

**Identificación del calentamiento global mediante la relación entre la radiación solar neta
espectral de onda corta y la temperatura aparente (atmósfera tropical despejada),
utilizando imágenes de satélite (2001–2014)**

Andrés Felipe Peñate Ramírez



Universidad de Córdoba

Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de Física y Electrónica

Montería–Córdoba

2023

**Identificación del calentamiento global mediante la relación entre la radiación solar neta
espectral de onda corta y la temperatura aparente (atmósfera tropical despejada),
utilizando imágenes de satélite (2001–2014)**

Andrés Felipe Peñate Ramírez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de: **Físico**

Director:

PhD. Leonardo Gónima

Grupo de investigación:

ATBIENCA

Línea de Investigación:

Teledetección

Universidad de Córdoba

Facultad de Ciencias Básicas

Departamento de Física y Electrónica

Montería–Córdoba

2023

Agradecimientos Nota de Aceptación

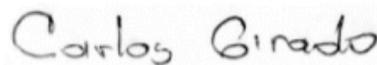
Los jurados abajo firmantes certifican que han leído y aprueban el trabajo de grado titulado **“Identificación del calentamiento global mediante la relación entre la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente (atmósfera tropical despejada), utilizando imágenes de satélite (2001–2014)”**, presentado por el estudiante **Andrés Felipe Peñate Ramírez**, como requisito parcial para optar al título de **Físico**.

Director:

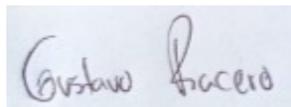


PhD. Leonardo Gónima Gónima

Jurados:



MSc. Carlos Mario Girado Polo



MSc. Gustavo Adolfo Racero Galaraga

Agradecimientos

Muchas son las personas que con su aporte y cooperación durante todo el tiempo de mi carrera universitaria han hecho posible la finalización de esta. A todos ellos mi más sincero agradecimiento.

En primer lugar, deseo agradecer de manera muy especial a mi director Leonardo Gónima Gónima por su tiempo y disponibilidad para guiarme y atender mis inquietudes en el desarrollo del presente trabajo de grado, por las innumerables discusiones que solíamos tener, que al final se convertían en sugerencias académicas y personales, que han sido cruciales en mi vida. Así como la confianza que deposito en mí desde el primer momento para la ejecución de este trabajo.

A mis abuelos, *Minerva Rosa Hernández* y *Rogelio Antonio Peñate*, de ellos adquirí enseñanzas, valores y fuerzas para poder enfrentarme a las dificultades de la vida. También, quiero hacer extensivo el agradecimiento a mis tíos, primos y resto de la familia, quienes de alguna u otra forma aportaron a mi aprendizaje y me animaron a seguir progresando.

Agradezco a mi padre *Samith Peñate* por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida. Gracias por tu apoyo incondicional durante todos estos años, este triunfo que he alcanzado también es tuyo.

Especialmente quiero agradecer a *Dora María López* e hijos la fe depositada en mí. Por sus palabras de aliento y su ayuda desinteresada emocional y económica desde mi inicio académico hasta la última etapa de mi carrera universitaria. Sobre todo, gracias por los impulsos, consejos y confianza que contribuyeron en mí, para ser una persona con gran calidad humana.

Así mismo quiero agradecer a la familia *Vargas Romero* por brindarme su amistad y apoyo en todo el recorrido por la universidad, con su ayuda he podido superar todas las situaciones y obstáculos que se presentaron en esta, que por cierto fue una de las épocas con más dificultades. Gracias a *Estefania* y *Valentina*, con quienes en mayor o menor medida he compartido gratos momentos en estos últimos años.

Además, quiero agradecer a la Lic. *Dayana Jiménez* por sus orientaciones gramaticales e innumerables revisiones del presente trabajo, las cuales han mejorado la calidad de este. Gracias por apoyarme y animarme en los buenos y malos momentos.

Agradezco a los jurados *Carlos Girado* y *Gustavo Racero* por sus comentarios y sugerencias, las cuales han sido de gran ayuda para mejorar la calidad del presente trabajo de grado.

Agradezco a mis compañeros que tuve el placer de conocer y compartir cursos de la carrera, discusiones en la sala de estudio y almuerzos, gracias por el apoyo que siempre me brindaron.

Finalmente, agradezco a la Universidad de Córdoba por haber hecho posible mi formación como profesional.

Resumen

En este trabajo se estudió la relación entre la radiación solar neta espectral de onda corta $K_{\Delta\lambda}^*$ y la temperatura aparente T_a del sistema superficie terrestre-atmósfera. La $K_{\Delta\lambda}^*$ está relacionada con la energía disponible para generar los procesos biofísicos a nivel de la superficie terrestre y T_a es una medida de la temperatura del sistema superficie terrestre-atmósfera suponiéndola como cuerpo negro. Se utilizaron imágenes del satélite LANDSAT para cuatro fechas específicas entre 2001 y 2014, en las cuales la atmósfera se encontraba despejada. Para el cálculo de $K_{\Delta\lambda}^*$ fue necesario determinar la reflectancia espectral $\rho_{\Delta\lambda}$ de la superficie terrestre y la radiación solar global espectral $K_{\Delta\lambda} \downarrow$, basados en la ecuación de transferencia radiativa entre la atmósfera y la superficie terrestre, y los valores de radiancia espectral para cada banda espectral de onda corta, mientras que, T_a fue estimada por medio de la ecuación de Planck aplicada sobre los valores de radiancia espectral correspondiente a la banda espectral térmica del mencionado satélite. Posteriormente, se realizó un análisis del comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$, y cómo estas tienen influencia sobre $K_{\Delta\lambda}^*$. Los resultados obtenidos muestran una estrecha relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , obteniendo coeficientes de correlación r entre 0.56 y 0.94 para las seis bandas espectrales del satélite LANDSAT, mayores que el coeficiente de correlación crítico $r_c < 0.06$. Finalmente, se realizó un análisis temporal de $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , para la identificación del calentamiento global en la zona de estudio seleccionada (municipio de Cereté y parte de Montería, Córdoba). Esta clase de estudios son de mucha utilidad en la agricultura y ganadería, al ser $K_{\Delta\lambda}^*$ una variable directamente relacionada con la disponibilidad de energía para el desarrollo de cultivos.

Palabras claves: Temperatura aparente, radiancia espectral, bandas espectrales, valores radiométricos y reflectancia espectral.

Tabla de contenido

1	Introducción	13
2	Objetivos	15
2.1	Objetivo General	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	Marco Teórico	16
4	Ubicación de la Zona de Estudio	21
5	Metodología	22
6	Análisis de Resultados	27
6.1	Descripción de las variables $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$	27
6.2	Influencia de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ sobre $K_{\Delta\lambda}^*$	30
6.3	Descripción de las variables $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a	31
6.4	Relación entre las variables $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a	36
6.5	Identificación del calentamiento global por medio de la relación $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a	37
7	Conclusiones	40
8	Referencias	42
9	Anexos	46
9.1	Anexo 1: Modelo para calcular la reflectancia espectral $\rho_{\Delta\lambda}$	46
9.2	Anexo 2: Imágenes de $\rho_{\Delta\lambda}$	47
9.3	Anexo 3: Curvas espectrales de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculadas	51
9.4	Anexo 4: Imágenes de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$	52
9.5	Anexo 5: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$	56
9.6	Anexo 6: Imágenes de $K_{\Delta\lambda}^*$	57
9.7	Anexo 7: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$	61
9.8	Anexo 8: Imágenes de T_a	63
9.9	Anexo 9: Comportamiento de T_a	64
9.10	Anexo 10: Regresiones estadísticas entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a	65

Lista de Figuras

3.1: Flujos radiativos de onda corta entre la atmósfera y la superficie terrestre (píxel).....	16
3.2: Esquema del sistema superficie terrestre-atmósfera, donde $E_{\Delta\lambda}$ es la radiación térmica captada por el sensor satelital utilizada para el cálculo T_a	20
4.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio (rectángulo rojo), imagen satelital del 26/12/2014.....	21
6.1: Imagen calculada de $\rho_{\Delta\lambda_1}$ y localización de las muestras representativas para el análisis (1: superficie de agua, 2: vegetación vigorosa, 3: vegetación seca y suelo, 4: zona urbana), correspondiente al 12/01/2001.....	27
6.2: (a) Comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculada para cada muestra representativa y (b) curvas espectrales existentes en la literatura especializada (Gónima, 2021).....	28
6.3: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1} \downarrow$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.....	29
6.4: (a) Comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para la superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana, (b) distribución espectral de la radiación solar (IDEAM, on-line)..	29
6.5: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1}^*$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.....	31
6.6: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas, para las diferentes bandas espectrales.....	32
6.7: Imagen calculada de T_a , correspondiente al 12/01/2001.....	33
6.8: Comportamiento de T_a (banda N°6) en función de las muestras seleccionada.....	34
6.9: Representación gráfica para la explicación de las diferencias de T_a entre las muestras seleccionadas (superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana).....	35
6.10: $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de la temperatura aparente T_a , para las diferentes bandas espectrales.....	36
6.11: Variación de T_a entre 2001 y 2014, para el píxel representativo de las superficies seleccionadas.....	37
6.12: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K_{\Delta\lambda_3}^*$ (a)) y $K_{\Delta\lambda_4}^*$ (b)).....	38
6.13: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K_{\Delta\lambda_4}^*$ (a)) y $K_{\Delta\lambda_7}^*$ (b)).....	39
6.14: Comportamiento temporal entre el 2001 y 2014 de $K_{\Delta\lambda_4}^*$ (a)) y $K_{\Delta\lambda_7}^*$ (b)).....	39

Lista de Tablas

5.1: Parámetros de adquisición de cada una de las imágenes seleccionada.....	22
5.2: Bandas espectrales $\Delta\lambda$ de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8.....	23
5.3: T y HR calculadas para cada imagen.....	24
5.4: Ecuaciones para el cálculo de las transmitancias espectrales.....	25
6.1: Valores calculados de $\rho_{\Delta\lambda}$, $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ y $K_{\Delta\lambda}^*$, a partir de las muestras representativas seleccionadas.	30

Lista de Símbolos

$K_{\Delta\lambda}^*$: Radiación solar neta espectral de onda corta [$W/m^2\mu m$]

$K_{\Delta\lambda}^{Ext \downarrow}$: Radiación solar espectral extraterrestres [$W/m^2\mu m$]

$S_{o\Delta\lambda}$: Constante solar espectral [$W/m^2\mu m$]

f : Factor de corrección astronómica [–]

θ : Ángulo cenital [°]

$K_{\Delta\lambda}^d \downarrow$: Radiación solar dispersada en dirección a la superficie terrestre y absorbida por la atmósfera [$W/m^2\mu m$]

$t_{\Delta\lambda}$: Transmitancia espectral por dispersión relacionada con la radiación solar incidente. [–]

$t_{\Delta\lambda}^a$: Transmitancia espectral por absorción relacionada con la radiación solar incidente. [–]

$d_{\Delta\lambda}$: Fracción espectral de radiación espectral dispersada por la atmósfera en dirección de la radiación solar incidente. [–]

$f_{\Delta\lambda}^R$: Coeficiente adimensional de Rayleigh asociado a la dispersión de la radiación solar espectral en dirección del rayo incidente [–]

$f_{\Delta\lambda}^M$: Coeficiente adimensional de Mie asociado a la dispersión de la radiación solar espectral en dirección del rayo incidente [–]

g : Coeficiente de asimetría [–]

$K_{\Delta\lambda}^d \uparrow$: Radiación solar dispersada en dirección al espacio exterior y absorbida por la atmósfera [$W/m^2\mu m$]

$t'_{\Delta\lambda}$: Transmitancia espectral por dispersión relacionada con la radiación solar en dirección al sensor satelital [–]

$t_{\Delta\lambda}^{a'}$: Transmitancia espectral por absorción relacionadas con la radiación solar en dirección al sensor satelital [–]

$u_{\Delta\lambda}$: Fracción espectral de radiación espectral dispersada por la atmósfera en dirección contraria a la radiación solar incidente [–]

$b_{\Delta\lambda}^R$: Coeficiente adimensional de Rayleigh asociados a la retrodispersión de la radiación solar incidente [–]

$b_{\Delta\lambda}^M$: Coeficiente adimensional de Mie asociados a la retrodispersión de la radiación solar incidente
[—]

β : Ángulo de posición real del satélite [°]

θ_v : Ángulo de visión [°]

φ_{sat} : Ángulo azimutal del satélite [°]

φ_{sol} : Ángulo azimutal del sol [°]

$K_{\Delta\lambda}^D$ ↓: Radiación solar espectral directa [$W/m^2\mu m$]

$R_{\Delta\lambda}$ ↑: Radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre [$W/m^2\mu m$]

$\rho_{\Delta\lambda}$: Reflectancia espectral [—]

$t_{\Delta\lambda}^*$: Transmitancia espectral por dispersión relacionada con la radiación solar espectral reflejada
[—]

$t_{\Delta\lambda}^{a*}$: Transmitancia espectral por absorción relacionada con la radiación solar espectral reflejada
[—]

$K_{\Delta\lambda}^{d*}$ ↓: Radiación solar espectral reflejada, que es dispersada en dirección a la superficie terrestre, luego de ser absorbida por la atmósfera [$W/m^2\mu m$]

$u'_{\Delta\lambda}$: Fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección contraria a la radiación solar espectral reflejada [—]

$K_{\Delta\lambda}^{d*}$ ↑: Radiación solar espectral reflejada, que es dispersada en dirección al sensor satelital, luego de ser absorbida por la atmósfera [$W/m^2\mu m$]

$d'_{\Delta\lambda}$: Fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección a la radiación solar espectral reflejada [—]

$R_{\Delta\lambda}^*$ ↑: Radiación solar espectral reflejada, en dirección al sensor satelital, proveniente de $K_{\Delta\lambda}^{d*}$ ↓
[$W/m^2\mu m$]

$K_{\Delta\lambda}^*$: Radiación solar neta espectral [$W/m^2\mu m$]

$K_{\Delta\lambda}$ ↓: Radiación solar global espectral [$W/m^2\mu m$]

$K_{\Delta\lambda}$ ↑: Radiación solar espectral reflejada [$W/m^2\mu m$]

T_a : Temperatura aparente [°C]

$E_{\Delta\lambda}$: Radiación de cuerpo negro espectral [$W/m^2\mu m$]

h : Constante de Planck [$J s$]

c : Velocidad de la luz [m/s]

λ : Longitud de onda [μm]

k : Constante de Boltzmann [J/K]

$L_{\Delta\lambda}$ ↑: Radiancia espectral [$W/m^2\mu m sr$]

$t_{\Delta\lambda}^{O_3}$: Transmitancia espectral debida a la absorción del ozono [–]

$t_{\Delta\lambda}^{m.g}$: Transmitancia espectral debida a la absorción a la mezcla de gases [–]

$t_{\Delta\lambda}^{H_2O}$: Transmitancia espectral debida a la absorción del vapor de agua [–]

$t_{\Delta\lambda}^R$: Transmitancia espectral debida a la dispersión de Rayleigh [–]

$t_{\Delta\lambda}^M$: Transmitancia espectral debida a la dispersión de Mie [–]

1 Introducción

La radiación solar neta espectral de onda corta ($0.3\mu m - 2.5\mu m$) está relacionada con la energía disponible para que se generen los procesos físicos, químicos y biológicos a nivel de la superficie terrestre. Esta disponibilidad de energía se modifica de acuerdo con las características de la superficie terrestre, ya que estas determinan la cantidad de radiación solar absorbida y reflejada por la superficie terrestre. Parte de la radiación solar reflejada por la superficie terrestre es absorbida por la atmósfera y reemitida hacia ella en forma de calor. Al mismo tiempo, parte de la radiación solar absorbida calienta la superficie terrestre emitiendo posteriormente calor hacia la atmósfera. Estas transformaciones de calor al distribuirse en el sistema superficie terrestre–atmósfera, determinan la temperatura de este sistema, la cual se denomina temperatura aparente. La cuantificación de la radiación solar neta espectral de onda corta y de la temperatura aparente son útiles para la planificación agropecuaria y el análisis de las alteraciones ambientales producidos por el calentamiento global.

Diferentes autores han desarrollado modelos para determinar la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente mediante imágenes de satélite, con el fin analizar su comportamiento temporal y espacial. Por ejemplo, Tang et al. (2006) propusieron una parametrización para estimar la radiación solar neta espectral de onda corta a partir de albedos, determinados con datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). Posteriormente, Yun Kim y Liang (2010) desarrollaron un algoritmo híbrido para estimar la radiación solar neta espectral de onda corta, basado en la comparación entre la reflectancia TOA calculada con datos MODIS y la reflectancia medida en la superficie terrestre, para determinar el efecto atmosférico, cuya validación fue satisfactoria utilizando la estación SURFRAD. Seguidamente, Ocampo y Rivas (2013) estimaron la radiación solar neta diaria a partir de modelos de regresión lineal múltiple en una zona subhúmeda–húmeda, utilizando datos meteorológicos de radiación solar global, temperatura y humedad relativa. Siguiendo este orden de ideas, García et al. (2014) calcularon la radiación solar neta total, a partir de experimentos de laboratorios realizados, para estimar por medios de mediciones radiométrica la transmitancia y la emisividad de la atmósfera, y el albedo de diferentes superficies, partiendo de estas mediciones encontraron regresiones estadísticas entre la relación solar incidente y la relación solar neta de onda corta. Así

mismo, Carmona et al. (2015) desarrollaron un modelo general para estimar la radiación solar neta total, por medios de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Por otro lado, Barbosa et al. (2015) calcularon la radiación solar neta instantánea y diaria usando imágenes de satélite, para determinar estas a escala regional y en áreas heterogéneas. Continuando con el estudio de la radiación solar neta, Moreno et al. (2021), evaluaron las alteraciones de la radiación neta en la cuenca hidrográfica de Sorocaba, partiendo de las variables meteorológicas y radiativas, por medio del modelo SEBAL, utilizando imágenes OLI/TIRS–Landsat y ASTER (GDEM).

Por otra parte, la temperatura aparente o de brillo permite estudiar las características de la superficie terrestre y las condiciones del clima. Diferentes investigaciones como, Kang et al. (2014) analizaron la evolución temporal de la temperatura de brillo, por medio del sensor AMSR–E, para estimar el espesor del hielo entre los periodos de congelación tardía y fragmentación temprana en Canadá. De igual forma, Keck et al. (2017) proporcionaron un método que determina las características de la nieve y del hielo con sensores remotos al convertir la temperatura de brillo en emisividad superficial. A nivel local, Buevas, E. (2019) determinó la temperatura aparente sobre la ciudad de Montería–Córdoba, a partir de imágenes térmicas del satélite Landsat para estudiar su distribución espacial y temporal.

De acuerdo con lo anterior, poco se sabe acerca de cómo influye la temperatura aparente sobre la radiación solar neta espectral de onda corta y viceversa. En este trabajo se encontró la relación física y estadísticamente entre ambas variables, utilizando datos radiométricos (imágenes de satélite) que incluye el municipio de Cereté y parte de Montería en el departamento de Córdoba, correspondiendo a las fechas 12/01/2001, 03/02/2003, 29/01/2010 y 26/12/2014, para la descripción de los fenómenos de adsorción, transmisión y reflexión de los flujos radiativos involucrados y la identificación del calentamiento global en la zona de estudio.

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

- ✚ Analizar el comportamiento del calentamiento global en el municipio de Cereté y parte de Montería–Córdoba (2001–2014), a partir de la determinación de la relación entre la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente, utilizando imágenes de satélite.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la reflectancia espectral de la superficie terrestre utilizando la ecuación de transferencia radiativa de onda corta, correspondiente a la hora de adquisición de las imágenes satelitales.
- Aplicar la teoría de Planck para estimar la temperatura aparente del sistema superficie terrestre–atmósfera.
- Relacionar la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente del sistema superficie terrestre–atmósfera de manera estadística.
- Determinar el fenómeno del calentamiento global por medio de la relación entre la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente del sistema superficie terrestre–atmósfera en forma temporal (2001–2014).
- Validar teóricamente el comportamiento de la radiación solar neta espectral de onda corta y la temperatura aparente con el fenómeno del calentamiento global, a través de los resultados obtenidos por Pérez y Gónima (2014) y Sandoval (2019).

3 Marco Teórico

La radiación solar neta espectral de onda corta $K_{\Delta\lambda}^*$ es la diferencia entre los flujos incidentes y reflejados a nivel de la superficie terrestre. Para su determinación se utilizará la teoría de transferencia de radiación solar de onda corta entre la atmósfera y la superficie terrestre (Gónima, 1993).

