



Estudio de islas de calor en área urbana y urbana rural en Costa Rica, 2024

ESTUDIO DE CASO: ALAJUELA - ESPARZA

Diciembre 2024



Euroclima está cofinanciado por:



Agencia implementadora:



Instituciones ejecutoras:



Estudios de islas de calor en áreas urbana y rural de Costa Rica

Estudio de caso: Alajuela y Esparza

La formulación del presente documento fue liderada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) del Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), la Fundación de la Universidad de Costa Rica y la Acción Proyectiva, con el apoyo de diferentes entidades públicas y organizaciones del sector privado y de la sociedad civil, a quienes se les agradece profundamente por su colaboración.

Esta guía forma parte de la Acción Proyectiva: Fortalecimiento de capacidades para la utilización de información climática para robustecer los procesos de toma de decisiones, cuya finalidad es aportar a la ejecución de las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) a partir de capacidades mejoradas de diferentes actores en el ámbito subnacional con el fin de robustecer la Política Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

Los fondos para la implementación de dicha Acción provienen de EUROCLIMA, programa de cooperación regional financiado por la Unión Europea que busca promover el desarrollo ambientalmente sostenible y resiliente al clima en América Latina.

El equipo profesional encargado de la elaboración de este documento fue coordinado por el Programa para la Promoción de la Gestión y el Ordenamiento Territorial de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional y fue integrado por:

- M.Sc. Omar Enrique Barrantes Sotela, líder del equipo: geógrafo especialista en métodos y modelos cuantitativos, desarrollo sostenible y conservación de recursos biológicos.
- Máster Luis Fernando Sandoval Murillo, geógrafo especialista en sistemas de información geográfica y teledetección.
- Máster Greyty Quesada Thompson, geógrafa, especialista en ordenamiento de territorio, planificación y diseño urbano.
- Máster Guillermo Calderón Ramírez, geógrafo especialista en planificación urbano regional y movilidad urbana.
- Bach. Jeaustin Chinchilla Guerrero, asistente de proyecto y apoyo en sistemas de información geográfica.
- Bach. Ania Campos Bermúdez, diseño gráfico.

Equipos encargados de guiar y revisar el documento:

Por AECID

- Dra. Christine Follana

Por IMN

- MSc. Nazareth Rojas
- MSc. Daniel Poleo
- Lic. Ana Rita Chacón

Por Acción Proyectiva

- Dr. Javier Saborío Bejarano
- MSc. Cristina de San Román Aguilar
- MSc. Mariana Soto Ugarte

Diagramador

- Lic. Christian Mc Koy Carrillo

Forma de citar el documento:

Programa para la Promoción de la Gestión y el Ordenamiento Territorial de la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional -Proyectiva-Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), Instituto Meteorológico Nacional (IMN), Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2024. Guía metodológica para la integración del análisis del riesgo en los proyectos de infraestructura pública vial. 108 p.

Esta publicación ha sido elaborada con la asistencia de la Unión Europea. El contenido es responsabilidad exclusiva de sus autores y, en ningún caso, debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

Resumen ejecutivo

La Isla de Calor Urbano (ICU) es una consecuencia directa de los patrones de urbanización y la configuración de las ciudades, y representa una preocupación creciente en el contexto del cambio climático y la sostenibilidad de las ciudades, afectando tanto a zonas urbanas como semiurbanas. En este estudio, se analizan los efectos de la ICU en dos ciudades clave de Costa Rica: Alajuela y Esparza.

El estudio establece una propuesta metodológica que se basa en dos etapas. La primera fase corresponde al proceso de determinación de la ICU mediante la utilización de imágenes satelitales disponibles entre los años 2020 y 2024, y de los datos de las estaciones meteorológicas del Instituto Meteorológico Nacional. La segunda fase consiste en el análisis de la ICU por medio tres metodologías: cruce de variables, análisis de transectos y estaciones fijas. En cada metodología se explican: la información utilizada, estadísticos, gráficos y cartografía esperada para el desarrollo de estudios de ICU, que buscan conocer las principales diferencias de temperatura según tipo de cobertura, máximos de temperatura y configuración espacial del fenómeno.

La investigación identifica los días del año en los que es posible experimentar las mayores intensidades de la ICU. También, revela que las temperaturas superficiales terrestres (TST) en la ciudad de Alajuela, una de las más densamente urbanizadas del país, alcanzan valores de hasta 50 °C, especialmente en los sectores centrales, oeste y norte, donde se concentran infraestructuras como centros comerciales, el aeropuerto y el Hospital de Alajuela, así como importantes zonas residenciales en los distritos de Alajuela y San José. Las temperaturas más elevadas se asocian con áreas de alta impermeabilización del suelo y baja cobertura vegetal.

En Esparza, una ciudad con características rural-urbanas, las temperaturas superficiales alcanzan hasta 47 °C en las áreas urbanas, pero en general son menores que las observadas en Alajuela, debido a la dispersión de la infraestructura y la menor densidad urbana. Entre los sectores residenciales más afectados se determinan Rosal, Karen Olsen, Calderón Fournier y Marañonal. Se observa también un patrón térmico asociado a actividades de extracción de materiales en el oeste de la ciudad y a lo largo del cauce del río Barranca.

Este estudio resalta la importancia de tomar medidas de mitigación y adaptación ante el fenómeno de la ICU, también subraya la necesidad de involucrar a las municipalidades y otras instituciones del Estado en la implementación de estrategias sostenibles. Las recomendaciones incluyen el aumento de la vegetación urbana, el uso de materiales reflectantes en techos, y la mejora en la planificación territorial para reducir el impacto de las temperaturas en las comunidades locales. Estas acciones son esenciales para minimizar los efectos adversos de la ICU en el bienestar de las personas.

Tabla de contenidos

Contenido de figuras	5
Contenido de tablas	8
Abreviaturas y glosario	9
1. Introducción	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Antecedentes	13
3. Marco teórico	13
4. Propuesta metodológica	15
4.1 Procesos para determinar la ICU	17
4.1.1 La delimitación del área de estudio	17
4.1.2 Componente de variabilidad climática	18
4.1.3 Selección y procesamiento de imágenes satelitales	22
4.1.3.1 Análisis zonal	23
5. Métodos para el análisis de la ICU	24
5.1 Método indirecto: cruce de variables	24
5.2 Método indirecto: análisis de transectos	27
5.3 Método directo: estaciones fijas	28
6. Resultados	31
6.1 Caso de estudio: Alajuela	31
6.1.1 Delimitación del área de estudio	31
6.1.2 Componente de variabilidad climática: Alajuela	34
6.1.3 Procesamiento de imágenes satelitales: ICU Alajuela	39
6.1.4 Método indirecto: cruce de variables, Alajuela	41
6.1.5 Método indirecto: análisis de transectos, Alajuela	44
6.2 Caso de estudio: Esparza	46
6.2.1 Delimitación del área de estudio	46
6.2.2 Componente de variabilidad climática: Esparza	49
6.2.3 Procesamiento de imágenes satelitales: ICU Esparza	53
6.2.4 Método indirecto: cruce de variables, Esparza	56
6.2.5 Método indirecto: análisis de transectos, Esparza	60
6.2.6 Método directo: estaciones fijas	61
7. Hallazgos	65
8. Estrategias de mitigación y adaptación en la planificación urbana	66
8.1 Estrategias puntuales para Alajuela	69
8.2 Estrategias puntuales para Esparza	69
9. Limitaciones y recomendaciones	70
9.1 Ausencia de estudios de la estructura urbana	70
9.2 Disponibilidad de imágenes satelitales	70
9.3 Cantidad de observaciones en método directo	70
9.4 Datos poblacionales	71
9.5 Cuantificación de la contribución del tráfico vehicular al fenómeno	71
9.6 Estaciones meteorológicas	71
9.7 Otras recomendaciones	71
10. Agradecimientos	72
11. Referencias bibliográficas	73
12. Anexos	77
12.1 Listado de imágenes satelitales	77
12.2 Gráficos de las tendencias de temperatura de las estaciones meteorológicas	78
12.3 ENOS	90
12.4 Propiedades de radiancia de materiales naturales	91

