por contraste de Weber. Sencilla. Automática.	No	No se indica	Se requiere la selección de objetivos ideales negros sobre la escena. No se establecen correlaciones con mediciones por otros métodos.
	[31]	Formulación relativamente sencilla para medir coeficiente de extinción por contraste de Weber.	No	6 < d < 20	Requiere la ubicación de dos objetivos para una sola medición. No se establecen correlaciones con otros métodos. Requiere registro de imagen: Que equivale a referenciar los objetos de las imágenes respecto a un sistema de coordenadas ubicado en una imagen patrón, para corregir desplazamientos o rotaciones de la cámara.
	[41]	Formulación sencilla, brillo específico (log contraste de Weber) como visibilidad digital. Correlación lineal alta entre Brillo específico estimado y Visibilidad por observadores entrenados.	0.91	5 < d < 10	Útil solo en distancias reducidas. Se requiere preseleccionar objetivos perfectos. No se correlacionaron con mediciones por Transiómetro, solo con mediciones por humanos. No se analiza la medida frente a: las sombras ni cambios de tamaño.
	[60]	Se mide contraste del horizonte, detectado por bordes, con formulación sencilla (Weber) y se estima el coeficiente de extinción. Correlacionan las estimaciones del coeficiente de extinción con medidas por Transiómetro.	0.6	No se indica	Requiere detectar el borde del horizonte previamente. Requiere registro de imagen. No se muestra la ecuación del ajuste lineal. Cada escena requiere franjas de pixeles de diferente ancho en el horizonte, lo que afecta la precisión de la medida.
	[75] [74]	Se proponen tres estimadores diferentes por Contraste. Se correlacionan las estimaciones contra medidas tomadas por Transmisómetro: E^{all} E^L \tilde{E}^L	0.82 0.95 0.90		Requiere la detección de superficies Lambertianas sobre la imagen, como objetos. No se puede usar en escenas urbanas porque asume para los objetos distribuciones continuas respecto a la distancia.
B)	Ref	Ventajas	R ²	Km	Desventajas
TRANSFORMADAS ESPACIALES	[22]	Fácil de implementar. Se detectan, con Sobel, bordes de objetivos prefijados en distancias conocidas que actúan como medida de visibilidad meteorológica. Se correlacionaron: V por métodos reconocidos vrs V estimada por el método. Correlación significativa para las visibilidades mayores de 10 km. Correlaciones para condiciones climáticas aunque con pocos datos.	0.4 0.7	5 < d < 10 d > 10	Es necesario detectar información en áreas muy pequeñas de la imagen. El espaciamiento de los objetivos afecta la precisión de las mediciones. Requiere registro de imagen.
	[42]	Fácil de implementar, se usa Sobel para detectar bordes y definir índices de Visibilidad como el promedio de la magnitud G del gradiente. No se requiere ubicar los objetivos perfectos. Se utiliza una base de datos para establecer correlaciones con las estimaciones obtenidas con la formulación.	0.81	0.5 < d < 15	Solo se establecieron correlaciones contra mediciones hechas por humanos. No se establecen condiciones de captura. No se estudian las condiciones climáticas ni características de la escena.

C)	Ref	Ventajas	R ²	Km	Desventajas
EXTRACCIÓN DE ALTAS FRECUENCIAS	[42]	Fácil de implementar, se cortan las bajas frecuencias con un filtro ideal, y sobre la imagen se define el índice de Visibilidad como el promedio de todos los niveles de gris. No se requiere ubicar los objetivos perfectos. Se utiliza una base de datos para establecer correlaciones con las estimaciones obtenidas con la formulación. Se obtuvieron correlaciones significativas.	0.78	0.5 < d < 15	Solo se establecieron correlaciones contra mediciones hechas por humanos. No se establecen condiciones de captura. No se estudian las condiciones climáticas. No se indica cómo se selecciona el radio de corte para el filtro pasa altas.
	[54]	La extracción de altas frecuencias se realiza con filtro Homomórfico. No se requiere la ubicación de objetivos perfectos. Se correlacionaron: <i>Índice Vis vrs Visibilidad medida por observadores</i> .	0.87	0.5 < d < 15	La precisión de la medida depende de los valores asignados a los parámetros D_o , γ_H e γ_L del filtro Homomórfico; pero, no se indica cómo seleccionarlos. No se consideran las condiciones climáticas ni las características ópticas de la cámara.
	[60]	Fácil de implementar, calculan el coeficiente de extinción de la luz como el valor de energía en bloques de una imagen filtrada por frecuencias. Se correlaciona el <i>bext estimado vrs bext medidos por Transiómetro</i> . Se muestra que los bloques con mejores R ² son cercanos al horizonte.	0.56 f medias 0.53 f altas 0.46 f bajas	No se indica	No se indican como calculan los filtros de frecuencias. Las correlaciones son relativamente bajas. No se consideran las condiciones climáticas de la escena. No se establece la configuración óptica de la cámara. Requiere registro de imagen.

