



Dynamics of land surface temperature from an urban heat island perspective in the North of Mexico

Dinámica de la temperatura superficial terrestre bajo un enfoque de islas de calor en el norte de México

Susana A. Mejía-Romero¹; Arturo Reyes-González²; Selenne Y. Márquez-Guerrero³; Francisco G. Echavarría-Chairez⁴; Gabriel de J. Peña-Urbe⁵; Armando López-Santos^{1*}

¹Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Programa de Posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas. km 40 carretera Gómez Palacio-Ciudad Juárez. C. P. 35230. Bermejillo, Durango, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental La Laguna. Bulevar José Santos Valdez núm. 1200 Poniente. C. P. 27440.

³Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón- San Pedro de las Colonias km 7.5, ejido Ana. C. P. 27170. Torreón, Coahuila, México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatecas. Calera de Víctor Rosales. C. P. 98500. Zacatecas, México.

⁵Universidad Juárez del Estado del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad s/n, Núcleo Universitario, col. Filadelfia. C. P. 35019. Gómez Palacio, Durango, México.

*Corresponding author: alopez@chapingo.urruza.edu.mx; tel.: +52 871 137 5102.

Abstract

Introduction. Land surfaces temperature (LST) derived from thermal bands, due to its resolution characteristics, can enhance the understanding of ecosystem dynamics, for example, the spatiotemporal distribution of drought or extreme aridity.

Objective. To analyze the spatiotemporal distribution of LST and its relationship with LANDSAT spectral indices to identify and classify areas that may be unfavorable for soil life.

Materials and methods. The 30/42 LANDSAT scene from the years 2017 and 2021 was used, covering 42.6 % (study area) in the Lagunera Region. LST was reclassified into six categories: C1(≤ 8 °C), C2(8-20 °C), C3(20-32 °C), C4(32-44 °C), C5(44-56 °C) and C6(>56 °C). The relationship between LST, ambient temperature, and the spectral indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and surfaces emissivity (ϵ_s) were determined.

Results. LST was highest in the northeastern part of the study area (>50 °C), where categories C3, C4 and C5 were dominant, characterized by bare soil (40-55 %) and sparse vegetation (39-55 %). The adjusted correlation coefficient between LST and ambient temperature was >0.7; with LST ~ 20 °C higher than ambient temperature. LST showed a stronger relationship with ϵ_s (>0.95) than with NDVI; however, the latter showed lower uncertainty (<2 %).

Conclusions. The strong correlation between LST, spectral indices, and ambient temperature highlights the utility of the LANDSAT thermal band for delineating critical areas affected by high temperatures. It also serves as an indicator of adverse conditions in the upper soil layer.

Keywords: Lagunera Region, surface emissivity, spectral indices, soil, arid zones.

Resumen

Introducción. La temperatura superficial terrestre (TST) de bandas térmicas, debido a sus características de resolución, puede mejorar la comprensión de la dinámica ecosistémica; por ejemplo, la distribución espacio-temporal de la sequía o aridez extrema.

Objetivo. Analizar la distribución espacio-temporal de la TST y su relación con índices espectrales de LANDSAT, para la zonificación de áreas posiblemente adversas para la vida del suelo.

Materiales y métodos. Se utilizó la escena 30/42 de LANDSAT de 2017 y 2021 ajustada al 42.6 % (unidad de estudio) de la región Lagunera. La TST se reclasificó en seis categorías: C1(≤ 8 °C), C2(8-20 °C), C3(20-32 °C), C4(32-44 °C), C5(44-56 °C) y C6(>56 °C) y se determinó su relación con la temperatura ambiente y los índices espectrales NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) y emisividad de la superficie (ϵ_s).

Resultados. La TST fue superior en la zona noreste de la unidad de estudio (>50 °C), donde predominaron C3, C4 y C5 con características de suelo desnudo (40-55 %) y vegetación escasa (39-55 %). El coeficiente de correlación ajustado de TST y temperatura ambiente fue >0.7; TST fue ~ 20 °C superior a la temperatura ambiente. La relación TST fue mejor con ϵ_s (>0.95) que con NDVI; sin embargo, este presentó menor incertidumbre (<2 %).

Conclusiones. La buena relación de TST con los índices espectrales y con la temperatura ambiente demuestra el potencial del canal térmico de LANDSAT para la delimitación de áreas críticas afectadas por las temperaturas altas y constituye un indicador de condiciones adversas en la capa superior del suelo.

Palabras clave: región Lagunera, emisividad de la superficie, índices espectrales, suelo, zonas áridas.

Please cite this article as follows (APA 7): Mejía-Romero, S. A., Reyes-González, A., Márquez-Guerrero, S. Y., Echavarría-Chairez, F. G., Peña-Urbe, G. J., & López-Santos, A. (2025). Dynamics of land surface temperature from an urban heat island perspective in the North of Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, e24050. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.11.050>



Introduction

Land Surface Temperature (LST) is a key indicator in the assessment of ecosystem changes (Guha & Govil, 2021; Kumar et al., 2022; Przeździecki et al., 2023). The organic and inorganic components of the Earth's surface, through the emission and re-radiation of energy, can reflect levels of molecular stability. For instance, the optimal temperature range for plants in temperate climates and arid tropical regions is 15-30 °C and 25-40 °C, respectively. Temperatures exceeding these ranges trigger a critical phase of thermal stress, which can lead to physiological damage and, in several cases, plant mortality (Hamlyn, 2014; Peng et al., 2016).

The urban heat island approach, traditionally applied in urban environments for public health purposes (Abedrabboh et al., 2025; Stewart & Oke, 2012), can be similarly used to create local zoning or climatopes. These classifications rely on local knowledge of wind patterns, temperature, land use, topography, and population density (Nazarenko et al., 2025; Wang et al., 2025; Žgela et al., 2024). However, boundary delineation can be made more precise using remote sensing technologies (Yantao et al., 2024; Žgela et al., 2024).

LST derived from hyperspectral sensors such as those on-board LANDSAT satellites (U.S. Geological Survey [USGS]) can be used to detect areas under stress from extrinsic factors (Peng et al., 2016; Tulandi & Aloanis, 2021). A lack of vegetation or the presence of senescent vegetation in a given area can manifest as elevated LST values (Bindajam et al., 2020), however, in some cases, LST may be more strongly influenced by other factors, such as precipitation, solar radiation, wind speed, and soil characteristics (Twumasi et al., 2021). Although LANDSAT Collection 2 (LC-L2) products from satellites 8 and 9 are calibrated using global climate datasets from MODIS (USGS, 2024) to estimate LST and surface reflectance, these products have certain limitations that can lead to errors in key variables such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface emissivity ϵ_s (USGS, 2024).

The emissivity coefficient (ϵ) at a specific wavelength refers to the radiation emitted by a surface or object as a fraction of the maximum possible radiation emitted by a blackbody at the same wavelength and temperature (Hamlyn, 2014). Both surface emissivity (ϵ_s) and NDVI are used in specific algorithms (Mono-Window or Double-Window) for estimating LST. However, the accuracy of these methods may lead to results that are either underestimated or overestimated (Arabi Aliabad et al., 2021; Wang et al., 2019).

Introducción

La temperatura de la superficie terrestre (TST) es un indicador importante en la evaluación de cambios ecosistémicos (Guha & Govil, 2021; Kumar et al., 2022; Przeździecki et al., 2023). Los componentes orgánicos e inorgánicos de la superficie terrestre, al emitir y remitir energía, pueden revelar los niveles de estabilidad molecular; por ejemplo, la temperatura óptima para plantas de clima templado y del trópico árido tiene rangos de 15-30 °C y 25-40 °C, respectivamente; por encima de estos ocurre una etapa crítica de estrés térmico con riesgo de muerte (Hamlyn, 2014; Peng et al., 2016).

El enfoque de islas de calor, utilizado tradicionalmente en entornos urbanos con fines de salud pública (Abedrabboh et al., 2025; Stewart & Oke, 2012), puede emplearse de modo análogo para hacer zonificaciones locales o climatopos. Estos se basan en el conocimiento local del viento, temperatura, uso del suelo, relieve y densidad de la población (Nazarenko et al., 2025; Wang et al., 2025; Žgela et al., 2024), pero la delimitación puede ser más precisa mediante el uso de recursos de teledetección (Yantao et al., 2024; Žgela et al., 2024).

La TST derivada de escaneos mediante sensores hiperespectrales como los de LANDSAT (U.S. Geological Survey [USGS]) puede emplearse para la detección de áreas estresadas por factores extrínsecos (Peng et al., 2016; Tulandi & Aloanis, 2021). La escasez de vegetación o su estado senescente en un área puede expresarse en una alta TST (Bindajam et al., 2020), pero en algunos casos esta puede ser más influenciada por otros factores como la precipitación, radiación, velocidad del viento y las características del suelo (Twumasi et al., 2021). Aun cuando la colección 2 (LC-L2) de LANDSAT (8 y 9) son productos calibrados con datos de clima a nivel global de MODIS (USGS, 2024) para estimar TST y reflectancia, estos presentan algunas limitaciones que pueden conducir a errores relacionados con variables clave como el NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) y la emisividad de la superficie ϵ_s (USGS, 2024).

El coeficiente de emisividad (ϵ) en una longitud de onda particular se refiere a la radiación emitida por una superficie u objeto como una fracción de la radiación máxima posible que emite un cuerpo en esa longitud de onda a esa temperatura (Hamlyn, 2014). Tanto la emisividad de la superficie (ϵ_s) como el NDVI se emplean en métodos específicos (Mono-Window o Double-Window) para la determinación de la TST, cuyos resultados pueden ser subestimados o sobrestimados (Arabi Aliabad et al., 2021; Wang et al., 2019).

The analysis of the causes and spatial distribution patterns of LST should be conducted over multiple time periods (Zhang et al., 2024) to identify variables that show consistent relationships. For instance, the correlation between LST and ambient temperature recorded by Conventional Meteorological Stations (CMS) in correlation analyses may vary throughout the year (Abulibdeh, 2021; Iqbal & Alí, 2022).

In the arid north of Mexico, where 24.94 % of the national population inhabits, heatwaves tend to be particularly severe, especially during the hottest months of the year (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020; Servicio Meteorológico Nacional (SMN) & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2024). Therefore, zoning based on the heat island approach holds significant potential for guiding the implementation of mitigation and adaptation measures in response to thermal stress-related risks (Lovriha, 2022).

Based on the above, the objective of this study was to analyze the spatial and temporal distribution of LST and its relationship with LANDSAT spectral indices for the zoning of areas potentially adverse to life. This was proposed under the premise that LST shows a correlation greater than 50 % with ambient temperature measured at CMS, and with environmental drivers related to soil and vegetation, such as NDVI and ε_s .

Materials and Methods

Study area delimitation

The study area covered 42.6 % of the total surface (41 290.41 km²) of the Lagunera Region. It is located at an elevation of 1 139 m in north-central Mexico (102.366° - 104.783° W and 24.366° - 26.383° N) and consists of five municipalities in the state of Coahuila and ten in the state of Durango (INEGI, 2018b; Figure 1a).

The study area was defined based on the LANDSAT Worldwide Reference System (WRS); the daytime (descending) scene WRS2 Path:30/Row:42 was adjusted to a quadrangular coverage of the Lagunera Region, with boundary coordinates at 104.2829° W - 26.5649° N, and 102.9269° W - 25.4189° N.

The study area included 80 % of the municipalities (12 out of 15) that make up the Lagunera Region: Francisco I. Madero, San Pedro, Matamoros, Viesca and Torreón in Coahuila and Lerdo, Nazas, San Luis del Cordero, San Pedro del Gallo, Mapimí, Gómez Palacio and Tlahualilo in Durango.

El análisis de las causas y características de la distribución espacial de la TST debe hacerse en varios períodos (Zhang et al., 2024) para identificar variables que se relacionen consistentemente; por ejemplo, la relación entre TST y la temperatura ambiente medida por Estaciones Meteorológicas Convencionales (EMC) en los análisis de correlación, puede variar a lo largo del año (Abulibdeh, 2021; Iqbal & Alí, 2022).

En el norte árido de México, donde reside 24.94 % de la población nacional, las ondas de calor tienden a ser aún más críticas, especialmente durante los meses más cálidos del año (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020; Servicio Meteorológico Nacional (SMN) & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2024). Por ello, la zonificación con base en el enfoque de las islas de calor presenta potencial en la implementación de medidas de mitigación y adaptación frente a riesgos por estrés térmico (Lovriha, 2022).

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue analizar la distribución espacial y temporal de la TST y su relación con los índices espectrales de LANDSAT para la zonificación de áreas posiblemente adversas para la vida. Esto se planteó bajo la premisa de que la TST presenta correlación mayor a 50 % con la temperatura ambiente medida en EMC, así como con los controladores ambientales asociados al suelo y la vegetación como el NDVI y ε_s .

Materiales y métodos

Delimitación de la unidad de estudio

La unidad de estudio comprendió 42.6 % de la superficie total (41 290.41 km²) de la región Lagunera. Esta se ubica a 1 139 m de elevación en el centro norte de México (102.366° - 104.783° O y 24.366° - 26.383° N) y se integra por cinco municipios del estado de Coahuila y 10 del estado de Durango (INEGI, 2018b; Figura 1a).

La unidad de estudio se definió a partir del Sistema de Referencia Mundial (WRS, por sus siglas en inglés) de LANDSAT; la escena diurna (*descending*) WRS2 Path:30/Row:42 se ajustó a una cobertura cuadrangular de la región Lagunera, cuyos límites extremos fueron 104.2829° O - 26.5649° N, y 102.9269° O - 25.4189° N.