Contenido de figuras

Figura 1. Diferencias de temperatura para identificar los distintos tipos de ICU.	15
Figura 2. Alajuela: localización de estaciones meteorológicas cercanas. Se muestran las estaciones meteorológicas 84169, 84187, 84191, 84197 y 84199. Se coloca el sentido y distancia de los perfiles A y B que atraviesan la ciudad de Alajuela y su periferia.	20
Figura 3. Esparza: localización de estaciones meteorológicas cercanas. Se muestran las estaciones meteorológicas 78033, 82011, 82013, 82015 y 82019.	21
Figura 4. Alajuela: perfil de análisis de las temperaturas superficiales	27
Figura 5. Esparza: perfil de análisis de las temperaturas superficiales	28
Figura 6. Esparza: ubicación de los dispositivos HOBO MX2301 para el registro de temperatura y humedad relativa	30
Figura 7. Sitio 5: Escuela La Riviera.	31
Figura 8. Alajuela: densidad poblacional en el área de interés	33
Figura 9. Densidad de población (hab./ha) en los distritos Alajuela, San José y Desamparados	33
Figura 10. Alajuela: área de interés.	34
Figura 11. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal	34
Figura 12. Estación 84187 – Fabio Baudrit, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal	35
Figura 13. Estación 84191 – RECOPE, La Garita, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal	35
Figura 14. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal	36
Figura 15. Estación 84199 – Belén, Heredia. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal	36
Figura 16. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de las anomalías de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024	37
Figura 17. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de las anomalías de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024	37
Figura 18. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de las anomalías de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024	38
Figura 19. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes. Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort.	38
Figura 20. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2019-12-02 a 2021-12-31.	40
Figura 21. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 a 2023-02-20.	40
Figura 22. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2023-02-28 a 2024-03-18.	40
Figura 23. Alajuela: Análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de enero a mayo del periodo 2020 al 2024.	40
Figura 24. Alajuela: cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024.	42
Figura 25. Prueba Tukey HSD	44
Figura 26. Alajuela: perfil térmico por transectos A y B que atraviesan la ciudad.	45

<i>Figura 27.</i> Alajuela: perfil térmico A.	46
<i>Figura 28.</i> Alajuela: perfil térmico B.	46
<i>Figura 29.</i> Esparza: densidad poblacional en el área de interés	48
<i>Figura 30.</i> Densidad de población (hab./ha) en los distritos Espíritu Santo y Macacona.	48
<i>Figura 31.</i> Esparza: área de interés.	49
<i>Figura 32.</i> Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.	50
<i>Figura 33.</i> Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.	50
<i>Figura 34.</i> Estación 82019 – Guayabal, Orotina. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.	51
<i>Figura 35.</i> Estación 78033 – Pitahaya, río Aranjuez, Puntarenas. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.	51
<i>Figura 36.</i> Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2012 al 2024.	52
<i>Figura 37.</i> Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2012 al 2024.	52
<i>Figura 38.</i> Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2012 al 2024.	52
<i>Figura 39.</i> Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes. Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort.	53
<i>Figura 40.</i> Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2019-12-02 a 2021-12-31.	54
<i>Figura 41.</i> Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 a 2023-02-20	55
<i>Figura 42.</i> Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2023-02-28 a 2024-01-14.	55
<i>Figura 43.</i> Esparza: análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de marzo a abril del período 2020 al 2024.	56
<i>Figura 44.</i> Esparza: cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024.	57
<i>Figura 45.</i> Prueba Tukey HSD	59
<i>Figura 46.</i> Esparza: perfil térmico por transectos A y B, que atraviesan la ciudad.	60
<i>Figura 47.</i> Esparza: perfil térmico A. Atraviesa la ciudad en sentido suroeste – noreste.	61
<i>Figura 48.</i> Esparza: perfil térmico B. Atraviesa la ciudad en sentido suroeste - norte.	61
<i>Figura 49.</i> Ciudad de Esparza: Distribución térmica durante el día y la noche (15 días de observación).	63
<i>Figura 50.</i> Sitio 4 -Sensor 6752: Terminal de Buses. Datos de temperatura superficial.	64
<i>Figura 51.</i> Sitio 5 -Sensor 6758: Escuela La Riviera. Datos de temperatura superficial	64
<i>Figura 52.</i> Estación 84187 – Fabio Baudrit. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024	78
<i>Figura 53.</i> Estación 84187 – Fabio Baudrit. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024	78

Figura 54. Estación 84187 – Fabio Baudrit. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024	79
Figura 55. Estación 84191 – La Garita (Recope). Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024	79
Figura 56. Estación 84191 – La Garita (Recope). Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024	80
Figura 57. Estación 84191 – La Garita (Recope). Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024	80
Figura 58. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024	81
Figura 59. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024	81
Figura 60. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024	82
Figura 61. Estación 84199 – Belén, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024	82
Figura 62. Estación 84199 – Belén, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024	83
Figura 63. Estación 84199 – Belén, Heredia. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024	83
Figura 64. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2016 al 2024	84
Figura 65. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2015 al 2024	84
Figura 66. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2016 al 2024	85
Figura 67. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2016 al 2024	85
Figura 68. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2015 al 2024	86
Figura 69. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2013 al 2024	86
Figura 70. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2014 al 2024	87
Figura 71. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2014 al 2024	87
Figura 72. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2014 al 2024	88
Figura 73. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2017 al 2024	88
Figura 74. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2017 al 2024	89
Figura 75. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2017 al 2024	89
Figura 76. El Niño - Índice del Niño Oceánico (ONI)	90

Contenido de tablas

Tabla 1. Características básicas de las islas de calor urbanas superficial y atmosférica	15
Tabla 2. Alajuela: coordenadas máximas del cuadrante de análisis	18
Tabla 3. Esparza: coordenadas máximas del cuadrante de análisis	18
Tabla 4. Estaciones meteorológicas, IMN	19
Tabla 5. Clave de clasificación de cobertura de la tierra	24
Tabla 6. Escala de valoración del índice Kappa	26
Tabla 7. Esparza: características de los sitios de muestreo	29
Tabla 8. Estaciones cercanas a la ciudad de Alajuela: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo	36
Tabla 9. Alajuela: resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie entre los meses de enero a mayo	39
Tabla 10. Alajuela: Superficies de la cobertura de la tierra en el 2024	41
Tabla 11. Alajuela: Matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre	42
Tabla 12. Prueba de ANOVA para comparar las TST en las categorías de cobertura de la tierra	43
Tabla 13. Prueba post hoc Tukey HSD en cruce de TST con respecto	43
Tabla 14. Estaciones cercanas a la ciudad de Esparza: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo	52
Tabla 15. Esparza: Resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite	53
Tabla 16. Esparza: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024	57
Tabla 17. Esparza: matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre	58
Tabla 18. Prueba de ANOVA para comparar las TST en las categorías de cobertura de la tierra	58
Tabla 19. Prueba post hoc Tukey HSD en cruce de TST con respecto	59
Tabla 20. Temperaturas diurnas y nocturnas máximas promediadas por dispositivo de registro	62
Tabla 21. Listado de imágenes sensor Landsat para análisis de la ICU	77
Tabla 22. Listado de imágenes sensor Sentinel 2 para la elaboración de las coberturas de la tierra	77
Tabla 23. Propiedades radiativas de materiales naturales	91

Abreviaturas y glosario

A continuación, se presenta una lista de acrónimos utilizados en este documento, junto con sus significados. Esta referencia facilitará la comprensión y permitirá a los lectores seguir el contenido de manera más efectiva.

DTA	División territorial administrativa de Costa Rica
GAM	Gran Área Metropolitana de Costa Rica
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censo de Costa Rica
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
UNA	Universidad Nacional
ATAP	Asistentes técnicos de atención primaria

Glosario

Área urbana: Espacio geográfico caracterizado por una alta densidad de población y un elevado nivel de desarrollo de infraestructura, servicios y actividades económicas, en comparación con las áreas rurales. Las áreas urbanas incluyen ciudades, metrópolis y suburbios; son centros clave de actividad humana, comercio, cultura y tecnología.

Albedo: Cociente entre la radiación luminosa reflejada por una superficie y la que incide sobre la misma. Suele expresarse en porcentaje (%) y permite conocer la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar. Las superficies urbanas, como el asfalto, tienen un albedo bajo, lo que significa que absorben más calor, mientras que las superficies más claras o naturales tienden a reflejar la radiación solar.

Calma: Coloquialmente, ausencia de viento. En la escala anemométrica de Beaufort, recibe este nombre el viento cuya velocidad es inferior a un nudo. El origen etimológico de la palabra es del griego karma, que significa “calor sofocante”.

Capa límite planetaria (CLP): Capa de aire en contacto con la superficie terrestre, sometida a su influencia y situada por debajo de la atmósfera libre. Su espesor es variable; en Costa Rica, Garbanzo- Salas & Hocking (2019) determinaron una altitud promedio de la CLP en un intervalo entre 2.34 km durante el mes de enero y 3.93 km durante el mes de agosto.