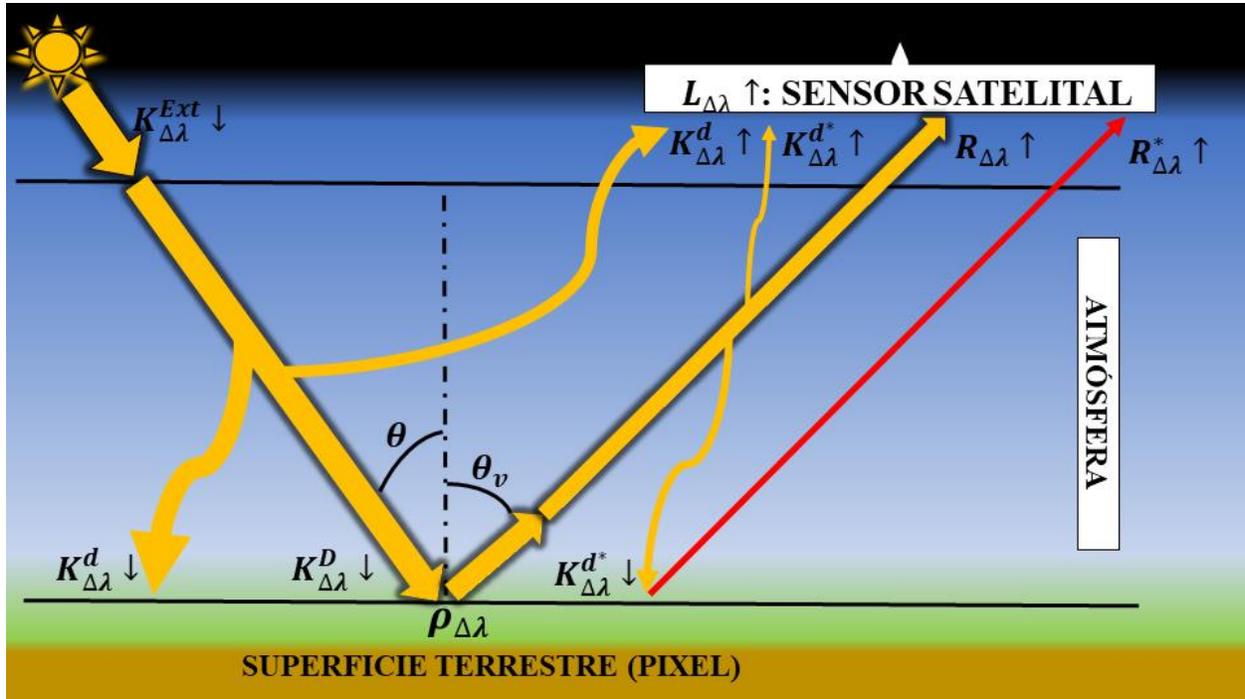


Figura 3.1: Flujos radiativos de onda corta entre la atmósfera y la superficie terrestre (pixel).

En la Figura 3.1 se muestran los flujos de radiación solar al interactuar con la atmósfera y la superficie terrestre (Gónima y Alados, 2003).

El primer término [1], representa la radiación solar espectral extraterrestre efectiva $K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow$, definida por:

$$K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow = S_{o\Delta\lambda} f \cos \theta \quad (1)$$

donde, $S_{o\Delta\lambda}$ es la constante solar espectral, f es el factor de corrección astronómica determinado por Fröhlich y London (1986), mientras que θ representa el ángulo cenital.

[2] corresponde a la radiación solar espectral incidente, que es dispersada en dirección a la superficie terrestre, luego de ser absorbida en parte por la atmósfera, $K_{\Delta\lambda}^d \downarrow$:

$$K_{\Delta\lambda}^d \downarrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow (1 - t_{\Delta\lambda}) d_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^a \quad (2)$$

donde, $t_{\Delta\lambda}$ y $t_{\Delta\lambda}^a$ son las transmitancias espectrales de la atmósfera debidas a la dispersión y absorción respectivamente, asociadas a la radiación solar incidente, y $d_{\Delta\lambda}$ es la fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección a la radiación solar incidente:

$$d_{\Delta\lambda} = \left[\frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta) f_{\Delta\lambda}^R + (1 + 3g \cos \theta) f_{\Delta\lambda}^M \right] \frac{1}{2\pi} \quad (2a)$$

siendo, $f_{\Delta\lambda}^R$ y $f_{\Delta\lambda}^M$ los coeficientes adimensionales de Rayleigh y Mie, respectivamente, relacionados con la dispersión de la radiación solar espectral en dirección del rayo incidente y g es el coeficiente de asimetría.

[3] representa la radiación solar espectral incidente, que es dispersada en dirección al sensor satelital, luego de ser absorbida una parte por la atmósfera, $K_{\Delta\lambda}^d \uparrow$:

$$K_{\Delta\lambda}^d \uparrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow (1 - t'_{\Delta\lambda}) u_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a'} \quad (3)$$

donde, $t'_{\Delta\lambda}$ y $t_{\Delta\lambda}^{a'}$ son las transmitancias espectrales de la atmósfera debidas a la dispersión y absorción, respectivamente, asociadas a la radiación solar en dirección al sensor satelital, y $u_{\Delta\lambda}$ es la fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección contraria a la radiación solar espectral incidente,

$$u_{\Delta\lambda} = \left[\frac{3}{4} (1 + \cos^2 \beta) b_{\Delta\lambda}^R + (1 + 3g \cos \beta) b_{\Delta\lambda}^M \right] \frac{1}{2\pi} \quad (3a)$$

En la ec. (3a), $b_{\Delta\lambda}^R$ y $b_{\Delta\lambda}^M$ son los coeficientes adimensionales de Rayleigh y Mie, respectivamente, asociados a la retrodispersión de la radiación solar espectral incidente que es captada por el sensor satelital, y β representa la posición real del satélite, calculada con la siguiente expresión:

$$\cos \beta = \cos \theta \cos \theta_v + (1 - \cos^2 \theta)^{1/2} (1 - \cos^2 \theta_v)^{1/2} \cos(\varphi_{sat} - \varphi_{sol}) \quad (3b)$$

siendo, θ_v el ángulo de posicionamiento del sensor satelital o de visión, φ_{sat} es el ángulo azimutal del satélite y φ_{sol} es el del Sol.

[4] corresponde a la radiación solar espectral que penetra imperturbablemente la atmósfera e incide directamente sobre la superficie terrestre, $K_{\Delta\lambda}^D \downarrow$:

$$K_{\Delta\lambda}^D \downarrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow t_{\Delta\lambda}^a t_{\Delta\lambda} \quad (4)$$

[5] representa la radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre, que atraviesa la atmósfera en dirección al sensor satelital, $R_{\Delta\lambda} \uparrow$:

$$R_{\Delta\lambda} \uparrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow t_{\Delta\lambda}^a [t_{\Delta\lambda} + (1 - t_{\Delta\lambda}) d_{\Delta\lambda}] \rho_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a*} t_{\Delta\lambda}^* \quad (5)$$

siendo, $\rho_{\Delta\lambda}$ la reflectancia espectral de la superficie terrestre (con correcciones atmosféricas), mientras que $t_{\Delta\lambda}^*$ y $t_{\Delta\lambda}^{a*}$ son las transmitancias espectrales de la atmósfera debidas a la dispersión y absorción, respectivamente, que están relacionadas con la radiación solar espectral reflejada.

[6] representa la radiación solar espectral reflejada, que es dispersada en dirección a la superficie terrestre, luego de ser absorbida por la atmósfera, $K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow$:

$$K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow t_{\Delta\lambda}^a [t_{\Delta\lambda} + (1 - t_{\Delta\lambda}) d_{\Delta\lambda}] \rho_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a*} t_{\Delta\lambda}^* (1 - t_{\Delta\lambda}^*) u'_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a*} \quad (6)$$

siendo, $u'_{\Delta\lambda}$ la fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección contraria a la radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre,

$$u'_{\Delta\lambda} = \left[\frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta_v) b_{\Delta\lambda}^R + (1 + 3g \cos \theta_v) b_{\Delta\lambda}^M \right] \frac{1}{2\pi} \quad (6a)$$

[7] corresponde a la radiación solar espectral reflejada, que es dispersada en dirección al sensor satelital, luego de ser absorbida por la atmósfera, $K_{\Delta\lambda}^{d*} \uparrow$:

$$K_{\Delta\lambda}^{d*} \uparrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow t_{\Delta\lambda}^a [t_{\Delta\lambda} + (1 - t_{\Delta\lambda}) d_{\Delta\lambda}] \rho_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a*} t_{\Delta\lambda}^* (1 - t_{\Delta\lambda}^*) d'_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^{a*} \quad (7)$$

donde, $d'_{\Delta\lambda}$ es la fracción espectral de la radiación solar espectral dispersada por la atmósfera, en dirección a la radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre,

$$d'_{\Delta\lambda} = \left[\frac{3}{4}(1 + \cos^2 \beta)f_{\Delta\lambda}^R + (1 + 3g \cos \beta)f_{\Delta\lambda}^M \right] \frac{1}{2\pi} \quad (7a)$$

[8] representa la radiación solar espectral reflejada, en dirección al sensor satelital, proveniente de $K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow$ ([6]):

$$R_{\Delta\lambda}^* \uparrow = K_{\Delta\lambda}^{Ext} \downarrow t_{\Delta\lambda}^a [t_{\Delta\lambda} + (1 - t_{\Delta\lambda}) d_{\Delta\lambda}] \rho_{\Delta\lambda}^2 (t_{\Delta\lambda}^a t_{\Delta\lambda}^*)^2 (1 - t_{\Delta\lambda}^*) u'_{\Delta\lambda} t_{\Delta\lambda}^a \quad (8)$$

Finalmente, $K_{\Delta\lambda}^*$ se expresa de la siguiente manera:

$$K_{\Delta\lambda}^* = (1 - \rho_{\Delta\lambda}) K_{\Delta\lambda} \downarrow \quad (9)$$

donde, $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ representa la radiación solar global espectral (Figura 3.1: flujos [2], [4] y [6]) y $\rho_{\Delta\lambda}$ se expresa como:

$$\rho_{\Delta\lambda} = \frac{K_{\Delta\lambda} \uparrow}{K_{\Delta\lambda} \downarrow} \quad (10)$$

En la ec. (10), $K_{\Delta\lambda} \uparrow$ representa la radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre (Figura 3.1: flujos [5] y [8]).

Por otra parte, la temperatura aparente T_a es la temperatura a la cual un cuerpo gris emite radiación infrarroja térmica, como si este actuara como cuerpo negro (Babaeian y Tuller, 2023). En teledetección, al captar el sensor satelital radiación térmica emitida por el Planeta (sistema superficie terrestre–atmósfera), es posible determinar T_a (Figura 3.2).

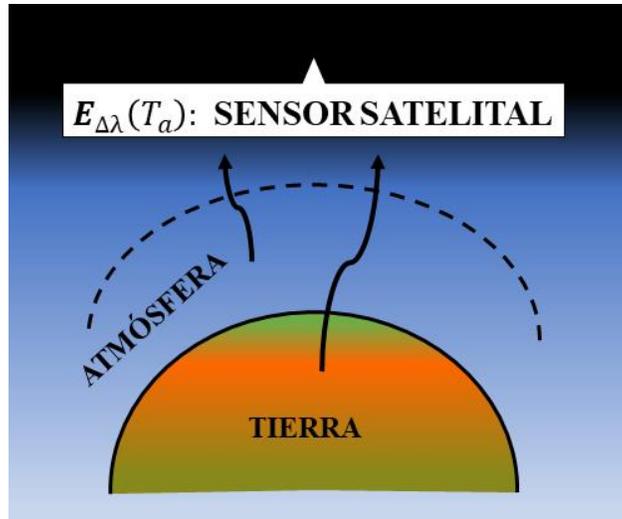


Figura 3.2: Esquema del sistema superficie terrestre-atmósfera, donde $E_{\Delta\lambda}$ es la radiación térmica captada por el sensor satelital utilizada para el cálculo T_a .

Para determinar T_a se utilizó la ecuación de Planck de cuerpo negro:

$$E_{\Delta\lambda}(T_a) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{k\lambda T_a}} - 1 \right)} \quad (11)$$

donde, $E_{\Delta\lambda}(T_a)$ es la radiación de cuerpo negro espectral, h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz, λ la longitud de onda y k es la constante de Boltzmann.

De la ec. (11) se obtiene la expresión para el cálculo de T_a :

$$T_a = \frac{hc}{k\lambda \ln \left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 E_{\Delta\lambda}(T_a)} + 1 \right)} \quad (12)$$

4 Ubicación de la Zona de Estudio

La zona de estudio seleccionada (Figura 4.1) incluye el municipio de Cereté y parte del municipio de Montería en el departamento de Córdoba. El régimen climático, representado por la estación meteorológica Turipaná está caracterizado por una temperatura media anual de 28°C y una precipitación media anual de 1200mm. La vegetación de la zona de estudio está representada por pastos, cultivos (arroz, maíz y algodón) y algunas áreas con bosques, y vegetación ribereña al río Sinú. Además, el suelo es utilizado para la actividad agrícola y la ganadería extensiva (CVS, on-line).

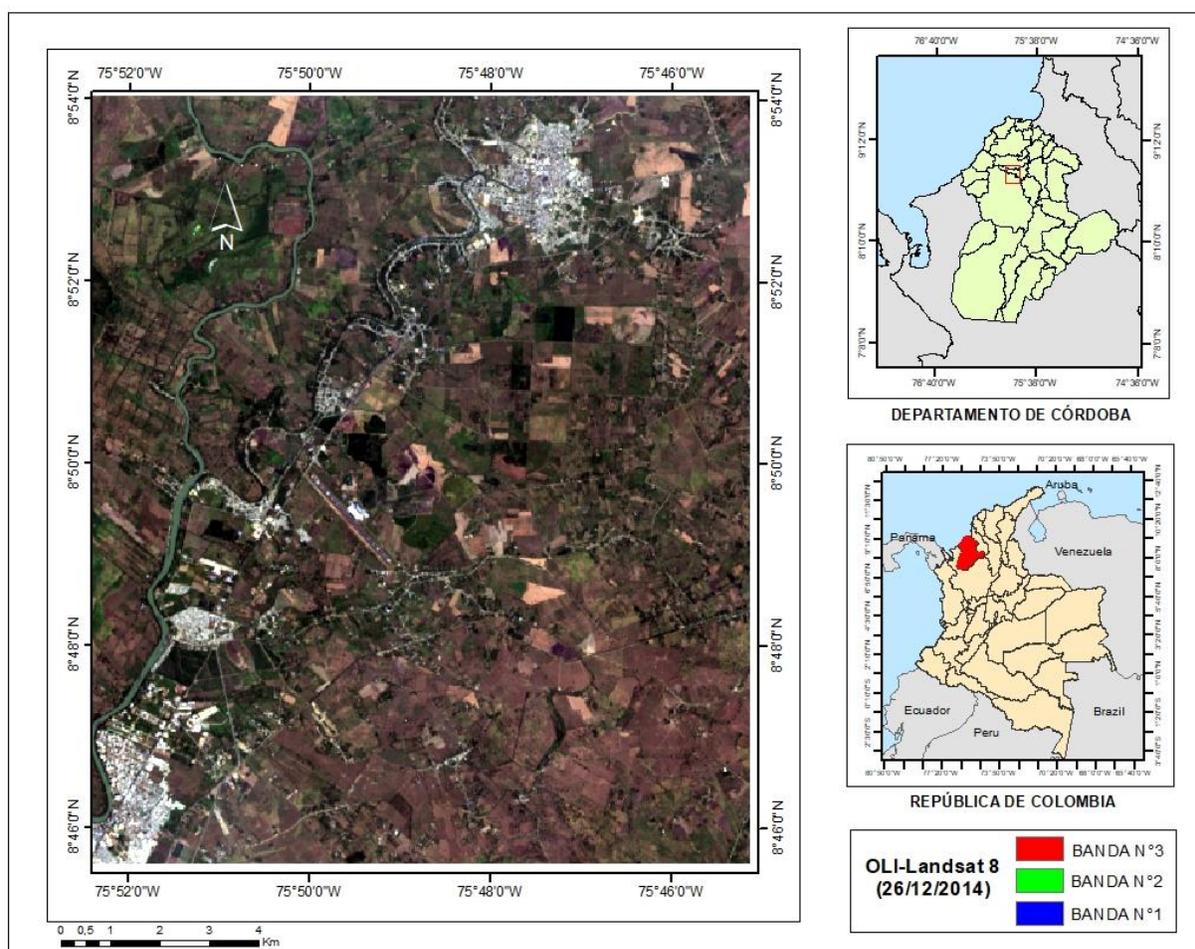


Figura 4.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio (rectángulo rojo), imagen satelital del 26/12/2014.

5 Metodología

Las etapas desarrolladas en el presente trabajo son las siguientes:

1. Adquisición, revisión y análisis de bibliografía relacionada con la temática de estudio (libros, artículos científicos, reportes, etc.).
2. Adquisición y puesta a punto (proceso de importación de imágenes al software especializado, organización por bandas secuenciales y extracción de la zona de estudio) de las imágenes de satélites (Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8) para cuatro fechas específicas entre 2001 y 2014 (Tabla 5.1), descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS on-line). Para el análisis se tuvo en cuenta seis bandas espectrales de onda corta y una térmica, las especificaciones de cada satélite Landsat se encuentran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.1: *Parámetros de adquisición de cada una de las imágenes seleccionada.*

Fechas	Hora	Satélite
12/01/2001	10:08:12	Landsat 7
03/02/2003	10:06:19	Landsat 7
29/01/2010	09:38:48	Landsat 5
26/12/2014	10:17:49	Landsat 8

Tabla 5.2: Bandas espectrales $\Delta\lambda$ de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8.

Landsat 5		
Bandas	Tipo de radiación	$\Delta\lambda$ (μm)
N°1	Azul	0.452 – 0.518
N°2	Verde	0.528 – 0.609
N°3	Rojo	0.626 – 0.693
N°4	IR-C 1	0.776 – 0.904
N°5	IR-C2	1.567 – 1.784
N°6	Infrarrojo térmico	10.45 – 12.42
N°7	IR-C 3	2.097 – 2.349
Landsat 7		
Bandas	Tipo de radiación	$\Delta\lambda$ (μm)
N°1	Azul	0.452 – 0.514
N°2	Verde	0.519 – 0.601
N°3	Rojo	0.631 – 0.692
N°4	IR-C 1	0.772 – 0.898
N°5	IR-C2	1.547 – 1.748
N°6	Infrarrojo térmico	10.31 – 12.36
N°7	IR-C 3	2.065 – 2.346
Landsat 8		
Bandas	Tipo de radiación	$\Delta\lambda$ (μm)
N°2	Azul	0.450 – 0.515
N°3	Verde	0.525 – 0.605
N°4	Roja	0.633 – 0.690
N°5	IR-C 1	0.775 – 0.805
N°6	IR-C 2	1.550 – 1.750
N°7	IR-C 3	2.080 – 2.350
N°10	Infrarrojo térmico	10.60 – 11.19

3. Conversión de los valores digitales de cada imagen seleccionada a valores de radiancia espectral $L_{\Delta\lambda} \uparrow$ ($W/m^2sr \mu m$), tal como se describe en Chader et al. (2009). Mediante el programa ERDAS IMAGINE.
4. Adquisición de datos de temperatura del aire (T), humedad relativa (HR) y visibilidad horizontal (VIS), fueron suministrados por el Centro de investigación de CORPOICA-TURIPANÁ, correspondientes a la fecha y hora de la adquisición de la imagen de satélite seleccionada.

Tabla 5.3: *T y HR calculadas para cada imagen.*

Fechas	T (°C)	HR(%)
12/01/2001	30.05	66.0
03/02/2003	30.90	63.7
29/02/2010	30.10	59.5
26/12/2014	31.58	53.3

Respecto a la presión atmosférica, no presenta grandes variaciones por lo cual se considera $p = 1011.77 \text{ hPa}$ y por último la visibilidad se consideró teóricamente $Vis = 23 \text{ km}$, de acuerdo con McClatchey et al. (1972), teniendo en cuenta que la atmósfera en cada una de las imágenes se encontraba despejada.

5. Para el cálculo de $K_{\Delta\lambda}^*$, ec. (9), se determinó las variables $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ y $\rho_{\Delta\lambda}$ de la siguiente manera:

a) Se realizó el cálculo de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ a partir de las variables $K_{\Delta\lambda}^D \downarrow$: ec. (4), $K_{\Delta\lambda}^d \downarrow$: ec. (2) y $K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow$: ec. (6), en el cual se estimó previamente:

- $t_{\Delta\lambda}^a$ mediante la ec. (13) según Gónima y Alados (2003):

$$t_{\Delta\lambda}^a = t_{\Delta\lambda}^{o_3} t_{\Delta\lambda}^{mg} t_{\Delta\lambda}^{H_2O} \quad (13)$$

donde $t_{\Delta\lambda}^{o_3}$, $t_{\Delta\lambda}^{mg}$ y $t_{\Delta\lambda}^{H_2O}$ son las transmitancias espectrales debidas al ozono, la mezcla de gases (CO_2, O_2, N_2O y CH_4) y al vapor de agua, respectivamente (Tabla 5.4).

- $t_{\Delta\lambda}$ mediante la ec. (14) según Gónima y Alados (2003):

$$t_{\Delta\lambda} = t_{\Delta\lambda}^R t_{\Delta\lambda}^M \quad (14)$$

donde $t_{\Delta\lambda}^R$ y $t_{\Delta\lambda}^M$ son las transmitancias espectrales debidas a la dispersión de Rayleigh y Mie, respectivamente (Tabla 5.4).

- $t_{\Delta\lambda}^{a*}$ y $t_{\Delta\lambda}^*$ se calculó por medio de las ecs. (13) y (14) respectivamente, con la condición de que las masas relativas (m_{o_3} , m_a y m_r) están en función del ángulo θ_v .