La unidad de estudio cubrió 80 % de los municipios (12/15) que integran la región Lagunera: Francisco I. Madero, San Pedro, Matamoros, Viesca y Torreón en Coahuila y Lerdo, Nazas, San Luis del Cordero, San Pedro del Gallo, Mapimí, Gómez Palacio y Tlahualilo en Durango.

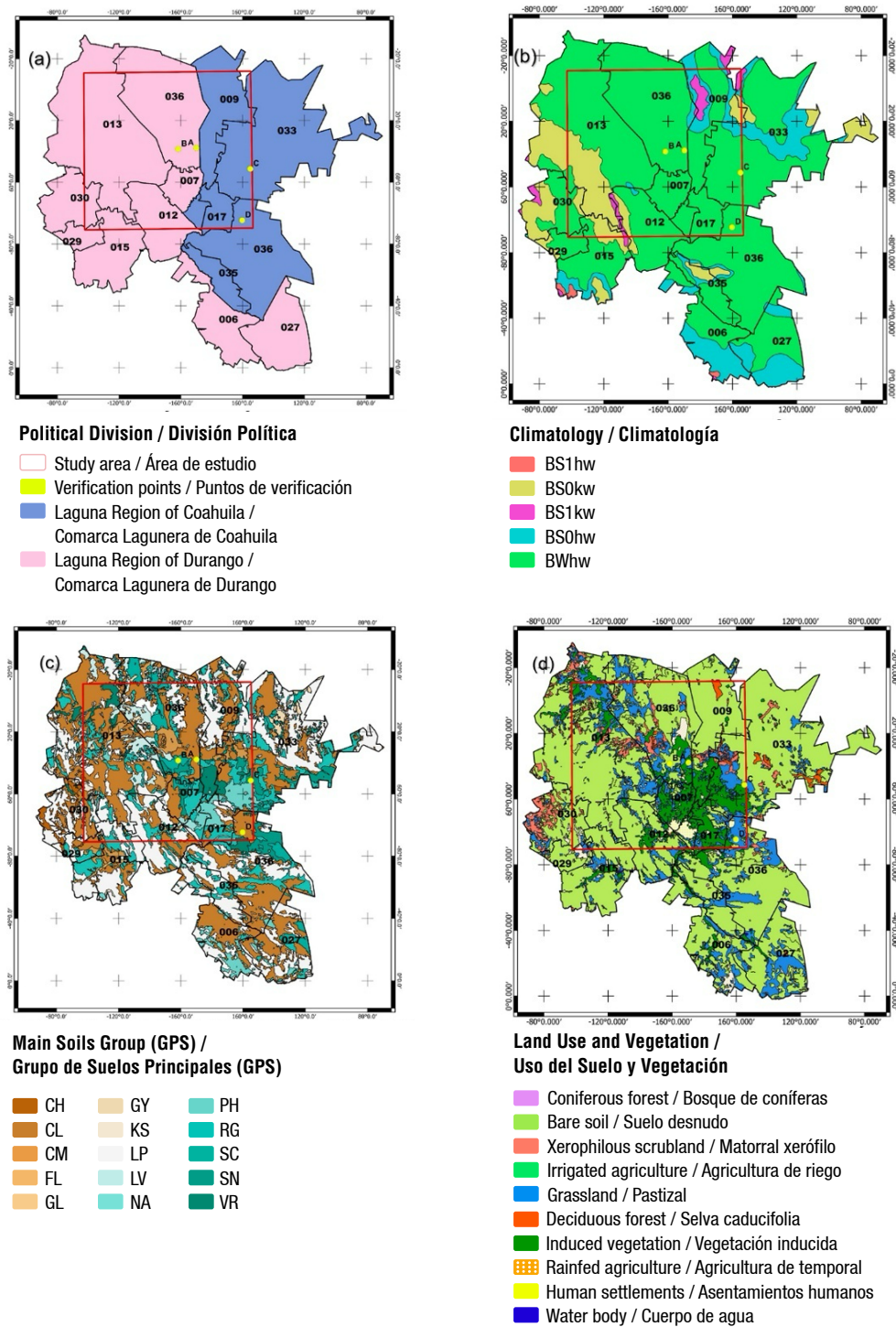


Figure 1. Coverage and delimitation of components considered in the study for determining land surface temperature in the Laguna Region. (a) Boundaries and location, (b) predominant climates, (c) main soils and (d) vegetation and land use. Municipal codes: Francisco I. Madero (009), San Pedro (033), Matamoros (017), Viesca (036) and Torreón (035) in Coahuila; and Lerdo (012), Nazas (015), San Luis del Cordero (029), San Pedro del Gallo (030), Mapimí (013), Gómez Palacio (007) and Tlahualilo (036) in Durango. Soil types: Calcisol (CL), Leptosol (LP), Regosol (RG), Luvisol (LV), Phaeozem (PH), Vertisol (VR), Cambisol (CM), Solonchak (SC), Solonetz (SN), Gypsisol (GY), Fluvisol (FL), Kastanozem (KS) and Chernozem (CH).

Figura 1. Cobertura y delimitación de los componentes considerados en el estudio para determinar la temperatura superficial terrestre en la región Lagunera. (a) Límites y ubicación, (b) climas predominantes, (c) suelos principales y (d) vegetación y uso de suelo. Claves municipales: Francisco I. Madero (009), San Pedro (033), Matamoros (017), Viesca (036) y Torreón (035) en Coahuila; y Lerdo (012), Nazas (015), San Luis del Cordero (029), San Pedro del Gallo (030), Mapimí (013), Gómez Palacio (007) y Tlahualilo (036) en Durango. Tipos de suelos: Calcisol (CL), Leptosol (LP), Regosol (RG), Luvisol (LV), Phaeozem (PH), Vertisol (VR), Cambisol (CM), Solonchak (SC), Solonetz (SN), Gypsisol (GY), Fluvisol (FL), Kastanozem (KS) y Chernozem (CH).

Components determining land surface temperature

Climate

The predominant climate group is dry (B) with two subtypes: semi-arid (BS) and arid (BW), average annual temperature range of 18 to 22 °C. Three subgroups were identified: 1) BWhw (80.4 %), 2) BS₀kw (12.43 %), BS₀hw (4.66 %) and 3) BS₁kw (2.54 %) (INEGI, 2008; Figure 1b).

Main soil groups, land use and cover

A total of 15 soil groups were identified in the Lagunera Region (Figure 1c), with 13 of these present in the study area. Across an approximate area of 16 716 km², the dominant soil types are: Calcisol (35.3 %), Leptosol (21.1 %) and Regosol (15.8 %) (Figure 1c), followed by Luvisol (5.9 %), Phaeozem (4.7 %), Vertisol (4.1 %), Cambisol (4 %), Solonchak (3.8 %), Solonetz (2.3 %), Gypsisol (1.1 %), Fluvisol (0.4 %), Kastanozem (0.4 %) and Chernozem (0.1 %) (INEGI, 2007a-f).

In terms of land use and vegetation cover (Figure 1d), xerophilous scrubland (56.4 %) predominates, followed by induced vegetation (17.4 %) and irrigated agriculture (16.7 %). Other cover types include grassland (4.3 %), human settlements (2.2 %), rainfed agriculture (1.6 %), bare soil (0.8 %), water bodies (0.12 %), deciduous forest (0.02 %) and coniferous forest (0.01 %) (INEGI, 2018a).

Information preprocessing

This phase involved the search and preparation of basic and complementary inputs to establish the geographical scope and application in the study area. The main data sources were INEGI (2018b) and USGS (2023), from which datasets were downloaded and processed as illustrated in Figure 2. The drivers influencing the LST were integrated according to the methodology described by Wan Mohd Jaafar et al. (2020), as shown in Table 1.

The analysis and monitoring of LST and its relationship with NDVI, based on LANDSAT datasets, covered the years 2017 and 2021. The selection and download of inputs (Figure 2) followed three criteria: 1) WRS2 daytime scenes, 2) cloud cover ≤15 % and 3) high geometric and radiometric quality. Nine LANDSAT collections were identified and downloaded; the months of March, August and December were excluded due to not meeting quality requirements (Appendix 1).

Componentes que determinan la temperatura superficial terrestre

Clima

Predomina el grupo de clima seco (B) con dos modalidades, seco árido (BS) y seco muy árido (BW), con rango de temperatura media anual de 18 a 22 °C; en particular se identificaron tres subgrupos: 1) BWhw (80.4 %), 2) BS₀kw (12.43 %), BS₀hw (4.66 %) y 3) BS₁kw (2.54 %) (INEGI, 2008; Figura 1b).

Grupos principales de suelo, uso y cubiertas

En la región Lagunera se identificaron 15 grupos de suelo (Figura 1c), de los cuales 13 están asociados a la unidad de estudio. En una extensión aproximada de 16 716 km² predominan: Calcisol (35.3 %), Leptosol (21.1 %) y Regosol (15.8 %) (Figura 1c), seguidos de Luvisol (5.9 %), Phaeozem (4.7 %), Vertisol (4.1 %), Cambisol (4 %), Solonchak (3.8 %), Solonetz (2.3 %), Gypsisol (1.1 %), Fluvisol (0.4 %), Kastanozem (0.4 %) y Chernozem (0.1 %) (INEGI, 2007a-f).

Respecto al uso y cobertura vegetal (Figura 1d) predomina el matorral xerófilo (56.4 %), la vegetación inducida (17.4 %) y la agricultura de riego (16.7 %); también incluye pastizal (4.3 %), asentamientos humanos (2.2 %), agricultura de secano (1.6 %), suelo desnudo (0.8 %), cuerpos de agua (0.12 %), selva caducifolia (0.02 %) y bosque de coníferas (0.01 %) (INEGI, 2018a).

Preproceso de la información

Esta fase implicó la búsqueda y preparación de insumos básicos y complementarios para establecer los alcances geográficos y su aplicación en la unidad de estudio, cuyas fuentes principales fueron el INEGI (2018b) y USGS (2023), de donde se realizaron descargas y procesos como se indica en la Figura 2. Los controladores que influyen en la TST se integraron conforme a lo descrito por Wan Mohd Jaafar et al. (2020), tal como se muestra en el Cuadro 1.

El análisis y seguimiento de la TST y su relación con el NDVI, apoyado en los conjuntos LANDSAT, comprendió los años 2017 y 2021; la selección y descarga de insumos (Figura 2) se hizo con base en tres criterios: 1) escenas diurnas WRS2, 2) nubosidad ≤15 % y 3) alta calidad geométrica y radiométrica. Se identificaron y descargaron nueve colecciones LANDSAT; los meses de marzo, agosto y diciembre se excluyeron por no cumplir los requisitos de calidad (Apéndice 1).

Table 1. Inputs used in the evaluation of land surface temperature in the Lagunera Region.**Cuadro 1. Insumos empleados en la evaluación de la temperatura superficial terrestre en la región Lagunera.**

Input/ Insumo	Description and source/ Descripción y fuente	Objective/ Objetivo
Vector Datasets, <i>shp</i> / Conjuntos vectoriales, <i>shp</i>		
Mexican Municipal Integration/ Integración municipal nacional	Municipal political division, 2005, scale 1:250 000 (INEGI, 2018b)/ División política municipal, 2005, escala 1:250 000 (INEGI, 2018b)	Extraction of municipalities comprising the Lagunera Region/ Extracción de municipios que integran la región Lagunera
Land use and vegetation/ Uso de suelo y vegetación	USV Serie VII, scale 1:250 000 (INEGI, 2018 ^a)/ USV serie VII, escala 1:250 000 (INEGI, 2018 ^a)	Characterization of the spatial distribution of land use and vegetation in the Lagunera Region/ Caracterización de la distribución espacial de usos de suelo/vegetación de la región Lagunera
Soil science/ Edafología	Vector dataset of soil characteristics. Scale 1:250 000. Serie II. (INEGI, 2007a-f)/ Conjunto vectorial edafológico. Escala 1:250 000. Serie II. (INEGI, 2007a-f)	Identification of the extent and spatial boundaries of land use group in the Lagunera Region/ Identificación de la extensión y límites espaciales de los grupos de uso de suelo de la región Lagunera
	Soil profiles, Serie II, Scale 1:250 000 (INEGI, 2013)/ Perfiles edafológicos, serie II, escala 1:250 000 (INEGI, 2013)	Description of soil layer properties (≤ 10 cm depth)/ Descripción de las propiedades de la capa ≤ 10 cm
Climatology/ Climatología	Types of climates in Mexico, reclassified by García, scale 1:1 000 000 (INEGI, 2008)/ Tipos de climas de México, reclasificado por García, escala 1:1 000 000 (INEGI, 2008)	Classification of climatic groups and subgroups in the Lagunera Region/ Distinción de grupo y subgrupo climáticos de la región Lagunera
LANDSAT Raster Band Datasets / Conjuntos de bandas en formato <i>raster</i> de LANDSAT		
TIRS2 bands/ Bandas TIRS2	Thermal infrared bands, level 1 (L2), collection (C2) of LANDSAT 8-9 (2022 and 2023)/ Bandas infrarrojo térmico, nivel 1 (L2), colección (C2) de LANDSAT 8-9 (2022 y 2023)	Estimation of land surface temperature in the study area/ Determinar temperatura de la superficie del suelo de la unidad de estudio
OLI2 bands/ Bandas OLI2	Bands 4-5 / Bandas 4-5	Analysis of soil / land cover in the study area/ Analizar la cobertura del suelo de la unidad de estudio

TIRS2 = Thermal Infrared Sensor 2; OLI2 = Operational Land Imager.