Capa límite urbana (urban boundary layer): Es la porción de la capa límite que se extiende desde los techos de los edificios hasta un nivel por debajo del cual las características meteorológicas están modificadas por la presencia de la ciudad en superficie.

Clima urbano: Características climáticas propias de las ciudades, particularmente en las grandes urbes, debido a la influencia que la urbanización y las actividades humanas ejercen sobre el medio atmosférico urbano, véase isla de calor.

Ciudad: En Costa Rica es el área urbana, donde se asentarán las autoridades políticas y administrativas más relevantes cuando se ha aprobado por ley la creación de un cantón. El título de ciudad se otorga únicamente a los centros administrativos de los cantones, entiéndase dónde se ubica el municipio.

Cubo de datos ráster (en inglés, raster data cube): Es una representación tridimensional (o de mayor dimensión) de datos ráster donde dos dimensiones corresponden a las coordenadas espaciales (X, Y) y la tercera dimensión representa el tiempo (T). Un cubo de datos puede tener múltiples capas ráster, cada una correspondiente a un instante temporal.

Datos geoespaciales: Información sobre la ubicación y las características de los elementos físicos en la tierra. En los estudios de ICU, los datos geoespaciales son esenciales para mapear las temperaturas y relacionarlas con las estructuras urbanas o actividades humanas.

ENOS (sigla en español El Niño – Oscilación del Sur): Es la oscilación bimodal a gran escala, cuya fase negativa o cálida es El Niño y la fase positiva o fría es “La Niña”. También presenta una fase neutral. Los episodios de ENOS involucran variaciones de la temperatura del océano Pacífico central y oriental, junto con cambios en la presión atmosférica. El ENOS afecta el clima global, que incluye los patrones de precipitación, temperatura y ocurrencia de eventos extremos.

Evapotranspiración: Transferencia de vapor de agua a la atmósfera desde un suelo con vegetación, debida a la evaporación directa del agua presente en esa superficie, como la transpiración de las plantas. En áreas verdes, este proceso ayuda a enfriar el ambiente y mitigar el efecto de la ICU.

Geoprocusamiento: Conjunto de técnicas y herramientas para analizar y manipular datos geoespaciales. Es fundamental en el estudio de las ICU para evaluar la distribución espacial de las temperaturas y su relación con las características del entorno urbano.

Hito urbano: Elementos o estructura significativa dentro de la ciudad que sirven como punto de referencia o símbolo de alta tradición cultural. Los hitos juegan un papel fundamental en la identidad del espacio urbano, así como en la orientación y navegación de las personas. También son determinantes para la definición de barrios o zonas de patrimonio histórico. Un ejemplo de hito urbano en Costa Rica es el Teatro Nacional.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés): Indicador que mide la presencia y estado de la vegetación en un área, basado en la cantidad de luz visible e infrarroja reflejada por las plantas. Es utilizado en el análisis de ICU para evaluar la relación entre la vegetación y las temperaturas superficiales.

Infraestructura verde: Elementos naturales o construidos que proporcionan servicios ecosistémicos en entornos urbanos, como parques, techos verdes, jardines y árboles, que ayudan a mitigar el efecto de la ICU al proporcionar sombra y aumentar la evapotranspiración.

Isla de calor urbana (ICU) (en inglés UHI): Efecto estudiado en la climatología urbana que describe el calentamiento al que se ve sometido el aire y la superficie de la ciudad.

Isla de calor urbano atmosférica: Efecto que describe el calentamiento al que se ve sometido el aire que cubre una ciudad. Los materiales refractarios de los que están constituidos las estructuras irradian una cantidad importante de energía infrarroja al ambiente urbano, calentando el aire. Por tanto, se enfoca en la medición de la temperatura del aire.

Isla de calor urbano superficial: Es el calentamiento en el que una zona urbana presenta temperaturas superficiales significativamente más altas que en sus alrededores suburbanos y rurales debido a las características de la superficie y a las actividades humanas. Su medición es a través de la radiación térmica emitida por las superficies.

Ola de calor: Evento climático caracterizado por un período prolongado de temperaturas anormalmente altas, que superan los valores climatológicos típicos de una región durante ese tiempo del año. Las olas de calor suelen durar varios días o semanas y pueden tener efectos significativos en la salud humana, los ecosistemas y las infraestructuras urbanas.

Percepción remota (Remote Sensing): Técnica que utiliza sensores colocados en satélites o aeronaves para recolectar información sobre la Tierra, incluyendo datos de temperatura superficial, lo cual es esencial para el mapeo y análisis de las islas de calor urbanas.

Planificación territorial: Proceso de organización y regulación del uso de la tierra urbano y los recursos naturales en un territorio, considerando su desarrollo económico, social y ambiental. En el contexto de la ICU, la planificación territorial debe integrar estrategias para reducir el efecto de las altas temperaturas urbanas.

Mitigación de la ICU: Estrategias y medidas implementadas para reducir el impacto de la isla de calor urbana. Estas pueden incluir la incorporación de infraestructura verde, la mejora del albedo de las superficies urbanas y la planificación urbana sostenible.

Radiación solar: Energía emitida por el Sol que llega a la Tierra.

Ráster: Es una representación matricial de datos espaciales, que organiza la información en una cuadrícula regular de celdas o píxeles. Cada celda de un ráster contiene un valor numérico que representa una característica o variable de interés, como la elevación, temperatura, precipitación, entre otros. Los rústers se utilizan ampliamente en sistemas de información geográfica (SIG) para modelar fenómenos espaciales y efectuar análisis geoespaciales.

Sensor remoto: Dispositivo que se utiliza para detectar, medir y registrar información sobre un objeto o área sin necesidad de contacto físico directo. Los sensores remotos capturan datos mediante la emisión o detección de ondas electromagnéticas, como la luz visible, el infrarrojo o las microondas. Son comúnmente montados en satélites, aviones o drones para observar y analizar la superficie terrestre y la atmósfera.

Sistema de información geográfica (SIG): Conjunto de herramientas para la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos georreferenciados. Los SIG son fundamentales para el estudio y la representación espacial de las ICU, lo que facilita la planificación territorial.

Temperatura superficial terrestre (TST): Es la temperatura medida de forma directa o indirecta en la superficie terrestre o en estructuras como edificaciones y carreteras.

Unidad geoestadística mínima (UGM): Cobertura geográfica elaborada por el Instituto de Estadística y Censo de Costa Rica, que representa el territorio con la mayor desagregación del espacio geográfico para cada distrito del país, a la cual puede vincularse la información del censo de población. Están conformadas por el polígono que rodea una manzana o un área irregular que se delimita por los bordes laterales de la calzada (cordón de caño) de la red vial, o bien, de red fluvial como ríos y quebradas u otros elementos de infraestructura cultural. Por lo tanto, estas unidades responden a características espaciales identificables en el terreno, por lo cual no coinciden con los límites imaginarios existentes en la distribución territorial administrativa del país.

Urbanización: Proceso de expansión de las áreas urbanas y desarrollo de infraestructuras, que afecta el medioambiente local, el clima y las dinámicas de energía superficial, lo que contribuye al fenómeno de las islas de calor.

Variabilidad climática: Son las variaciones naturales que ocurren en el clima de una región durante períodos de tiempo que van desde meses hasta décadas, y que se manifiestan como desviaciones de las condiciones climáticas promedio. A diferencia del cambio climático, que implica tendencias a largo plazo, la variabilidad climática se concentra en los cambios a corto o mediano plazo debido a causas naturales.

1. Introducción

Las ciudades tienen una función fundamental en el desarrollo de las sociedades modernas, al ser espacios de concentración y núcleos centrales de las actividades económicas, culturales y sociales. Además, al mantener una concentración significativa de procesos de producción, su estudio es relevante porque impacta las condiciones de vida de sus habitantes y visitantes.

Con el modelo contemporáneo de uso y ocupación de los territorios, los centros urbanos enfrentan unas series de impactos derivados de los procesos de cambio y variabilidad climática. Por ejemplo, se observa un incremento en la ocurrencia e intensidad de los eventos hidrometeorológicos como inundaciones o sequías y experimentan un deterioro en la disponibilidad de recursos estratégicos como el agua, la calidad del aire y el suelo (Quesada-Román et al., 2021). Uno de los principales factores que generan estas situaciones es el crecimiento urbano no planificado de la ciudad, que ocupa espacios destinados a la naturaleza y la producción agropecuaria. El proceso continuo de urbanización ocasiona el calentamiento de los núcleos urbanos con respecto a sus áreas colindantes y periféricas (Y. Liu et al., 2020). Si bien la temperatura promedio de la centralidad es algunos grados superior al de las áreas periféricas, el impacto no es uniforme a lo largo del día y puede exceder hasta más de 10 grados Celsius. Este aumento diferencial varía según las características de las ciudades.