Tabla 5.4: Ecuaciones para el cálculo de las transmitancias espectrales.

Transmitancia	Ecuación	Descripción
Ozono ($t_{\Delta\lambda}^{o_3}$)	$t_{\Delta\lambda}^{o_3} = e^{-m_{o_3} l k_{\Delta\lambda}^{o_3}}$	m_{o_3} es la masa relativa del ozono, l es el contenido o_3 en la atmosfera y $k_{\Delta\lambda}^{o_3}$ es el coeficiente de absorción espectral para el ozono.
Mezcla de gases ($t_{\Delta\lambda}^{mg}$)	$t_{\Delta\lambda}^{mg} = e^{\frac{-1.41 m_a k_{\Delta\lambda}^{mg}}{(1+118.93 m_a k_{\Delta\lambda}^{mg})^{0.45}}}$	m_a es la masa relativa para la mezcla de gases y $k_{\Delta\lambda}^{mg}$ es el coeficiente espectral de la mezcla de gases (CO_2 , O_2 , N_2O y CH_4).
Vapor de agua ($t_{\Delta\lambda}^{H_2O}$)	$t_{\Delta\lambda}^{H_2O} = e^{\frac{-0.2385 m_r \omega k_{\Delta\lambda}^{H_2O}}{(1+20.07 m_r \omega k_{\Delta\lambda}^{H_2O})^{0.45}}}$	m_r es la masa relativa, $k_{\Delta\lambda}^{H_2O}$ es el coeficiente espectral del H_2O y ω es el contenido del valor de agua o razón de mezcla.
Rayleigh ($t_{\Delta\lambda}^R$)	$t_{\Delta\lambda}^R = e^{-m_r \delta_{\Delta\lambda}^R}$	m_r es la masa relativa y $\delta_{\Delta\lambda}^R$ es el coeficiente de dispersión adimensional de Rayleigh (Gónima, 2021).
Mie ($t_{\Delta\lambda}^M$)	$t_{\Delta\lambda}^M = e^{-m_r \delta_{\Delta\lambda}^M}$	m_r es la masa relativa y $\delta_{\Delta\lambda}^M$ es el coeficiente de dispersión adimensional de Mie (Gónima, 2021).

- b) Para el cálculo de $\rho_{\Delta\lambda}$ se tuvo en cuenta los flujos de radiación solar espectral captados por el sensor satelital que son representados por $L_{\Delta\lambda} \uparrow$ (Figura 3.1). De acuerdo con la siguiente expresión, se halló el modelo para calcular $\rho_{\Delta\lambda}$,

$$L_{\Delta\lambda} \uparrow = K_{\Delta\lambda}^d \uparrow + R_{\Delta\lambda} \uparrow + K_{\Delta\lambda}^{d*} \uparrow + R_{\Delta\lambda}^* \uparrow \quad (15)$$

de manera que los flujos $R_{\Delta\lambda} \uparrow$, $K_{\Delta\lambda}^{d*} \uparrow$ y $R_{\Delta\lambda}^* \uparrow$ incluyen $\rho_{\Delta\lambda}$, debido a que estos están relacionados con la reflexión de la radiación solar espectral en la superficie terrestre.

Para el cálculo $K_{\Delta\lambda}^d \uparrow$, se calculó previamente $t_{\Delta\lambda}^{a'}$ y $t'_{\Delta\lambda}$ por medio de las ecs. (13) y (14) respectivamente, con la condición de que las masas relativas (m_{o_3} , m_a y m_r) están en función del ángulo β .

En el Anexo 1 se encuentra el modelo que se utilizó para calcular $\rho_{\Delta\lambda}$, que fue aplicada sobre los valores de radiancia espectral correspondiente a cada banda espectral de onda corta.

6. Seguidamente se calculó T_a de acuerdo con la ec. (12), aplicada sobre los valores de radiancia espectral de la banda térmica.
7. Para establecer la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , se definieron cuatro muestras representativas de las superficies que representan la zona de estudio.
8. Para la identificación del calentamiento global en la zona de estudio, se seleccionó un píxel representativo de cada una de las muestras definidas en el numeral anterior. A partir de los datos obtenido se analizó el comportamiento temporal de T_a y $K_{\Delta\lambda}^*$.

6 Análisis de Resultados

Para el análisis se seleccionó la imagen correspondiente al 12/01/2001. Ya que el resto de las imágenes seleccionadas muestran resultados similares, lo que se puede corroborar a partir del Anexo 2 hasta el Anexo 10, secuencialmente. El objetivo de este trabajo es relacionar $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , por lo tanto, se analizó inicialmente el comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$, variables que intervienen en el cálculo de $K_{\Delta\lambda}^*$ según el Marco Teórico.

6.1 Descripción de las variables $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$

En la Figura 6.1 se muestra la imagen calculada de $\rho_{\Delta\lambda_1}$ (banda N°1), cuyo rango varía entre 7.17% y 30.12%, que de acuerdo con las curvas espectrales (Figura 6.2(b)) y la Corporación autónoma regional de los valles del Sinú y del San Jorge (CVS on-line). El área de estudio está representada por superficies de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana. En el Anexo 2 se encuentran las imágenes de $\rho_{\Delta\lambda}$ para las 5 bandas restantes, de igual forma se presentan las imágenes de cada una de las fechas restantes.

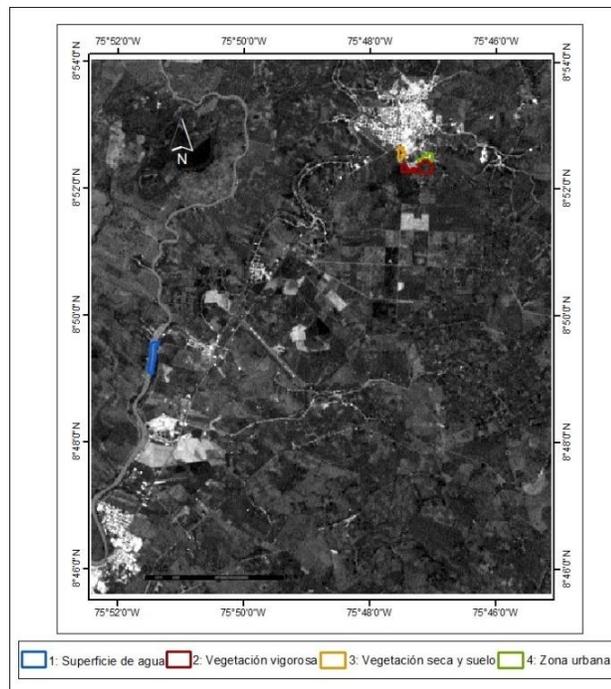


Figura 6.1: Imagen calculada de $\rho_{\Delta\lambda_1}$ y localización de las muestras representativas para el análisis (1: superficie de agua, 2: vegetación vigorosa, 3: vegetación seca y suelo, 4: zona urbana), correspondiente al 12/01/2001.

Para analizar el comportamiento espectral de las superficies existentes en la zona de estudio, se definieron muestras representativas (Figura 6.1) de superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana: construcciones mezcladas con vegetación, cuyas respuestas espectrales se muestran en la Figura 6.2(a).

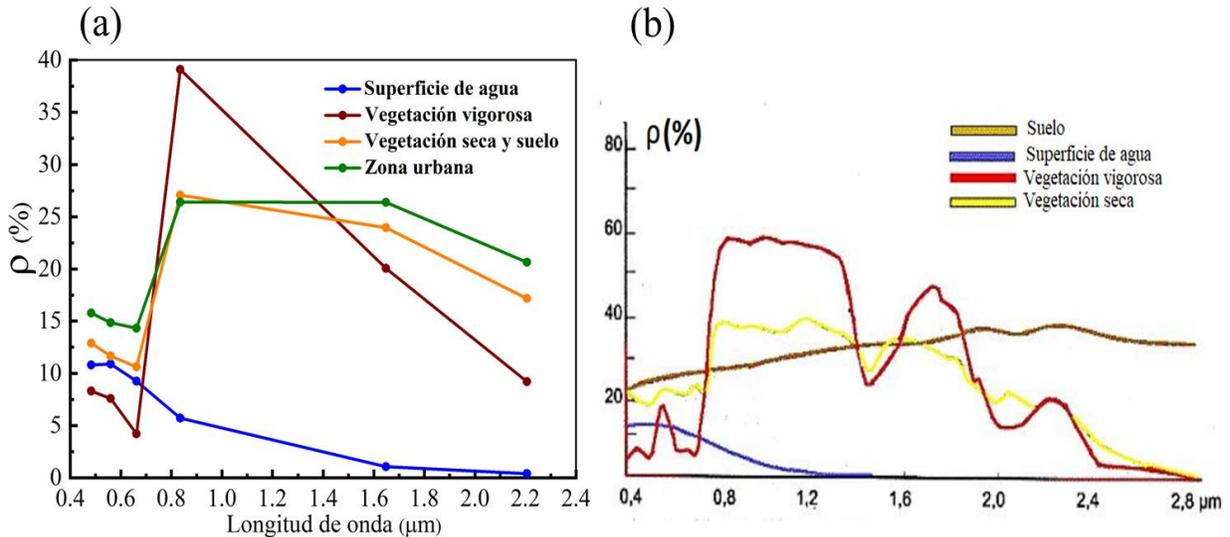


Figura 6.2: (a) Comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculada para cada muestra representativa y (b) curvas espectrales existentes en la literatura especializada (Gónima, 2021).

De acuerdo con la Figura 6.2(a), las curvas espectrales calculadas para la superficie de agua y la vegetación vigorosa muestran el mismo comportamiento que las de la Figura 6.2(b). Las curvas espectrales de la vegetación seca y suelo, y la zona urbana (Figura 6.2(a)) se comportan como una mezcla de vegetación vigorosa y suelo, lo cual también concuerda con la teoría. En el Anexo 3, se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes de las curvas espectrales de cada muestra representativa.

La otra variable que interviene en el cálculo de $K_{\Delta\lambda}^*$ es $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ (ec. (9)). La Figura 6.3 muestra la imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1} \downarrow$ (banda N°1), por ejemplo, cuyos valores varían entre $1014.32 W/m^2\mu m$ y $1019.04 W/m^2\mu m$ correspondiente a las superficies existentes en el área de estudio. En el Anexo 4, se encuentran las imágenes de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para las 5 bandas restantes, del mismo modo se presentan las imágenes de cada una de las fechas restantes.

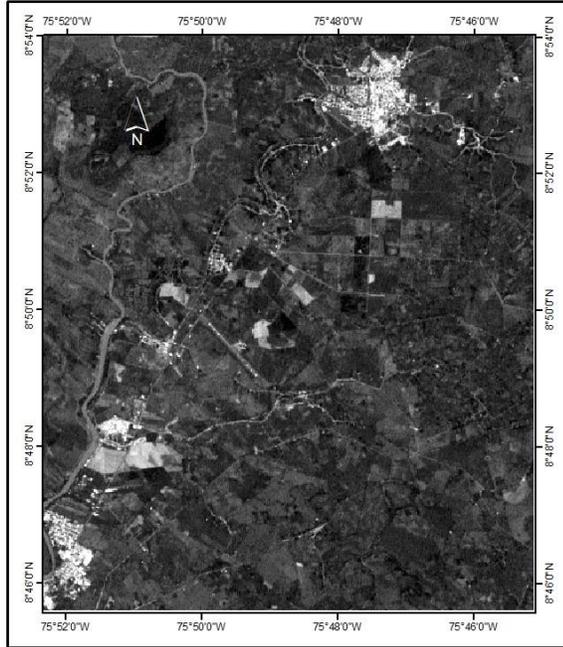


Figura 6.3: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1} \downarrow$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.

Teniendo en cuenta las muestras representativas se analizó el comportamiento espectral de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para cada una de ellas. En la Figura 6.4(a) se muestra la respuesta espectral de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ correspondiente a la superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana.

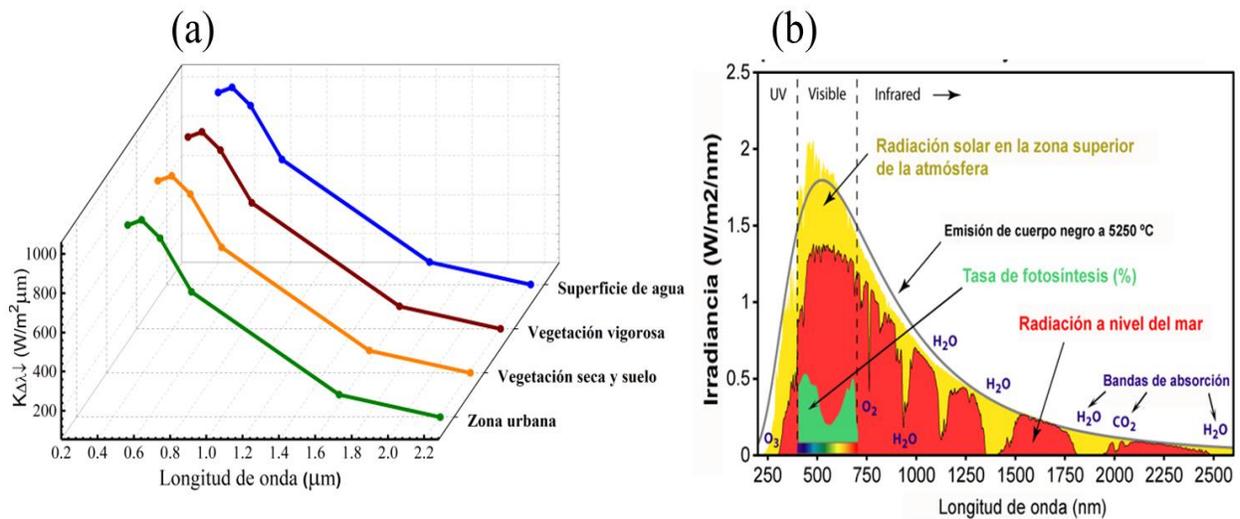


Figura 6.4: (a) Comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para la superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana, (b) distribución espectral de la radiación solar (IDEAM, on-line).

Tal como se observa en la Figura 6.4(a), $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ calculada para las cuatro muestras tiene el mismo comportamiento a la distribución espectral de la radiación solar (Figura 6.4(b)). En el Anexo 5, se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes de la distribución espectral de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$, para cada muestra representativa.

6.2 Influencia de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ sobre $K_{\Delta\lambda}^*$

En la Tabla 6.1 se muestran los valores de $\rho_{\Delta\lambda}$, $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ y $K_{\Delta\lambda}^*$ para cada una de las muestras representativas seleccionadas (Figura 6.1).

Tabla 6.1: Valores calculados de $\rho_{\Delta\lambda}$, $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ y $K_{\Delta\lambda}^*$, a partir de las muestras representativas seleccionadas.

Bandas	VARIABLES	Superficie de agua	Vegetación vigorosa	Vegetación seca y suelo	Zona urbana
N°1	$\rho_{\Delta\lambda_1}(\%)$	10.79	8.30	12.88	15.78
	$K_{\Delta\lambda_1} \downarrow (W/m^2\mu m)$	1032.67	1031.52	1033.63	1034.97
	$K_{\Delta\lambda_1}^* (W/m^2\mu m)$	921.26	945.87	900.48	871.65
N°2	$\rho_{\Delta\lambda_2}(\%)$	10.90	7.59	11.66	14.84
	$K_{\Delta\lambda_2} \downarrow (W/m^2\mu m)$	1058.86	1057.55	1059.17	1060.43
	$K_{\Delta\lambda_2}^* (W/m^2\mu m)$	943.49	977.31	935.67	903.07
N°3	$\rho_{\Delta\lambda_3}(\%)$	9.24	4.21	10.62	14.31
	$K_{\Delta\lambda_3} \downarrow (W/m^2\mu m)$	965.88	964.33	966.30	967.44
	$K_{\Delta\lambda_3}^* (W/m^2\mu m)$	876.64	923.71	863.66	829.01
N°4	$\rho_{\Delta\lambda_4}(\%)$	5.70	39.09	27.08	26.41
	$K_{\Delta\lambda_4} \downarrow (W/m^2\mu m)$	691.34	696.93	694.92	694.81
	$K_{\Delta\lambda_4}^* (W/m^2\mu m)$	651.90	424.42	506.71	511.34
N°5	$\rho_{\Delta\lambda_5}(\%)$	1.07	20.06	23.96	26.39
	$K_{\Delta\lambda_5} \downarrow (W/m^2\mu m)$	169.21	169.53	169.60	169.64
	$K_{\Delta\lambda_5}^* (W/m^2\mu m)$	167.40	135.51	128.96	124.87
N°7	$\rho_{\Delta\lambda_7}(\%)$	0.39	9.20	17.18	20.65
	$K_{\Delta\lambda_7} \downarrow (W/m^2\mu m)$	54.95	54.98	55.01	55.02
	$K_{\Delta\lambda_7}^* (W/m^2\mu m)$	54.73	49.92	45.56	43.66

En la Tabla 6.1 se observa que la variación de $\rho_{\Delta\lambda}$ por muestra representativa es mayor que la respectiva variación de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$. En consecuencia, $\rho_{\Delta\lambda}$ es la variable que más influye en el

comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$, lo cual demuestra que las características de las superficies (muestras seleccionadas) determinan la cantidad de energía disponible para que ocurran los procesos biofísicos y químicos sobre ellas y que está representada por $K_{\Delta\lambda}^*$.

6.3 Descripción de las variables $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a

En la Figura 6.5 se muestra la imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1}^*$ (banda N°1) cuyos valores varían entre $706.82 W/m^2\mu m$ y $974.68 W/m^2\mu m$. En el Anexo 6, se encuentran las imágenes de $K_{\Delta\lambda}^*$ para las 5 bandas restantes, así mismo se presentan las imágenes de cada una de las fechas restantes.

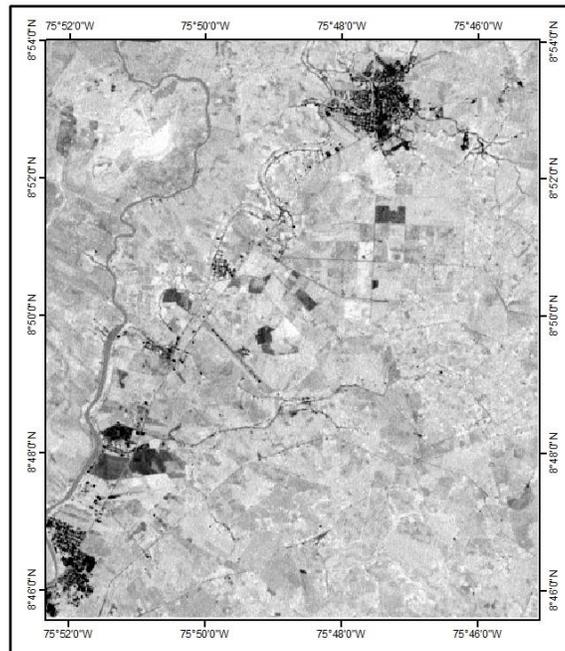


Figura 6.5: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1}^*$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.

La siguiente figura muestra el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ para cada una de las muestras seleccionadas (superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana), correspondiente al 12/01/2001.

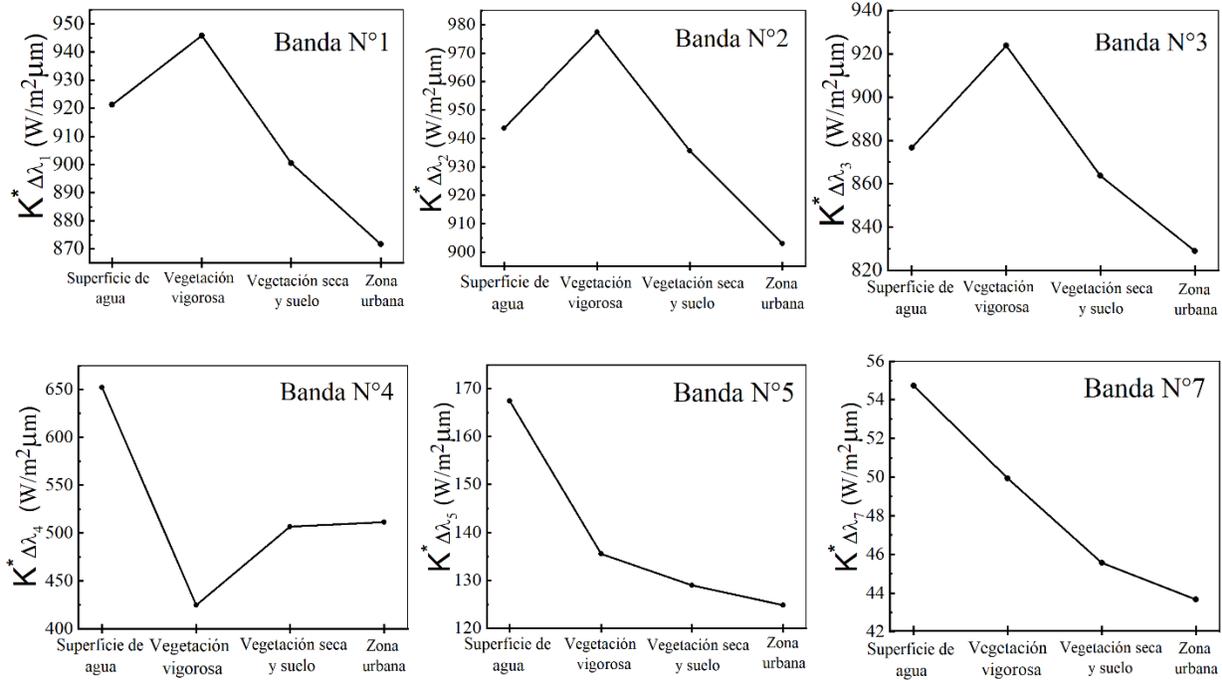


Figura 6.6: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas, para las diferentes bandas espectrales.