TIRS2 = Thermal Infrared Sensor 2; OLI2 = Operational Land Imager.

Post-processing: Estimation of Land Surface Temperature and its Spatial Distribution

To estimate the spatial distribution of LST, the thermal band (B10) was used according to the following equation: $LST = [(Qcal \times VCa) + VCo] - 273.15$; where, $Qcal$ represents the digital numbers (DN) contained in the raster image; VCo and VCa are constants obtained from the metadata (*MTL.txt), the first (0.00341802) used to calibrate DN and the second (149.0) used to convert to the Kelvin (K) scale; and 273.15 is the constant for conversion from K to °C. The spatial distribution of LST was classified into six categories corresponding to critical temperature ranges, as shown in Table 2.

Postproceso: Cálculo de la temperatura superficial terrestre y su distribución espacial

Para calcular la distribución espacial de la TST se utilizó la banda térmica (b10) mediante la siguiente ecuación: $TST = [(Qcal \times VCa) + VCo] - 273.15$; donde, $Qcal$ son valores digitales (DN) contenidos en la imagen ráster; VCo y VCa son constantes obtenidas de los metadatos (*MTL.txt), la primera (0.00341802) usada para calibrar los DN y la segunda (149.0) es un valor para transformar a escala Kelvin (K); y 273.15 es una constante de conversión de K a °C. La distribución espacial de TST se determinó mediante seis clases consideradas como rangos críticos de temperatura que se señalan en el Cuadro 2.

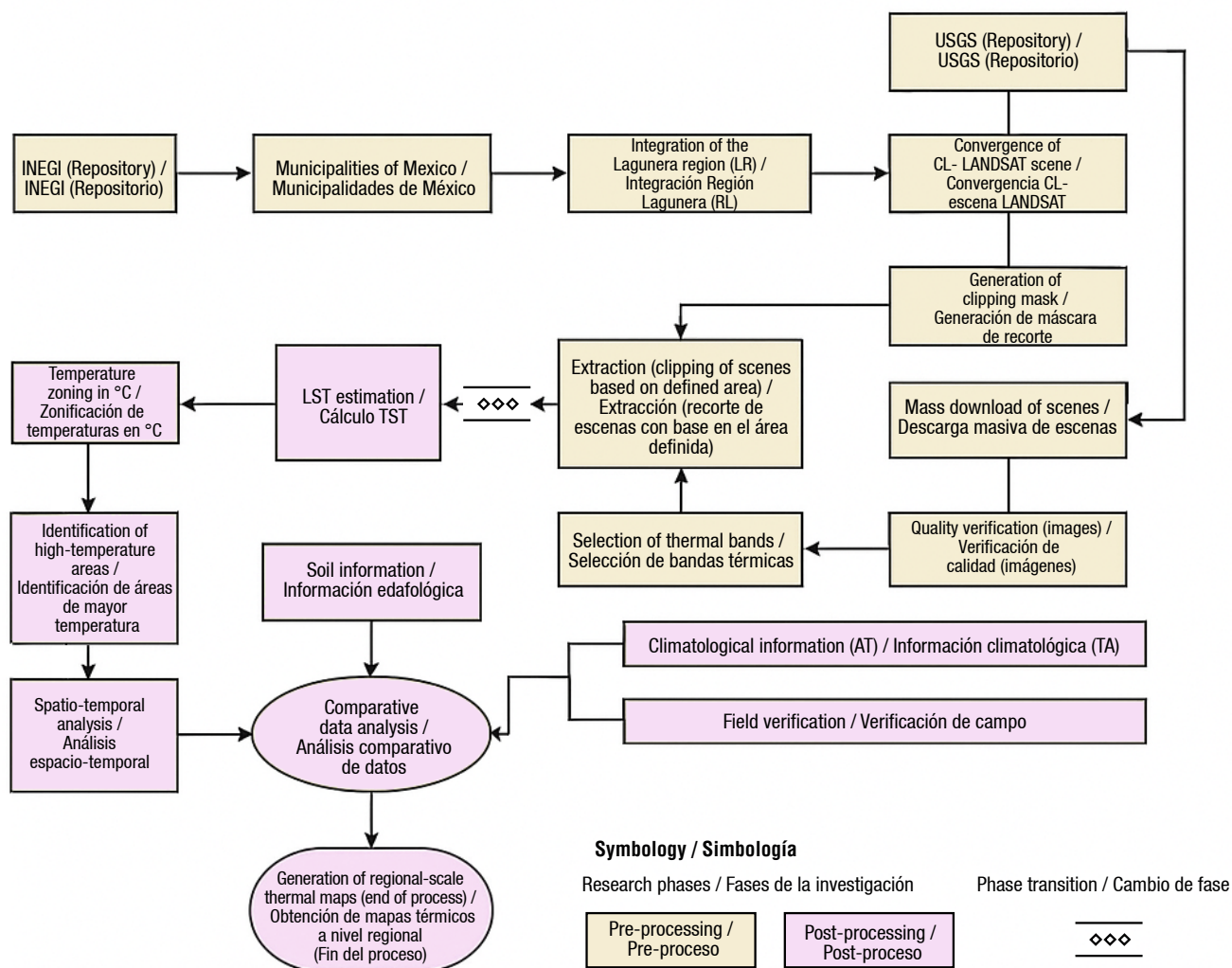


Figure 2. Phases of the research and process management for the generation of thermal maps in the Lagunera Region. LST: Land Surfaces Temperature.

Figura 2. Fases de la investigación y administración de procesos para la obtención de mapas térmicos en la región Lagunera. TST: temperatura superficial terrestre.

Temperature zonation

A geostatistical analysis of LST was conducted for each month of 2017 and 2021 using QGIS v3.30 (2018). Mean (T_{avg}) and maximum temperature (T_{max}) were determined from the frequency analysis. Monthly temperature zonation was performed by adding 5 °C to T_{avg} for each of the six classes previously defined (Table 2). LST zonation was carried out through segmentation using the raster calculator with the following algorithm: $TSTz_i = (TST > T_{avg} + 5) \text{ AND } (TST < T_{max})$; where, $LSTz_i$ is the monthly LST z (°C) for the i -th month.

Zonation and field verification

Once the six LST categories were segmented, the location and extent of the zones with the highest temperature records were identified, specifically categories C5(44-56 °C) and C6 (>56 °C). Within these

Zonificación de temperaturas

Se implementó un análisis geoestadístico de TST por mes para 2017 y 2021 en el *software* QGIS v 3.30 (2018). Del análisis de frecuencias se obtuvieron temperatura media (T_{med}) y máxima (T_{max}). La zonificación de temperaturas mensuales se hizo agregando 5 °C sobre T_{med} para cada una de las seis clases definidas previamente (Cuadro 2). La zonificación de TST fue por segmentación mediante la calculadora ráster utilizando el siguiente algoritmo: $TSTz_i = (TST > T_{med} + 5) \text{ AND } (TST < T_{max})$; donde, $TSTz_i$ es la TST mensual z (°C) para el i ésimo mes.

Zonificación y verificación de campo

Una vez segmentadas las seis categorías de TST se estableció la ubicación y extensión de las zonas con registros de temperatura más caliente como fueron los casos C5(44-56 °C) y C6 (>56 °C); en estas

Table 2. Categories, soil temperature ranges and optimal values of selected organisms in the Lagunera Region.
Cuadro 2. Categorías, rangos de temperatura edáfica y óptimos de algunos organismos de la región Lagunera.

Category/ Clase	Range (°C)/ Rango (°C)	Optimal values by category/ Óptimo por categoría	Reference/ Referencia
C1	≤8	<i>Polaromonas vacuolata</i> and <i>Methanogenium frigidum</i>	Belmar and Alfonso (2018)
C2	8-20	<i>Fragaria vesca</i> L.	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2010; Chaves-Barrantes and Gutiérrez-Soto (2017)
C3	20-32	<i>Fragaria ananassa</i> Duch	Tang et al. (2020); Samad et al. (2021)
		<i>Oryza sativa</i> L.	Jagadish et al. (2007); Nagai and Makino (2009)
		<i>Zea mays</i> L.	Wahid et al. (2007)
		<i>Musa</i> spp.	Sabitti et al. (2018)
C4	32-44	Bacteria of the families <i>Clostridiaceae</i> , <i>Pseudomonaceae</i> , <i>Staphylococcaceae</i> . Fungi of the genera <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> and <i>Fusarium</i> / Bacterias de las familias <i>Clostridiaceae</i> , <i>Pseudomonaceae</i> , <i>Staphylococcaceae</i> . Hongos de los géneros <i>Aspergillus</i> , <i>Penicillium</i> y <i>Fusarium</i>	Laich (2011)
C5	44-56	Bacteria of the genus <i>Bacillus</i> and <i>Actinomicetes</i> fungi / Bacterias del género <i>Bacillus</i> y hongos <i>Actinomicetes</i>	Laich (2011)
C6	>56	Bacteria of the genera <i>Thermus</i> and <i>Hydrogenobacter</i> / Bacterias de los géneros <i>Thermus</i> e <i>Hydrogenobacter</i>	Laich (2011)

zones, four sites were randomly selected, where temperatures were consistently higher during the studied months (Figure 3).

Field verification was carried out at each of the selected sites (A-D, Figure 3) to document six local factors potentially influencing LST: 1) vegetation type, 2) relative vegetation density, 3) physical condition of the topsoil layer, 4) soil color and 5) land use.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

The NDVI was used to determine the distribution and condition of vegetation on the same dates for which the LST was estimated. For this purpose, bands 4 (red) and 5 (near-infrared) were employed, using the following formula: $NDVI = (b5 - b4) / (b5 + b4)$. The spatial relationship between LST and NDVI was classified according to the criteria proposed by López-Pérez et al. (2015), who defined five surface condition categories: 1) <0.01 for clouds, water bodies, or other non-vegetative elements; 2) 0.01-0.1 for bare soil; 3) 0.1-0.2 for areas with sparse vegetation; 4) 0.2-0.4 for areas with moderate vegetation cover; and 5) >0.4 for areas with dense vegetation cover.

se eligieron cuatro sitios al azar, cuyas temperaturas fueron persistentemente más calientes para los meses estudiados (Figura 3).

En cada uno de los sitios elegidos (A-D, Figura 3) se hizo una verificación de campo para recabar evidencia de seis factores locales que podrían influir en la TST como son: 1) tipo de vegetación, 2) densidad relativa de la vegetación, 3) fase física de la capa superior del suelo, 4) color del suelo y 5) uso del suelo.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI se utilizó para determinar distribución y condición de la vegetación en las mismas fechas calculadas de TST; para ello, se emplearon las bandas 4 (rojo) y 5 (infrarrojo Cercano) como: $NDVI = (b5 - b4) / (b5 + b4)$. La relación espacial de TST y NDVI se clasificó conforme a lo propuesto por López-Pérez et al. (2015), quienes definieron cinco categorías por condición de superficie: 1) <0.01 para nubes, agua u otros elementos no vegetales; 2) 0.01-0.1 para suelo desnudo; 3) 0.1-0.2 para zonas con escasa cobertura vegetal; 4) 0.2-0.4 para zonas con mediana cobertura vegetal y 5) >0.4 para zonas con alta cobertura vegetal.

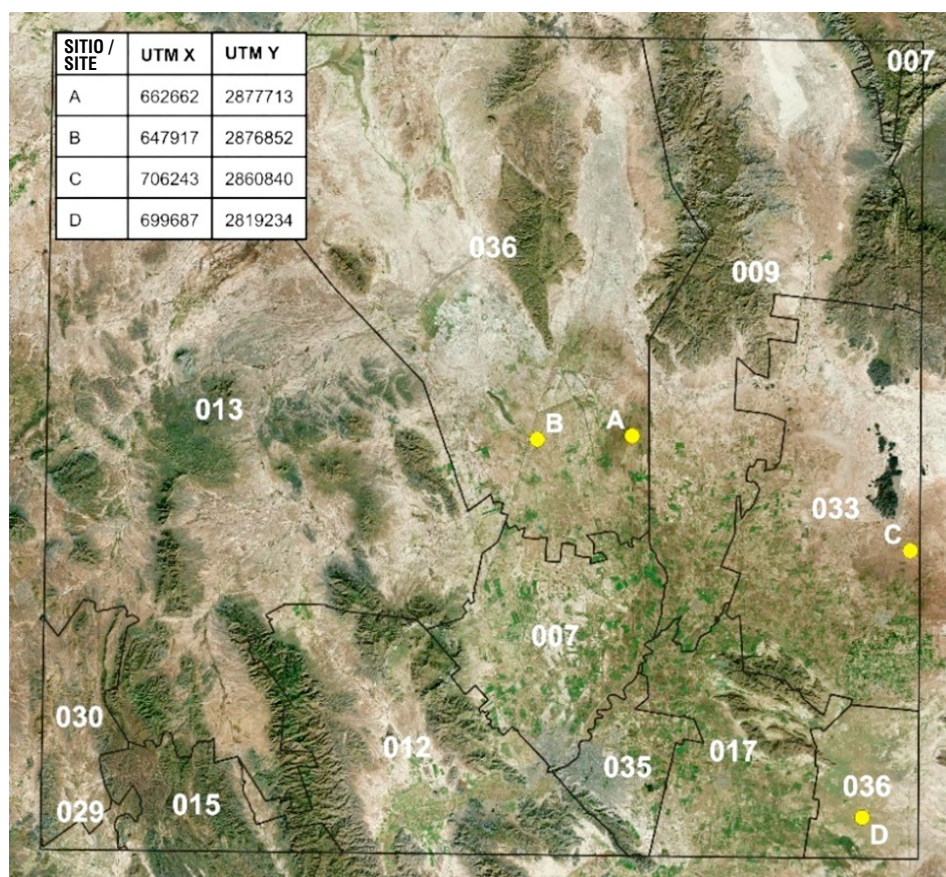


Figure 3. Field verification sites (UTM centroids, in yellow): Sites A, B, C and D were selected to show the highest temperatures in the Lagunera Region. Municipal codes: Francisco I. Madero (009), San Pedro (033), Matamoros (017), Viesca (036) and Torreón (035) in Coahuila, and Lerdo (012), Nazas (015), San Luis del Cordero (029), San Pedro del Gallo (030), Mapimí (013), Gómez Palacio (007) and Tlahualilo (036) in Durango. Study area boundaries (black frame).