A medida que ocurre el crecimiento y expansión del área urbana, se produce una serie de cambios en su sistema. Estos incluyen el incremento de la temperatura debido al cambio de las características de la superficie; así como el deterioro de la calidad del aire, producto del incremento de contaminantes en la capa de la atmósfera cercana a la superficie terrestre (Sheng et al., 2017). A su vez, se observa una asociación con problemas derivados, como el alto consumo energético, afectación en la salud de grupos poblacionales (niños y adultos mayores), así como la población económicamente activa, la cual es expuesta a altas temperaturas en su período laboral (Liu et al., 2020).

Al fenómeno climático que ocurre en áreas urbanizadas donde las temperaturas son significativamente más altas que en las zonas rurales o periurbanas circundantes, se le denomina isla de calor urbana (ICU). Determinar las características del fenómeno de la isla de calor es fundamental para comprender los procesos energéticos que ocurren en la superficie terrestre (Li et al., 2013). Además, es un indicador de la sostenibilidad de las ciudades, debido a su relación con los temas de habitabilidad, bienestar de la población y condición ecosistémica.

Esta investigación se centró en estudiar las islas de calor urbanas superficiales y que ocurren de forma específica en cielos despejados y bajo condiciones de calma.

A continuación, se indican los objetivos del estudio.

1.1 Objetivo general

- Proponer una metodología para la identificación y análisis de la isla de calor superficial mediante dos estudios de caso en las ciudades de Alajuela y Esparza entre los años 2020 a 2024, con el propósito de la elaboración de una guía técnica, que pueda ser utilizada por gobiernos locales e instituciones en sus procesos de planificación territorial en Costa Rica.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar metodologías con enfoque indirecto y directo para la identificación de la isla de calor urbana en las áreas de estudio propuestas.
- Implementar las metodologías seleccionadas considerando factores como la densidad de población, la disposición espacial de las ciudades y las características de variabilidad climática locales.

- Determinar las zonas, en ambos casos de estudio, donde el fenómeno de la isla de calor urbana es más pronunciado, con el fin de establecer estrategias de intervenciones de carácter general para su adaptación o mitigación.

2. Antecedentes

En Costa Rica, son escasos los estudios del clima urbano orientado al análisis de las ICU, algunos estudios anteriores son los elaborados por Arce & Acevedo (2014), que analizan las ICU de la ciudad de Heredia por medio de la técnica de transectos móviles, y que se basa en la metodología empleada por Sarricolea et al. (2008) que estudia la ICU en la Ciudad de Rancagua en Chile y posteriormente estudia la superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile, aplicando el análisis de imágenes de satélite Terra-MODIS mediante componentes principales (Espinoza & Martín-Vide, 2014). A su vez, estos estudios citan la investigación de Jauregui (1997) en la Ciudad de México, la cual es un estudio relevante en la temática en América Latina, ya que establece los principales métodos de comparación de las diferencias térmicas en diferentes sitios en la ciudad. Además, destaca la observación de superficies con diversas propiedades térmicas y aprovecha la red de estaciones meteorológicas existentes para su objetivo.

Entre los estudios más actuales se puede citar el elaborado por Corrales et al. (2019), que consiste en un análisis mediante Climate Engine (plataforma en Google que permite crear mapas gráficos a partir de datos climáticos y satelitales públicos) y usa las imágenes Landsat 8 para obtener las temperaturas superficiales máximas que abarcan 34 meses (2016-2018) en el cantón de Curridabat. Los valores de temperatura se asocian con el índice normalizado de construcción y el índice normalizado de vegetación. El estudio obtiene como principal resultado una alta correlación entre los sitios con mayor intensidad de la isla de calor y las zonas que presentan una alta densidad de construcción.

A su vez, Barrantes-Sotela (2020) establece el efecto del cambio de cobertura de la tierra y el incremento del ICU en la ciudad de Heredia. Para esto utiliza el modelo de Wang et al. (2015a) y lo ajusta para el trópico, a su vez lo asocia al índice de disturbio (Arnett et al., 2014), calculado de una transformación de Tasseled Cap. El estudio analiza un período que comprende desde el año 1985 hasta el 2019. Entre los principales resultados obtenidos está la asociación entre la forma del perfil térmico de la ICU y el proceso de expansión de las áreas urbanas. Además, la mayor intensidad del fenómeno se presenta en la Gran Área Metropolitana (GAM) entre los días 80 y 120 del año, con un punto máximo cercano al día 100 (finales del mes de marzo e inicio del mes de abril). Lo anterior por las condiciones de cielo despejado, aumento de la temperatura, disminución de la humedad relativa y disminución de la velocidad del viento.

Una investigación derivada de la anterior y que también aplica las metodologías implementadas por Romero y Romero (2005) y Romero et al., (2011) es la elaborada por Bermúdez y Sánchez (2022) en la ciudad de Liberia. Otras iniciativas recientes en Costa Rica son la propuesta del Índice Urbano de Calor (IUC) por INISEFOR, de la Universidad Nacional, para el proyecto International Cooperation to Restore and Connect Urban Environments in Latin America and Europe (INTERLACE). El índice se implementa en Earth Engine y consiste en normalizar la temperatura superficial en función de la media y desviación estándar observada durante un año particular (en este caso el 2023) en la GAM.

3. Marco teórico

La isla de calor urbana (ICU) (Urban Heat Island - UHI) es cuando la centralidad de un área urbana es más cálida que en sus zonas periféricas, por lo general no urbanizadas (Cochran, 2014; Fan et al., 2016). A medida que las áreas urbanas se desarrollan, se

¹Para determinar las anomalías de la temperatura se usan los datos de las estaciones meteorológicas en un período que comprende desde el 2004 al 2024.

presentan cambios en el paisaje. Los espacios naturales, abiertos y con vegetación se reemplazan por edificios, carreteras y otras superficies. Este cambio en las superficies permeables origina un incremento en las temperaturas (U.S. Environmental Protection Agency, 2008).

El término isla de calor fue usado por primera vez por Manley en 1958, al referirse al efecto del calentamiento artificial observado en la gran área urbana de Londres con respecto a sus áreas periféricas. Sarricolea (2012, 2021) establece que el término se utiliza desde entonces en estudios que se refieren al clima de ciudad o clima urbano.

De manera tradicional, se cuantifica como la diferencia entre la temperatura del aire registrada en la zona urbana con respecto a la zona periférica (Jin, 2012). Las mediciones se realizan a una altura de la superficie del suelo entre 1.5 m a 2.0 m. También, Johnson (1985), Romero-Dávila et al. (2011), Sarricolea Espinoza & Martín-Vide (2014) indican que otro método aceptado es el uso de transectos.

En general, existe escasa información de la configuración espacial de las temperaturas de las ciudades y según Sarricolea Espinoza & Martín-Vide (2014) significa un desafío generar información tanto en una mayor cobertura superficial y resolución temporal. Ante esto es necesario definir de manera precisa el límite de la aglomeración urbana y su área inmediata, mediante un mapa de cobertura de la tierra (Zhao et al., 2016).

Se destaca que la ICU no solo es un fenómeno térmico, también corresponde al efecto que introduce el flujo de aire en las ciudades, ya sea por efecto del viento o por los canales que se producen debido a las edificaciones en altitud, que pueden reducir o aumentar la temperatura en determinadas áreas en las aglomeraciones urbanas. También, el aumento de consumo de combustibles fósiles y elevados niveles de contaminación del aire son un factor fundamental por considerar en el estudio del clima urbano (Piracha & Chaudhary, 2022).