En la Figura 6.6 se observa que el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas coincide en las bandas N°1, N°2 y N°3, en las cuales $K_{\Delta\lambda}^*$ alcanza su valor máximo en la vegetación vigorosa y es menor para la superficie de agua, vegetación seca y suelo, y zona urbana, respectivamente. Esto se debe a que la vegetación vigorosa absorbe mayor cantidad de estas tres clases de radiación solar espectral, reflejando menos en comparación con la superficie de agua, vegetación seca y suelo, y zona urbana. La superficie de agua refleja más que la vegetación vigorosa, pero absorbe más radiación solar espectral (bandas N°1, N°2 y N°3) que las otras dos muestras seleccionadas. La vegetación seca y suelo, y la zona urbana son las que reflejan la mayor cantidad de radiación en las tres bandas espectrales, es decir, absorben poca radiación solar incidente debido a sus características como, por ejemplo, a que tienen una estructura molecular más compacta que la superficie de agua y la vegetación vigorosa. La argumentación anterior se puede corroborar con las curvas espectrales de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculadas para las bandas N°1, N°2 y N°3 (Figura 6.2).

Un caso particular es el de la banda N°4 en la Figura 6.6, cuyo comportamiento es diferente al de las otras cinco bandas. En este caso especial, $K_{\Delta\lambda}^*$ adquiere su valor mínimo en la vegetación vigorosa y el máximo en la superficie de agua. Esto significa que la vegetación vigorosa refleja mayor cantidad de radiación solar en esta banda, es decir, absorbe poca radiación solar, mientras que la superficie de agua es la que absorbe la mayor cantidad. Esta situación se puede comprobar por medio de las curvas espectrales de la Figura 6.2. Así mismo, la vegetación seca y suelo, y zona urbana tienen valores intermedios de $\rho_{\Delta\lambda}$ y por lo tanto $K_{\Delta\lambda}^*$ muestra valores intermedios.

Por último, en la Figura 6.6 se observa que para las bandas N°5 y N°7 el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ es diferente a las anteriores. En este caso, es la superficie de agua la que muestra el valor máximo de $K_{\Delta\lambda}^*$, mientras que la vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana tienen valores menores, lo que indica que la superficie de agua está absorbiendo prácticamente toda la radiación solar espectral incidente en comparación con la vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana las que respectivamente reflejan más cantidad de radiación en estas dos bandas espectrales. En el Anexo 7, se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes del comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas.

Por otra parte, la Figura 6.7 muestra la imagen calculada de T_a cuyos valores varían entre 22.23 °C y 32.17 °C.

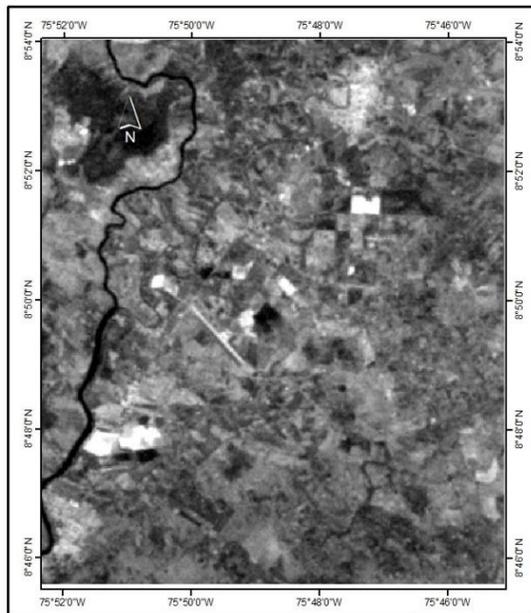


Figura 6.7: Imagen calculada de T_a , correspondiente al 12/01/2001.

En el Anexo 8, se encuentran las imágenes de T_a para las tres fechas restantes.

A continuación, se muestra el comportamiento de T_a calculada para cada una de las muestras seleccionadas, para la fecha mencionada. En el Anexo 9, se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes del comportamiento de T_a en función de las muestras seleccionadas.

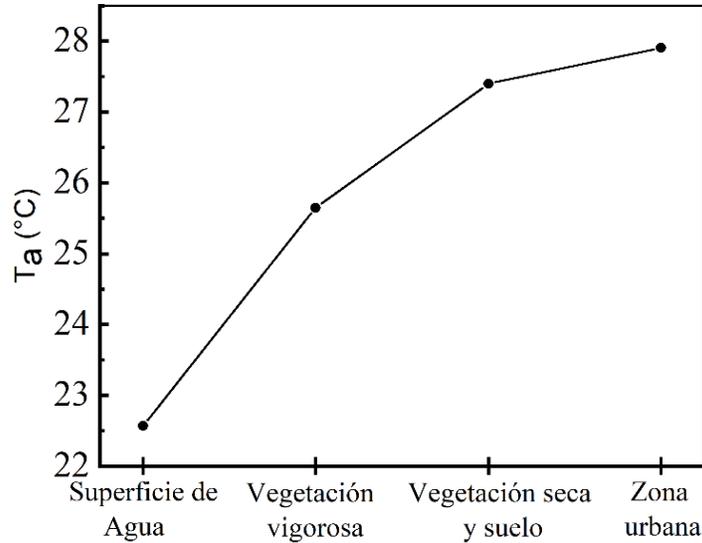


Figura 6.8: Comportamiento de T_a (banda N°6) en función de las muestras seleccionadas.

De acuerdo con la Figura 6.8, se puede verificar que la superficie de agua y la zona urbana poseen la mínima y máxima temperatura aparente, respectivamente. En términos generales, la superficie de agua absorbe mayor cantidad de radiación solar incidente que las demás superficies, enfriándose más la columna atmosférica sobre ella. A continuación, en la Figura 6.9, se hace un análisis físico detallado del comportamiento de las cuatro superficies mostrado en la Figura 6.8.

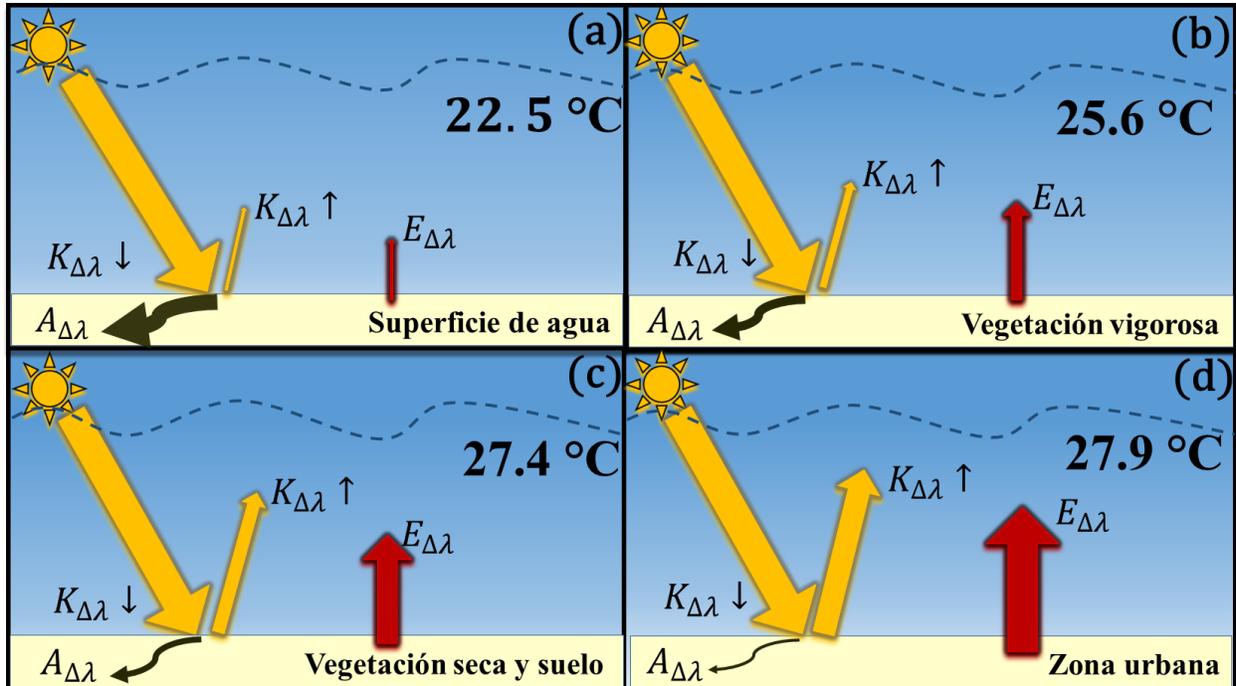
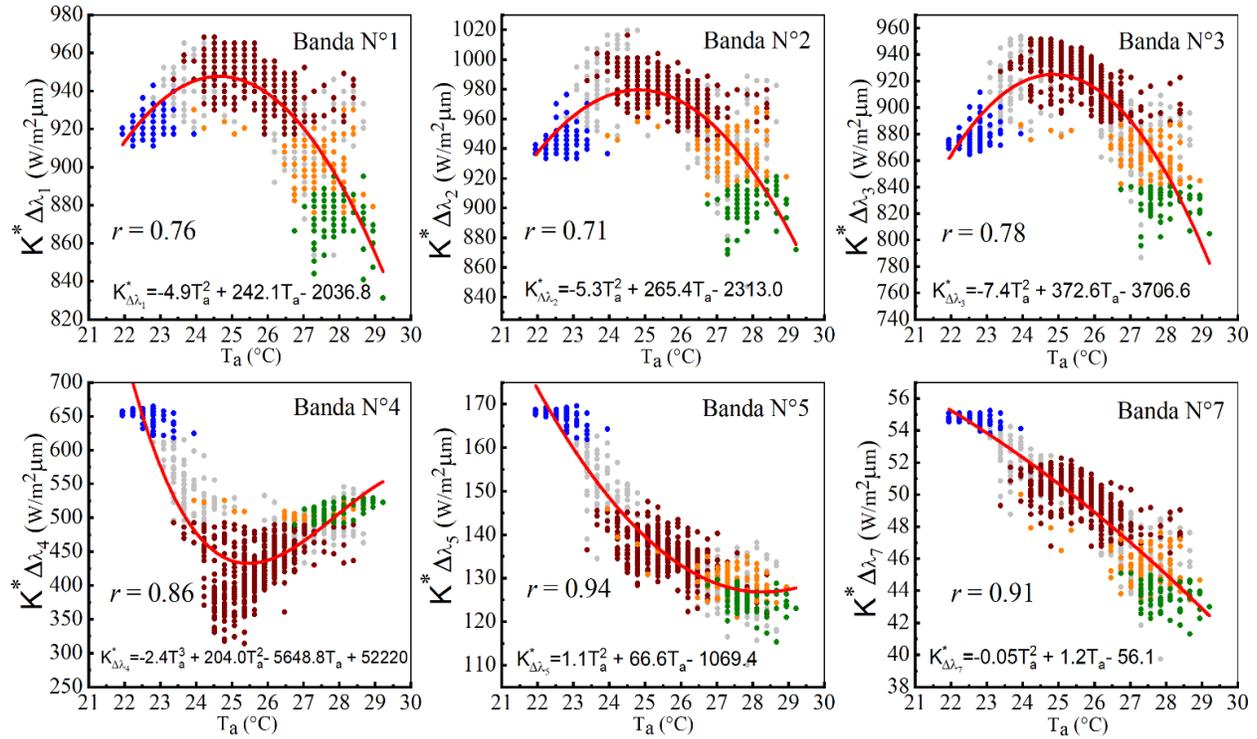


Figura 6.9: Representación gráfica para la explicación de las diferencias de T_a entre las muestras seleccionadas (superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana).

En la Figura 6.9(a), al incidir radiación solar global ($K_{\Delta\lambda} \downarrow$) sobre la superficie de agua gran parte de esta se absorbe ($A_{\Delta\lambda}$) reflejándose una pequeña proporción hacia la atmósfera ($K_{\Delta\lambda} \uparrow$), al mismo tiempo parte de la radiación absorbida calienta la superficie de agua y se transmite dentro de ella (almacenamiento interno de calor), emitiendo posteriormente una pequeña cantidad de radiación térmica (calor) hacia la atmósfera ($E_{\Delta\lambda}$). Entonces, al interactuar $K_{\Delta\lambda} \uparrow$ con la atmósfera, al llegar a esta, parte se transforma en calor y junto con $E_{\Delta\lambda}$ producen que T_a sea de 22.5°C. El otro caso extremo se refiere a la zona urbana (Figura 6.9(d)), la cual muestra claramente que $A_{\Delta\lambda}$ es menor y $K_{\Delta\lambda} \uparrow$ es mayor, en comparación con la superficie de agua. En este caso, la mayor parte de la radiación absorbida calienta la capa superior de la superficie correspondiente a la zona urbana, transmitiendo una pequeña cantidad dentro de ella. Al calentarse de esa manera la superficie, la radiación térmica que esta emite hacia la atmósfera es mayor. Simultáneamente, al interactuar una mayor cantidad de $K_{\Delta\lambda} \uparrow$ con la atmósfera, implica una mayor transformación de calor y junto con $E_{\Delta\lambda}$ generan que T_a sea de 27.9°C. Las otras dos superficies de vegetación vigorosa y vegetación seca y suelo (Figuras 6.9(b) y 6.9(c)) representan situaciones intermedias de los dos casos analizados anteriormente.

6.4 Relación entre las variables $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a

La Figura 6.10 muestra la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a para cada banda espectral de onda corta, de acuerdo con las cuatro superficies (muestras seleccionadas) analizadas previamente.



● Mezclas de Superficies ● Superficie de agua ● Vegetación vigorosa ● Vegetación seca y suelo ● Zona urbana
Figura 6.10: $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de la temperatura aparente T_a , para las diferentes bandas espectrales.

De acuerdo con los fundamentos físicos que intervienen en la descripción de $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a (sección 6.3), la Figura 6.10 muestra el comportamiento combinado de las Figuras 6.6 y 6.8. La correlación para cada banda espectral es altamente significativa, ya que todos los coeficientes de correlación r están muy por encima del coeficiente de correlación crítico $r_c < 0.06$, para una muestra de 1051 datos. Por lo tanto, estos resultados demuestran que $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a están relacionadas estadísticamente. Por consiguiente, las regresiones empíricas de la Figura 6.10 permiten clasificar las diferentes superficies de acuerdo con los valores calculados de $K_{\Delta\lambda}^*$, disponiendo previamente de T_a calculada. En el Anexo 10, se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes de la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a para cada banda espectral de onda corta.

6.5 Identificación del calentamiento global por medio de la relación $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a

Los resultados expuestos a continuación acerca de la influencia que tiene el calentamiento global sobre la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a están validados en los estudios de Pérez y Gónima (2014) y Sandoval (2019), en el que reportan un incremento temporal de la temperatura del aire, debido a la degradación de los suelos como consecuencia de una fuerte intervención antrópica, con el fin de obtener suelos aptos para la agricultura, ganadería y la expansión urbana.

Se seleccionó un píxel representativo de la vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana, para analizar el comportamiento temporal de T_a en cada una de estas, demostrando que la tendencia (lineal) es al aumento, tal como se muestra en la Figura 6.11.

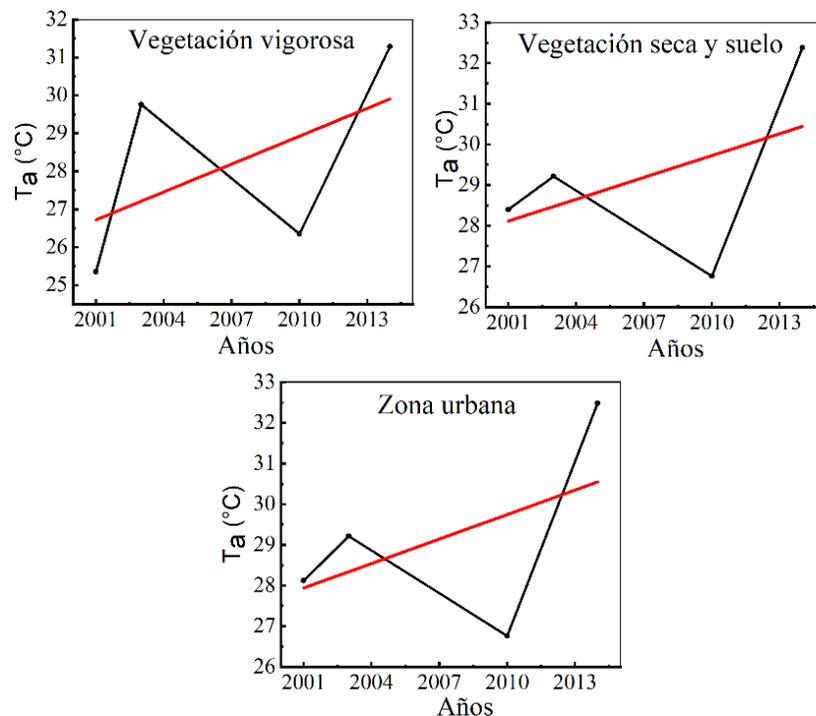


Figura 6.11: Variación de T_a entre 2001 y 2014, para el píxel representativo de las superficies seleccionadas.

De acuerdo con la sección 6.4, el incremento de la temperatura (Figura 6.11) también afecta el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$, lo cual se analizará por medio de bandas espectrales específicas en las cuales se identifica claramente este fenómeno.

Por ejemplo, para la vegetación vigorosa se seleccionaron las bandas espectrales 3 y 4 ($K_{\Delta\lambda_3}^*$ y $K_{\Delta\lambda_4}^*$) que muestran teóricamente (Figura 6.2) la mínima y máxima reflexión (máxima y

mínima absorción de radiación solar), respectivamente. Cuando la temperatura aumenta excediendo el límite de tolerancia en la vegetación causa daños paulatinamente en la estructura interna de esta, lo cual se manifiesta en una tendencia a la disminución de $K_{\Delta\lambda_3}^*$ (Figura 6.12(a)), debido a que el deterioro a través de los años de la vegetación vigorosa, como consecuencia del calentamiento global, hace que esta refleje cada vez mayor cantidad de radiación solar (calentándose la atmósfera) disminuyendo $K_{\Delta\lambda_3}^*$ a través de los años. Por otra parte, $K_{\Delta\lambda_4}^*$ muestra una tendencia al aumento entre 2001 y 2014 (Figura 6.12(b)), la cual es consecuencia de que el deterioro de la vegetación (calentamiento global) en esta banda espectral se manifiesta en una disminución de la reflexión, comportándose como vegetación seca (Figura 6.2), lo que genera un aumento paulatino de $K_{\Delta\lambda_4}^*$.

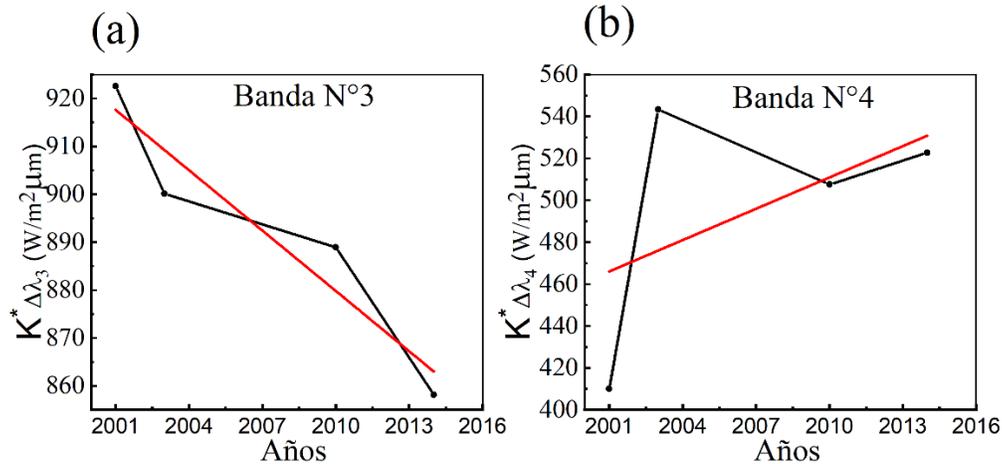


Figura 6.12: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K_{\Delta\lambda_3}^*$ (a) y $K_{\Delta\lambda_4}^*$ (b).

Así mismo, el incremento de T_a influye en la degradación de la vegetación seca y suelo, la cual se manifiesta en una tendencia al aumento de $K_{\Delta\lambda_4}^*$ (banda N°4) (Figura 6.13(a)). Este comportamiento está directamente relacionado con que esta clase de superficie refleja cada vez menos radiación solar, incrementando $K_{\Delta\lambda_4}^*$ y pareciendo cada vez más a suelo expuesto (Figura 6.2). La tendencia a la disminución de $K_{\Delta\lambda_7}^*$ (Figura 6.13(b)), se explica con una mayor reflexión de la radiación solar en dicha banda espectral, como consecuencia de que el aumento de la temperatura, a través de los años, incrementa la evapotranspiración del suelo y la vegetación seca, secándose ambas superficies y por lo tanto disminuyendo $K_{\Delta\lambda_7}^*$.

