

CAPÍTULO 4

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)

Data de aceite: 02/05/2024

Andrés Peñate Ramírez

Grupo de Materiales y Física aplicada.
Departamento de Física y Electrónica
Universidad de Córdoba

Leonardo Gónima Gónima

Grupo de Materiales y Física aplicada.
Departamento de Física y Electrónica
Universidad de Córdoba

INTRODUCCIÓN

La radiación solar neta espectral de onda corta ($0.3\mu\text{m} - 2.5\mu\text{m}$) está relacionada con la energía disponible para generar 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 ración solar neta espectral de onda corta a partir de albedos, determinados con datos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). Posteriormente, Carmona et al. (2015) desarrollaron un modelo general para

estimar la radiación solar neta total, por medios de datos meteorológicos e imágenes de satélite. Seguidamente, 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, 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, Buelvas, E. (2019) determinó la temperatura aparente sobre la ciudad de Montería–Córdoba, a partir de imágenes térmicas de los satélites 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. Además, se realizó un análisis temporal de $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a identificando el calentamiento global en la zona de estudio. Se utilizó para esto imágenes de los satélites Landsat que incluye el municipio de Cereté y parte de Montería en el departamento de 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.

ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio seleccionada (Figura 2.1) 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).

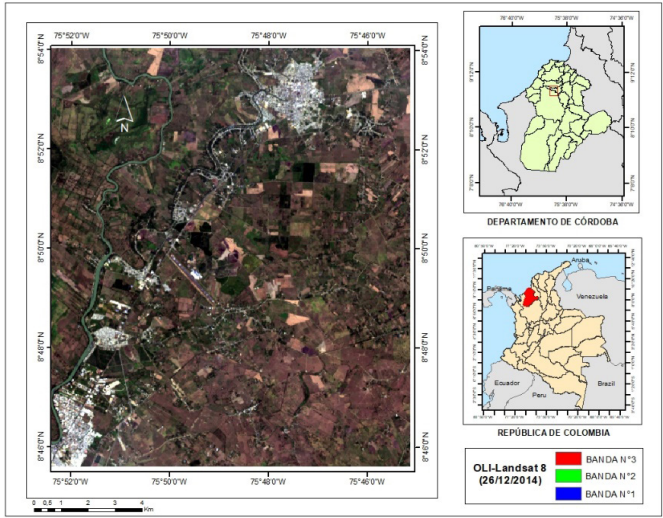


Figura 2.1: Ubicación geográfica de la zona de estudio (rectángulo rojo), imagen satelital del 26/12/2014.

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 utilizó la teoría de transferencia de radiación solar de onda corta entre la atmósfera y la superficie terrestre (Gónima, 1993).

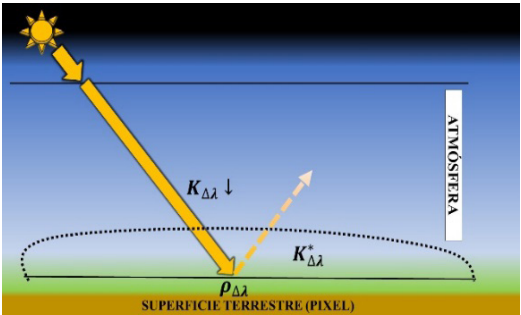


Figura 3.1: Flujos radiativos para la determinación de $K_{\Delta\lambda}^*$.

La ecuación que representa la radiación solar neta espectral de onda corta:

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

donde, $\rho_{\Delta\lambda}$ representa la reflectancia espectral en la superficie terrestre. El modelo teórico desarrollado 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 3.2: flujos $K_{\Delta\lambda}^d \uparrow$, $R_{\Delta\lambda} \uparrow$, $K_{\Delta\lambda}^{d*} \uparrow$ y $R_{\Delta\lambda}^* \uparrow$) siguiendo el formalismo teórico expuesto en Gónima y Alados, 2003.