Figura 3. Sitios (centroides-UTM) de verificación de campo (amarillo): A, B, C y D elegidos por presentar los meses más calientes en la región Lagunera. Claves municipales: Francisco I. Madero (009), San Pedro (033), Matamoros (017), Viesca (036) y Torreón (035) en Coahuila, y Lerdo (012), Nazas (015), San Luis del Cordero (029), San Pedro del Gallo (030), Mapimí (013), Gómez Palacio (007) y Tlahualilo (036) en Durango. Límites de la unidad de estudio (marco negro).

Soil information

The field data collected were compared with the soil profile identification data provided by INEGI (2013) for the upper soil layers at depths of 0-10 and 0-15 cm. The variables considered included texture, color, and hue, organic matter content, field capacity, permanent wilting point, and electrical conductivity.

Statistical analysis

In addition to field verification, a vector layer was generated in QGIS v 3.30 (2018) with 500 random points, which were used as sampling sites on the LST, ϵ_s and NDVI images of the 18 raster scenes analyzed. Using this data, a simple linear regression analysis was carried out, regarding LST as the independent

Información edafológica

La información recabada en campo se contrastó con los datos de identificación de perfiles edafológicos del INEGI (2013) de las capas superiores del suelo de 0-10 y 0-15 cm de profundidad. Las variables consideradas fueron textura, color y tono, materia orgánica, capacidad de campo, punto de marchitez permanente y conductividad eléctrica.

Análisis estadístico

Además de la verificación de campo, se generó una capa vectorial en QGIS v 3.30 (2018) con 500 puntos aleatorios que se emplearon como sitios de muestreo sobre las imágenes TST, ϵ_s y NDVI de las 18 escenas ráster analizadas. Con estos datos se hizo un análisis de regresión lineal simple, tomando en cuenta la

variable, the standard error, and the uncertainty ($I = s * 2/LSTa$), where s is the standard deviation and $LSTa$ is the average LST. Statistical analyses were carried out in Excel 2016 (Ms Office).

The coefficient of determination (R^2) between TA and LST was determined using the monthly extreme maximum temperature data from 10 weather stations located in the study area, obtained from SMN-CONAGUA (2023), and compared with the maximum temperatures of each analyzed scene.

Results

LST – NDVI spatial distribution

An inversely proportional relationship was observed between NDVI and LST. When the NDVI approaches zero, LST increases throughout the study area. According to the five LST ranges established (Table 2), the predominant classes during 2017 and 2021 were C3(20-32 °C), C4(32-44 °C) and C5(44-56 °C), with extreme anomalous values corresponding to category C6(>56 °C). The highest and most persistent LST, maintained throughout the nine months, was detected in the northeastern portion of the study area in the municipalities of Francisco I. Madero (009) and San Pedro (033), and in the southeastern portion in Matamoros (017) and Viesca (036) (Figure 4). According to the NDVI values (0.01-0.1), these areas showed predominantly bare soil conditions.

Reports from weather stations indicate that the hottest months were May and June, with temperatures ranging around 40 °C (Figures 5b and 5d). The LST estimated showed that the temperature ranges of classes C5(44-56 °C) and C6(\geq 56 °C) had the greatest impact on the territory in both years. In 2017, during June and July, C6 affected 40 to 50 % of the study area. In 2021, C5 was associated with April and May; when the maximum temperature barely reached 35 °C (Figure 5d), LST in May affected nearly 80 % of the study area (Appendix 2; Figure 5).

For most of the study areas in both years, two primary land cover types were observed: a) bare soil (0.01-0.1) and b) sparse vegetation (0.1-0.2), with annual averages of the total area ranging from 40-55 % and 39-55 %, respectively. Areas with semi-evergreen forest (0.2-0.4) and high vegetation cover (>0.4) range between 5 and 6 %. It was also found that during the driest months (November-May), the bare soil conditions in 2017 and 2021 correspond to 46 and 65 %, respectively (Figure 6; Appendix 3).

TST como variable independiente, el error típico y la incertidumbre ($I = s * 2/TSTp$), donde s es la desviación estándar y $TSTp$ es la TST promedio; los análisis estadísticos se realizaron en Excel 2016 (Ms Office).

El coeficiente de determinación (R^2) entre temperatura ambiente y TST se determinó con los datos de las temperaturas máximas extremas mensuales de 10 EMC localizadas en la unidad de estudio, obtenidas del SMN-CONAGUA (2023), y se contrastaron con las temperaturas máximas de cada escena analizada.

Resultados

Distribución espacial de TST - NDVI

Se observó una relación inversamente proporcional entre el NDVI y la TST. Cuando el NDVI se aproxima a cero, la TST incrementa en todo el territorio estudiado. De acuerdo con los cinco rangos establecidos de TST (Cuadro 2), las clases de mayor predominio durante 2017 y 2021 fueron C3(20-32 °C), C4(32-44 °C) y C5(44-56 °C), pero con valores anómalos extremos de la categoría C6(>56 °C). La TST más elevada, y que se mantuvo constante durante los nueve meses, se detectó al noreste de la unidad de estudio en los municipios de Francisco I. Madero (009) y San Pedro (033), y en el sureste en Matamoros (017) y Viesca (036) (Figura 4) se observó una condición predominante de suelo desnudo, de acuerdo con el NDVI (0.01-0.1).

Reportes de las EMC indican que los meses más calientes fueron mayo y junio con temperaturas que fluctuaron alrededor de los 40 °C (Figuras 5b y 5d). La TST calculada mostró que los rangos de temperatura de las clases C5(44-56 °C) y C6(\geq 56 °C) tuvieron los mayores efectos sobre el territorio en ambos años. En 2017 para los meses de junio y julio, la C6 afectó una superficie de 40 a 50 % de la superficie de la unidad de estudio. En 2021, la C5 se asoció a los meses de abril y mayo; cuando la temperatura máxima apenas alcanzó los 35 °C (Figura 5d), la TST en mayo afectó casi 80 % de la unidad de estudio (Apéndice 2; Figura 5).

La mayor parte de la unidad de estudio, para ambos años, presenta principalmente dos condiciones de superficie: a) suelo desnudo (0.01-0.1) y b) escasa vegetación (0.1-0.2), cuyos promedios anuales de la superficie total varían de 40-55 % y 39-55 %, respectivamente. Las áreas con mediana vegetación (0.2-0.4) y alta cobertura vegetal (>0.4) oscilan entre 5 y 6 %. También se encontró que para los meses más secos (noviembre-mayo), la condición de suelo desnudo en 2017 y 2021 fue equivalente al 46 y 65 %, respectivamente (Figura 6; Apéndice 3).

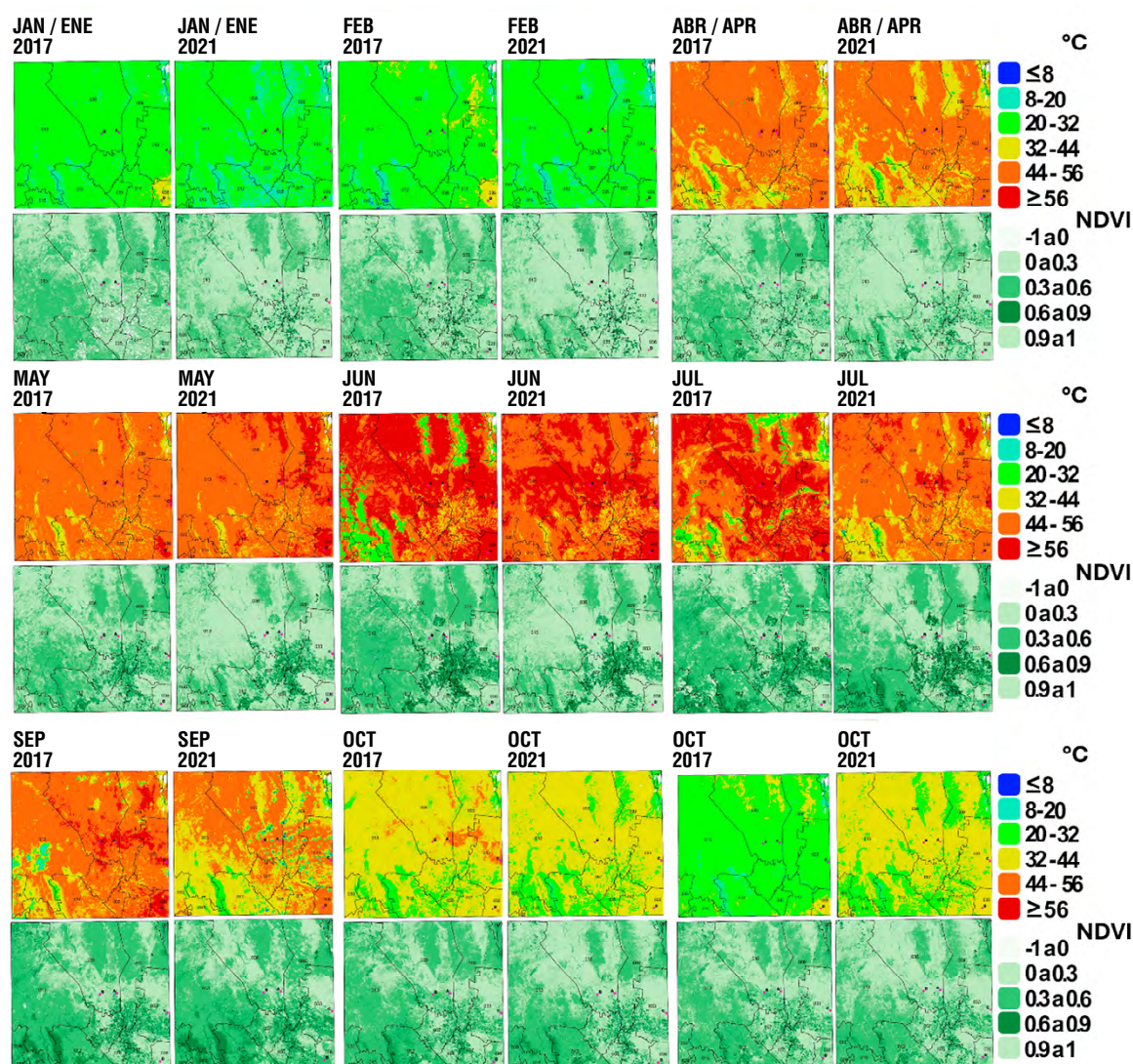


Figure 4. Land surface temperature and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) over nine months in 2017 vs. 2021 in the Lagunera Region.

Figura 4. Distribución de la temperatura superficial terrestre y NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), durante nueve meses del año 2017 vs. 2021 en la región Lagunera.

Field verification

The information collected at the four sites was compiled into five components, as shown in Table 3. Graphical evidence is presented in Figure 7.

Soil properties of the verified sites

The information collected at the four sites (Table 3), when compared with the soil profiles, confirmed the presence of three soil groups: Leptosol, Calcisol and Solonetz. Except for site D, the textural properties reveal a predominance of fractions >0.05 mm, where silts and sands are grouped, resulting in a low available moisture capacity ranging from 3.2 to 6.8 % (Appendix 4).

Verificación en campo

La información recabada en los cuatro sitios se integró en cinco componentes como se muestra en el Cuadro 3. La evidencia gráfica se muestra en la Figura 7.

Propiedades edáficas de los sitios verificados

La información verificada en los cuatro sitios (Cuadro 3), al contrastarse con los perfiles edafológicos, confirmó la presencia de tres grupos de suelo: Leptosol, Calcisol y Solonetz. Con excepción del sitio D, las propiedades texturales revelan predominio de fracciones >0.05 mm donde se agrupan limos y arena, los cuales imponen baja capacidad de humedad aprovechable entre 3.2 y 6.8 % (Apéndice 4).

Table 3. Characteristics of the field verification sites used to gather evidence on local factors that could influence land surface temperature in the Lagunera Region.

Cuadro 3. Características de los sitios de verificación en campo para recabar evidencia de los factores locales que podrían influir en la temperatura superficial terrestre de la región Lagunera.