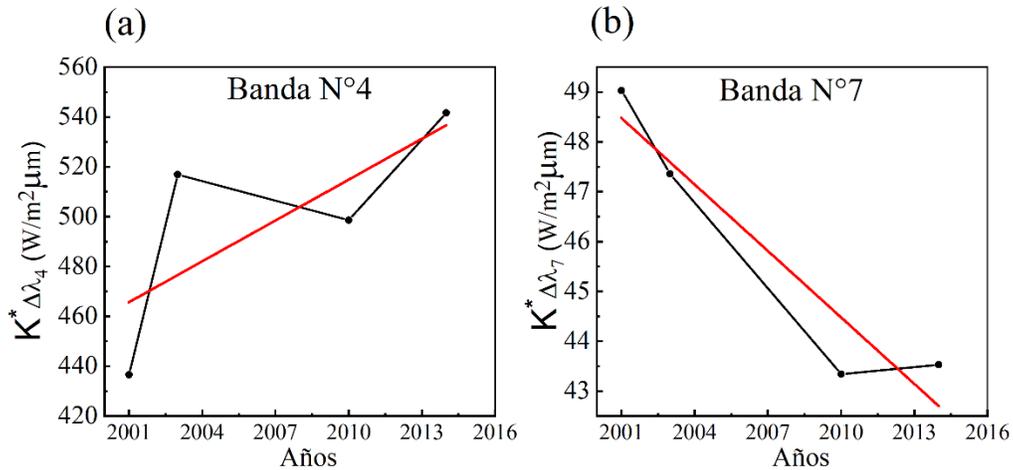


Figura 6.13: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K^*_{\Delta\lambda_4}$ (a) y $K^*_{\Delta\lambda_7}$ (b).

Para la zona urbana, el comportamiento de esta clase de superficie (construcciones y vegetación) es el mismo que el de la vegetación seca y suelo, en las bandas espectrales 4 y 7, como se observa en la Figura 6.14.

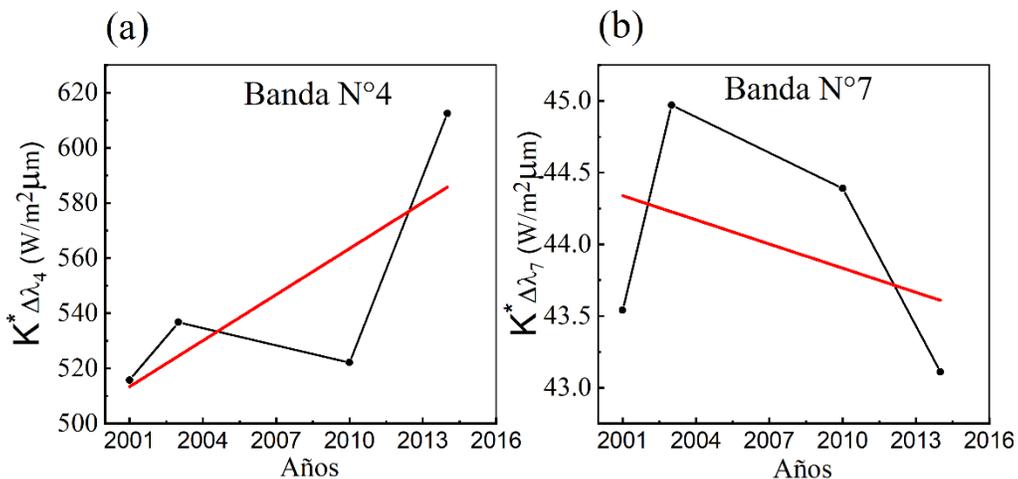


Figura 6.14: Comportamiento temporal entre el 2001 y 2014 de $K^*_{\Delta\lambda_4}$ (a) y $K^*_{\Delta\lambda_7}$ (b).

Respecto a la superficie de agua (rio Sinú y ciénagas), no se identifica efecto del calentamiento global sobre $K^*_{\Delta\lambda}$, ya que este está estrechamente relacionado con una mayor evaporación del agua y no con una variación de la reflexión de la radiación solar incidente.

7 Conclusiones

El análisis cualitativo de T_a permitió identificar que cada superficie seleccionada se encuentra bajo la influencia del calentamiento global. Este fenómeno de calentar paulatinamente la atmósfera entre 2001 y 2014, influye en la modificación (degradación) de las superficies seleccionadas generando efectos sobre $K_{\Delta\lambda}^*$, como lo es la disminución y el aumento de $K_{\Delta\lambda_3}^*$ y $K_{\Delta\lambda_4}^*$, respectivamente en la vegetación vigorosa. Para la vegetación seca y suelo, y zona urbana se presenta un aumento de $K_{\Delta\lambda_4}^*$ y una disminución de $K_{\Delta\lambda_7}^*$. Estos resultados confirman que cada vez se está reflejando e irradiando una mayor cantidad de radiación solar y térmica, respectivamente hacia la atmósfera, lo que favorece aún más al efecto invernadero.

Otro aspecto importante en el análisis es el contenido físico que interviene en la descripción de $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , en la cual se presentan las causas que producen el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ y simultáneamente determinan la cantidad de calor emitido por el sistema superficie terrestre–atmósfera de acuerdo con la superficie seleccionada. Los resultados obtenidos demuestran que la superficie de agua y la vegetación vigorosa reflejan una pequeña proporción de la radiación solar global hacia la atmósfera, absorbiendo gran parte de esta. Parte de la radiación solar absorbida calienta estas superficies emitiendo una pequeña cantidad de radiación térmica hacia la atmósfera, por lo tanto, la pequeña proporción de radiación reflejada y emitida hacia la atmósfera produce que T_a sea mínima. Mientras que, para la vegetación seca y suelo, y zona urbana la tendencia de reflexión y emisión es positiva (aumento), lo cual calienta aún más la columna atmosférica sobre estas, es decir, T_a incrementa.

En relación con el análisis estadístico, los resultados obtenidos muestran una estrecha relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , ya que todos los coeficientes de correlación r están muy por encima del coeficiente de correlación crítico $r_c < 0.06$. De acuerdo con las regresiones empíricas se requiere medidas de T_a para estimar los valores de $K_{\Delta\lambda}^*$, en función a estos definir el tipo de superficie. Pero, este resultado cobra importancia en la agricultura, ya que me permite evaluar las características físicas de la superficie y con base a estas ofrecer recomendaciones apuntando a reducir los costos de producción e incrementar la producción de un cultivo. Cabe resaltar que la relación es netamente empírica, por lo tanto, es válida solo para la zona de estudio. Debido a que cada región del mundo

tiene características particulares de la superficie, condiciones meteorológicas y radiativas diferentes, que influyen en dicha relación.

Por otra parte, los cálculos realizados de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para cada superficie seleccionada muestra que efectivamente concuerda con las curvas espectrales existentes en la literatura especializada y la distribución espectral de la radiación solar, respectivamente. Asimismo, estos resultados muestran que $\rho_{\Delta\lambda}$ tiene una fuerte influencia sobre el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en comparación con $K_{\Delta\lambda} \downarrow$. Por lo tanto, las características de la superficie determinan la disponibilidad de energía para que ocurra los procesos biofísicos.

Por último, cabe destacar que el nuevo modelo desarrollado para el cálculo de $\rho_{\Delta\lambda}$, es posible utilizarlo en cualquier región del mundo que se encuentre con una atmósfera despejada ya que está estructurado teóricamente, siempre que se disponga de las mediciones de las variables meteorológicas y radiativas.

8 Referencias

- Babaeian, E. y Tuller, M. (2023). Proximal sensing of land surface temperature. *Encyclopedia of soils in the Environment*, 4, 600-609. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2129/10.1016/B978-0-12-822974-3.00129-4>
- Barbosa, B., Gico, S., Rodríguez, V., Ribeiro, H., Domiciano, J. y Maciel, L. (2015). Determination of instantaneous and daily net radiation from TM – Landsat 5 data in a subtropical watershed. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 135, 42-49. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2054/science/article/pii/S1364682615300614>
- Buelvas, E. (2019). Determinación de la temperatura aparente del sistema superficie terrestre - atmósfera por medio de imágenes satelitales (atmósfera despejada) y su representación espacial y temporal (Tesis de pregrado). Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Electrónica. Montería, Colombia.
- Carmona, F., Rivas, R. y Caselles, V. (2015). Development of a general model to estimate the instantaneous, daily, and daytime net radiation with satellite data on clear-sky days. *Remote Sensing of Environment*, 171, 1-13. <https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2054/science/article/pii/S0034425715301541>
- Chander, G., Markham, B. y Helder, D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors.

Remote Sensing of Environment, 113, 893-903.
<https://ezproxyucor.unicordoba.edu.co:2129/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Corporación autónoma regional de los valles del Sinú y del san Jorge (CVS). Cobertura Geográfica. <http://cvs.gov.co/cobertura-geografica/#1618430401496-be8715c0-308b>

Fröhlich, C. y London, J. (1986). Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. Ginebra, Suiza: WCRP Publications

García, R., Santillan, N., Haro, Z., Borjoquez, G., Quitero, M. y Ojeda, S. (2014). El balance de radiación y modelos de radiación neta para diferentes superficies de suelo: estudio experimental en Mexicali, México. *Archivo Climatológico y Meteorológico Institucional*, Serie A, 9, 535-544.
<https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/8210>

Gónima, L. (1993). Simple algorithm for the atmospheric correction of reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*. 14, 1179-1187.
<https://doi.org/10.1080/01431169308904403>

Gónima, L. y Alados, L. (2003). Cálculo de la reflectancia a partir de datos de satélite, Versión alternativa. Proceedings III Asamblea-Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Tomo III. Ed. UPV, Valencia (España).

Gónima, L. (2021). Notas de clase del curso de Teledetección. Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Física y Electrónica. Montería, Colombia.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). *Características de la radiación solar*. [CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR - IDEAM](#)

Kang, K. K., Duguay, C. R., Lemmetyinen, J. y Gel, Y. (2014). Estimation of ice thickness on large northern lakes from AMSR-E brightness temperature measurements. *Remote Sensing of Environment*, 150, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.016>

Keck, T., Preusker, R. y Fischer, J. (2017). Retrieving snow and ice characteristics by remotely sensed emissivity using the multi-view brightness temperature within 8 μm to 14 μm , *Remote Sensing of Environment*, 201, 181-195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.09.006>

Kim, H. y Liang, S. (2010). Development of a hybrid method for estimating land surface shortwave net radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2393-2402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.012>

McClatchey, R. A. (1972). Optical Properties of the Atmosphere (No. 411). *Air Force Cambridge Research Laboratories*, Oficina de Investigación Aeroespacial, Fuerza Aérea de los Estados Unidos. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=78WiRW_mEAEC&oi=fnd&pg=PA2&dq=Optical+properties+of+the+atmosphere&ots=jFX9eE7piR&sig=a16fL5q8pE1eCTy3WXDG9_oSIxo#v=onepage&q=Optical%20properties%20of%20the%20atmosphere&f=false

Moreno, A., Neto, M. y Vidal, G. (2021). Análisis de componentes biofísicos del balance de radiación neta, usando teledetección, en la cuenca hidrográfica de Sorocaba con bosque atlántico intervenido, Brasil. *Investigaciones Geográficas*, (104). <http://dx.doi.org/10.14350/rig.60235>

Ocampo, D. y Rivas, R. (2013). Estimación de la radiación neta diaria a partir de Modelos de Regresión Lineal Múltiple. *Revista Chapingo*, 19(2), 263-272. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v19n2/v19n2a8.pdf>

Pérez, M. y Gónima, L. (2014). Atmospheric water vapor content as indicator of global warming in a Caribbean zone of Colombia. *Cuadernos de investigación geográfica*, 40 (2), 477-496. <https://doi.org/10.18172/cig.2517>

Sandoval, J. (2019). Relación entre la radiación global espectral y el contenido de vapor de agua para una atmósfera tropical despejada, utilizando imágenes de satélite (1996-2017) (tesis de pregrado). Universidad de Córdoba, Facultad de Ciencias Básica, Departamento de Física y Electronica. Montería, Colombia.

Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). *EarthExplorer*: [EarthExplorer \(usgs.gov\)](https://earthexplorer.usgs.gov)

Tang, B., Li, Z. y Zhang, R. (2006). A direct method for estimating net surface shortwave radiation from MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103(1), 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.04.008>

9 Anexos

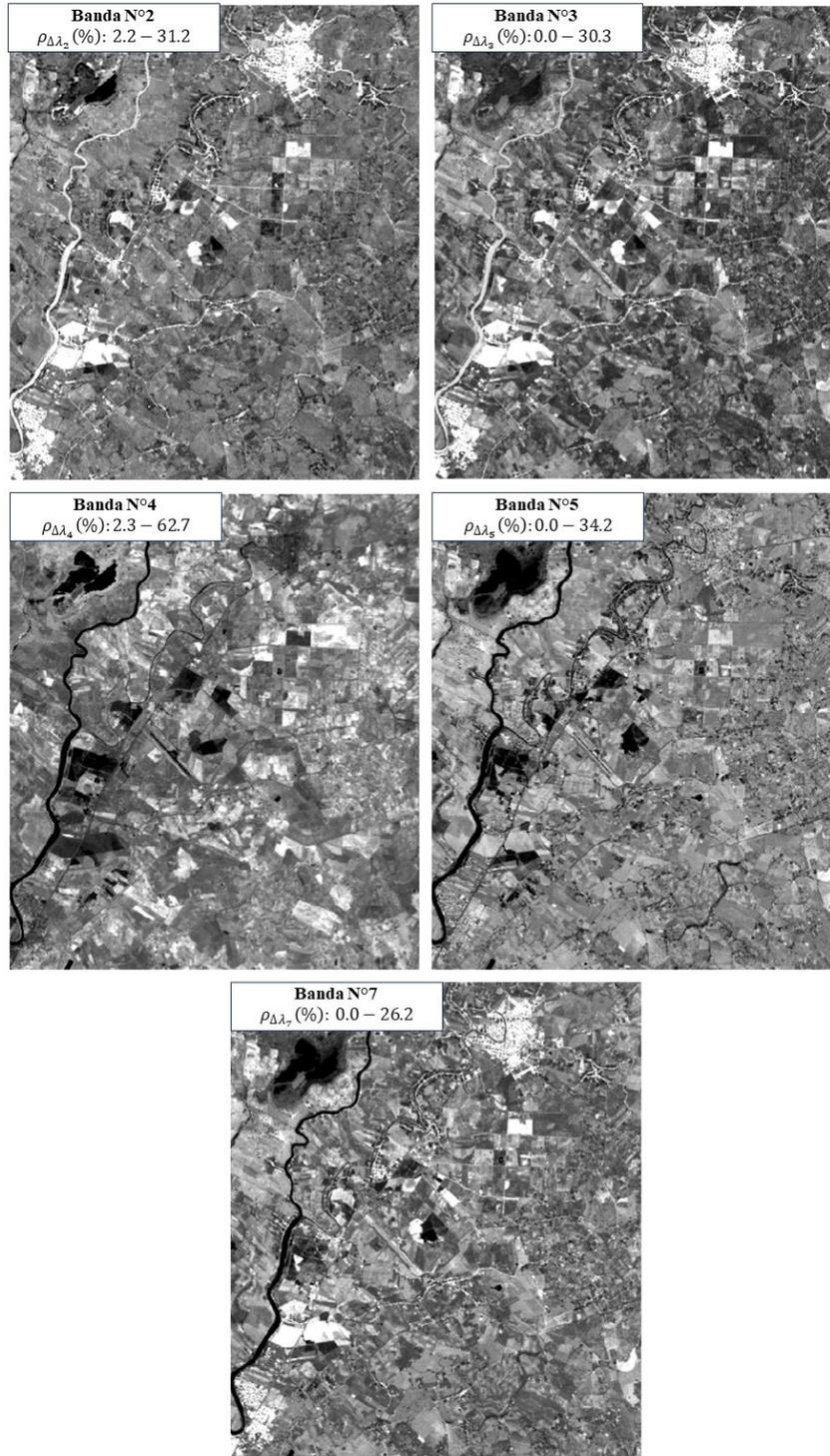
9.1 Anexo 1: Modelo para calcular la reflectancia espectral $\rho_{\Delta\lambda}$

$$\rho_{\Delta\lambda} = \frac{2(L_{\Delta\lambda} \uparrow - K_{\Delta\lambda}^d \uparrow)}{(K_{\Delta\lambda}^D \downarrow + K_{\Delta\lambda}^d \downarrow)t_{\Delta\lambda}^{a^*}t_{\Delta\lambda}^*} \left\{ \sqrt{(1 + (1 - t_{\Delta\lambda}^*)d'_{\Delta\lambda}t_{\Delta\lambda}^{a^*})^2 + 4(1 - t_{\Delta\lambda}^*)u'_{\Delta\lambda}t_{\Delta\lambda}^{a^*} \left(\frac{L_{\Delta\lambda} \uparrow - K_{\Delta\lambda}^d \uparrow}{K_{\Delta\lambda}^D \downarrow + K_{\Delta\lambda}^d \downarrow} \right)} + (1 + (1 - t_{\Delta\lambda}^*)d'_{\Delta\lambda}t_{\Delta\lambda}^{a^*}) \right\}$$

9.2 Anexo 2: Imágenes de $\rho_{\Delta\lambda}$

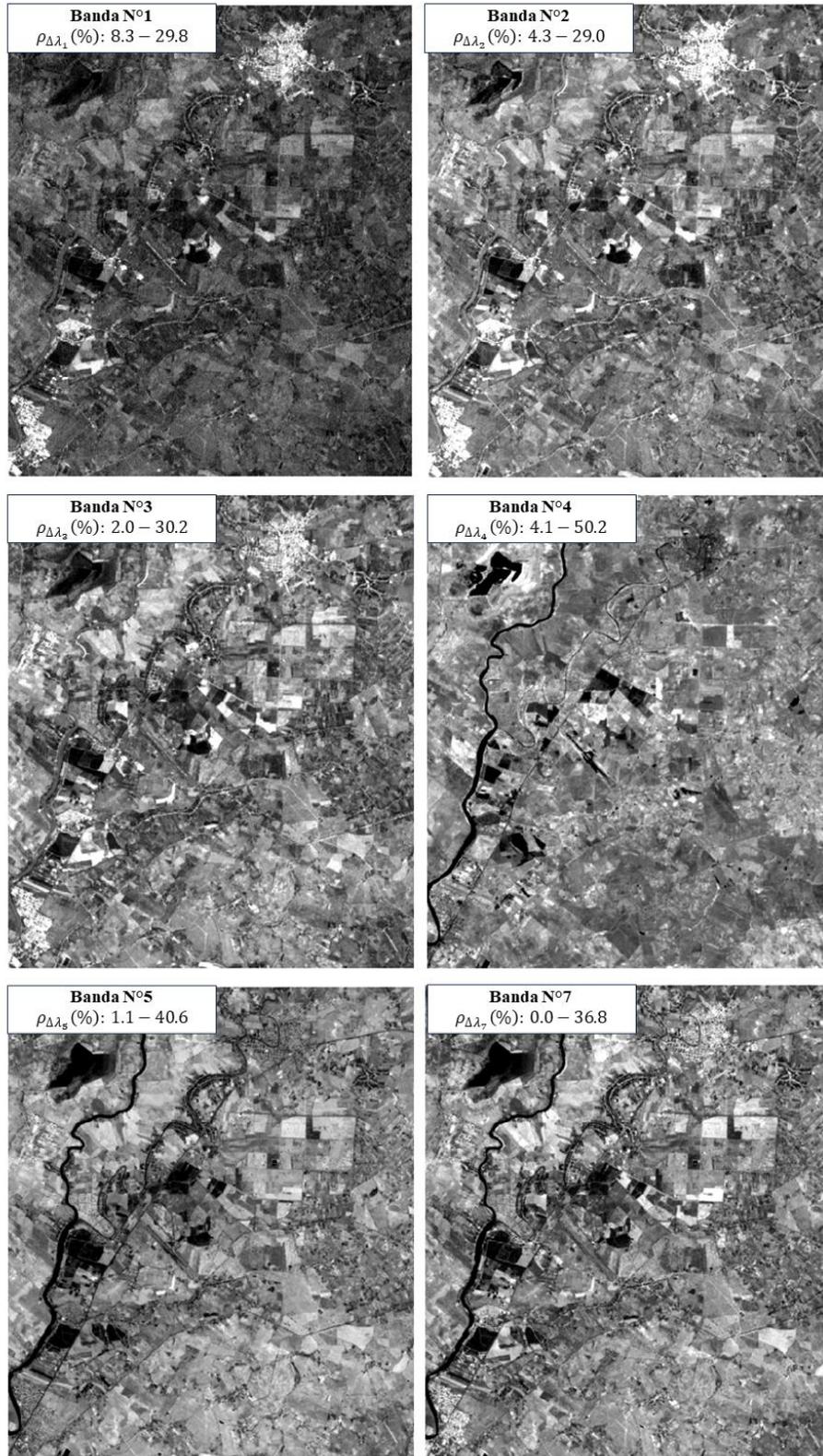
La siguiente figura muestra las imágenes espectrales de $\rho_{\Delta\lambda}$ restantes, correspondientes al 12/01/2001.