D)	Ref	Ventajas	R ²	Km	Desventajas
TRANSFORMADAS WAVELET	[43]	Se define un <i>Índice de visibilidad wavelet</i> de manera sencilla con la componente wavelet diagonal de la Haar. Se utiliza una base de datos para establecer correlaciones con las estimaciones obtenidas con la formulación. No se requiere la ubicación de objetivos perfectos.	0.81	0.5 < d < 15	No se establecieron comparaciones <i>Índice wavelet vrs Vis medida</i> con mediciones desde Transiómetro, No se consideran las condiciones climáticas de iluminación de la escena. No se establece la afectación de la medida por la óptica de la cámara.
	[36]	No se requiere la ubicación de objetivos perfectos. Se realizan análisis de sombras y se obtienen similitudes altas entre las mediciones sin sombras y con sombras. Se propone un realce de la imagen con redistribución de la iluminación, previo a la medición. Se utilizan dos bases de datos: Alta densidad de edificios altos, baja densidad de edificios altos mayor área de cielo. Se definen tres índices: a) Fourier y Filtro pasa-altas Ideal b) Fourier y Filtro Homomórfico Gauss c) Haar + 0.78 (b)	0.70 0.81 0.86	No se indica	No se establecen objetivamente los parámetros c , Y_H , Y_L , D_o , para el Homomórfico. No se analiza el cambio de resolución de la imagen. Son necesarias varias transformaciones sobre la imagen antes de realizar la medición; esto podría implicar mayor tiempo de computación.

2.8. Vacíos en la Literatura Científica sobre Visibilidad desde Imágenes Digitales

De igual forma, al realizar el análisis comparativo entre todos los métodos de medición de visibilidad se encontraron vacíos en el estado del arte; los cuales pueden resumirse considerando que no se ha determinado como son afectadas las estimaciones de visibilidad por variables tales

como: las características ópticas de la cámara (resolución, rango dinámico, velocidad de obturación, foco, sensibilidad ISO), las condiciones de iluminación de la escena, el tamaño de las regiones de interés, el cambio de resolución de la imagen, el cambio en los valores de los filtros pasa-altas, el uso de transformadas espaciales diferentes a Sobel, el uso de análisis multiresolución con transformadas diferentes a la Wavelet Haar. De

igual manera se encontró en esta revisión que: no se ha determinado como son afectadas las estimaciones de la visibilidad con la aparición de sombras, o con las características propias de la escena (aérea, oceánica, rural, urbana, o los datos meteorológicos (humedad, presión, temperatura). De igual forma, puede decirse que tampoco se ha evaluado el desempeño de la medida en términos de otros métodos de medición tales como las concentraciones de material particulado, ni en términos del tiempo de ejecución de los algoritmos.

3. CONCLUSIONES

Se presenta una revisión del estado del arte sobre los modelos para calcular las propiedades ópticas atmosféricas (POA): profundidad óptica, opacidad, visibilidad; y se determina que todas las POA revisadas pueden utilizarse para definir índices de calidad del aire. Sin embargo, se encontró que la visibilidad atmosférica tiene ventajas comparativas para la posible conformación, en trabajos futuros, de índices de calidad del aire desde imágenes digitales, porque: tiene modelos de cálculo relativamente sencillos (gracias al menor número de variables involucradas), y reporta en las referencias científicas correlaciones lineales significativas con respecto a las concentraciones atmosféricas de material particulado (PM).

También, se realiza una revisión del estado del arte de las mediciones de visibilidad desde la imagen digital, con la que se logra establecer: una tipología de las mediciones, un análisis de ventajas y desventajas de los métodos propuestos en las referencias, y también, los vacíos del Estado del arte.

En dicha revisión se hallaron los siguientes vacíos en el estado del arte de las mediciones de visibilidad desde imágenes digitales: La definición de las condiciones de captura de la imagen en términos de la iluminación de la escena por las condiciones climáticas y en términos de la configuración óptica de la cámara; la afectación de la medición de visibilidad por la presencia de sombras, cambio de resolución de la imagen y cambio de tamaño de las regiones de interés seleccionadas; y la evaluación del rendimiento de los métodos de medición en términos de su eficacia, y tiempo de ejecución.