Los estudios de Johnson (1985), Liu & Zhang (2011), Oke (1987), Sarricolea (2012); Voogt & Oke (2003a), Yue et al. (2019) establecen los principales hallazgos sobre las ICU y que se resumen a continuación:

1. Al comparar con las áreas rurales sin desarrollar, la ICU es por lo general más cálida, con distintos patrones diarios en su comportamiento. Suelen ser más calientes en relación con las áreas rurales que rodean la ciudad, después de la puesta del sol y más frías después del amanecer. La temperatura del aire en la capa del dosel urbano, debajo de los árboles y edificios, puede alcanzar una diferencia de hasta 6 °C con respecto al aire en las áreas rurales. A esa diferencia de temperaturas, se le conoce como la intensidad de la ICU y se usa para medir su efecto.
2. La temperatura del aire es impulsada por el calentamiento de las superficies urbanas, ya que muchas superficies antrópicas absorben más calor del sol que la vegetación.
3. Las diferencias en la temperatura del aire y de la superficie aumentan cuando el tiempo atmosférico es calmo y con el cielo despejado.
4. Las áreas con menor cobertura de vegetación y mayor desarrollo estructural tienden a ser más cálidas, y las islas de calor tienden a ser más intensas a medida que las ciudades crecen.
5. Las ICU también muestran un aire más cálido en el límite de la atmósfera baja o peplosfera (Boundary layer), la cual es la capa de aire que alcanza hasta 2000 metros de altura y es afectada por las inmediaciones de la superficie terrestre. Las ICU a menudo crean grandes columnas de aire más cálido sobre las ciudades, y las inversiones de temperatura causadas son frecuentes.

La ICU puede ser definida a partir de tres parámetros básicos: intensidad, que corresponde a la máxima diferencia de temperatura de la capa del dosel urbano en el área central de la ciudad, con respecto al entorno periurbano; la configuración, que establece

la distribución espacial de las temperaturas, y el máximo térmico, que se refiere a las zonas donde se alcanzan las mayores intensidades (Moreno-García, 1999; J. Voogt, 2007). El mapa térmico o de isotermas es un tipo de representación que considera estos tres parámetros.

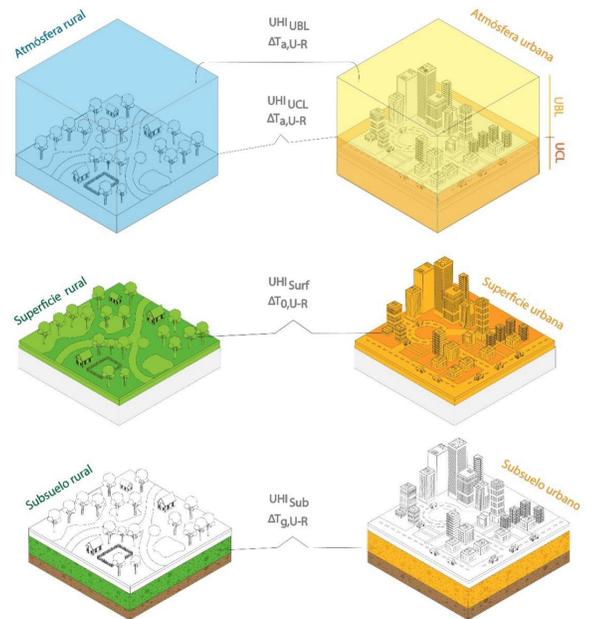
Además, Oke (1987, 1995, 2006) y Sarricolea, (2021) indican que en el estudio de la ICU se pueden distinguir dos tipos: la isla de calor atmosférica que representa las diferencias en la temperatura del aire y la isla de calor superficial que indica las diferencias térmicas entre las superficies. Ambas se comparan entre las zonas urbanas y periféricas. Voogt & Oke (2003) indican que la isla de calor de superficie es homóloga o equivalente a la isla de calor del aire. En la Tabla 1, se establecen las características de los dos tipos de ICU.

Tabla 1. Características básicas de las islas de calor superficial y atmosférica

Características	Isla de calor superficial	Isla de calor atmosférica
Temporalidad	<ul style="list-style-type: none"> - Presente durante el día y la noche. - Mayor intensidad durante el día y en el verano. 	<ul style="list-style-type: none"> - Débil o inexistente durante el día. - Mayor intensidad durante la noche o antes del amanecer y en el invierno.
Picos de intensidad	<ul style="list-style-type: none"> - Gran variación espacial y temporal: ▪ Durante el día de 10 °C a 15 °C. ▪ Durante la noche de 5 °C a 10 °C. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor variación: ▪ Durante el día: 1°C a 3°C. ▪ Durante la noche: 7 °C a 12 °C.
Método de identificación	<ul style="list-style-type: none"> - Método directo. ▪ Registradores de datos en superficie. - Método indirecto. ▪ Teledetección. 	<ul style="list-style-type: none"> - Método directo ▪ Estaciones meteorológicas fijas. ▪ Transectos móviles. - Método indirecto ▪ Modelado climático
Representación	<ul style="list-style-type: none"> - Imagen térmica - Gráficos térmicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapas de isotermas. - Gráficos térmicos

Fuente: Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2008).

Figura 1. Diferencias de temperatura para identificar los distintos tipos de ICU .



Fuente: Adaptado de Oke et al. (2017) por ECG-UNA.

Oke et al. (2017) incluyen las ICU en el subsuelo, que en el caso del subsuelo rural presenta un alto impacto en los cultivos o fuentes de agua, mientras que el subsuelo urbano incide en la infraestructura estratégica como redes de servicio, parqueos subterráneos o sistemas de transporte por ejemplo el sistema de metro (Figura 1).

4. Propuesta metodológica

La investigación busca describir las características espaciales y temporales de la isla de calor urbana en las ciudades de Alajuela y Esparza. Además, pretende explicar la relación de las coberturas de la tierra y el comportamiento térmico de la superficie que se

²Garbanzo-Salas & Hocking (2019) identificaron la capa límite planetaria en Santa Cruz (Guanacaste, Costa Rica) entre un intervalo de altura promedio entre un mínimo 2.34 km durante el mes de enero y un máximo 3.93 km durante el mes de agosto.

³En Costa Rica el clima se caracteriza por dos estaciones: la época lluviosa y la época seca, debido a su ubicación geográfica en el trópico. Por lo tanto, no se usa el esquema de cuatro estaciones como en otras regiones del planeta.

extiende de las centralidades urbanas y zonas periféricas entre los años 2020 y 2024. La investigación es de carácter descriptivo y explicativa.

En el estudio de la ICU se pueden distinguir dos tipos (Fernández & Martilli, 2012):

- Isla de calor atmosférica, que representa las diferencias en la temperatura del aire entre las zonas urbanas y las rurales
- Isla de calor superficial, que indica las diferencias térmicas entre las superficies artificiales (pavimento, aceras, edificios, entre otros) y las naturales (vegetación, cultivos, entre otros).

Ambas presentan diferencias en los mecanismos de formación y en las técnicas metodológicas aplicadas para su identificación (Oke, 1995, 2006; J. A. Voogt & Oke, 2003b). Según Sarricolea (2021), la isla de calor superficial se identifica de manera indirecta, mediante teledetección o sensores remotos. Por su parte, la isla de calor atmosférica se identifica por método directo, con datos de estaciones de medición fijas o por transectos móviles. Los resultados para identificar las ICU se representan de forma similar. En este estudio se representan mediante mapas térmicos y gráficos.

Se proponen tres metodologías que contemplan el análisis de la ICU superficial. Los métodos son los siguientes:

1. **Método indirecto - cruce de variables (temperatura superficial y categorías de coberturas de la tierra):** Superpone los datos de temperatura y coberturas de la tierra para establecer la variación de la temperatura en función de los diferentes tipos de cobertura.
2. **Método indirecto - análisis de transectos:** método indirecto que utiliza líneas de transecto a lo largo de la ciudad para elaborar perfiles térmicos, con el fin de determinar la transición de la temperatura entre las zonas periféricas y áreas centrales. Se generan gráficos de perfiles térmicos.
3. **Método directo - estaciones fijas:** Determina la ICU superficial empleando dispositivos de recolección de datos ubicados en puntos de muestreo específicos, para generar mapas de temperaturas. Voogt & Oke (2003b) indican que para complementar los análisis espaciales es necesario realizar observaciones en el terreno para determinar "la temperatura urbana completa".

Las propuestas metodológicas mencionadas se aplicaron en dos casos de estudio en los cantones de Esparza y Alajuela. Estos cantones fueron elegidos por el proyecto Proyectiva con el propósito de establecer las características del fenómeno de islas de calor urbana en un área urbana de una ciudad intermedia y con alta densificación localizada en la GAM como lo es Alajuela, con respecto a otra área urbana con características de menor densificación y localizada en una zona rural o semirural como lo es Esparza.

La coordinación y apoyo de la municipalidad de Esparza hizo posible aplicar los tres métodos de análisis descritos. En Alajuela solo se lograron aplicar los métodos indirectos (cruce de variables y análisis de transectos).