12/01/2001

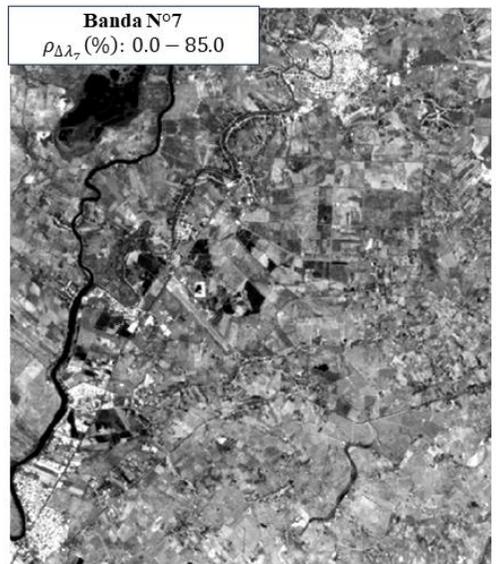
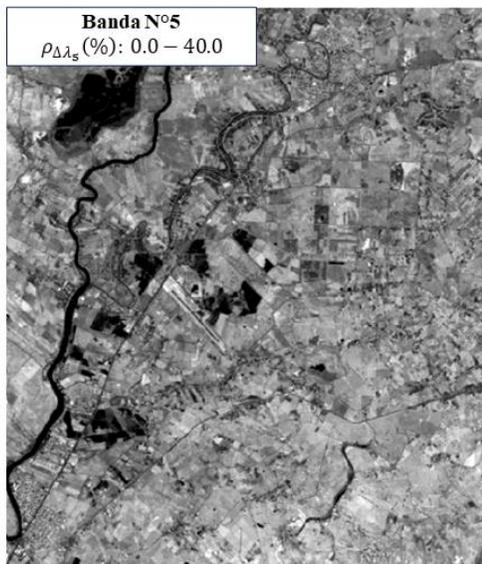
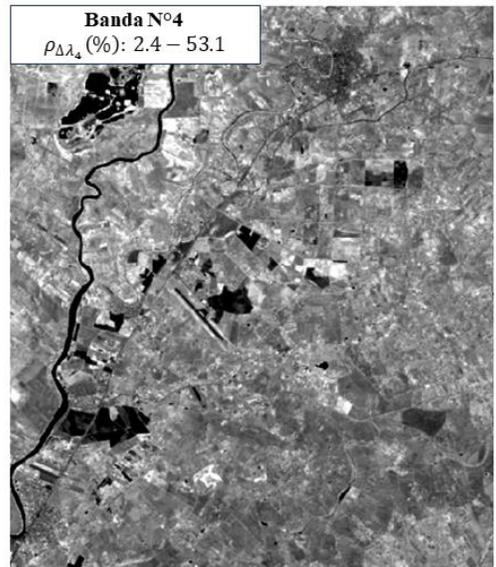
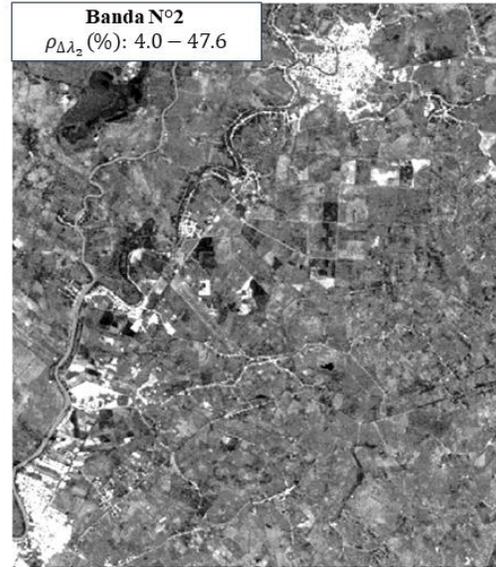
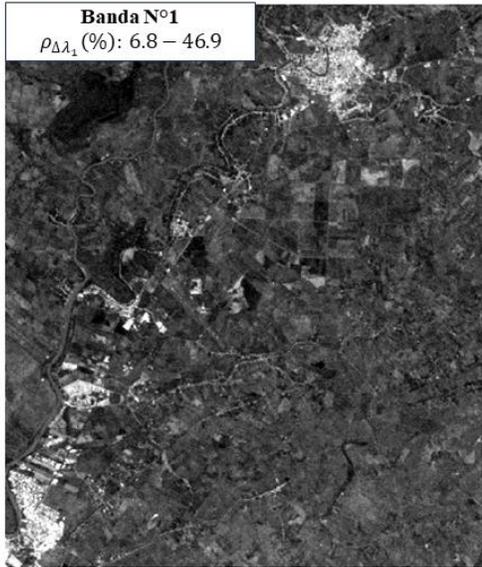


Las siguientes figuras muestran las imágenes espectrales de $\rho_{\Delta\lambda}$ para las tres fechas restantes.

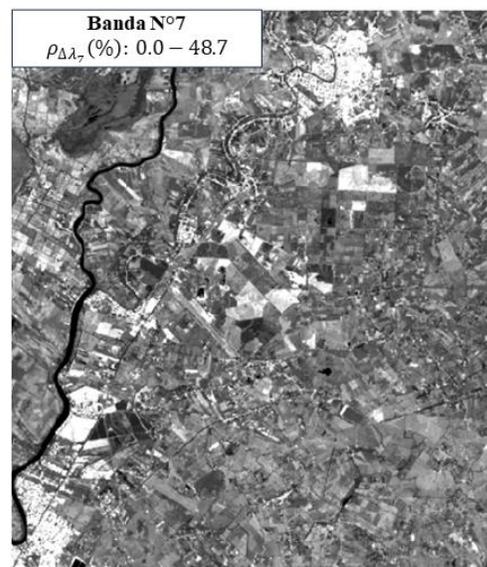
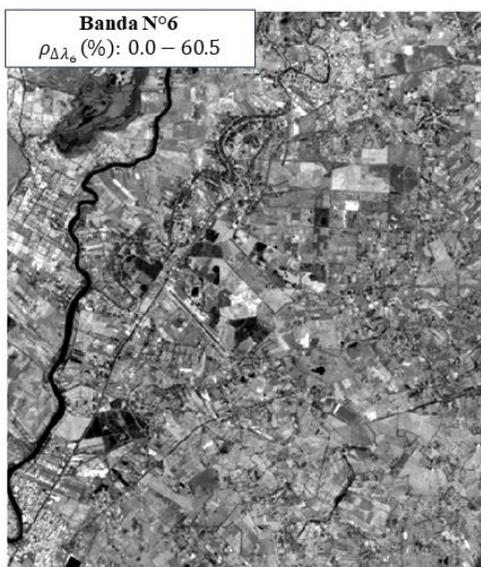
03/02/2003



29/01/2010

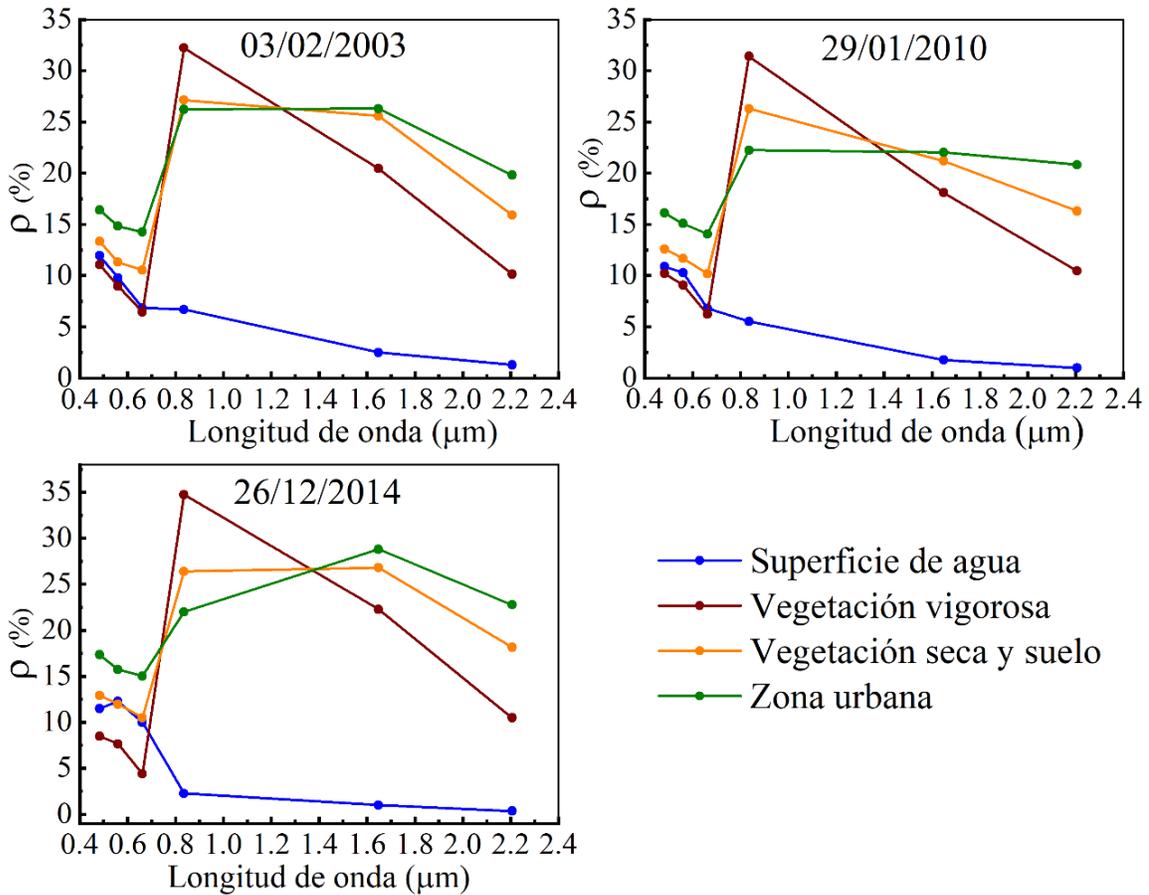


26/12/2014



9.3 Anexo 3: Curvas espectrales de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculadas

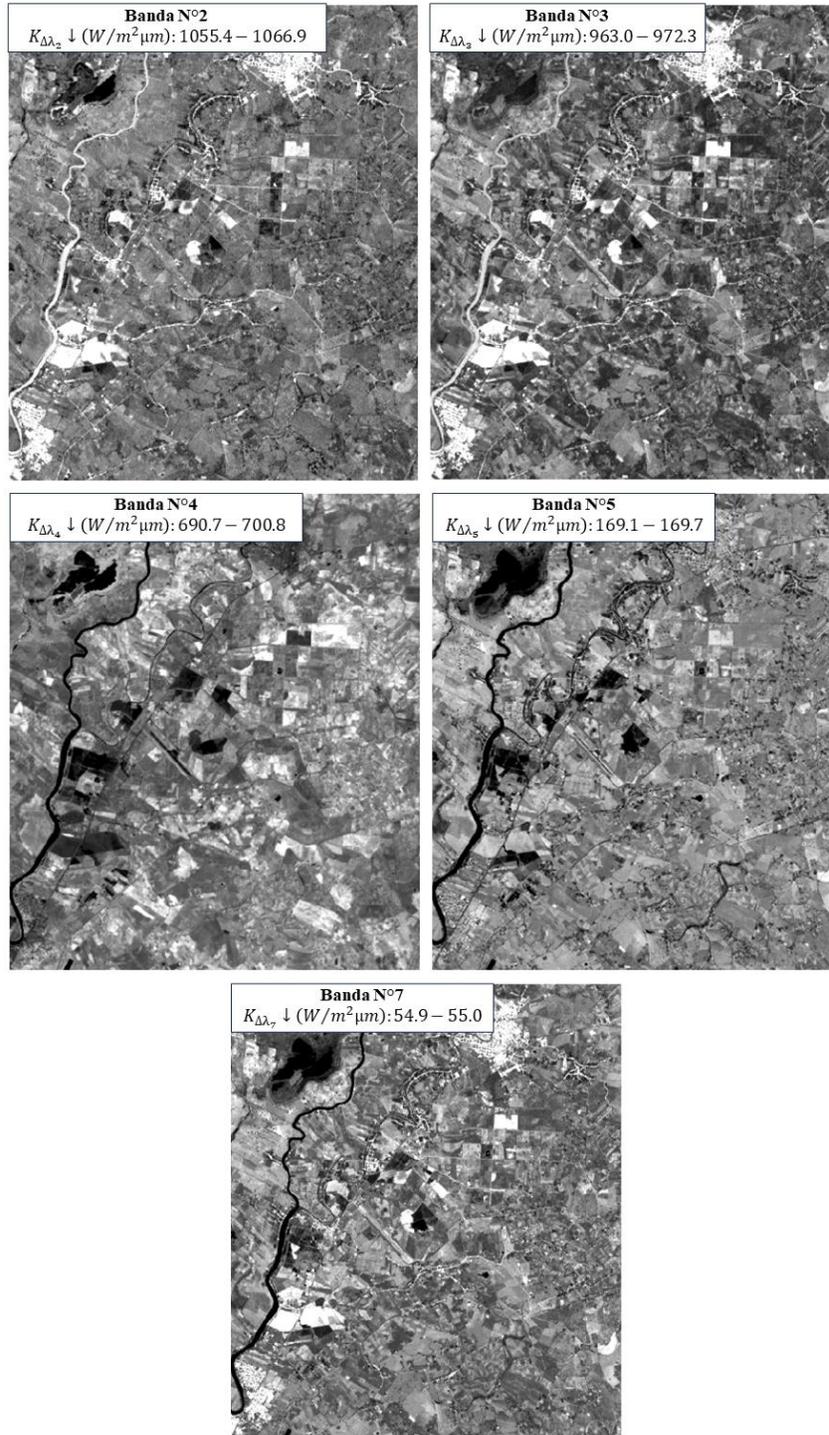
La siguiente figura muestra el comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda}$ calculada para cada muestra seleccionada, para las tres fechas restantes.



9.4 Anexo 4: Imágenes de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$

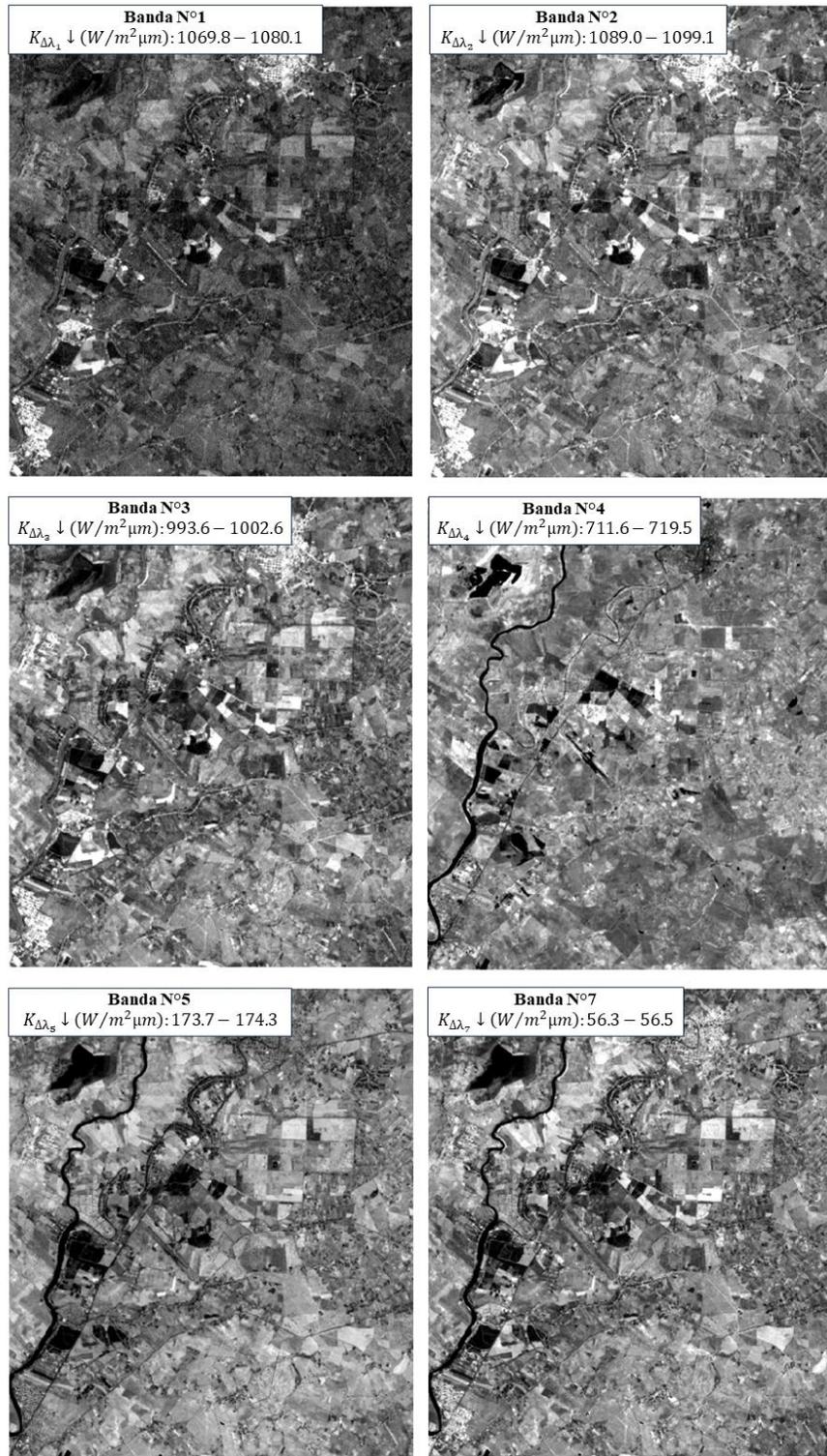
La siguiente figura muestra las imágenes espectrales de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ restantes, correspondientes al 12/01/2001.

12/01/2001

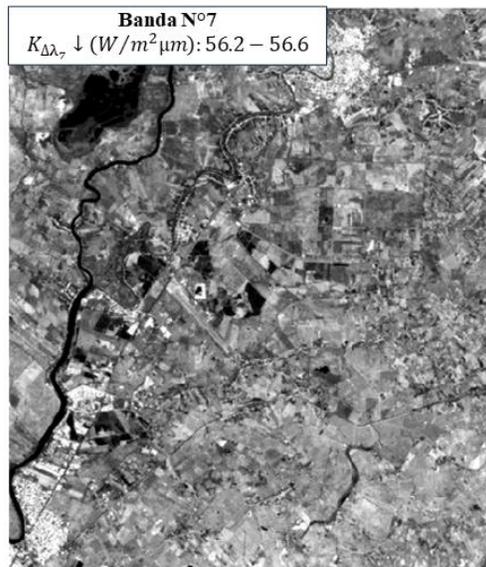
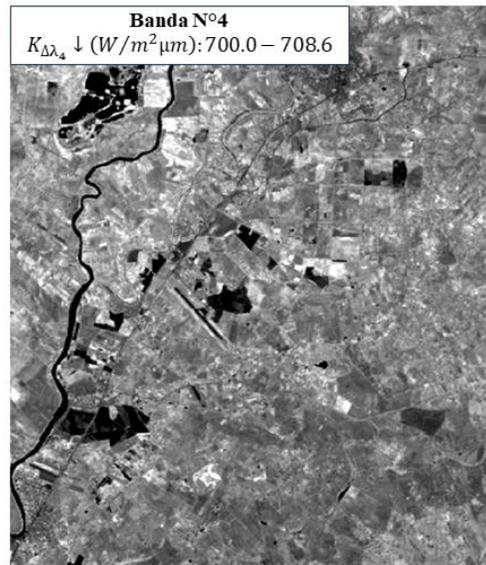
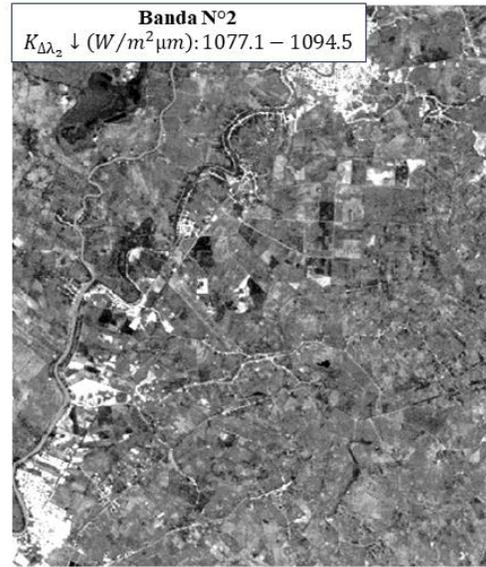
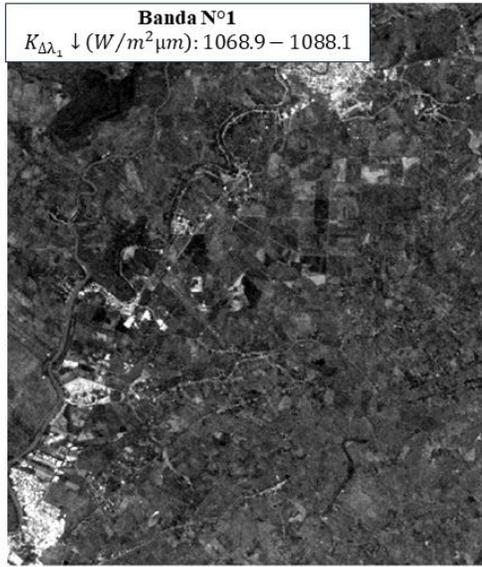


Las siguientes figuras muestran las imágenes espectrales de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para las tres fechas restantes.