Por lo tanto, los estudios futuros deben enfocarse: en el bosquejo de un estándar de medición para la visibilidad donde se establezcan las condiciones para la captura de imágenes, en el diseño de un protocolo con métrica que permita evaluar el rendimiento del método, y en la definición de las limitaciones de la visibilidad en la descripción de los eventos de contaminación atmosférica.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Tecnológico Metropolitano por el financiamiento de este trabajo, enmarcado dentro del proyecto de investigación código PM11103 y denominado: *Metodología para Medir Visibilidad orientada a la detección de Eventos Atmosféricos usando análisis digital de imágenes.*

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hyslop, N. P. Impaired visibility: the air pollution people see, *Atmospheric Environment*, 43, pp. 182-195, 2009.
- [2] González, R. C., Woods, R. E. Tratamiento digital de imágenes, Addison-Wesley, 1996
- [3] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, pp. 1-22, 2010. Disponible en: www.minambiente.gov.co/documentos/1732_protocolo_monitoreo_calidad_aire.pdf
- [4] Kaufman, Y. J., Tanre, D., Remer, L. A., Vermote, E. F., Chu, A., & Holben, B. N. "Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging Spectroradiometer", *Journal of Geophysical Research*, 102(D14), pp. 17051-17067, 1997.
- [5] Lim, H. S., MatJafri, M. Z., Abdullah, K. "Retrieval of Air Quality using a Newly Simulated Algorithm from Aerosol Optical Depth", presented at the Map Asia Conference 2004 Beijing China. 2004.
- [6] Koelemeijer, R. B. A., Homan, C. D., Matthijsen, J. "Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe", *Atmospheric Environment*, 40(27), pp. 5304-5315, 2006.
- [7] Tian, T., and Chen, D. "A semi-empirical Model for Predicting Hourly Ground-Level Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Concentration in Southern Ontario from Satellite Remote Sensing and Ground-