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

donde $T_{\Delta\lambda}^*$ y $T_{\Delta\lambda}^{a*}$ son las transmitancias espectrales de la atmósfera debidas a la dispersión y absorción, respectivamente, que están relacionadas con la radiación solar espectral reflejada por la superficie terrestre, mientras que $d'_{\Delta\lambda}$ 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 y $u'_{\Delta\lambda}$ 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.

En la ec. (1), $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ representa la radiación solar global espectral (Figura 3.2: flujos $K_{\Delta\lambda}^d \downarrow$, $K_{\Delta\lambda}^D \downarrow$, y $K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow$), se exprese como:

$$K_{\Delta\lambda} \downarrow = K_{\Delta\lambda}^D \downarrow + K_{\Delta\lambda}^d \downarrow + K_{\Delta\lambda}^{d*} \downarrow \quad (3)$$

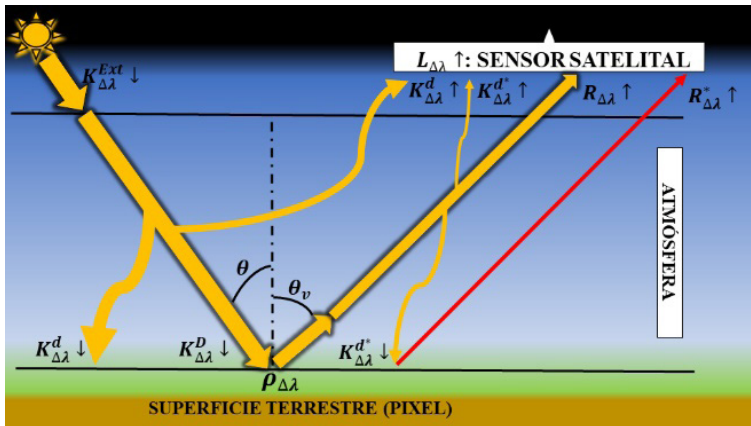


Figura 3.2: Flujos radiativos de onda corta entre la atmósfera y la superficie terrestre (píxel).

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 3.3).

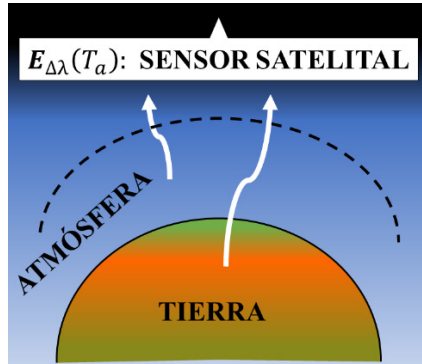


Figura 3.3: Esquema del sistema superficie terrestre-atmósfera.

La expresión para el cálculo de T_a se obtiene a partir de la ecuación de Planck:

$$T_a = \frac{hc}{k\lambda \ln\left(\frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 E_{\Delta\lambda}(T_a)} + 1\right)} \quad (4)$$

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.

METODOLOGÍA

Adquisición y puesta a punto de las imágenes de satélite

Se seleccionaron cuatro imágenes de satélite correspondiente a las fechas 12/01/2001, 03/02/2003, 29/01/2010 y 26/12/2014, descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS on-line). Luego se procedió a la importación de las imágenes de satélite al software especializado (ERDAS IMAGINE) y se convirtieron los valores digitales de cada imagen a valores de radiancia espectral $L_{\Delta\lambda} \uparrow (W / m^2 sr \mu m)$. Finalmente, fueron organizadas por bandas secuenciales y la extracción de la zona de estudio. Para el análisis se tuvo en cuenta seis bandas espectrales de onda corta y una térmica, las especificaciones de cada banda se encuentran en la Tabla 1.

Bandas	Tipo de radiación	$\Delta\lambda (\mu m)$
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

Tabla 1: Bandas espectrales $\Delta\lambda$ del satélite Landsat 7.

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

Para el cálculo $K_{\Delta\lambda}^*$, ec. (1), se determinó previamente las variables $P_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda}\downarrow$ por medio de las ecs. (2) y (3) respectivamente, aplicada sobre los valores de radiancia espectral de cada banda espectral de onda corta. Seguidamente se calculó T_a de acuerdo con la ec. (4), aplicada sobre los valores de radiancia espectral de la banda térmica.