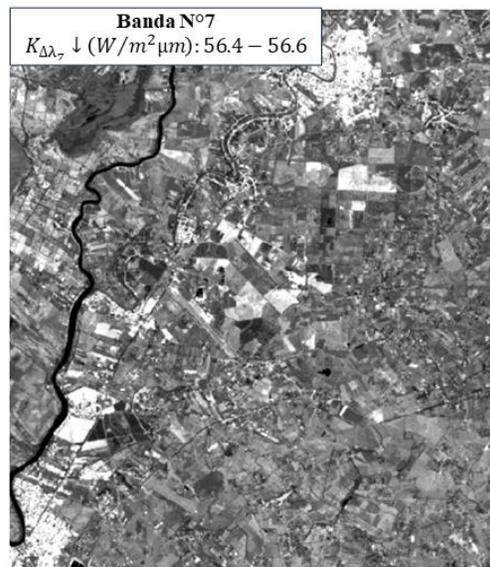
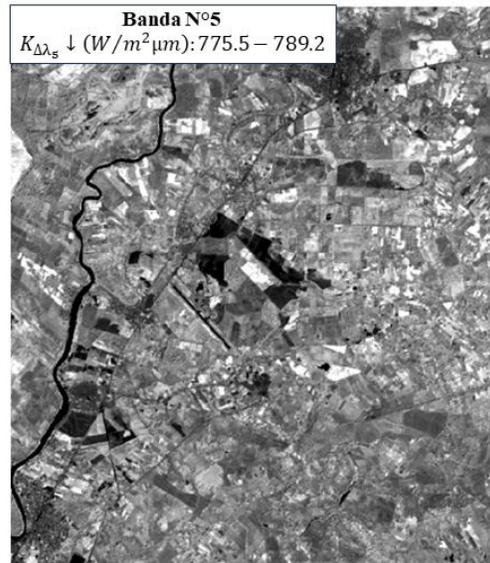
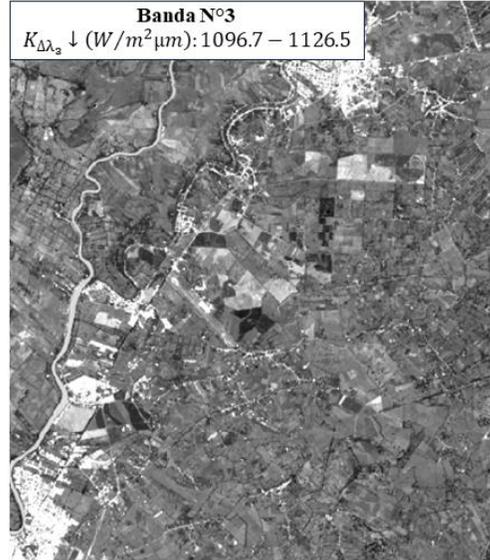
03/02/2003



29/01/2010



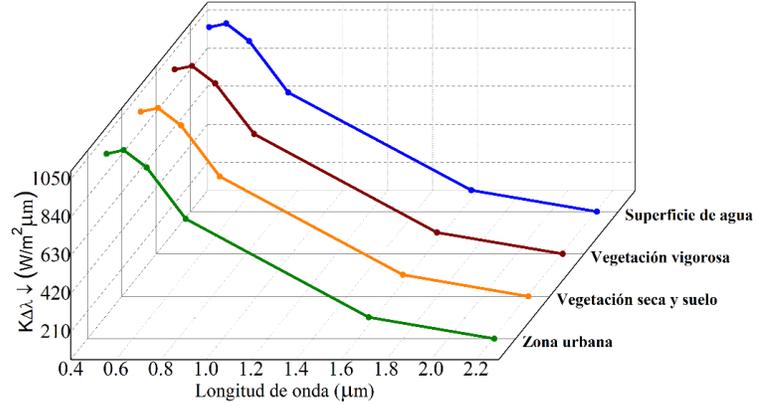
26/12/2014



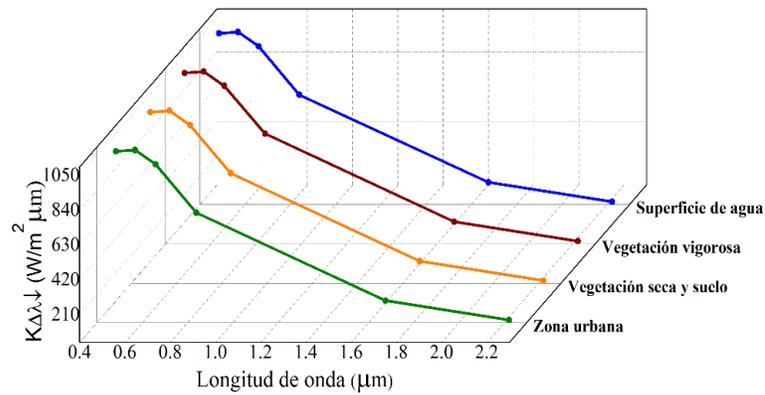
9.5 Anexo 5: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$

Las siguientes figuras muestran comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ de la superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana. Para cada una de las tres fechas restantes.

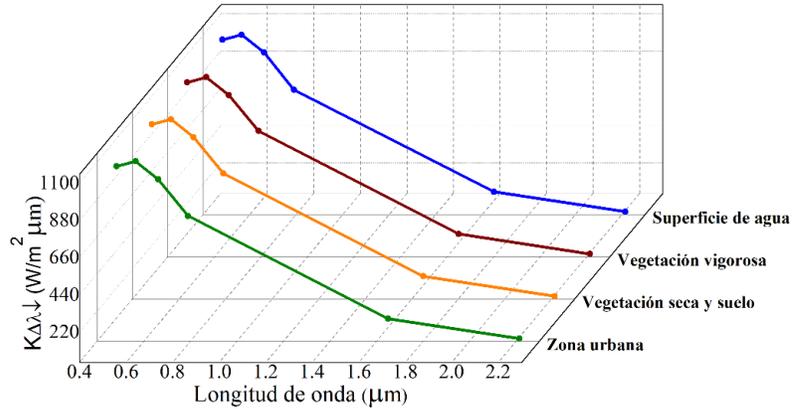
03/02/2003



29/01/2010



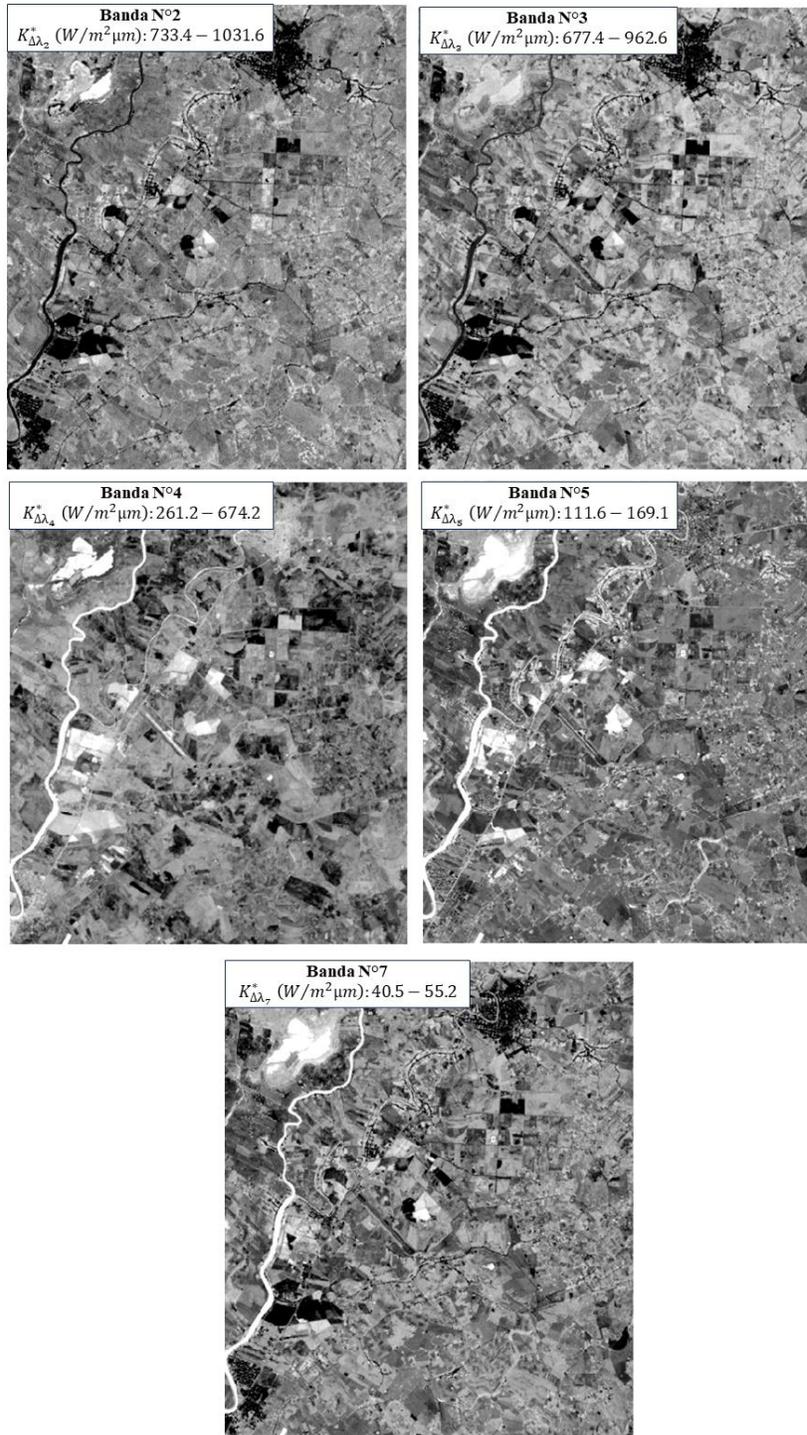
26/12/2014



9.6 Anexo 6: Imágenes de $K_{\Delta\lambda}^*$

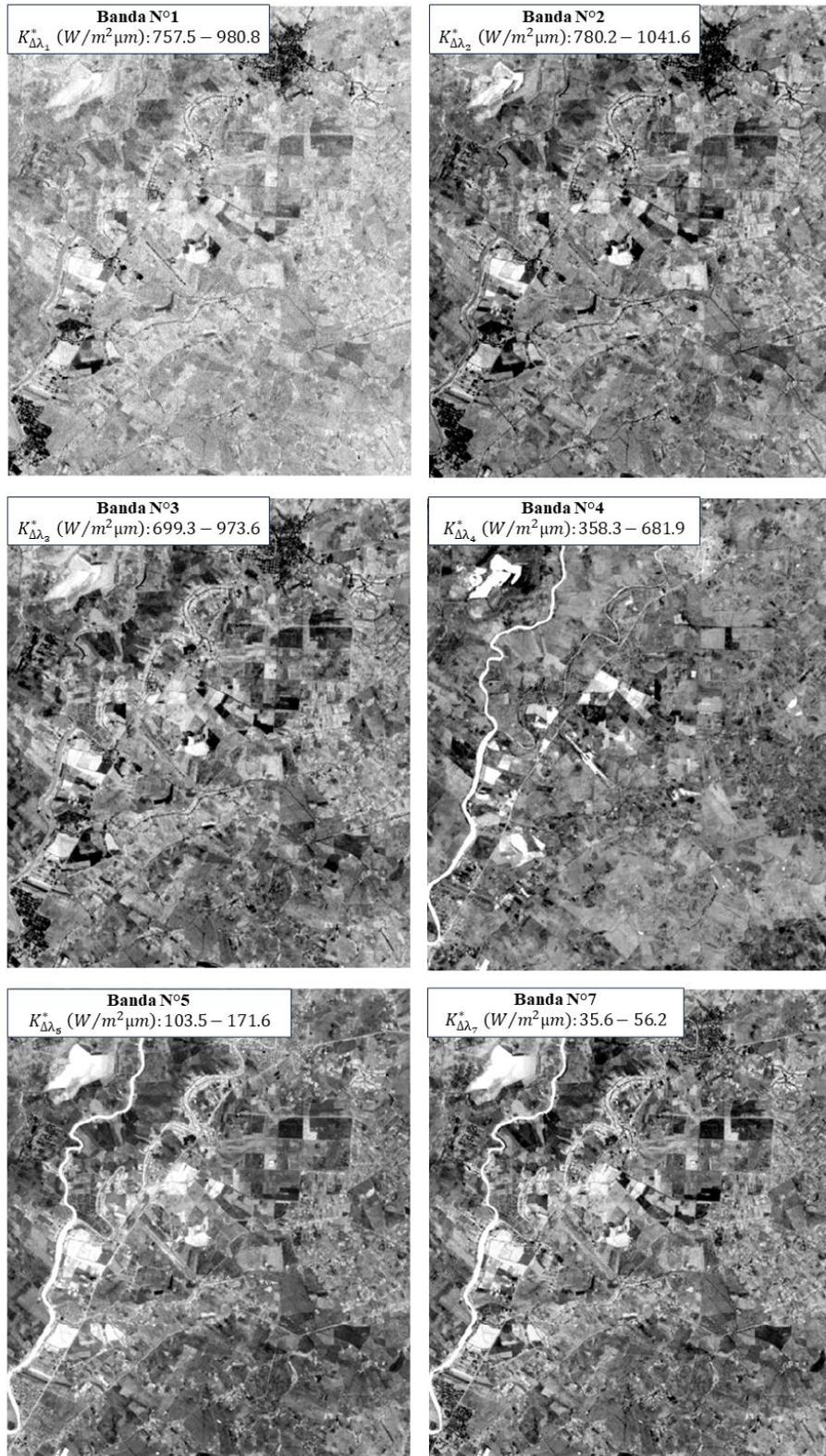
La siguiente figura muestra las imágenes espectrales de $K_{\Delta\lambda}^*$ restantes, correspondientes al 12/01/2001.

12/01/2001

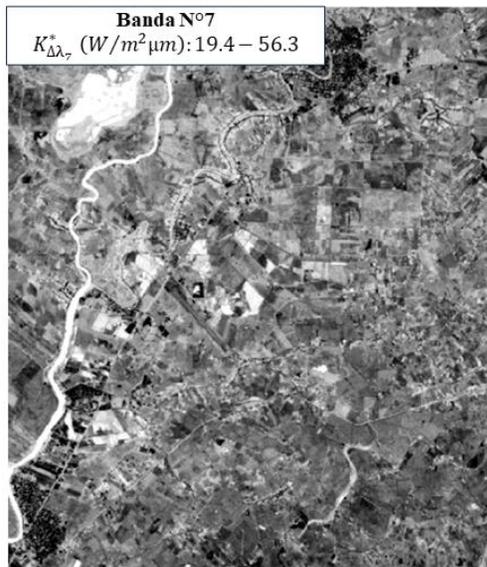
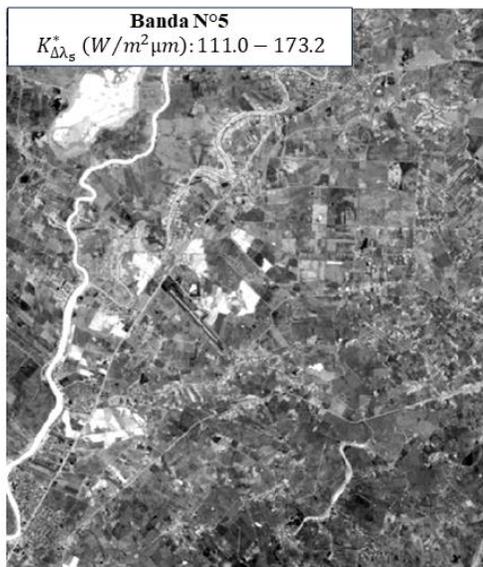
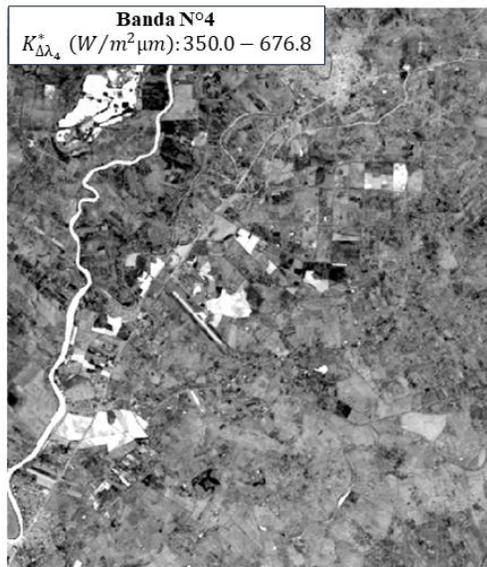
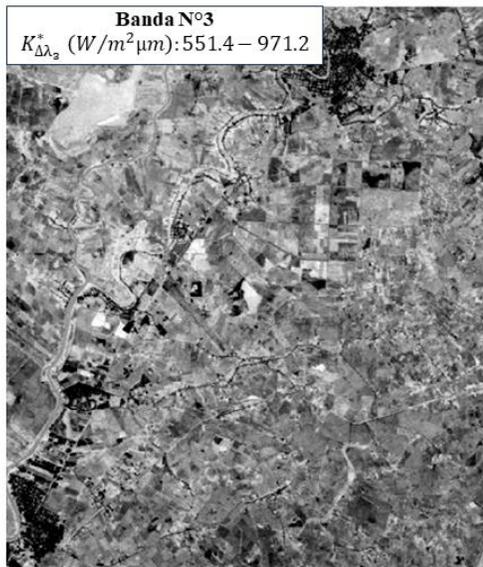
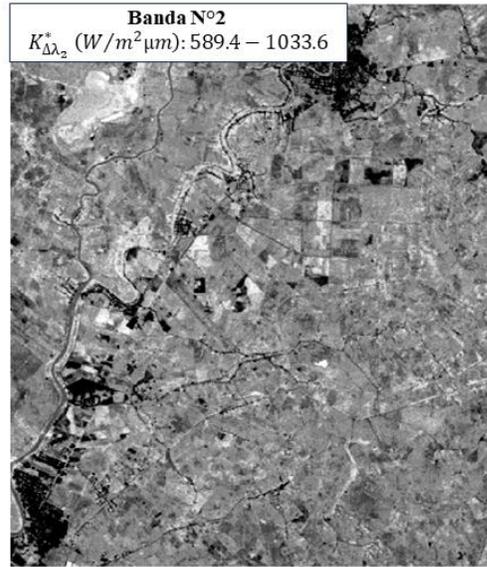
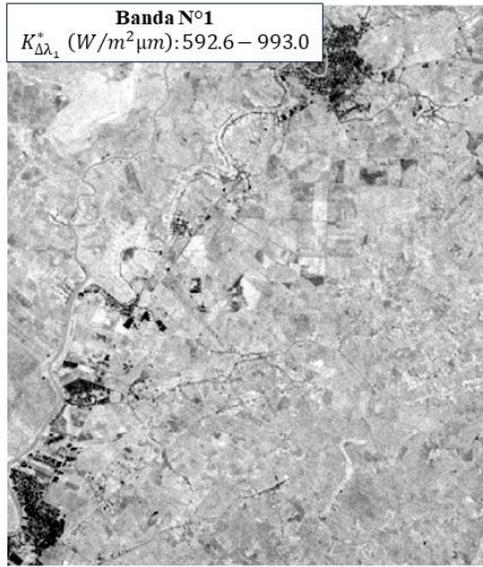


Las siguientes figuras muestran las imágenes espectrales de $K_{\Delta\lambda}^*$ para las tres fechas restantes.