A su vez, el desarrollo metodológico se plantea en dos partes:

- **Procesos para determinar la ICU:** aquí se plantean los procesos y generación de datos básicos para determinar la ICU, que independientemente de los métodos aquí propuestos, son esenciales para iniciar con el estudio.
- **Métodos para el análisis de la ICU:** en esta parte, considerando la información disponible y accesible en Costa Rica, se brindan distintos métodos para determinar la ICU.

Los resultados obtenidos en la aplicación del método directo en el cantón de Esparza no son estadísticamente significativos para entender el patrón temporal de distribución de la ICU, debido a que el período de observación solo abarca 16 días, entre las fechas de 2024-07-02 y al 2024-07-18. No obstante, permite demostrar el proceso de aplicación de la metodología. Además, se plantea la necesidad de realizar las mediciones con una temporalidad más amplia y con mayor número de estaciones fijas en la ciudad.

4.1 Procesos para determinar la ICU

Para iniciar a determinar la ICU, es necesario realizar tres procesos básicos:

1. **La delimitación del área de estudio**
2. **Determinar variabilidad climática (principalmente de temperatura y viento)**
3. **Selección y procesamiento de las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio**

4.1.1 Delimitación del área de estudio

Para establecer el área de estudio, es necesario delimitar la zona urbana, ya sea desde el marco legal o con la aplicación de criterios técnicos. Estos deben considerar aspectos históricos, del relieve o topográficos, poblacionales, jurídicos, entre otros.

En el aspecto histórico, es necesario establecer la centralidad urbana histórica que hace referencia al origen o la fundación de la ciudad, es decir, cómo surgió y se desarrolló su núcleo principal y hacia dónde se expandió y creció. Por lo general, es el lugar donde se establecieron las primeras instituciones, plazas o parques, mercados y edificios, a los que se les denomina hitos urbanos, por su relevancia cultural y socioeconómica en el espacio urbano. Es así como se considera la configuración urbana como uno de los criterios de delimitación del área de estudio.

Los factores geográficos y la topografía del relieve son importantes de considerar en el estudio de las ICU (Fang et al., 2024a). Las elevaciones del terreno inciden en la intensidad y distribución de la temperatura, así como influyen en el comportamiento de los vientos. Al definir el área de estudio, se recomienda que la diferencia altitudinal de los sitios a monitorear en las ciudades no debe superar más de los 100 msnm (Romero-Dávila et al., 2011). De lo contrario, se introduciría un sesgo asociado a la variabilidad de la temperatura por gradiente adiabático y no por las características de los materiales presentes en la superficie de la ciudad.

Otras opciones son ajustar la temperatura usando un modelo de elevaciones detallado (resolución espacial óptima entre el intervalo de 1 metro a 5 metros) o llevar a cabo un análisis de transectos térmicos que atravesase el área de estudio. En términos de costo-beneficio, la segunda opción es la más viable en Costa Rica, ya que los datos de elevaciones de baja escala (1:1 000 o 1:5 000) no están disponibles para todo el territorio costarricense.

En la delimitación del área de estudio es importante considerar la densidad poblacional (cantidad de habitantes por hectárea), ya que es un indicador no solo de la población afectada por el fenómeno, sino que ayuda a determinar las zonas de concentración habitacional. Para la implementación metodológica en este estudio, se utilizó la información disponible por unidad geoestadística mínima (UGM) elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) en el Censo de Población del 2011.

Es importante indicar que se solicitó la información actualizada por UGM del Censo de Población del 2022, pero según comunicado del INEC los datos no están disponibles a esa escala espacial. Lo anterior es una limitación importante para establecer la asociación entre las temperaturas superficiales con la ocupación habitacional, tal y como lo establece (Fang et al., 2024b; Oke, 1973). Pero, a pesar de que el dato de densidad de población tiene una antigüedad de once años, ofrece una buena estimación sobre la ubicación de las zonas residenciales, lo cual es esencial para la delimitación del área a estudiar y la demarcación de los transectos (centralidad y periferia).

Al establecer los criterios para delimitar la zona urbana, es importante homologar las áreas para realizar los procesamientos matemáticos y algebraicos a las capas ráster y vectoriales. Se propone la construcción de un área de interés que abarque el área central y periférica, a partir de intersección de los criterios antes indicados. Se definieron zonas con una longitud de 16 x 16 km para el caso de Alajuela y de 8 x 8 kilómetros para la ciudad de Esparza, es decir, se usa una proporción 1:2. Este tipo de demarcación

abarca ambas ciudades no solo en un sentido jurídico, físico y demográfico, sino también facilita el álgebra matricial.

Para el caso de estudio en Alajuela, se delimita el cuadrante de análisis en las siguientes coordenadas geográficas máximas (decimales) (ver Tabla 2):

Tabla 2. Alajuela: coordenadas máximas del cuadrante de análisis

Norte	10,0676236
Sur	9,90200158
Oeste	-84,3140597
Este	-84,1645693

El área considerada para el análisis de acuerdo con las dimensiones del cuadrante propuesto es de 256 km².

Para el caso de estudio en Esparza, se delimita el cuadrante de análisis en las siguientes coordenadas geográficas máximas (decimales) (ver Tabla 3):

Tabla 3. Esparza: coordenadas máximas del cuadrante de análisis

Norte:	10.0311967
Sur:	9.9553048
Oeste:	-84.7009221
Este:	-84.6237945

El área considerada para el análisis de acuerdo con las dimensiones del cuadrante propuesto es de 64 km². El área contiene las áreas urbanas de los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande.

4.1.2 Componente de variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones en los patrones climáticos promedios en una región específica durante períodos de tiempo cortos como meses, años o décadas. Su estudio implica el análisis de datos climáticos obtenidos a partir de estaciones meteorológicas y metodologías como la descomposición de series de tiempo. Chandler (2005) y Zhang (2018) establecen que las tendencias de una serie temporal climática no son lineales y para describir los patrones a lo largo de un período determinado, es necesario establecer las variaciones estacionales entre años, durante el año e incluso durante las horas del día.

La investigación propone la aplicación de modelos aditivos generalizados (MAG) a los datos meteorológicos en la determinación de la variabilidad climática, debido a su capacidad para modelar relaciones complejas y no lineales entre los factores climáticos y sus efectos. Esto implica establecer los cambios en variables como la temperatura, la precipitación, la humedad y otros factores atmosféricos, los cuales pueden tener relaciones no lineales con los fenómenos que se intentan analizar (como la frecuencia de eventos extremos, patrones de temperatura a lo largo del tiempo, o impactos en ecosistemas). Además, permiten visualizar estas asociaciones de forma sencilla. Los MAG analizan y observan el comportamiento estacional, tendencial y aleatorio, mediante la siguiente ecuación:

$$y = \beta_0 + f_{estacional}(x_1) + f_{tendencia}(x_2) + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma^2 \Lambda)$$

Donde β_0 es la intersección, $f_{estacional}$ y $f_{tendencia}$ son funciones no paramétricas suavizadas para las características estacionales y de tendencia de las variables seleccionadas (temperatura, humedad relativa, etc.). Mientras que, x_1 y x_2 son los datos covariables que proporcionan algún tipo de indicadores de periodicidad para los tiempos en el día, dentro del año y entre años. Además, el error tiene una distribución normal multivariante, con media 0 y varianza multiplicada por la matriz de covarianza (Λ).

En la Tabla 4 se indican las estaciones meteorológicas de las que se obtuvo la información de las variables de temperatura, humedad relativa, precipitación y viento. En las Figura 2 y Figura 3 se visualiza la distribución espacial de las estaciones meteorológicas más cercanas a las ciudades de Alajuela y Esparza. Los datos de las estaciones meteorológicas y dispositivos registradores se preparan en un formato de serie de tiempo en el programa R; por lo que se define su fecha de inicio, fecha final y frecuencia de las observaciones por unidad de tiempo. Esto permite su ajuste y manejo estadístico, que incluye tratamiento de datos atípicos y vacíos de mediciones, proceso de descomposición de las series, entre otros.