Selección de muestras representativas

Inicialmente se definieron cuatro muestras representativas de las superficies que representan la zona de estudio (superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana) para establecer la relación entre $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a . Posteriormente, para la identificación del calentamiento global en la zona de estudio, se seleccionó un píxel representativo de cada una de las muestras definidas. A partir de los datos obtenido se analizó el comportamiento temporal de T_a y $K_{\Delta\lambda}^*$.

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 en Peñate, A. (2023). El objetivo de este trabajo es relacionar $K_{\Delta\lambda}^*$ y T_a , por lo tanto, se analizó inicialmente el comportamiento de $P_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda}\downarrow$, variables que intervienen en el cálculo de $K_{\Delta\lambda}^*$ según el Marco Teórico.

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

En la Figura 5.1 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 5.2(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 Peñate, A. (2023), 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.

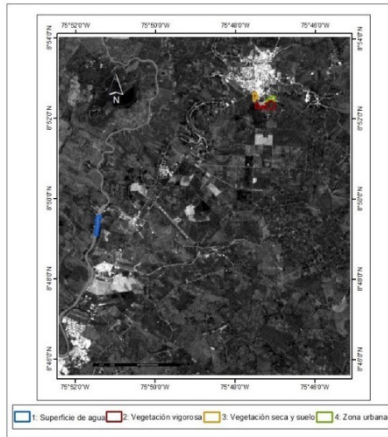


Figura 5.1: Imagen calculada de $\rho_{\Delta\lambda_1}$ y localización de las muestras representativas para el análisis (1: superficie de agua, 2: vegetación vigorosa, 3: vegetación seca y suelo, 4: zona urbana), correspondiente al 12/01/2001.

Para analizar el comportamiento espectral de las superficies existentes en la zona de estudio, se definieron muestras representativas (Figura 5.1) 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 5.2(a).

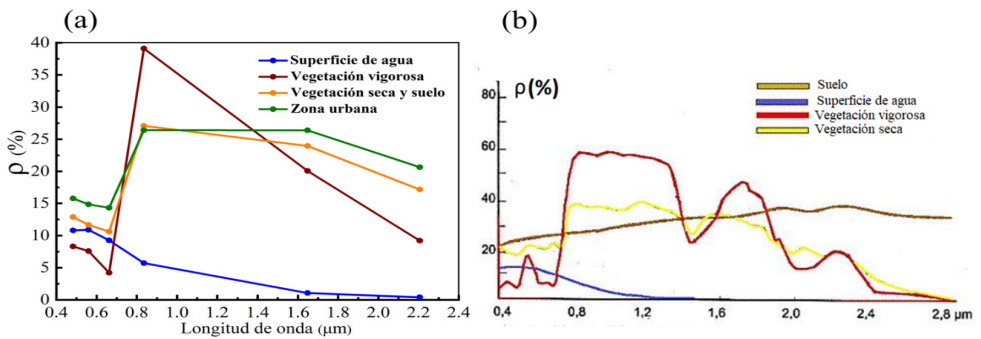


Figura 5.2: (a) Comportamiento de $\rho_{\Delta\lambda_1}$ calculada para cada muestra representativa y (b) curvas espectrales existentes en la literatura especializada (Gónima, 2021).

De acuerdo con la Figura 5.2(a), las curvas espectrales calculadas para la superficie de agua y la vegetación vigorosa muestran el mismo comportamiento que las de la Figura 5.2(b). Las curvas espectrales de la vegetación seca y suelo, y la zona urbana (Figura 5.2(a)) se comportan como una mezcla de vegetación vigorosa y suelo, lo cual también concuerda con la teoría. En Peñate, A. (2023), 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. (1)). La Figura 5.3 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 Peñate, A. (2023), 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.