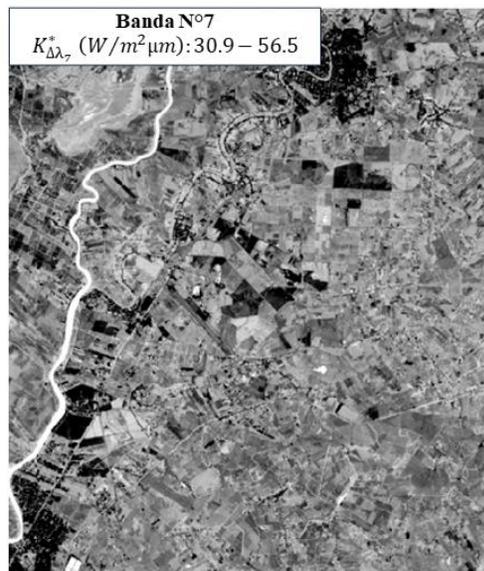
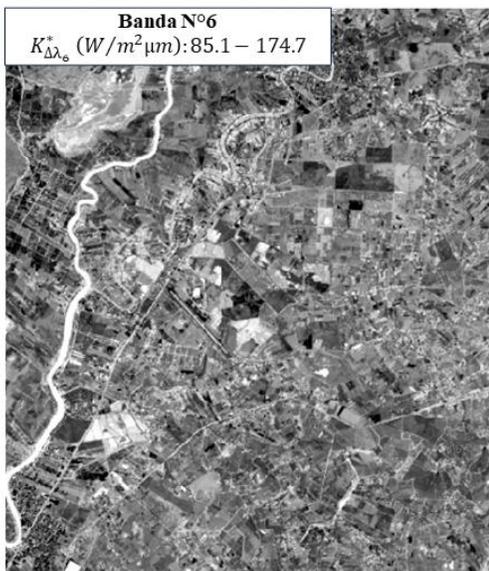
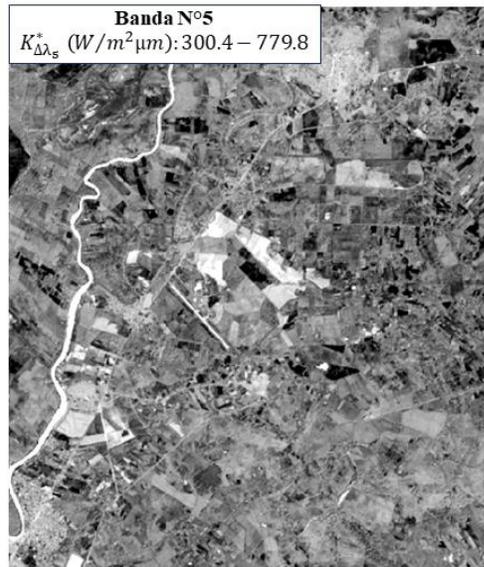
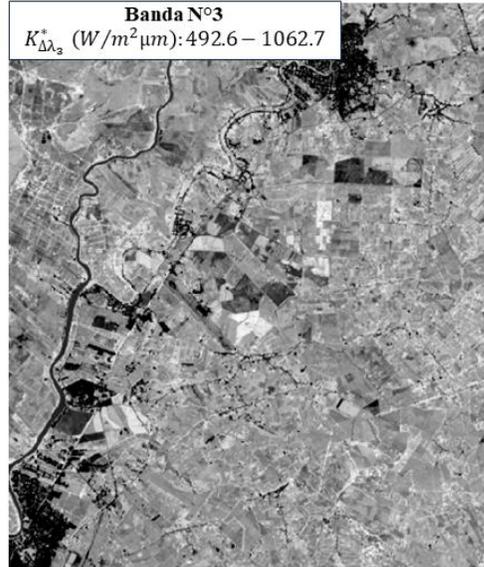
03/02/2003



29/01/2010



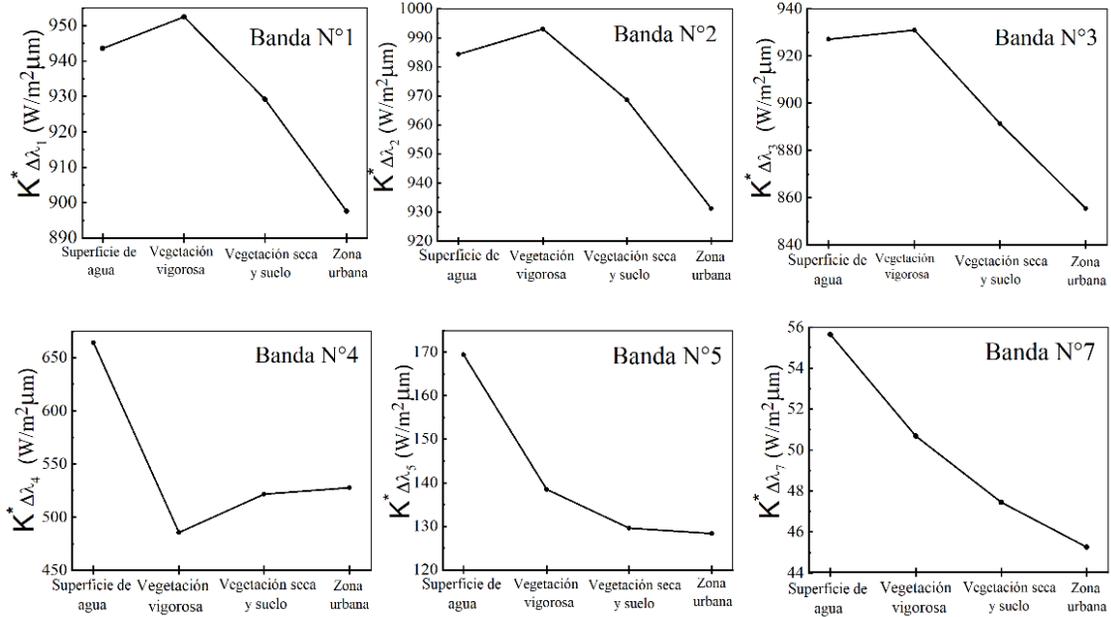
26/12/2014



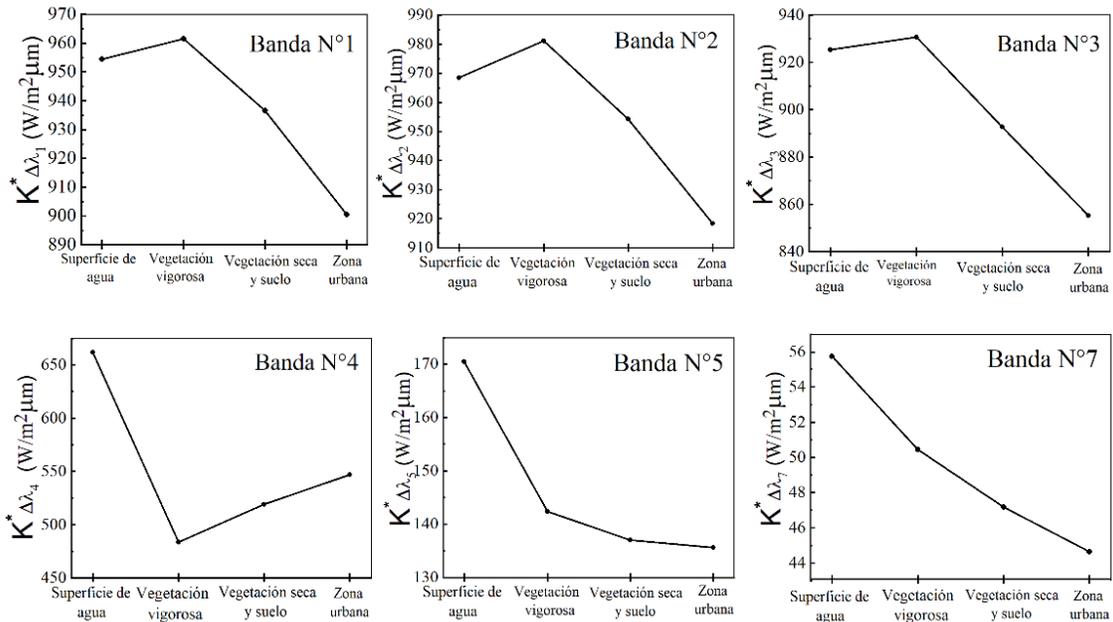
9.7 Anexo 7: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$

Las siguientes figuras muestran el comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas, para las tres fechas restantes.

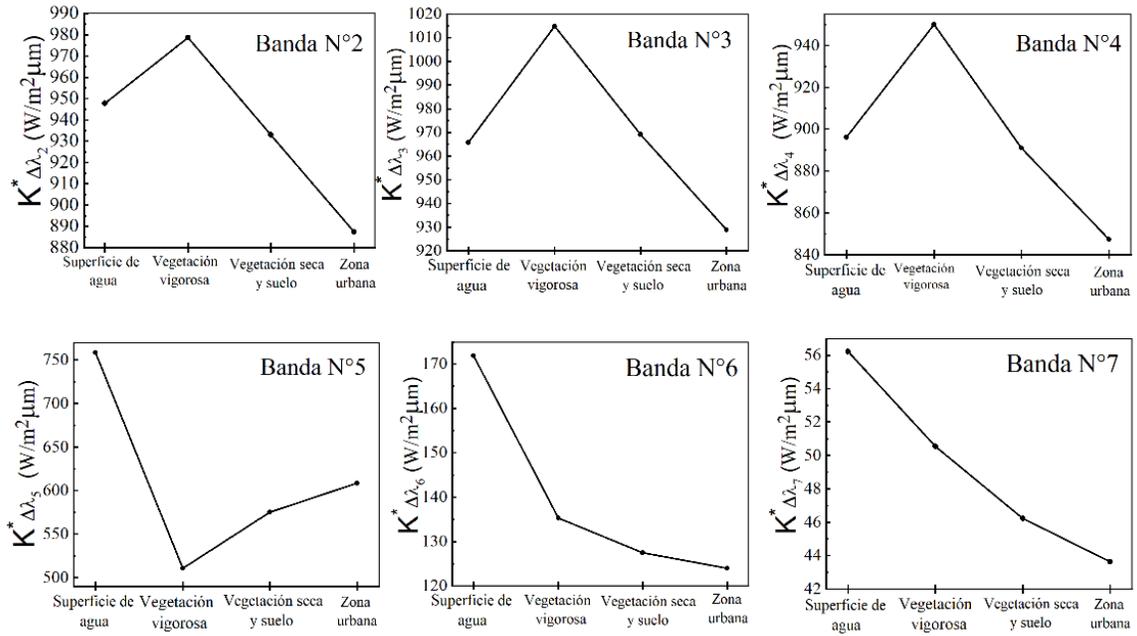
03/02/2003



29/01/2010



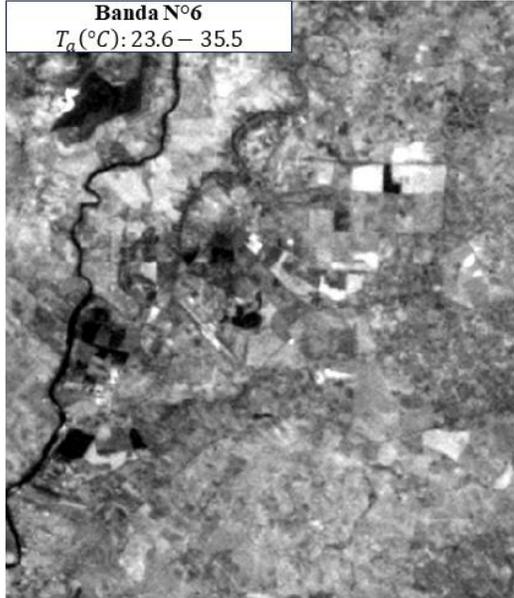
26/12/2014



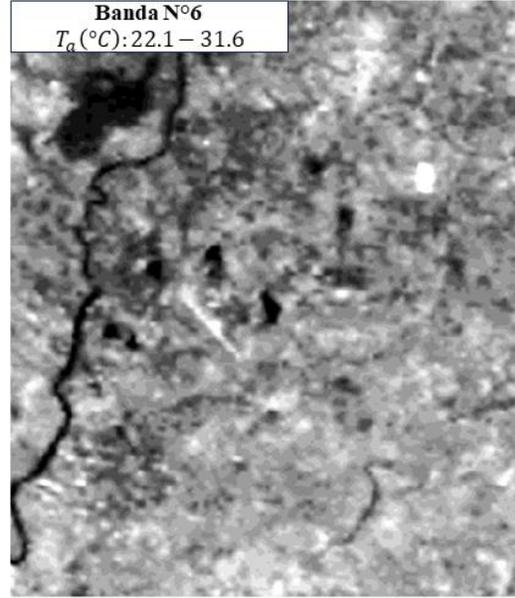
9.8 Anexo 8: Imágenes de T_a

La siguiente figura muestra las imágenes de T_a , para las tres fechas restantes.

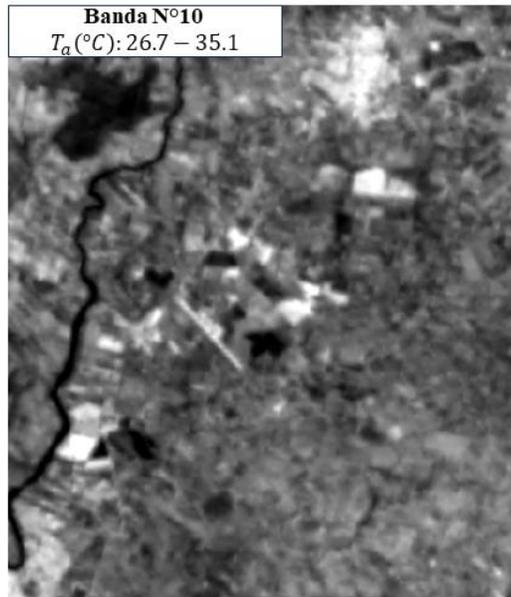
03/02/2003



29/01/2010

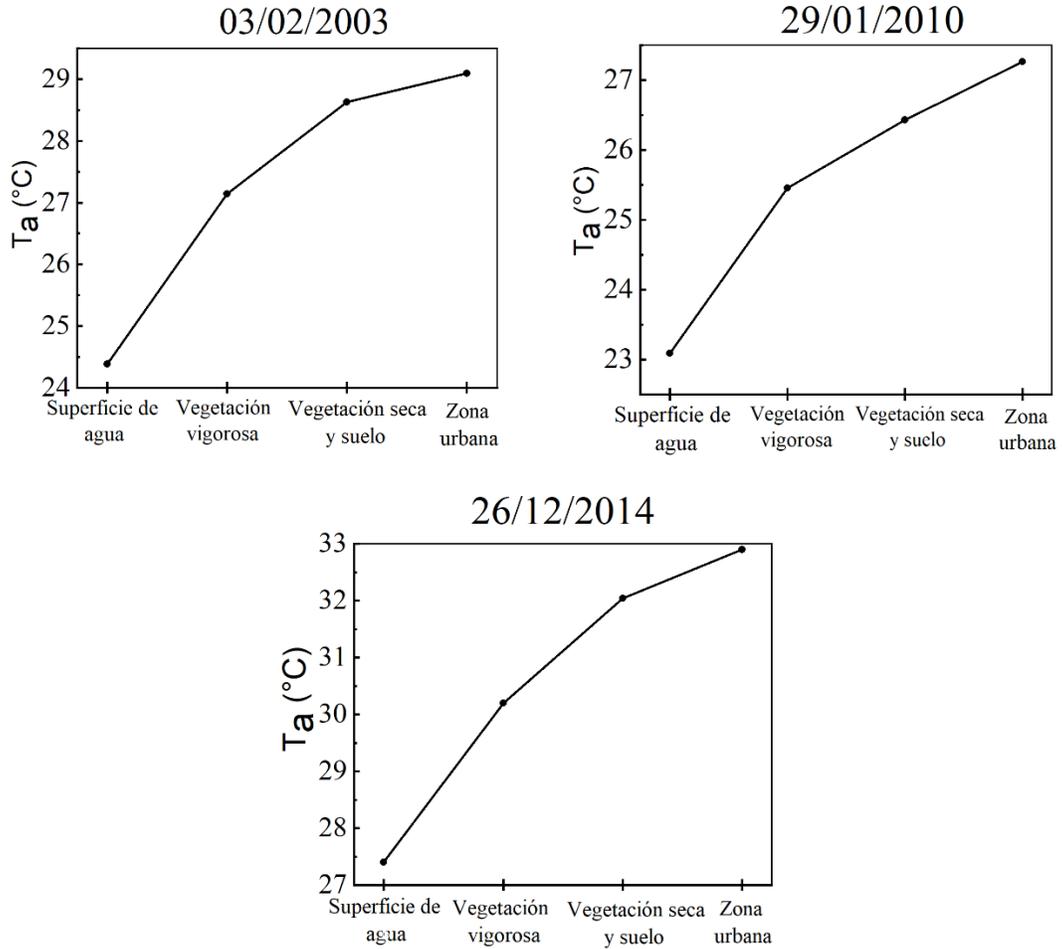


26/12/2014



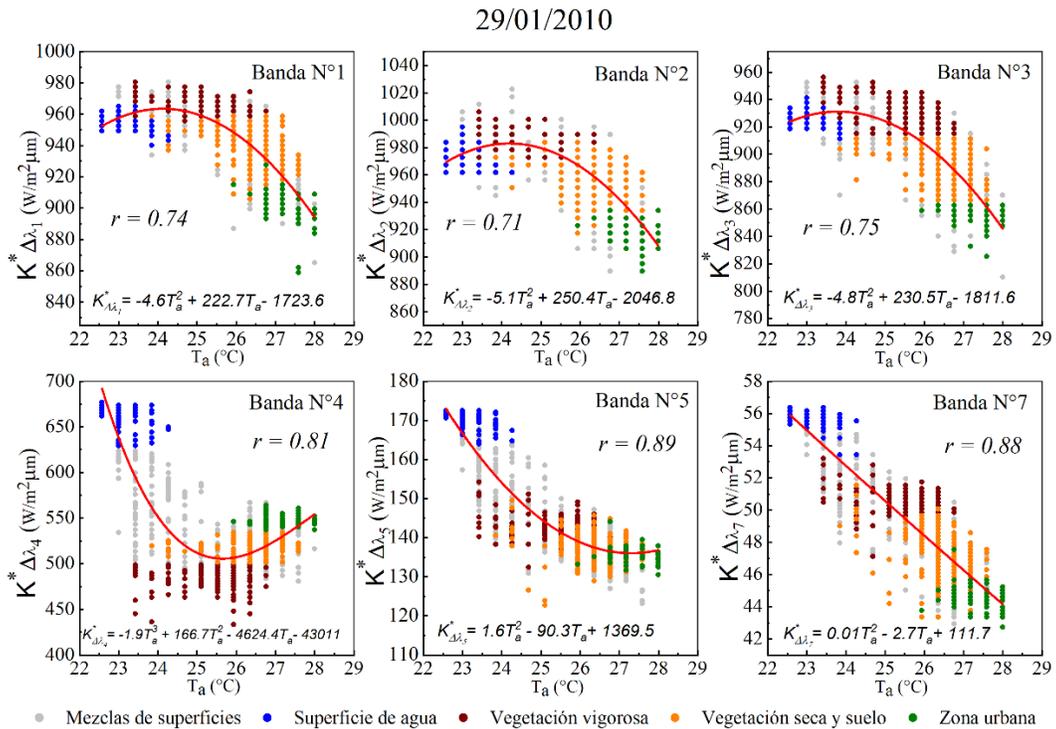
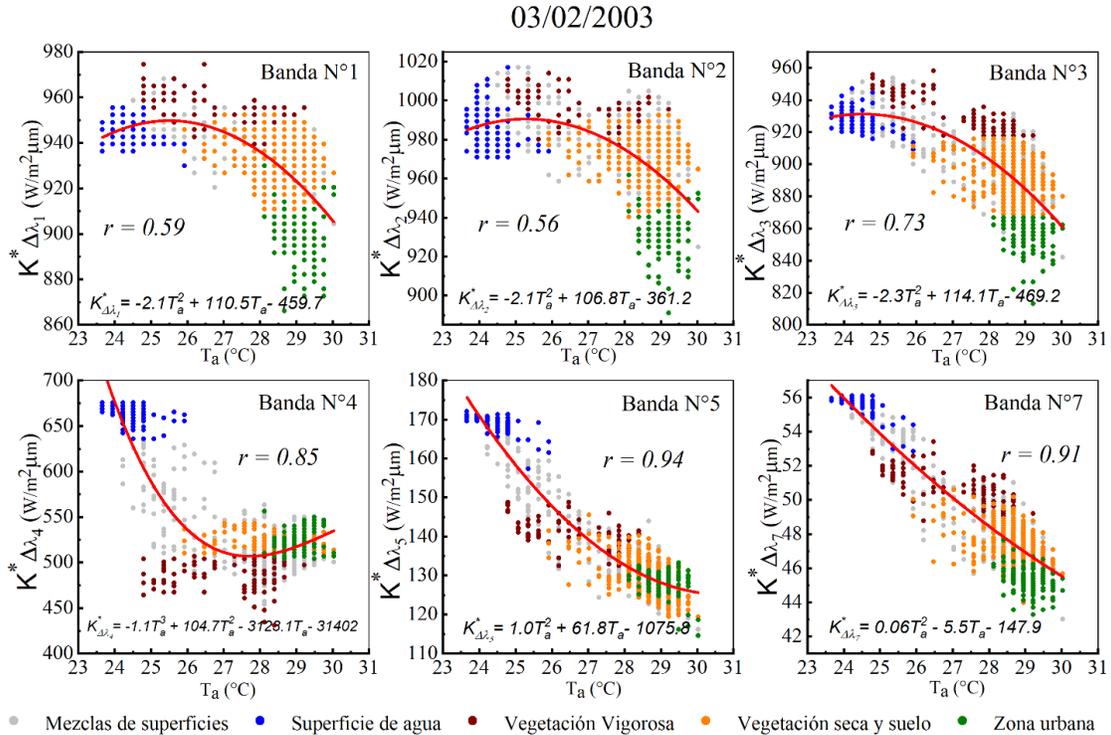
9.9 Anexo 9: Comportamiento de T_a

La siguiente figura muestra el comportamiento de T_a en función de las muestras seleccionadas, para las tres fechas restantes.



9.10 Anexo 10: Regresiones estadísticas entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a

Las siguientes figuras muestran la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a para cada banda espectral de onda corta, para las tres fechas restantes.



26/12/2014