Component / Componente	Site / Sitio	Description / Descripción
1) Nearest locality / 1) Localidad más cercana	A	El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango
	B	Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango
	C	San Pedro de las Colonias, Coahuila
	D	Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila
2) Type of vegetation / density / 2) Tipo de vegetación / densidad	A	Xerophilous scrubland / sparse / Matorral xerófilo / poco denso
	B	Xerophilous scrubland / moderately dense / Matorral xerófilo / medianamente denso
	C	Xerophilous scrubland / very sparse / Matorral xerófilo / muy poco denso
	D	Xerophilous scrubland / sparse / Matorral xerófilo / poco denso
3) Soil / 3) Suelo	A	Clayey, compact, light-colored / Arcilloso, compacto, color claro
	B	Clayey, compact, light-colored / Arcilloso, compacto, color claro
	C	Clayey, very loose, grayish / Arcilloso, muy suelto, grisáceo
	D	Sandy, compact, light-colored / Arenoso, compacto, color claro
4) Land use / 4) Uso del suelo	A	Chicken farms, barns and maize cultivation, and associated roads and highway / Granjas de pollo, establos y cultivo de maíz, caminos y carretera
	B	Road and irrigation canal / Camino y canal de riego
	C	Highway / Carretera
	D	Highway / Carretera
5) Description / 5) Descripción	A	Completely bare soil areas / Áreas con suelo completamente desnudo
	B	Road next to the canal with salt crusts and natural vegetation / Camino al lado del canal con costras de sales y vegetación natural
	C	Completely bare soil areas / Áreas con suelo completamente desnudo
	D	Natural vegetation / Vegetación natural

Degree of relationship among the studied variables

Grado de relación entre las variables estudiadas

Linear regression between LST and air temperature

Regresión lineal entre TST y temperatura ambiente

Between LST and the air temperature recorded at the 10 weather stations, it was found that in 2017, 95 % of the stations showed R^2 values > 0.7 , except for the weather station 5139 ($R^2 = 0.589$); however, in 2021, this station and stations 5180 and 10085 showed a strong relationship ($R^2 > 0.9$) (Table 4).

Entre TST y la temperatura ambiente de las 10 EMC se encontró que, en 2017, 95 % de estas presentaron valores $R^2 > 0.7$ con excepción de la EMC 5139 ($R^2 = 0.589$); sin embargo, en 2021, esta y las EMC 5180 y 10085 tuvieron fuerte relación ($R^2 > 0.9$) (Cuadro 4).

Linear regression of LST with spectral indices

Regresión lineal de TST con los índices espectrales

In general, the linear regression analysis of the LST- ϵ_s AND LST-NDVI pairings indicates a good relationship

En general, el análisis de regresión lineal en los emparejamientos TST- ϵ_s y TST-NDVI indican buena relación (Cuadro 5) considerando a TST como variable

Table 4. Correlation coefficients (R^2) estimated between air temperature (data from the weather station and land surfaces temperature in the Lagunera Region.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación (R^2) estimados entre temperatura ambiente (datos de la Estación Meteorológica Nacional [EMC]) y temperatura superficial terrestre en la región Lagunera.

Weather station code/ Clave EMC	Weather station name/ Nombre EMC	R^2 (2017)	R^2 (2021)
5053	Matamoros	0.864	0.830
5036	San Pedro	0.820	0.874
5139	Emiliano Zapata	0.589	0.927
5159	Acatita	0.940	0.856
5180	Fco. I. Madero	0.835	0.909
10045	Mapimí	0.840	0.844
10085	Tlahualilo	0.860	0.931
10108	Ciudad Lerdo (DGE)	0.874	0.813
10168	Cartagena	0.872	0.759
10169	Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario (CBTA) Gómez P.	0.774	0.838

DGE = Dirección General Estatal

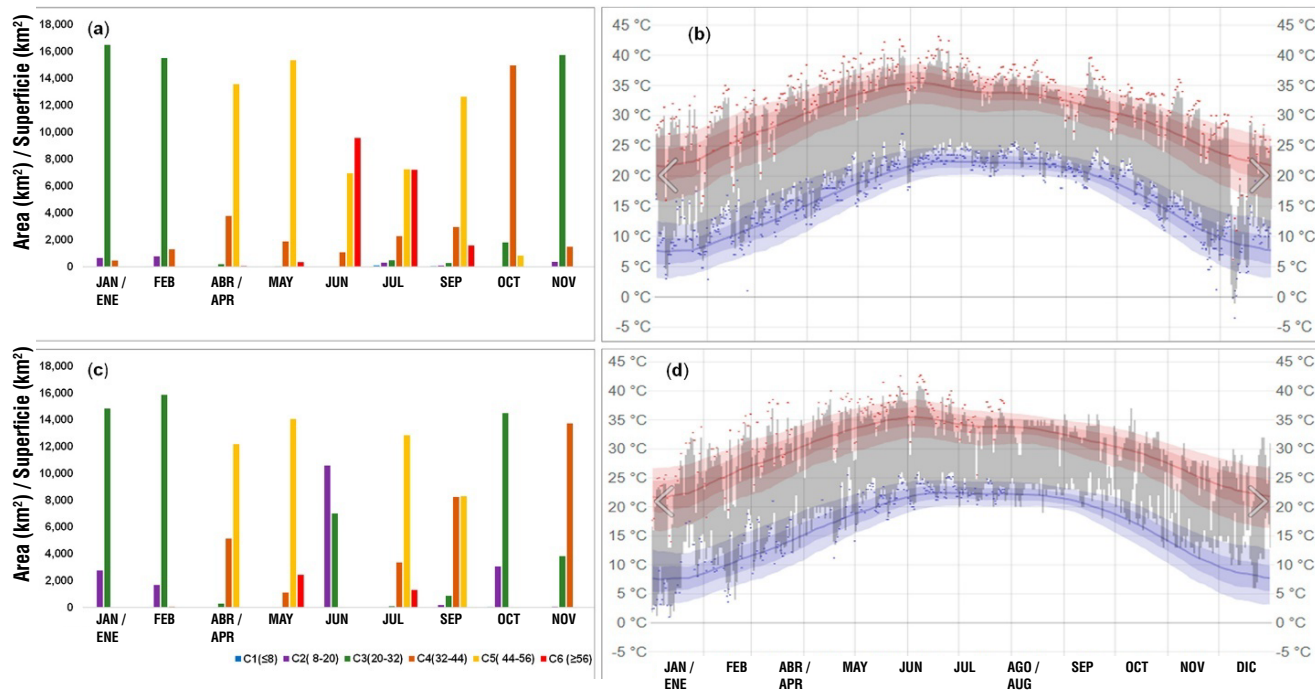


Figure 5. Estimated land surface temperature and daily temperature data for nine months in the two years analyzed: 2017 (a and b) and 2021 (c and d). Figures b and d show maximum temperatures (red) and minimum temperatures (blue). Source: Weather-Spark (2024).

Figura 5. Temperatura superficial terrestre calculada y datos diarios de temperatura de nueve meses en los dos años estudiados: 2017 (a y b) y 2021 (c y d). Las figuras b y d presentan temperaturas máximas (rojo) y mínimas (azul). Fuente: Weather-Spark (2024).

Table 5. Statistical parameters derived from the linear regression analysis, with estimated land surface temperature in the Lagunera Region as the independent variable.

Cuadro 5. Parámetros estadísticos derivados del análisis de regresión lineal, considerando temperatura superficial terrestre estimada en la región Lagunera como variable independiente.

Year/ Año	Month/ Mes	LSTa (°C)/ TSTp (°C)	NDVI						Es					
			β_0	β_1	R ²	SE/ ET	s (°C)	U (%)/ I (%)	β_0	β_1	R ²	SE/ ET	s (°C)	U (%)/ I (%)
2017	Jan/Ene	27.2	0.204	-0.0034	0.774	0.059	1.2	8.8	0.9817	-0.0005	0.985	0.108	2.3	16.9
	Feb	27.6	0.23	-0.0044	0.745	0.062	1.3	9.4	0.9794	-0.0004	0.981	0.124	2.6	18.8
	Apr/Abr	47.9	0.2529	-0.0031	0.822	0.048	1.0	4.2	0.9811	-0.0003	0.986	0.105	2.2	9.2
	May	49.8	0.3739	-0.0054	0.775	0.057	1.2	4.8	0.9874	-0.0004	0.99	0.086	1.8	7.2
	Jun	54.2	0.2564	-0.0025	0.756	0.066	1.4	5.2	0.9736	-0.0001	0.977	0.138	2.9	10.7
	Jul	53.0	0.1917	-0.0012	0.738	0.073	1.5	5.7	0.9699	-0.00003	0.963	0.18	3.8	14.3
	Sep	49.5	0.3503	-0.0045	0.761	0.07	1.5	6.1	0.9778	-0.0002	0.98	0.128	2.7	10.9
	Oct	38.3	0.3356	-0.0057	0.807	0.056	1.2	6.3	0.9803	-0.0003	0.985	0.110	2.3	12.0
	Nov	28.3	0.2397	-0.0046	0.843	0.046	1.0	7.1	0.9836	-0.0005	0.986	0.105	2.2	15.5
2021	Jan/Ene	22.0	0.1596	-0.0029	0.791	0.048	1.1	10.0	0.9743	-0.0003	0.981	0.124	2.7	24.5
	Feb	24.9	0.1971	-0.0041	0.725	0.056	1.2	9.6	0.9732	-0.0002	0.976	0.142	3.1	24.9
	Apr/Abr	44.9	0.2713	-0.0039	0.777	0.05	1.1	4.9	0.9776	-0.0002	0.988	0.097	2.1	9.4
	May	51.9	0.3863	-0.0055	0.736	0.059	1.3	5.0	0.9815	-0.0003	0.99	0.086	1.9	7.3
	Jun	53.8	0.4736	-0.0068	0.737	0.061	1.3	4.8	0.9824	-0.0003	0.991	0.082	1.8	6.7
	Jul	48.9	0.532	-0.0082	0.657	0.089	1.9	7.8	0.9748	-0.0001	0.983	0.120	2.6	10.6
	Sep	42.2	0.284	-0.0037	0.780	0.066	1.4	6.6	0.9753	-0.0002	0.979	0.132	2.9	13.7
	Oct	34.3	0.3735	-0.0076	0.779	0.059	1.3	7.6	0.9798	-0.0003	0.988	0.098	2.1	12.2
	Nov	33.5	0.3069	-0.006	0.785	0.055	1.2	7.2	0.9771	-0.0003	0.989	0.093	2.0	12.0
Vp2017		41.8					1.26	6.4					2.54	12.9
Vp2021		39.6					1.31	7.1					2.37	13.5
Vp17-21		40.7					1.28	6.7					2.45	13.2
Ds17-21		11.2					0.21	1.8					0.51	5.3

SE = Standard error; s = sample standard deviation; LSTa = mean land Surface temperature; U = Uncertainty ($I = 2s/LSTa*100$); Vp17-21 = average value for the years 2017 and 2021; Ds17-21 = standard deviation for the years 2017-2021. NDVI = normalized difference vegetation index, Es = surfaces emissivity.

ET = Error típico; s = desviación estándar muestral; TSTp = temperatura superficial terrestre promedio; I = Incertidumbre ($I = 2s/TSTp*100$); Vp17-21 = valor promedio de los años 2017 y 2021; Ds17-21 = desviación estándar de los años 2017-2021. NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada, Es = emisividad de la superficie.

(Table 5), with LST as the independent variable and NDVI or Es as the dependent variables ($NDVI = \beta_0 + \beta_1*LST$ and $Es = \beta_0 + \beta_1*LST$). Although Es is a better predictor than NDVI; NDVI shows an average uncertainty 2.9 times lower than Es, when calculating LST for all analyzed months in both years

Discussion

High temperatures and probable causes

In hot deserts, large temperature variations between day and night are common. Morning radiative incidence initiates a surface heating process, with daytime maximum surface temperature reaching up to 80 °C, exceeding air temperature (Farhad & Monger, 2020).

independiente y NDVI o Es como variables dependientes ($NDVI = \beta_0 + \beta_1*TST$ y $Es = \beta_0 + \beta_1*TST$). Se puede apreciar que Es es mejor predictor que NDVI; sin embargo, en el cálculo de TST para todos los meses analizados, NDVI presenta 2.9 veces menor incertidumbre promedio que Es, para ambos años.

Discusión

Temperaturas elevadas y causas probables

En los desiertos calientes es común la gran variabilidad de la temperatura entre el día y la noche, de modo que la incidencia radiativa matutina inicia un proceso de calentamiento de las superficies que alcanzan temperaturas máximas diurnas de hasta 80 °C, mayor

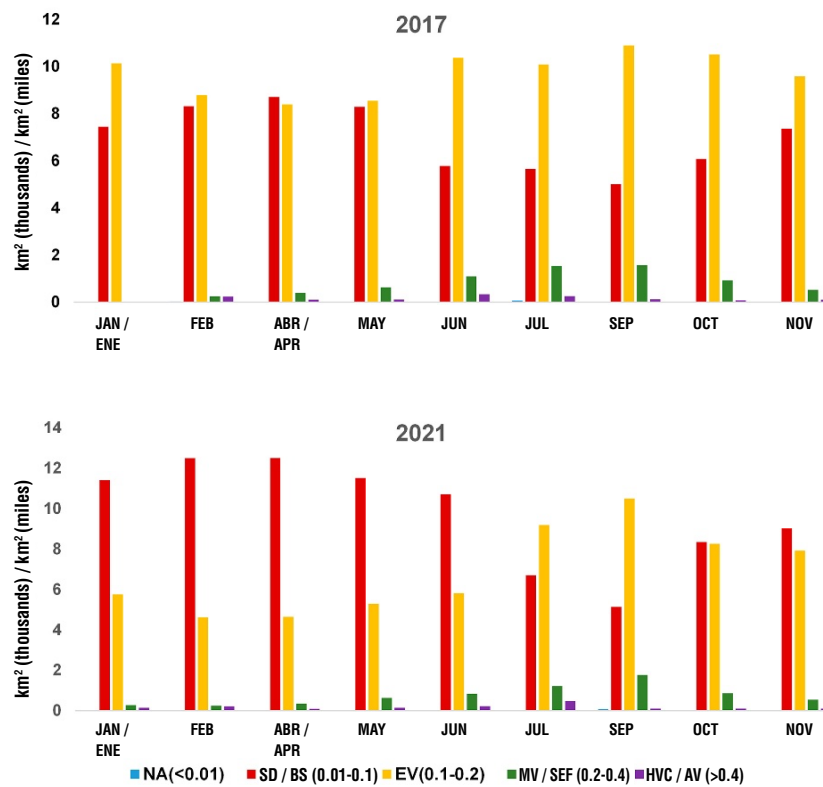


Figure 6. Surface changes in five NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) classes defined in the Lagunera Region during nine months of the two study years. NDVI classes: bare soil (BS), sparse vegetation (SV), semi-evergreen forest (SEF) and high vegetation cover (HVC).