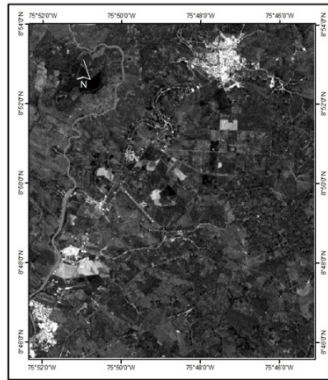


Figura 5.3: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1} \downarrow$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.

Teniendo en cuenta las muestras representativas se analizó el comportamiento espectral de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para cada una de ellas. En la Figura 5.4(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.

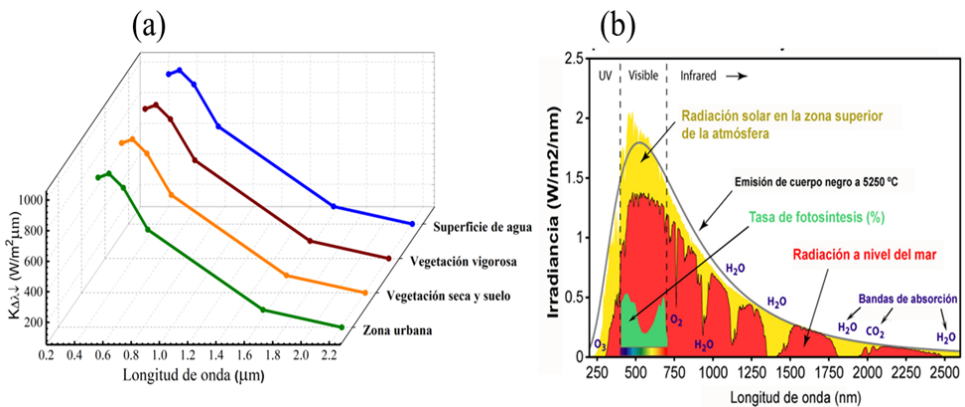


Figura 5.4: (a) Comportamiento de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ para la superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana, (b) distribución espectral de la radiación solar (IDEAM, on-line).

Tal como se observa en la Figura 5.4(a), $K_{\Delta\lambda} \downarrow$ calculada para las cuatro muestras tiene el mismo comportamiento a la distribución espectral de la radiación solar (Figura 5.4(b)). En Peñate, A. (2023), se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes de la distribución espectral de $K_{\Delta\lambda} \downarrow$, para cada muestra representativa.

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

En la Figura 5.5 se muestra la imagen calculada de $K_{\Delta\lambda}^*$ (banda N°1) cuyos valores varían entre $706.82 \text{ W/m}^2 \mu\text{m}$ y $974.68 \text{ W/m}^2 \mu\text{m}$. En Peñate, A. (2023), 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.

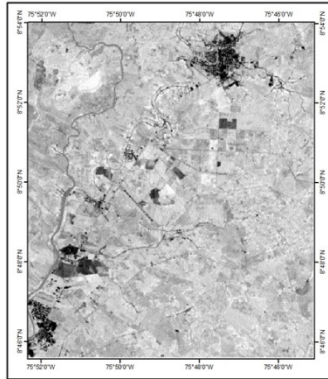


Figura 5.5: Imagen calculada de $K_{\Delta\lambda_1}^*$ (banda N°1), correspondiente al 12/01/2001.

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.