Tabla 4. Estaciones meteorológicas, IMN

Código	Nombre	Poblado	Latitud	Longitud	Altitud	Período	
						Inicio	Fin
69695	Balsa	San Ramón	10,17444	-84,49694	1110	07/01/2008	18/02/2024
73123	ITCR	Cartago	9,8522222	-83,908611	1360	01/01/2004	30/04/2024
73129	RECOPE	Ochomogo	9,89450278	-83,938725	1546	01/01/2004	30/04/2024
78033	Aranjuez, Pitahaya	Puntarenas	10,0558333	-84,80694	30	09/07/2016	03/03/2024
78035	Refugio Cipanci	Cañas	10,21194	-85,234	10	05/07/2012	10/06/2024
82011	San Mateo	San Mateo	9,93166	-84,519167	182	21/11/2012	04/03/2024
82013	ABOPAC	Orotina	9,89472	-84,645	133	01/11/2013	31/05/2024
82015	Oroceiba	Orotina	9,89666	-84,6	140	08/11/2014	31/05/2024
82019	Guayabal Mastate	Orotina	9,9175	-84,58527	198	06/06/2017	31/05/2024
84139	CIGEFI	San José	9,93638889	-84,045278	1210	01/01/2004	10/06/2024
84141	IMN, Aranjuez	Aranjuez	9,93794722	-84,067175	1181	02/01/2004	07/05/2024
84169	A. Juan Santamaría	San José	9,99068056	-84,214703	913	03/01/2004	30/04/2024
84181	Iztarú	La Unión, Cartago	9,88944444	-83,968889	1680	04/01/2004	19/02/2024
84187	Fabio Baudrit	Alajuela	10,005	-84,265556	840	05/01/2004	30/04/2024
84191	RECOPE	La Garita	10,00527778	-84,295833	740	06/01/2004	10/06/2024
84193	AEROP, Pavas este	San José	9,95659167	-84,138	997	02/08/2008	05/05/2024
84197	Santa Bárbara	Santa Bárbara	10,03333333	-84,165833	1070	01/01/2004	23/05/2024
84199	Belén	Belén	9,9975	-84,185556	926	03/11/2004	05/05/2024
84203	Zapote	San José	9,92277778	-84,059167	1192	15/11/2007	21/08/2022
84221	Laguna Volcán Poás	Poás	10,18916667	-84,232	2598	06/09/2011	29/04/2024
84225	UTN, Balsa de Atenas	Atenas	9,9355	-84,379806	437	21/08/2012	30/03/2024
84243	Santa Lucía, Heredia	Barva	10,023	-84,111781	1257	20/11/2013	10/06/2024
84293	Chagüites	Santa Bárbara	10,0794	-84,164194	1486	19/09/2015	20/03/2024

Fuente: IMN (2024).

Nota: En los valores de latitud y longitud en grados decimales no se ajusta a un número de cifras significativas, para no perder precisión de la ubicación de las estaciones meteorológicas.

4.1.3 Selección y procesamiento de las imágenes satelitales

Para identificar la ICU es común el uso de sensores remotos para monitorear la temperatura del aire alrededor de las zonas de estudio (Gartland, 2008). Los sensores remotos se utilizan para determinar la temperatura de la superficie terrestre, así como para identificar los tipos de coberturas, emisividad y reflectividad de los materiales dispuestos en la ciudad (Kala et al., 2014; Oke, 2006).

Sin embargo, las imágenes satelitales multiespectrales en órbitas casi polares con sensores pasivos presentan limitaciones, como el registro parcial y no continuo de la información de temperatura durante el día, ya que solo lo realizan durante el paso del sensor por el área de estudio, por lo que su disponibilidad es irregular. Aunque mantienen una ventaja fundamental con respecto a otros métodos, ya que logran registrar las variables físicas sobre grandes extensiones de terreno. Es decir, cuentan con una alta resolución espacial, pero baja resolución temporal. Otra ventaja comparativa es la disponibilidad de imágenes de acceso libre para realizar la identificación de la ICU.

Este estudio utiliza las imágenes obtenidas por el sensor infrarrojo térmico (TIRS) de los satélites Landsat 8 y 9. El sensor TIRS dispone de una amplia documentación y literatura científica en la determinación de la temperatura de la superficie terrestre. Se destacan los métodos y algoritmos utilizados por Ghulam (2010), Rozenstein et al. (2014), Sobrino et al. (2004), Wang et al. (2015) y Wang et al. (2018). El sensor TIRS (Banda 10 y 11) presenta una resolución espacial de 90 a 100 metros; por lo que los datos del sensor TIRS se re-escalan a 30 metros para ser analizados en conjunto con el sensor Operational Land Imager (OLI).

Si bien existen otros sensores como MODIS y Sentinel 3 que pueden utilizarse para la estimación de la temperatura superficial, para este caso en particular, su uso supone varias limitaciones. La principal limitante es su resolución espacial. En el caso del sensor de MODIS (Bandas 20 a 36) y el sensor SLSTR de Sentinel 3, la resolución espacial de sus bandas térmicas es de 1 kilómetro, lo cual no lo hace viable para el estudio de las ciudades con la extensión superficial como las de Alajuela y Esparza.

Para la selección de las imágenes, se evalúa la cantidad de nubosidad, neblina, polvo o humo presente en la imagen, entre un 5 % a un 10 % en la zona de estudio. Para verificar se revisan los metadatos, con el fin de examinar algún tipo de anomalía en el sensor o el proceso de adquisición. A las imágenes satelitales en la lista de la Tabla 21, se les realiza una serie de procesos para poder ser utilizadas. El primero es la calibración por factor de escala para convertir los valores digitales de los píxeles a valores de reflectancia, que usualmente usan las siguientes ecuaciones:

Radiancia:

$$L_{\lambda} = \text{Ganancia} \times \text{ValorPíxel} + \text{Valor de compensación}$$

$$L_{\lambda} = \frac{Q_{cal}}{100}$$

Reflectancia:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \sin\theta}$$

Donde:

- L_{λ} : Radiancia en unidades de $W/(m^2*sr*\mu m)$
- d : Distancia Sol-Tierra, en unidades astronómicas.
- $ESUN_{\lambda}$: Irradiancia solar en unidades de $W/(m^2*sr*\mu m)$
- θ : Elevación del Sol en grados decimales

Los datos anteriores se obtienen de los metadatos de las imágenes. A su vez, las imágenes del sensor OLI de los satélites Landsat 8 y 9, en su producto nivel dos, son imágenes preprocesadas por la USGS y la NASA, por lo que solo es necesario realizar la siguiente operación para obtener los valores de reflectancia.

$$factor\ de\ escala = (lsat.\ aoi \times 0,0000275 \pm 0,2)$$

Donde:

lsat.aoi: Valor digital del píxel de la imagen Landsat

Mientras que en el caso del sensor TIRS, el producto de temperatura de superficial de Landsat en el nivel 2 de la Colección 2 se genera a partir de las bandas infrarrojas térmicas de nivel 1 de la Colección 2 de Landsat, la reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA), la temperatura de brillo TOA, los datos de la base de datos de emisividad global (GED) del radiómetro térmico avanzado en el espacio (ASTER), los datos del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de ASTER y los perfiles atmosféricos de altura geopotencial, humedad específica y temperatura del aire extraídos de los datos de reanálisis que proporciona la Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (2020).

Se obtienen los valores de temperatura superficial mediante la siguiente conversión de escala:

$$lst = (lsat.\ aoi \times 0,00341802 + 149,0) - 273,15$$

Donde:

TST: Temperatura de la superficie terrestre

ICU: Intensidad de la ICU en °C

4.1.3.1 Análisis zonal

Para el estudio del patrón de distribución espacial de la temperatura de la superficie terrestre (TST), se elabora un ráster compuesto con todas las imágenes disponibles entre el año 2020 al 2024 (26 para cada caso de estudio). Se asocia la fecha de adquisición y se conforma un ráster con propiedades similares a una serie de tiempo, al que se le denomina cubo de datos ráster. El "cubo" presenta dos dimensiones que corresponden a las coordenadas espaciales (X, Y) y la tercera dimensión representa el tiempo (fecha de captura de la imagen). Este tipo de formato facilita el manejo de los datos, según el tipo de análisis que se requiera, por ejemplo, uso de la totalidad de la ingesta de imágenes, imágenes disponibles en época seca o en un mes particular.

Al cubo de datos ráster se le aplican los estadísticos de media, mediana, máximo y mínimo, para generar ráster derivados y cuadros estadísticos descriptivos. Para los estudios de caso se decide trabajar con los valores de la media muestral. Los detalles de procesamiento se explican para cada método de análisis de la ICU.

5. Métodos para el análisis de la ICU

5.1 Método indirecto: cruce de variables

Consiste en identificar las coberturas de la tierra y realizar un cruce o superposición de estas con respecto a los datos de TST. Este tipo de análisis permite identificar relaciones, patrones, o zonas específicas donde ambos tipos de datos se intersectan.