Figura 6. Cambios de superficie en cinco clases de NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada) definidas en la región Lagunera durante nueve meses de dos años de estudio. Clases NDVI: suelo desnudo (SD), escasa vegetación (EV), mediana vegetación (MV) y alta cobertura vegetal (AV).

In recent years, arid regions, particularly in North America (Yan et al., 2020), have recorded unusually high temperatures (25-40 °C) that are attributed to changes in precipitation and temperature patterns resulting from prolonged droughts, water scarcity, high solar radiation, and low vegetation cover (Gohain et al., 2021; Tariq et al., 2020). This study documents some of these effects in the year 2017 and 2021, which experienced more intense droughts and higher-than-normal temperatures (SMN-CONAGUA, 2025). Furthermore, the close relationship between elevated temperatures and land surface temperature (LST) observed in this study is consistent throughout the analysis (Figures 4 and 7).

The behavior of *LST* in terms of its maximum extent (>12000 km²) and magnitude for C6(>56 °C) reflects a regional daytime energy balance, in which sensible heat is primarily concentrated in the upper soil layer and at the soil-atmosphere interface. This pattern agrees with the air temperature values observed in the EMC, suggesting a possible transition from arid to hyper-arid conditions. According to Yan et al. (2020), *LST* in North America has increased by an average of 1.92 °C in recent years (2002-2018), with

que la temperatura del aire (Farhad & Monger, 2020).

En años recientes, las zonas áridas, particularmente en Norteamérica (Yan et al., 2020), han registrado temperaturas elevadas fuera de rango (25-40 °C) que son atribuidas a cambios en los patrones de precipitación y temperatura, debido a sequías prolongadas, escasez de agua, radiación solar alta y cobertura vegetal baja (Gohain et al., 2021; Tariq et al., 2020). En este trabajo se evidencian algunos de esos efectos en los años 2017 y 2021, que presentaron sequías y temperaturas más intensas de lo habitual (SMN-CONAGUA, 2025); además, la relación estrecha que hay entre las temperaturas más elevadas y la TST que es consistente en el presente estudio (Figuras 4 y 7).

El comportamiento de la TST en términos de extensión máxima (>12000 km²) y magnitud para C6(>56 °C) muestra un balance de energía diurno regional, donde el calor sensible se concentra primordialmente en la capa superior del suelo y en la interfase suelo atmósfera. Esto coincide con los valores de temperatura ambiente en las EMC, de tal manera que podría considerarse como una señal de cambio de una condición de árido a hiperárido. Yan et al. (2020) mencionan que la TST

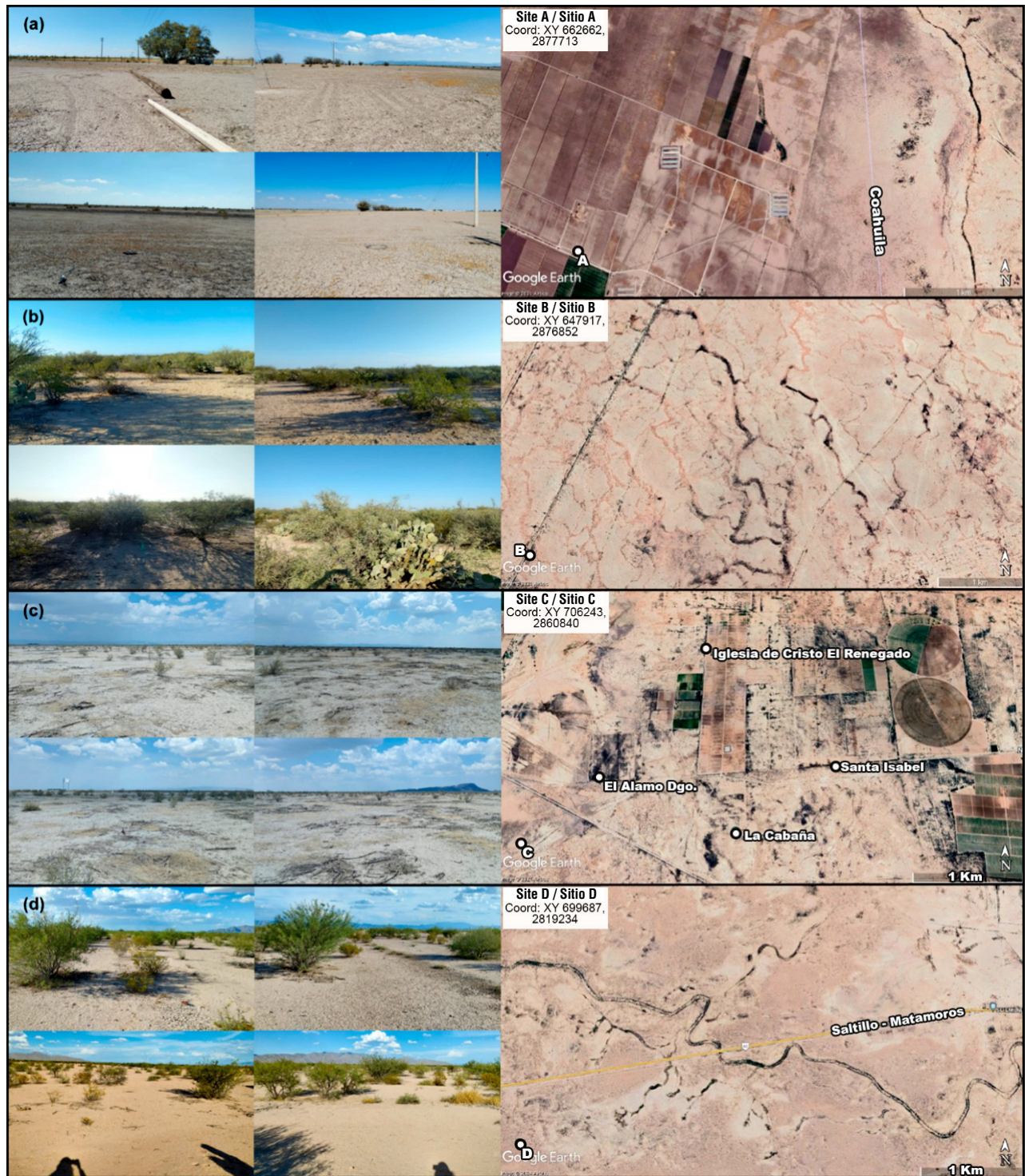


Figure 7. Field verification sites in the Lagunera Region. Aerial images at 1 km altitude; those on the left were taken at the four cardinal points, starting at north and proceeding clockwise. (a) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; (b) Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; (c) San Pedro de las Colonias, Coahuila; (d) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila.

Figura 7. Sitios de verificación de campo en la región Lagunera. Imágenes aéreas a 1 km de altura; las de la izquierda se tomaron a los cuatro puntos cardinales, iniciando en el norte y continuando en el sentido de las manecillas del reloj. (a) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; (b) Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; (c) San Pedro de las Colonias, Coahuila; (d) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila.

maximum values reaching 67.73 °C, while the Baja California Peninsula shows the highest average LST at 32.41 °C. Furthermore, Žgela et al. (2024) report contrasting LST values between urban and natural environments.

Evaluation of indicators: Surface emissivity and NDVI

From a thermal perspective, emissivity ε is an ideal indicator that reveals the intrinsic characteristics and functioning of the surface upon which shortwave radiative energy (R_{sc}) is incident and subsequently reemitted as longwave energy (R_{ol}). Emissivity can be attributed to the atmosphere (ε_{a}), bare soil (ε_{sd}) or vegetation (ε_{v}). This concept is grounded in blackbody theory, which states that “any body can absorb and emit energy across all wavelengths” (Hamlyn, 2014).

In calibrated LANDSAT (L2-C2) products, as in this case, ε_{s} is considerably more accurate due to the sensor's enhanced radiometric, spectral, spatial, and temporal resolution. This likely provides greater accuracy than studies relying on algorithmic approaches (e. g., ‘Split Window’ and ‘Doble Window’), which are often labor-intensive (Mujabar, 2019; Wang et al., 2020) and generally use default emissivity ε values associated with NDVI (Arabi Aliabad et al., 2021).

Abulibdeh (2021) analyzed the relationship between LST and NDVI in the arid and semi-arid regions of the Persian Gulf and found that bare soils show higher temperatures than urban and vegetated areas, with variations of 1 to 2 °C for the former and 1 to 7 °C for the latter. Meanwhile, Iqbal and Alí (2022), in a semi-arid to arid environment in northwestern Pakistan, demonstrated that linear and quadratic models are effective for estimating air temperature from LST, yielding Pearson correlation coefficients of 0.62 and 0.78 in summer and 0.59 and 0.78 in winter.

Additional indicators

Statistical parameters

The negative coefficients (β_1) representing the slopes of the linear regression models obtained (Table 5), for both NDVI and ε_{s} , are consistent with the triangle theory proposed by Goward et al. (1985) and applied in studies of similar conditions (Kumar et al., 2022; Tang et al., 2010) in the study area. In other words, as both indices approach zero, LST increases. This temperature rise is particularly pronounced in the study region, where LST exceeded twice the normal values during the hottest month. These observations are in agreement with the BWhw climate type, which covers nearly 80.4 % of the area according to INEGI (2008).

en Norteamérica ha mostrado aumento de 1.92 °C en promedio en los últimos años (2002-2018), con máximas de 67.73 °C, y que la península de California tiene TST promedio más elevada con 32.41 °C. Además, Žgela et al. (2024) advierten TST contrastantes entre ambientes urbanos y de condición natural.

Evaluación de indicadores: emisividad de la superficie y NDVI

Desde el punto de vista térmico, la emisividad ε es un indicador perfecto que revela las características y funcionamiento intrínseco de la superficie donde incide la energía radiativa de onda corta (R_{oc}) y se reemite como energía de onda larga (R_{ol}), la cual puede estar referida a la atmósfera (ε_{a}), el suelo desnudo (ε_{sd}) y la vegetación (ε_{v}). Esto se explica a partir de la teoría del cuerpo negro que establece que «cualquier cuerpo puede absorber y emitir energía en todas las longitudes de onda» (Hamlyn, 2014).

En productos calibrados de LANDSAT (L2-C2), como en este caso, ε_{s} es mucho más preciso debido a su mejor resolución (radiométrica, espectral, espacial y temporal), superando probablemente estudios con base en algoritmos (v. g., ‘Split Window’ y ‘Doble Window’) cuyos procesos son laboriosos (Mujabar, 2019; Wang et al., 2020) y donde emplean valores por defecto de ε asociados al NDVI (Arabi Aliabad et al., 2021).

Abulibdeh (2021) analizó la relación entre TST y NDVI en la región árida y semiárida del golfo Pérsico y encontró que los suelos desnudos tenían temperaturas más altas que las áreas urbanas y verdes que fluctuaban entre 1 y 2 °C para las primeras y entre 1 y 7 °C para las segundas. Por su parte, Iqbal y Alí (2022), en un entorno semiárido a árido en el noroeste de Pakistán, comprobaron que los modelos lineales y cuadráticos son efectivos para estimar la temperatura ambiente a partir de la TST con coeficientes de correlación de Pearson de 0.62 y 0.78 para el verano y de 0.59 y 0.78 para el invierno.

Indicadores adicionales

Parámetros estadísticos

Los coeficientes negativos (β_1) que representan la pendiente de los modelos de regresión lineal obtenidos (Cuadro 5), tanto para NDVI como para ε_{s} , son acordes con la teoría del triángulo propuesto por Goward et al. (1985), aplicada en trabajos de condiciones semejantes (Kumar et al., 2022; Tang et al., 2010) a la unidad de estudio. En otras palabras, en la medida que ambos índices tienden a cero, la TST es mayor; este aumento de temperatura es muy notorio en la zona estudiada, donde la TST fue más del doble de lo normal durante el

Soil component

Leptosols are very thin soils, often stony, with a high calcium carbonate (CaCO_3) content and are highly susceptible to erosion. The vegetation that predominantly develops on these soils is rosetophilous desert scrub. Calcisols are characterized by a high CaCO_3 content (>15 %) in the surface layer, which may be cemented. They are primarily found in arid regions in the northern part of the country. Solonetz soils have a more alkaline pH (>8.5) with subsurface layers commonly hardened. These soils are typically located in hot dry climates with high sodium concentrations (González & Chávez-García, 2025).