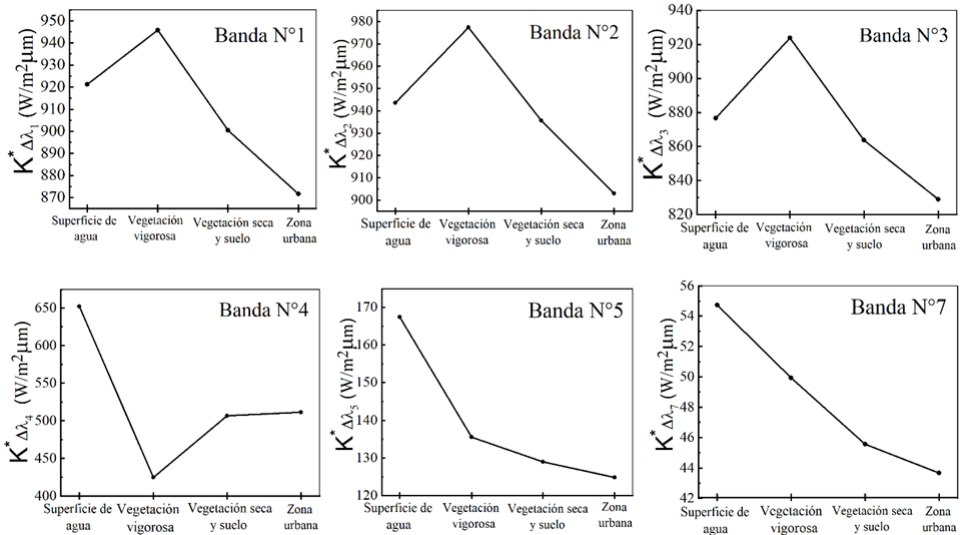


Figura 5.6: Comportamiento de $K_{\Delta\lambda}^*$ en función de las muestras seleccionadas, para las diferentes bandas espectrales.

En la Figura 5.6 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 5.2).

Un caso particular es el de la banda N°4 en la Figura 5.6, 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 5.2. Así mismo, la vegetación seca y suelo, y zona urbana tienen valores intermedios de $\rho_{\Delta\lambda}$ y $K_{\Delta\lambda}^*$ por lo tanto muestra valores intermedios.

Por último, en la Figura 5.6 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 Peñate, A. (2023), 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 5.7 muestra la imagen calculada de T_a cuyos valores varían entre 22.23°C y 32.17°C.

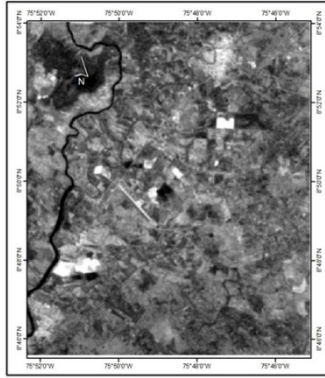


Figura 5.7: Imagen calculada de T_a , correspondiente al 12/01/2001.

En Peñate, A. (2023), 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 Peñate, A. (2023), se encuentran las gráficas para cada una de las fechas restantes del comportamiento de T_a en función de las muestras seleccionadas.

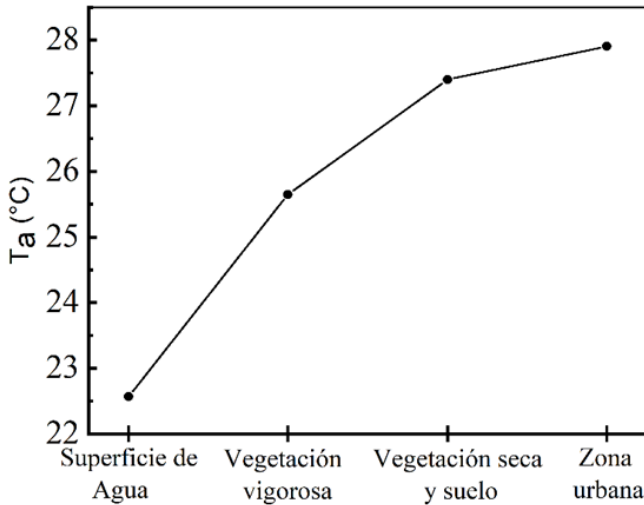


Figura 5.8: Comportamiento de T_a (banda N°6) en función de las muestras seleccionadas.

De acuerdo con la Figura 5.8, 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 5.9, se hace un análisis físico detallado del comportamiento de las cuatro superficies mostrado en la Figura 5.8.