- based Meteorological Measurements”, *Remote Sensing of Environment*, 114(2), pp. 221-229, 2010.
- [8] Pilat, M. J., Ensor, D. S. “Comparison between the light extinction aerosol mass concentration relationship of atmospheric and air pollutant emission aerosols”, *Atmospheric Environment*, 5(), pp. 209-215, 1971.
- [9] Cook, C. S., Bethke, G. W., Conner, W. D. “Remote Measurement of Smoke Plume Transmittance Using Lidar”, *Applied Optics*, 11(8), pp. 209-215, 1972.
- [10] Du, K., and Rood, M. “Quantification of Plume Opacity by Digital Photography”, *Environmental Science & Technology*, 41, pp. 928-935, 2007.
- [11] Du, K., Rood, M., Kim, B., Kemme, M., Frank, B., Mattison, K. “Evaluation of Digital Optical Method To Determine Plume Opacity during Night time”, *Environmental Science & Technology*, American Chemical Society, 43(3), pp. 783-789, 2009.
- [12] Dzubay, T. G., Steven, R. K., Lewis, Ch. W., Hern, D. H., Courtney, W. J., Tesch, J. W Mason, M. A. “Visibility and Aerosol Composition in Houston Texas”, *Environmental Science & Technology*, 16(), pp. 514-525, 1982.
- [13] Sequeira, R., Lai, K. The effect of meteorological parameters and aerosol constituents on visibility in urban Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 32(16), pp. 2865-2871, 1998.
- [14] Tsai, Y. I., Cheng, M. T. “Visibility and aerosol chemical compositions near the coastal area in Central Taiwan”, *The Science of The Total Environment*, 231(1), pp. 37-51, 1999.
- [15] Yuan, Ch., Lee, Ch., Liu, S., Chang, J., Yuan, Ch., Yang, H. “Correlation of atmospheric visibility with chemical composition of Kaohsiung aerosols”, *Atmospheric Research*, 82(3), pp. 663-679, 2006.
- [16] Bryant, C., Eleftheriadis, K., Smolik, J., Zdimal, V., Mihalopoulos, N., Colbeck, I. “Optical properties of aerosols over the eastern Mediterranean”, *Atmospheric Environment*, 40(32), pp. 6229-6244, 2006.
- [17] Bäumer, D., Vogel, B., Versick, S., Rinke, R., Möhler, O., Schnaiter, M. “Relationship of Visibility, aerosol optical thickness and aerosol size distribution in an ageing air mass over South-West Germany”, *Atmospheric Environment*, 42(11), pp. 989-998, 2008a.
- [18] Tao, J., Ho, K. F., L. Chen, L. Zhu, J. Han, Z. Xu, “Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring”, *Particuology* 7(), pp. 68–75, 2009.
- [19] Wen, Ch., Yeh, H. “Comparative influences of airborne pollutants and meteorological parameters on atmospheric visibility and turbidity”, *Atmospheric Research*, 96(4), pp. 496-509, 2010.
- [20] Chylek, P., Henderson, B. G., Lesins, G. “Aerosol Optical Depth Retrieval over the NASA Stennis Space Center: MTI, MODIS, and AERONET”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(9), pp. 1978–1983, 2005.
- [21] Li, F., Lu, D. “Features of Aerosol Optical Depth with Visibility Grade over Beijing”, *Atmospheric Environment*, 31(20), pp. 3413-3419, 1997.
- [22] Bäumer, D., Versick, S., Vogel, B. “Determination of The Visibility Using a Digital Panorama Camera”, *Atmospheric Environment*, 42(11), pp. 2593-2602, 2008b.
- [23] Bradley, E., Roberts, D., Still, C. “Design of an Image Analysis Website for Phenological and Meteorological Monitoring”, *Environmental Modelling & Software*, 25, pp. 107-116, 2010.
- [24] Caimi, F. M., Kocak, D. M., Justak, J. “Remote visibility measurement technique using object plane data from digital image sensors”, *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5(), pp. 3288–3291, 2004.
- [25] Cazorla, A., F. J. Olmo, L. Alados-Arboledas, “Using a Sky Imager for aerosol characterization”, *Atmospheric Environment*, 42(11), pp. 2739-2745, 2008.
- [26] Cazorla, A., Shields, J. E., M. E. Karr, F. J. Olmo, A. Burden, L. Alados-Arboledas, “Technical Note: Determination of aerosol optical properties by a calibrated sky imager”, *Atmospheric Chemical and Physics*, 9(), pp. 6417–6427, 2009.
- [27] Diederer, H. S., R. Guicherit, J. C. HolLonder, “Visibility Reduction by Air Pollution in the Netherlands”, *Atmospheric Environment*, 19(2), pp. 377-383, 1985.
- [28] Eldering, A. “Alternative models for air pollutant effects on visibility”, *Doctoral Thesis*, California Institute of Technology, Pasadena California U.S.A., 1994.
- [29] Harrison, A. W., Murdock, L. B. “Perception Visual Range and Sky Background”, *Atmosphere Ocean*, 20(2), pp. 116-128, 1982.
- [30] Horvath, H. “Results of high precision visibility determinations and their application to atmospheric measurements”, *Industrial & Engineering Chemistry product research and development*, 19(1), pp. 53-56, 1980.
- [31] Janeiro, F. M., Wagner, F., Ramos, P., Silva, A. “Automated Atmospheric Visibility Measurements using a Digital Camera and Image