On the other hand, Bindajam et al. (2020) reported that in semi-arid regions, the highest LST values are observed in rocky areas and on built-up surfaces. In contrast, Singh et al. (2023) found a low correlation ($r = 0.12$) between LST and calcium carbonate (CaCO_3). This weak association is attributed to the prevalence of light-colored soils, which reflect a larger proportion of incident solar radiation. The reflected radiation is captured by the thermal bands of satellite sensors, resulting in apparently elevated temperature readings. Additionally, a high clay content alters the specific heat of the soil by reducing the proportion of macropores, thereby limiting air and water circulation within the soil profile (Rucks et al., 2004).

Conclusions

A strong correlation was confirmed between land surface temperature (LST), spectral indicators, and air temperature. The spatiotemporal distribution analysis indicates that the highest LST values are directly associated with soil degradation characteristics and sparse vegetation cover. This underscores the significant influence of anthropogenic factors, such as vegetation cover and land use change, as key controllers of LST, and as their potential impacts of short-term weather events (heat waves) and medium-term phenomena (droughts), and their likely contribution to climate change, which may threaten the establishment of wild species. This study can serve as a basis for estimating LST at larger scales and support public policy decisions related to sustainable development, climate change mitigation, natural area restoration, and agricultural planning.

Acknowledgments

The authors thank to the Graduate Program in Natural Resources and Environment of Arid Zones at the Universidad Autónoma Chapingo-URUZA for the education and support provided. Special thanks are extended to the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) for the master's scholarship (CVU 1183399).

mes más caluroso. Esto concuerda con el tipo de clima BWhw, que cubre casi toda el área (80.4 %), según el INEGI (2008).

Componente edáfico

Los Leptosoles son suelos muy delgados, particularmente pedregosos con un contenido alto de carbonatos de calcio (CaCO_3) y son susceptibles a erosión; la vegetación que más se desarrolla en este tipo de suelos es el matorral desértico rosetófilo. En cuanto a los Calcisoles, los suelos tienen contenido alto de CaCO_3 (>15 %) en su capa superficial, la cual puede estar cementada. Se encuentran principalmente en zonas áridas al norte del país. Por su parte, los Solonetz tienen pH más alcalino (>8.5) y las capas del subsuelo comúnmente se encuentran endurecidas. Este tipo de suelos se localizan en lugares con clima seco caluroso con concentraciones altas de sodio (González & Chávez-García, 2025).

Por otro lado, Bindajam et al. (2020) reportaron que, en zonas semiáridas, las TST más elevadas se registran en áreas rocosas y en superficies construidas. En contraste, Singh et al. (2023) encontraron una correlación baja ($r = 0.12$) entre la TST y el contenido de carbonatos (CaCO_3). Esta débil asociación se atribuye al predominio de suelos de color claro, los cuales reflejan una mayor proporción de la radiación solar incidente. Dicha radiación reflejada es captada por las bandas térmicas de los sensores satelitales, generando registros de temperatura aparentemente altos. Adicionalmente, un alto contenido de arcillas modifica el calor específico del suelo, al reducir la proporción de macroporos y, por ende, limitar la circulación de aire y agua en el perfil (Rucks et al., 2004).

Conclusiones

Se comprobó la alta correlación que existe entre la temperatura superficial terrestre (TST) con los indicadores espectrales y la temperatura ambiente. El análisis de la distribución espacio-temporal advierte que los valores más altos de TST tienen relación directa con las características del deterioro del suelo y con la cobertura vegetal escasa. Esto resalta la gran influencia de los factores antrópicos (cambio de uso de suelo y cobertura vegetal) como controladores de la TST y las repercusiones posibles con los fenómenos meteorológicos de plazo corto (ondas de calor) y medio (sequías), así como su probable contribución con el cambio climático, que pudieran poner en riesgo el establecimiento de especies silvestres. Este trabajo puede servir como base para calcular TST a mayor escala, para la toma de decisiones de políticas públicas de desarrollo sostenible y de mitigación al cambio climático, restauración de áreas naturales, así como para particulares en la planificación agrícola.

Conflict of interest declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

References / Referencias

- Abedrabboh, O., Rami Alfarrá, M., Al-Ansari, T., Fountoukis, Ch. (2025). Enhancing human thermal comfort in hot arid cities: A systematic review of urban heat island observations and mitigation strategies. *Building and Environment*, 283, 113398. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113398>.
- Abulibdeh, A. (2021). Análisis de las características de las islas de calor urbanas y estrategias de mitigación para ocho ciudades de la región árida y semiárida del golfo. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 80, 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09540-7>
- Arabi Aliabad, F., Zare, M., & Ghafarian Malamiri, H. (2021). A comparative assessment of the accuracies of split-window algorithms for retrieving land surface temperature using Landsat 8 data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 2267–2281. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01007-1>
- Belmar, R., & Alfonso, V. (2018) Microorganismos extremófilos. Psicrófilos y sus mecanismos de adaptación. *Nature*, 409, 1092-1101. <https://doi.org/10.17159/sajs.2018/20170254>
- Bindajam, A. A., Mallick, J., AlQadhi, S., Singh, C. K., & Hang, H. T. (2020). Impacts of vegetation and topography on land surface temperature variability over the semi-arid mountain cities of Saudi Arabia. *Atmosphere*, 11(7), 762. <https://doi.org/10.3390/atmos11070762>
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2017). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237-253. <http://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Khormali, F., & Monger, C. (2020). Hot desert soils – Global distribution and unique characteristics. *Geoderma Regional*, 23, e00330. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00330>
- González, M.B., & Chávez-García, E. (2025). *Soils of Mexican deserts: Characteristics and water management challenges. Book soil improvement and water conservation biotechnology*. Bentham Science Publishers. <https://www.benthamdirect.com/content/books/9789815322439.chapter-2>
- Gohain, K. J., Mohammad, P., & Goswami, A. (2021). Assessing the impact of land use land cover changes on land surface temperature over Pune city, India. *Quaternary International*, 575, 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.052>
- Goward, S., Cruickshanks, G. D., & Hope, A. (1985). Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape. *Remote Sensing of Environment*, 18, 137-146. [http://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90044-6](http://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90044-6)
- Guha, S., & Govil, H. (2021). An assessment on the relationship between land surface temperature and normalized difference

Agradecimientos

Se agradece al posgrado en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo-URUZA por la formación y el apoyo proporcionado. Se hace especial mención al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) por la beca de maestría (CVU 1183399).

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.

Fin de la versión en español

- vegetation index. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 1944–1963. <http://doi.org/10.1007/s10668-020-00657-6>
- Hamlyn, G. J. (2014). *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology* (3rd. ed.). Cambridge University Press.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007a). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Hidalgo del Parral*. <http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236052>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2007b). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Juan Aldama*. <http://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236014>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2007c). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Monclova*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236151>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2007d). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Santiago Papasquiaro*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236083>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2007e). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Tlahualilo de Zaragoza*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236069>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2007f). *Conjunto de datos vectorial edafológico. Escala 1:250,000, Serie II. Continuo Nacional, Torreón*. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825236090>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2008). *Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas*. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Conjunto de datos de perfiles de suelos. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional)*. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018a). *Conjunto*

- de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018b). *División política municipal 1:250000. Aguascalientes, México*. Consultado (15/03/2023): https://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Consultado (15/03/2023): <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#tabulados>
- Iqbal, B., & Ali, M. (2022). Estimación de la temperatura del aire espacio-temporal a partir de LST satelital en un ambiente semiárido a árido en la cuenca de Peshawar, noroeste de Pakistán. *Avances en la Investigación Espacial*, 70(4), 961-975. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.052>
- Jagdish, S. K., Craufurd, P. Q., & Wheeler, T. (2007). High temperature stress and spikelet fertility in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, 58(7), 1627-1635. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm003>
- Kumar, P. B., Babu, K. R., Anusha, B. N., & Rajasekhar, M. (2022). Geo-environmental monitoring and assessment of land degradation and desertification in the semi-arid regions using Landsat 8 OLI / TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges*, 8(100578). <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100578>
- Laich, F. (2011). *El papel de los microorganismos en el proceso de compostaje*. <https://www.icia.es/biomusa/en/jornadas-y-actividades/jornada-tecnica-sobre-calidad-y-fertilidad-del-suelo/65-el-papel-de-los-microorganismos-en-el-proceso-de-compostaje/file>
- López-Pérez, A., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2015). Priorización de áreas de intervención mediante análisis morfométrico e índice de vegetación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 121-137. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222015000100007&script=sci_arttext
- Lovriha, I. M. (2022). Una revisión sobre la isla de calor urbana y sus particularidades en zonas desérticas de México. *Vivienda y comunidades sustentables*, (12), 9-25. <http://doi.org/10.32870/rvcs.v0i12.196>
- Nagai, T., & Makino, A. (2009). Differences between rice and wheat in temperature responses of photosynthesis and plant growth. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 744-755. <http://doi.org/10.1093/pcp/pcp029>
- Nazarenko, N., Panina, M., & Sherstobitov, Y. (2025). Modern forest-climatic conditions and forest typological zoning of Kazakhstan. *E3S Web of Conferences*, 623, 01035. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202562301035>
- Mujabar, P. S. (2019). Spatial-temporal variation of land surface temperature of Jubail Industrial City, Saudi Arabia due to seasonal effect by using Thermal Infrared Remote Sensor (TIRS) satellite data. *Journal of African Earth Sciences*, 155, 54-63. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.008>
- Peng, W., Zhou, J., Wen, L., Xue, S., & Dong, L. (2016). Land surface temperature and its impact factors in Western Sichuan Plateau, China. *Geocarto International*, 32(8), 919-934. <http://doi.org/10.1080/10106049.2016.1188167>
- Przeździecki, K., Zawadzki, J. J., Urbaniak, M., Ziemblińska, K., & Miatkowski, Z. (2023). Using temporal variability of land surface temperature and normalized vegetation index to estimate soil moisture condition on forest areas by means of remote sensing. *Ecological Indicators*, 148, 110088. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110088>
- QGIS (2018). *QGIS v3.30 de acceso libre para pc en ambiente Windows*. <https://download.qgis.org/downloads/>
- Ramakreshnan, L., & Aghamohammadi, N. (2024). The application of nature-based solutions for urban heat island mitigation in Asia: Progress, challenges, and recommendations. *Current Environmental Health Reports* 11, 4-17. <https://doi.org/10.1007/s40572-023-00427-2>
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades físicas del suelo*. Universidad de la República: Facultad de agronomía. Montevideo, Uruguay. <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>
<http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades%20fisicas%20del%20suelo.pdf>
- Sabiiti, G., Ininda, J. M., Ogallo, L. A., Ouma, J., Artan, G., Basalirwa, C., Opijah, F., Nimusiima, A., Ddumba, S. D., Mwesigwa, J. B., Otieno, G., & Nanteza, J. (2018). Adapting agriculture to climate change: Suitability of banana crop production to future climate change over Uganda. In W. Leal Filho, & J. Nalau, (Eds.), *Limits to climate change adaptation. Climate change management* (pp. 175-190). Springer, Cham. http://doi.org/10.1007/978-3-319-64599-5_10
- Samad, S., Butare, D., Marttila, S., Sønsteby, A., & Khalil, S. (2021). Effects of temperature and photoperiod on the flower potential in everbearing strawberry as evaluated by meristem dissection. *Horticulturae*, 7(11), 484. <http://doi.org/10.3390/horticulturae7110484>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2010). *Capacitación en línea, EDUSIAP*. https://encuestascontinuas.siap.gob.mx/edu_siap/segunda.php?cv_cultivo=14000&cv_ciclo=1
- Singh, V. K., Prakash, R., & Kushwaha, D. P. (2023). Impacto de la temperatura de la superficie en las propiedades químicas del suelo mediante un enfoque acoplado de imágenes de satélite, pruebas gamma y modelos basados en regresión en zonas semiáridas. In *Desarrollo y gestión de recursos de aguas superficiales y subterráneas en la región semiárida: estrategias y soluciones para la gestión sostenible del agua* (pp. 337-363). Cham: Editorial Internacional Springer.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (15 de febrero de 2023). *Normales climatológicas por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=dgo>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). *Se pronostican temperaturas máximas superiores a 45 grados Celsius en seis entidades de México*. *Comunicado de Prensa No. 0332-24 (15/05/2024)*. <https://smn.conagua.gob.mx/files/pdfs/comunicados-de-prensa/Comunicado0332-24.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2025). *Monitor de Sequía en México* [Conjunto de datos]. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban

- temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Tang, R., Zhao-Liang, L., & Tang, B. (2010). An application of the Ts–VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. *Remote Sensing of Environment*, 114(3), 540-551. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.012>
- Tang, Y., Ma, X., Li, M., & Wang, Y. (2020). The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse. *Energía Solar*, 195, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070>
- Tariq, A., Riaz, I., Ahmad, Z., Yang, B., Amin, M., Kausar, R., Andleeb, S., Farooqi, M. A., & Rafiq, M. (2020). Land surface temperature relation with normalized satellite indices for the estimation of spatio-temporal trends in temperature among various land use land cover classes of an arid Potohar region using Landsat data. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-15. <http://doi.org/10.1007/s12665-019-8766-2>
- Tulandi, D. A., & Aloanis, A. A. (2021). Dynamics analysis of surface temperature and vegetation index in settlement area around the Lokon Volcano, Tomohon, North Sulawesi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 9(10), 118-129. <http://doi.org/10.4236/gep.2021.910009>
- Twumasi, Y. A., Merem, E. C., Namwamba, J. B., Mwakimi, O. S., Ayala-Silva, T., Frimpong, D. B., Ning, Z. H., Asare-Ansah, A., Annan, J. B., Oppong, J., Loh, P. M., Owusu, F., Jeruto, V., Petja, B. M., Okwemba, R., McClendon-Peralta, J., Akinrinwoye, C. O., & Mosby, H. J. (2021). Estimation of land surface temperature from Landsat-8 OLI thermal infrared satellite data. A comparative analysis of two cities in Ghana. *Advances in Remote Sensing*, 10(4), 131-149. [10.4236/ars.2021.104009](https://doi.org/10.4236/ars.2021.104009)
- U.S. Geological Survey (USGS). (2023). *Earth explorer* [Dataset]. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- U. S. Geological Survey (USGS). (2024). *Landsat collection 2 surface reflectance*. Retrieved on July 22, 2024 from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants: an overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), 199-223. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wan Mohd Jaafar, W. S., Abdul Maulud, K. N., Muhmad Kamarulzaman, A. M., Raihan, A., Md Sah, S., Ahmad, A., Saad, S. N. M., Mohd Azmi, A. T., Jusoh Syukri, N. K. A., & Razzaq Khan, W. (2020). The influence of deforestation on land surface temperature—A case study of Perak and Kedah, Malaysia. *Forests*, 11(6), 70. <https://doi.org/10.3390/f11060670>
- Wang, L., Lu, Y., & Yao, Y. (2019). Comparison of three algorithms for the retrieval of land surface temperature from Landsat 8 Images. *Sensors*, 9(22), 5049. <http://doi.org/10.3390/s19225049>
- Wang, J., Lu, L., Zhou, X., Huang, G., & Chen, Z. (2025). Spatio-temporal patterns and drivers of the urban heat island effect in arid and semi-arid regions of Northern China. *Remote Sensing*, 17(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/rs17081339>
- Weather-Spark (2024). *El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo*. Cedar Lake Ventures, Inc. <https://es.weatherspark.com/>
- Yan, Y., Mao, K., Shi, J., Piao, S., Shen, X., Dozier, J., Liu, Y., Ren, H., & Bao, Q. (2020). Driving forces of land surface temperature anomalous changes in North America in 2002–2018. *Science Reports*, 10, 6931. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63701-5>
- Yantao, Xi., Wang, S., Zou, Y., Zhou, X., & Zhang, Y. (2024). Seasonal surface urban heat island analysis based on local climate zones. *Ecological Indicators*, 159(2), 111669. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111669>
- Žgela, M., Herczeg-Bulić, I., Lozuk, J., & Jureša, P. (2024). Linking land surface temperature and local climate zones in nine Croatian cities. *Urban Climate*, 54, 101842. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101842>
- Zhang, M., Cao, Y., Zhang, Z., Zhang, X., Liu, L., Chen, H., Gao, Y., Yu, F., & Liu, X. (2024). Spatiotemporal variation of land surface temperature and its driving factors in Xinjiang, China. *Journal of Arid Land*, 16(3), 373-395. <https://doi.org/10.1007/s40333-024-0072-5>

Appendix 1. Nomenclature of LANDSAT collections (NC) downloaded by study year.**Apéndice 1. Nomenclatura de colecciones (NC) LANDSAT descargadas por año de estudio.**

Month	NC-LANDSAT-2017	NC-LANDSAT-2021
Jan/Ene	LC08_L2SP_030042_20170119_20200905_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210114_20210308_02_T1_ST_B10
Feb	LC08_L2SP_030042_20170220_20200905_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210215_20210301_02_T1_ST_B10
Apr/Abr	LC08_L2SP_030042_20170409_20200904_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210420_20210430_02_T1_ST_B10
May	LC08_L2SP_030042_20170511_20201016_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210522_20210529_02_T1_ST_B10
Jun	LC08_L2SP_030042_20170628_20200903_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210607_20210615_02_T1_ST_B10
Jul	LC08_L2SP_030042_20170730_20200903_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210725_20210803_02_T1_ST_B10
Sep	LC08_L2SP_030042_20170916_20200903_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20210911_20210916_02_T1_ST_B10
Oct	LC08_L2SP_030042_20171103_20200902_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20211029_20211109_02_T1_ST_B10
Nov	LC08_L2SP_030042_20171119_20200902_02_T1_ST_B10	LC08_L2SP_030042_20211114_20211125_02_T1_ST_B10

Appendix 2. Area affected in the Lagunera Region by each temperature class in two study years.**Apéndice 2. Superficie afectada en la región Lagunera por cada clase de temperatura en dos años de estudio.**

Year/ Año	Month/ Mes	Area (km ² , %)/Superficie (km ² , %)					
		C1 (≤8 °C)	C2 (8-20 °C)	C3 (20-32 °C)	C4 (32-44 °C)	C5 (44-56 °C)	C6 (≥56 °C)
2017	Jan/Ene	0(0)	651(3.7)	16 487.1(93.7)	457.6(2.6)	0(0)	0(0)
	Feb	17.6(0.1)	774.2(4.4)	15 501.8(88.1)	1 302.1(7.4)	0(0)	0(0)
	Apr/Abr	0(0)	0(0)	193.6(1.1)	3 783.1(21.5)	13 566.3(77.1)	52.7(0.3)
	May	0(0)	0(0)	35.2(0.2)	1 882.7(10.7)	15 343.5(87.2)	334.3(1.9)
	Jun	0(0)	0(0)	0(0)	1 073.3(6.1)	6 950.3(39.5)	9 572.1(54.4)
	Jul	105.6(0.6)	299.2(1.7)	475.1(2.7)	2 269.8(12.9)	7 249.4(41.2)	7 196.6(40.9)
	Sep	52.8(0.3)	88(0.5)	281.5(1.6)	2 956.1(16.8)	12 633.7(71.8)	1 583.6(9)
	Oct	0(0)	7(0.04)	1 812.4(10.3)	14 949.3(84.96)	827(4.7)	0(0)
	Nov	0(0)	369.5(2.1)	15 730.6(89.4)	1 495.6(8.5)	0(0)	0(0)
	Average/ Promedio	19.5(0.1)	243.2(1.4)	5 613(31.9)	3 352.1(19.1)	6 285.5(35.7)	2 082.1(11.8)
	SD/DesvSt	36.7(0.2)	300.9(1.7)	7 743.2(44)	4 463.5(25.4)	6 374.2(36.2)	3 657.5(20.8)
2021	Jan/Ene	0(0)	2 762.5(15.7)	14 833.2(84.3)	0(0)	0(0)	0(0)
	Feb	5.3(0.03)	1 671.6(9.5)	15 866(90.17)	52.8(0.3)	0(0)	0(0)
	Apr/Abr	0(0)	0 (0)	281.4(1.599)	5 137.9(29.2)	12 176.2(69.2)	0.2(0.001)
	May	0(0)	0 (0)	0(0)	1 108.6(6.3)	14 058.9(79.9)	2 428.2(13.8)
	Jun	985.4(5.6)	9 607.2(54.6)	7 003.1(39.8)	0(0)	0(0)	0(0)
	Jul	1.8(0.01)	7 (0.04)	88(0.5)	3 352(19.05)	12 844.8(73)	1 302.1(7.4)
	Sep	17.6(0.1)	176 (1)	862.2(4.9)	8 234.7(46.8)	8 305.2(47.2)	0(0)
	Oct	35.2(0.2)	3 061.7(17.4)	14 498.8(82.4)	0(0)	0(0)	0(0)
	Nov	0 (0)	52.8(0.3)	3 818.3(21.7)	13 724.6(78)	0(0)	0(0)
	Average/ Promedio	116.1(0.7)	1 926.5(10.9)	6 361.2(36.2)	3 512.2(20)	5 265.0(29.9)	414.4(2.4)
	SD/DesvSt	326.1(1.9)	3 137.0(17.8)	6 912.2(39.3)	4 796(27.3)	6 426.4(36.5)	869.2(4.9)

Appendix 3. NDVI classes (BS = bare soil, LV = low vegetation, MV = medium vegetation and HV = high vegetation) and monthly surface changes in the Lagunera Region in two years.

Apéndice 3. Clases NDVI (SD = suelo desnudo, EV = escasa vegetación, MV = mediana vegetación y AV = alta cobertura vegetal) y cambios mensuales de superficie en la región Lagunera durante dos años de estudio.

Year/ Año	Month/ Mes	NA (<0.01)	BS (0.01-0.1)/ SD (0.01-0.1)	LV (0.1-0.2)/ EV (0.1-0.2)	MV (0.2-0.4)	HV (>0.4)/ AV (>0.4)
Area (km ² , %)/Superficie (km ² , %)						
2017	Jan/Ene	18.1(0.11)	7064.5(42.3)	9616.4(57.59)	0.0(0)	0.0(0)
	Feb	19.9(0.12)	8146.4(47.27)	8598.1(49.9)	240.7(1.4)	227.1(1.32)
	Apr/Abr	12.4(0.07)	8520.1(49.44)	8218.7(47.69)	376.7(2.19)	104.3(0.61)
	May	13.2(0.08)	8118.7(47.11)	8373.7(48.59)	616.2(3.58)	110.4(0.64)
	Jun	65.3(0.09)	5535.2(32.86)	9876.6(58.91)	1502.5(6.22)	252.7(1.93)
	Jul	15.0(0.38)	5662.6(32.12)	10150.7(57.31)	1071.5(8.72)	332.4(1.47)
	Sep	7.7(0.04)	4911.7(28.5)	10666.8(61.9)	1528.8(8.87)	117.1(0.68)
	Oct	8.4(0.05)	5954.8(34.56)	10289.2(59.71)	905.8(5.26)	74.1(0.43)
	Nov	8.3(0.05)	7214.6(41.87)	9390.0(54.49)	514.4(2.99)	104.9(0.61)
2021	Jan/Ene	21.0(0.12)	11174.7(64.85)	5634.2(32.7)	264.6(1.54)	137.8(0.8)
	Feb	14.7(0.09)	12241.3(71.04)	4524.0(26.25)	239.7(1.39)	212.5(1.23)
	Apr/Abr	9.4(0.05)	12245.0(71.06)	4549.8(26.4)	336.0(1.95)	92.1(0.53)
	May	9.3(0.05)	11284.5(65.48)	5187.7(30.1)	613.4(3.56)	137.4(0.8)
	Jun	8.5(0.05)	10490.9(60.88)	5697.1(33.06)	820.3(4.76)	215.5(1.25)
	Jul	10.4(0.06)	6560.0(38.07)	9002.8(52.24)	1190.4(6.91)	468.6(2.72)
	Sep	74.0(0.43)	5038.0(29.24)	10289.9(59.71)	1732.3(10.05)	98.0(0.57)
	Oct	13.7(0.08)	8178.6(47.46)	8096.5(46.98)	849.0(4.93)	94.4(0.55)
	Nov	12.4(0.07)	8840.9(51.3)	7753.1(44.99)	526.8(3.06)	99.0(0.57)

Appendix 4. Description of topsoil properties for field-verified sites in the Lagunera Region. A) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; B) Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; C) San Pedro de las Colonias, Coahuila; D) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila.

Apéndice 4. Descripción de propiedades edáficas de la capa superior del suelo para los sitios verificados en campo en la región Lagunera. A) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; B) Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; C) San Pedro de las Colonias, Coahuila; D) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila.

Site/Sitio	A	B	C	D
Soil classes/Grupos de suelo	Leptosol	Calcisol	Solonetz	Calcisol
Depth (cm)/Espesor (cm)	7	15	11	15
Sand (%)/Arena (%)	44	44	78	22
Silt (%)/Limo (%)	39	30	6	26
Clay (%)/Arcilla (%)	17	26	16	52
Texture/Textura	Loam/ Franca	Loam/ Franca	Sandy-loam/ Franca-arenosa	Clay-loam/ Franca-arcillosa
Bulk density (g·mL ⁻¹)/Densidad aparente (g·mL ⁻¹)	1.3-1.5	1.3-1.5	1.4-1.6	1.2-1.3
Field capacity (%)/Capacidad de campo (%)	21.2	24.4	13.1	38.7
Permanent Wilting Point (%)/ Punto de marchitez permanente (%)	14.4	18.5	9.9	32.8
Available water (%)/Humedad aprovechable (%)	6.8	5.9	3.2	5.9
Color (Munsell code)/Color (clave Munsell)	10YR5/3	10YR4/2	10YR3/1	10YR4/2

Appendix 4. Description of topsoil properties for field-verified sites in the Lagunera Region. A) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; B) Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; C) San Pedro de las Colonias, Coahuila; D) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila. (cont.)

Apéndice 4. Descripción de propiedades edáficas de la capa superior del suelo para los sitios verificados en campo en la región Lagunera. A) El Milagro, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; B) Ejido Amapolas, Tlahualilo de Zaragoza, Durango; C) San Pedro de las Colonias, Coahuila; D) Emiliano Zapata, Viesca, Coahuila. (cont.)

Site/Sitio	A	B	C	D
Hue/Tono	Dark brown/ Café oscuro	Dark grayish brown/ Café grisáceo oscuro	Very dark brown/ Café muy oscuro	Dark grayish brown/ Café grisáceo oscuro
Electrical conductivity (dS·m ⁻¹)/ Conductividad eléctrica (dS·m ⁻¹)	0.1	2	2	2
Organic matter (%)/Materia orgánica (%)	1.72	0.69	0.34	1.03
Distance site-trench (km)/Distancia Sitio-Calicata (km)	16.36	5.42	0.65	16.15

Source: Compiled by the authors with data from INEGI (2013).

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI (2013).