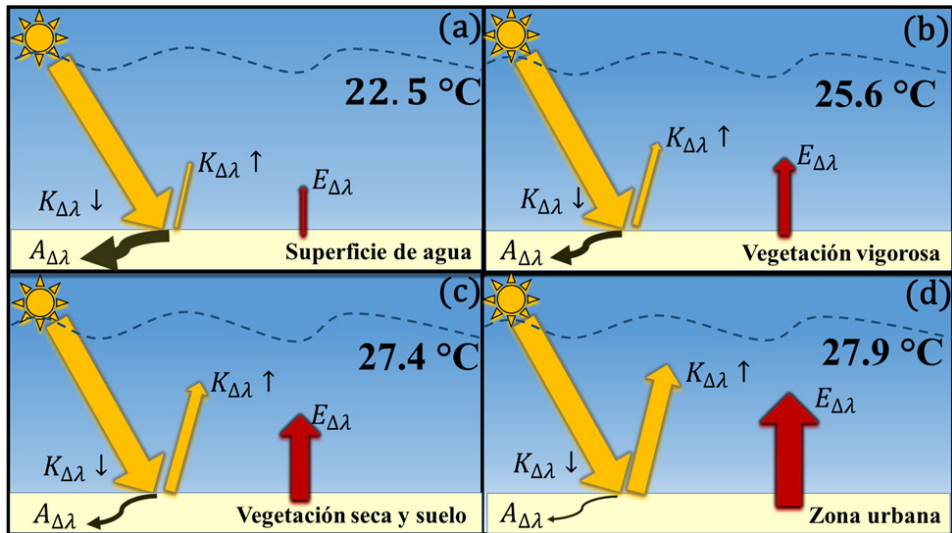


Figura 5.9: Representación gráfica para la explicación de las diferencias de T_a entre las muestras seleccionadas (superficie de agua, vegetación vigorosa, vegetación seca y suelo, y zona urbana).

En la Figura 5.9(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 interaccionar $K_{\Delta\lambda} \uparrow$ 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 5.9(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 interaccionar 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 5.9(b) y 5.9(c)) representan situaciones intermedias de los dos casos analizados anteriormente.

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

La Figura 5.10 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.

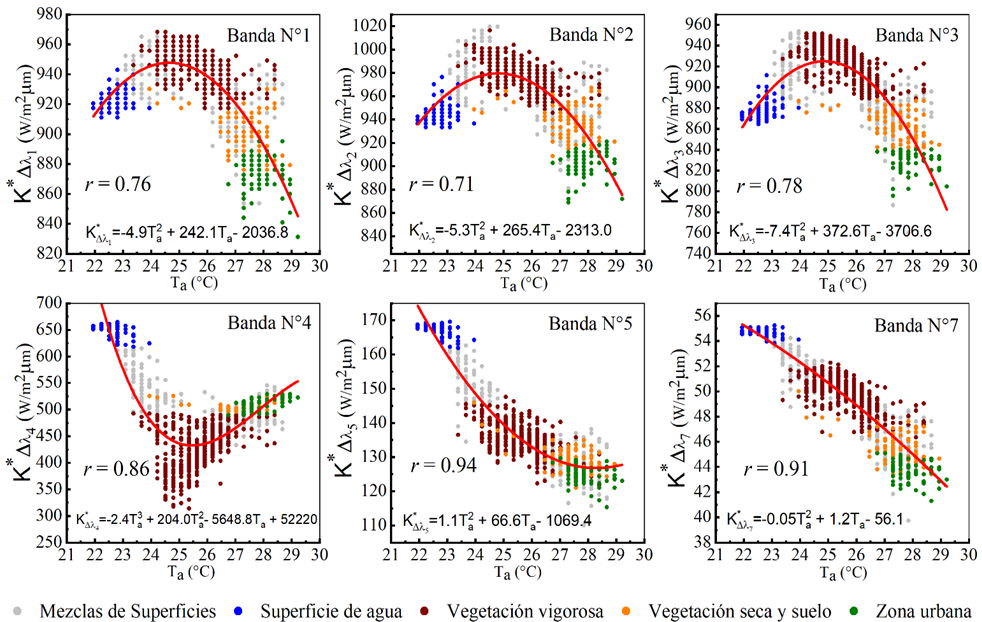


Figura 5.10: $K^*_{\Delta\lambda}$ en función de la temperatura aparente T_a , para las diferentes bandas espectrales.