- Registration”, presented at Conference on Visibility, Aerosols and Atmospheric Optics, Vienna, Austria, 2006.
- [32] Kahn, R., Banerjee, P., D. McDonald, D. Diner, “Sensitivity of multiangle imaging to aerosol optical depth, and to Pure-Particle Size Distribution and Composition Over Ocean”, *The Journal of Geophysical Research, Atmospheres*. 1997.
- [33] Kaufman, Y. J., Haywood, J. M., Hobbs, P. V., W. Hart, R. Kleidman, B. Schmid, “Remote sensing of vertical distributions of smoke aerosol off the coast of Africa”, *Geophysical Research Letters*, 30(16), pp. ASC2.1-ASC2.4, 2003.
- [34] Lalonde, J. F., Narasimhan, S. G., A. A. Efros, A.A., “What Do the Sun and the Sky Tell Us About the Camera?”, *International Journal of Computer Vision*, 88(1), pp. 24-51, 2010.
- [35] Larson, S. M., Cass, G. R., Hussey, K. J., Luce, F. “Verification of image processing based visibility models”, *Environmental Science & Technology*, 22(), pp. 629-637, 1988.
- [36] Liaw, J. J., Lian, S. B., Huang, Y. F., Chen, R. C. “Using sharpness image with Haar function for urban atmospheric visibility measurement”, *Aerosol and Air Quality Research*, 10(), pp. 323-330, 2010.
- [37] Lin, S., Gu, J., Yamazaki, S., Shum, H. Y. “Radiometric Calibration from a single image”, in *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference, CVPR’04, Washington, USA.*, pp. 938-945, 2004.
- [38] Liu, C. H., Chen, A. J., Liu, G. R. “An image-based retrieval algorithm of aerosol characteristics and surface reflectance for satellite images”, *International Journal of Remote Sensing*, 17 (17), pp. 3477-3500, 1996.
- [39] López-Álvarez, M. A., Hernández-Andrés, J., J. Romero, F. J. Olmo, A. Cazorla, L. Alados-Arboledas, “Using a Trichromatic CCD camera for spectral skylight estimation”, *Applied Optics*, 47(34), pp.31-38, 2008.
- [40] López, M. A., Hernández-Andrés, J., Romero, J., J. Campos, A. Pons, “Calibrating the Elements of A Multi spectral Imaging System”, *Journal of Imaging Science and Technology*, 53(3), pp. 031102–031102-10, 2009.
- [41] Luo, C. H., Liu, S. H., Yuan, C. S. “Measuring atmospheric visibility by digital image processing”, *Aerosol and Air Quality Research*, 2(1), pp. 23-29, 2002.
- [42] Luo, C. H., Wen, C. Y., Yuan, C. S., Liaw, J. J., Loc, C. C., Chiud, S. H. “Investigation of urban atmospheric visibility by high-frequency extraction: Model development and field test”, *Atmospheric Environment*, 39(), pp. 2545–2552, 2005.
- [43] Luo, C. H., Yuan, C. S., Wen, C. Y., Liaw, J. J. “Investigation of urban atmospheric visibility using Haar wavelet Transform”, *Aerosol and Air Quality Research*, 5(1), pp. 39-47, 2005.
- [44] Malm, W. C., Molenaar, J. V., Chan, L. L. “Photographic simulation techniques for visualizing the effects the uniform haze on a scenic resource”, *Atmospheric Environment*, 28(5), pp. 1055-1063, 1983.
- [45] Middleton, W. E. K. “Vision through the Atmosphere”, University of Toronto Press, Toronto, Canada, 1952.
- [46] Namer, E., Schechner, Y. Y. “Advanced visibility improvement based on polarization filtered images”, In *Proceedings of SPIE 5888*, pp. 36-45, 2005.
- [47] NOAA, National Weather Service, Federal Meteorological Handbook No. 1, Surface Observations, pp. 405-406, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C, 1982.
- [48] Oakley, J., Bu, H. “Correction of Simple Contrast Loss in Color Images”, *IEEE Transactions of Image Processing*, 16(2), pp. 511-522, 2007.
- [49] Olmo, F. J., Cazorla, A., L. Alados-Arboledas, M. López-Álvarez, J. Hernández-Andrés, J. Romero, “Retrieval of the Optical Depth Using an all-sky CCD Camera”, *Applied Optics*, 47(34), pp. 182-189, 2008.
- [50] Retalis, A., Hadjimitsis, D. G., Michaelides, S., Tymvios, F., N. Chrysoulakis, C. R. I. Clayton, K. Themistocleous, “Comparison of aerosol optical thickness with in situ visibility data over Cyprus”, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(), pp. 421-428, 2010.
- [51] Rivas, E., Mendiola, J., G. Herrera, C. González, M. Trejo, G. Ríos, “Mejora de contraste y compensación en cambios de la iluminación”, *Computación y Sistemas*, 10(004), pp. 357-371, 2007.
- [52] Sequeira, R., Lai, K. “The effect of meteorological parameters and aerosol constituents on visibility in urban Hong Kong”, *Atmospheric Environment*, 32(16), pp. 2865-2871, 1998.
- [53] Sloane, C. S. “Fortran algorithm for the calculation of light scattering by stratified spheres”, Report RM 11-70 General Motor Research Laboratories, Warren Michigan, 1984.
- [54] Sun, Y. C., Liaw, J. J., Luo, C. H. “Measuring Atmospheric Visibility Index by Different High-pass Operations”, *Computer Vision, Graphics and Image Processing Conference (CVGIP)*, pp. 423-428, Taiwan, China, 2007.

- [55] Vermote, E. F., Vibert, S., H. Kilcoyne, D. Hoyt, T. Zhao, "Suspended Matter. Visible/Infra red Imager/Radiometer Suite algorithm theoretical basis document", SBRS Document # Y2390, Raytheon Systems Company, Information Technology and Scientific Services, Maryland, 2002.
- [56] Watson, J. G. "Visibility Science and Regulation", Journal of the Air & Waste Management Association, 52(), pp. 628-713, 2002.
- [57] Wilscy, M., John, J. "A novel wavelet fusion method for contrast correction and visibility enhancement of color images", In Proceedings of the World Congress on Engineering, WCE 2008, U.K. Vol. I, pp. 705-709, London, England, 2008.
- [58] Williams, M. D., Treiman, E., M. Wecksung, "Plume Blight Visibility Model with a Simulated Photography Technique", Journal Air Pollute Control Association, 30, pp.191-194, 1980.
- [59] WMO, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, World Meteorological Observations", WMO-No 8, 7th ed. Secretariat of the WMO, Geneva, Switzerland, 2008.
- [60] Xie, L., Chiu, A., Newsam, S. "Estimating atmospheric visibility using general purpose cameras", In Advances in visual computing: 4th International Symposium, ISVC, pp. 356-367, Las Vegas, NV, USA, 2008.
- [61] Yang, C. C. "Improving the sharpness of an image with non-uniform illumination", Optical Laser Technologies, 37, pp. 235-238, 2005.
- [62] Kaufman, Y. J., Tanré, D., Gordon, H. R., T. Nakajima, J. Lenoble, R. Frouin, H. Grassl, B. M. Herman, M. D. King, P. M. Teillet, "Passive Remote Sensing of Tropospheric aerosol and atmospheric correction for the aerosol effect", Journal of Geophysical Research, 102(D14), pp. 16815-16830, 1997.
- [63] Méndez, L., Pérez, L., Ferrer, A. "Medición del coeficiente de atenuación de cuantos gamma y de la densidad aparente en suelos cubanos", Revista Cubana de Física, VII (1), pp. 37-41, 1987.
- [64] Arango, J.E., Bustos, M.C., Novoa, E.J. "Estudio exploratorio de metales pesados en material particulado de emisiones de exhosto de motores a diesel", presentado en 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, Perú, 23 al 25 Octubre 2007.
- [65] Yanowitz, J., Graboski, M.S., Ryan, L.B.A., Daniels, T.L., McCormick, R.L. "Chassis Dynamometer Study of Emissions from 21 In Use Heavy-duty Diesel Vehicles". Environment Science Technology, vol. 33, pp. 209-216. 1999
- [66] Yao, S., Weisi, L., Rahardja, S., Xiao, L., Ong, E.P., Lu, Z.K., Yang, X.K. "Perceived Visual Quality Metric Based on Error Spread and Contrast. In Circuits and System". ISCAS 2005. IEEE International Symposium. pp. 3793-3796. Singapore, 2005.
- [67] Lin, W. & Kuo, J. Perceptual visual quality metrics: A survey. Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 22 (4), 297-312. 2011.
- [68] Gallego, A.R. Modelos visuales en el análisis de calidad de imagen, [MSc. Tesis]. Madrid, España: Universidad Politécnica. 2006.
- [69] Bar, M. Visual objects in context, Nature Reviews Neuroscience, 617-629. 2004.
- [70] Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., & Gibbons, W. "Geoquímica Inorgánica Atmosférica: Elementos trazadores de Fuentes Emisoras de Contaminantes". Macla Revista de la Sociedad Española de Mineralogía, 15, 143-144. 2011.
- [71] Maurellis, A., Lang, R., Landgraf, J. "The opacity coefficient method-nongray determination of inhomogeneous atmospheric extinction", Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 84, 295-323. 2004.
- [72] Milone, E., Wilson, W. Solar Sistem Astrophysics: Background Science and the Inner Solar System. New York: Springer. 2008.
- [73] Valencia, G. "Trazabilidad de las Medidas de Opacidad", Simposio de Metrología, Santiago de Querétalo, SM2008-M113-1072-1, México, 22 al 24 de Octubre, 2008.
- [74] Babari, R., Hautière, N., Dumont, E., Paparoditis, N., Misener, J. "A model-driven approach to estimate atmospheric visibility with ordinary cameras". Atmospheric Environment. 45, 5316-5324. 2011.
- [75] Babari, R., Hautière, N., Dumont, E., Bremond, R., Paparoditis, N. "Visibility monitoring using conventional roadside cameras – Emerging applications". Transportation Research Part C. 22, 17-28. 2012.