De acuerdo con los fundamentos físicos que intervienen en la descripción de $K^*_{\Delta\lambda}$ y T_a (sección 5.2), la Figura 5.10 muestra el comportamiento combinado de las Figuras 5.6 y 5.8. 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 , 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 5.10 permiten clasificar las diferentes superficies de acuerdo con los valores calculados de $K^*_{\Delta\lambda}$, disponiendo previamente de T_a calculada. En Peñate, A. (2023), 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.

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 5.11.

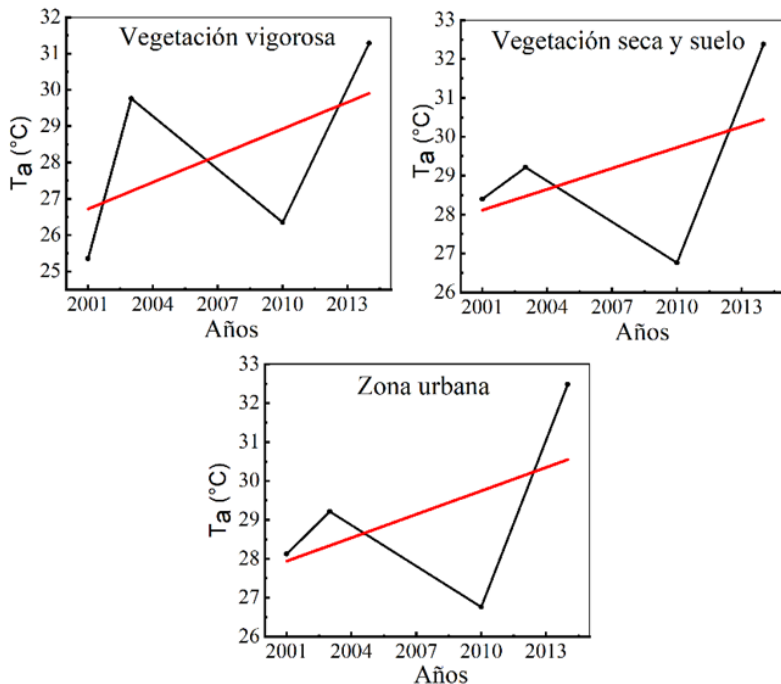


Figura 5.11: Variación de T_a entre 2001 y 2014, para el pixel representativo de las superficies seleccionadas.

De acuerdo con la sección 5.3, el incremento de la temperatura (Figura 5.11) 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 N°3 y N°4 ($K_{\Delta\lambda_3}^*$ y $K_{\Delta\lambda_4}^*$) que muestran teóricamente (Figura 5.2) 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 5.12(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 5.12(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 5.2), lo que genera un aumento paulatino de $K_{\Delta\lambda_4}^*$.

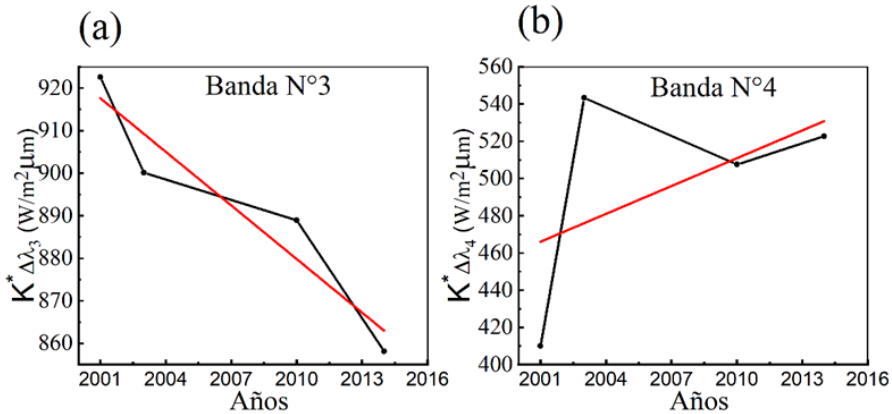


Figura 5.12: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K^*_{\Delta\lambda_3}$ ((a)) y $K^*_{\Delta\lambda_4}$ ((b)).

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 5.13(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 5.2). La tendencia a la disminución de $K^*_{\Delta\lambda_7}$ (Figura 5.13(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 $K^*_{\Delta\lambda_7}$.

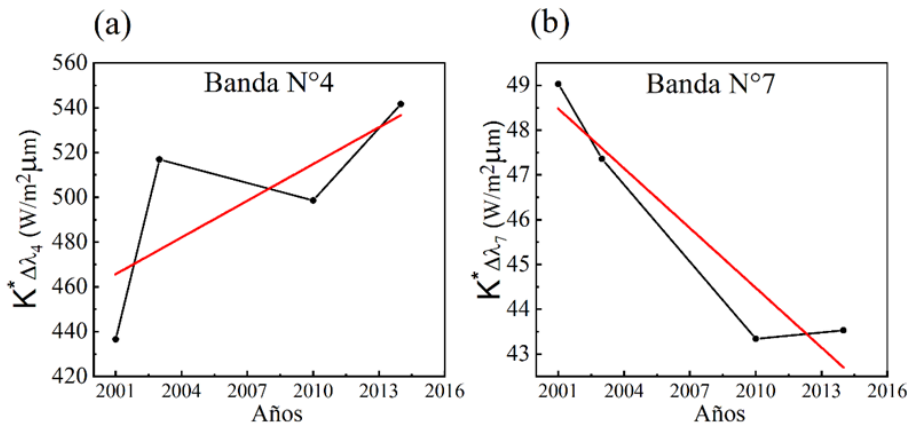


Figura 5.13: Comportamiento temporal entre 2001 y 2014 de $K^*_{\Delta\lambda_4}$ ((a)) y $K^*_{\Delta\lambda_7}$ ((b)).

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 N°4 y N°7, como se observa en la Figura 5.14.

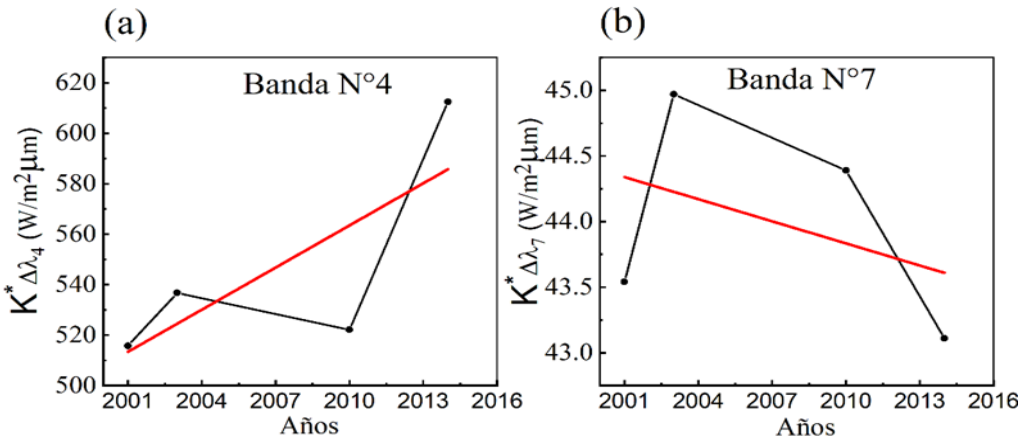


Figura 5.14: Comportamiento temporal entre el 2001 y 2014 de $K^*_{\Delta\lambda_4}$ ((a)) y $K^*_{\Delta\lambda_7}$ ((b)).

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.

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 $K^*_{\Delta\lambda}$ 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 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 último, 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.

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>

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

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

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>

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/ig.60235>

Peñate, A. (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). *Repositorio Universidad de Córdoba/ Trabajo de grado*. <https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/7729>

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)

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>