Para determinar las coberturas presentes en el área de estudio, se utiliza el sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para Costa Rica elaborado por el MINAE (SIMOCUTE). Este sistema establece los estándares del país para la agrupación de elementos terrestres en las siguientes clases: cobertura de la tierra, uso de la tierra y ecosistemas (Acevedo & Villalobos, 2023). Debido a las características de las imágenes satelitales disponibles, la investigación utiliza el primer nivel jerárquico de la clasificación de cobertura de la tierra.

Tabla 5. Clave de clasificación de cobertura de la tierra

Clasificación	Definición
Vegetación (C1000)	Área de la superficie terrestre o del suelo cubierta por un determinado tipo de cobertura vegetal.
Terreno descubierto (C2000)	Área desprovista de vegetación o infraestructuras.
Infraestructura (C3000)	Áreas cubiertas con instalaciones construidas por el ser humano.
Agua (C4000)	Superficie cubierta con un espejo de agua.
Nubes y sombras (C5000)	Áreas en las que no es posible determinar la cobertura por efecto de la presencia de nubes, sombras de nubes u otras sombras del terreno en la imagen satelital o fotografía aérea.
Sin información (C6000)	Áreas de la superficie terrestre de las cuales no se posee información disponible.

Fuente: Acevedo & Villalobos, SIMOCUTE (2023)

Para la identificación de las coberturas de la tierra se emplean los datos de las imágenes satelitales Sentinel 2 en varios períodos temporales. Las imágenes satelitales son rectificadas y corregidas si fuera el caso y se utilizan los siguientes pasos para su tratamiento:

1. La composición de bandas en falso color (FCC) es una técnica usada en teledetección que resalta características específicas que pueden no ser visibles fácilmente en una imagen en color natural. En el caso de las imágenes Sentinel-2, la combinación de bandas para la FCC se realiza utilizando la Banda 8 (Infrarrojo cercano, 835,1 nm) para el canal rojo, la Banda 4 (Rojo, 664,5 nm) para el canal verde, y la Banda 3 (Verde, 560 nm) para el canal azul. Esta combinación de bandas, con una resolución espacial de 10 metros por píxel, es eficaz para la identificación de diversas características del paisaje, como la vegetación y las áreas urbanas (Purwanto & Asriningrum, 2019).
2. En la elaboración de datos de entrenamiento, se utiliza la composición de bandas en FCC como capa base para identificar y distinguir características heterogéneas en el paisaje. La FCC facilita la visualización de diferentes tipos de cobertura terrestre al resaltar contrastes en la imagen. En este proceso, se seleccionan áreas representativas en la imagen FCC para

definir zonas de entrenamiento, las cuales se digitalizan en una capa vectorial de polígonos que representan las distintas categorías de la cobertura de la tierra. Estos polígonos se asignan a las categorías establecidas en la Tabla 5, lo que permite la clasificación precisa de las imágenes en función de las características espectrales y de textura observadas.

3. La construcción de una colección de sitios de entrenamiento se usa para evaluar la precisión de la clasificación obtenida, se efectuó un análisis de similitud espectral y visual de los sitios de control de validación, los cuales sirvieron como base ampliada para la elaboración de una matriz de concordancia. Esta matriz se construyó utilizando un diseño de muestreo estratificado, lo que asegura una representación adecuada de las categorías de cobertura y uso del suelo. Este enfoque se considera dirigido, con un tamaño y distancia constante del conjunto de muestra.
4. Uso del clasificador Random Forest (RF): El clasificador de RF asimila numerosas corridas de procesamiento independiente a las que denomina árboles de decisión para producir los resultados de la clasificación, donde cada árbol se “cultiva” a la máxima profundidad sin poda. Cada árbol se construye con muestras de arranque (muestreo fuera de bolsa) y las variables en cada nodo se seleccionan al azar para introducir aleatoriedad, minimizar la correlación entre los árboles y reducir el sesgo de entrenamiento producido por árboles individuales. La RF se ha utilizado para diversas aplicaciones de mapeo y regresión, incluida la estimación de biomasa, estimación de la calidad del agua y la clasificación de la cobertura del suelo. Este tipo de clasificador se basa en la siguiente ecuación:

$$p(x) = \frac{1}{\sum_{t=1}^T \alpha_t I(t \in S)} * \sum_{t=1}^T \alpha_t \hat{p}_t(x) I(t \in S)$$

Donde:

- $p(x)$: Es la probabilidad de que una observación x sea de la clase c .
- T : Representa el número total de árboles en el bosque (Random Forest). Cada árbol está indexado por t , donde $t \in \{1, 2, \dots, T\}$.
- α_t : Es el coeficiente que puede representar el “peso” o la importancia que se asigna a cada árbol individual en el conjunto de árboles. Los árboles pueden tener el mismo peso (es decir, $\alpha_t = 1$ para todos los t), pero se puede definir que los árboles tengan diferentes pesos dependiendo de su desempeño.
- $I(t \in S)$: Es una función indicadora que toma el valor de 1 si el árbol t está en el subconjunto de árboles S utilizados para hacer la predicción, y 0 si no lo está. Puede estar relacionado con la bolsa (muestreo de subconjuntos de datos o características) que se utiliza en Random Forest.
- $\hat{p}_t(x)$: Es la probabilidad predicha por el árbol t de que la observación x pertenezca a la clase c . Cada árbol hace una predicción independiente sobre a qué clase considera que pertenece x .

5. Se prefiere la selección de imágenes satelitales capturadas cercanas al período con mayor incremento de la variabilidad térmica durante en el año. Según Barrantes-Sotela (2020), por lo general ocurre alrededor de los días 100 y 120 de año (meses de marzo y abril).
6. Debido a la dinámica de cambio de las coberturas de la tierra en sus diferentes niveles, se recomienda que las coberturas de la tierra identificadas sean temporalmente cercanas al período en el que ocurre la mayor intensidad de la ICU.
7. La matriz de confusión: Se valora la precisión del clasificador mediante el indicador estadístico de concordancia Kappa,

descrito por Cohen (1960). El índice Kappa mide el grado de concordancia entre los resultados de la clasificación supervisada y el uso/cobertura registrada en terreno, ajustando la concordancia observada por el acuerdo esperado al azar. El índice Kappa varía de 0.0, que indica ausencia de correlación, a 1.0, que refleja una correlación perfecta. Según Landis y Koch (1977), un coeficiente Kappa mayor a 0.8 sugiere que la clasificación realizada es poco probable que haya sido obtenida por azar. En la Tabla 6 se indica el nivel de concordancia del clasificador según el valor del índice Kappa.

Tabla 6. Escala de valoración del índice Kappa

Valor del índice Kappa	Fuerza de la concordancia
0	Sin concordancia
< 0,20	Insignificante
0,21 – 0,40	Discreto
0,41 – 0,60	Moderado
0,61 – 0,80	Sustancial
0,81 – 1,00	Casi perfecto

Análisis de precisión y concordancia de la clasificación de las coberturas de la tierra

Este análisis proporciona una medida cuantitativa del desempeño del clasificador y ayuda a identificar áreas de mejora en el proceso de clasificación de las coberturas de la tierra realizada a partir del sensor remoto.

Esto quiere decir que, además de obtener la clasificación de las coberturas de la tierra de una imagen satelital, es necesario comprobar que la clasificación fue realizada de manera correcta o que tanto se acerca o se aleja de la realidad.

Matriz de concordancia

La matriz de concordancia es uno de los primeros pasos que se deben realizar para comprobar los datos obtenidos en la clasificación de las coberturas de la tierra. Ahora, los datos obtenidos de la matriz de concordancia se utilizan para calcular el índice Kappa.

Superposición de variables de coberturas de la tierra y TST

El análisis busca entender la relación entre el tipo de coberturas y las temperaturas en diferentes áreas. Este tipo de estudio es común en el análisis de ICU, donde las zonas urbanas tienden a tener temperaturas más altas que las áreas rurales o naturales. En este caso particular, se compara el ráster de TST promedio de las imágenes capturadas entre enero y mayo (estación seca) entre los años 2020 y 2024 y la capa ráster de cobertura de la tierra.

Se utilizan gráficos de caja y un análisis de varianza (ANOVA) para investigar si las diferencias en la TST promedio observadas entre las diferentes categorías de cobertura son estadísticamente significativas.

La fórmula del ANOVA se expresa generalmente como:

$$SST = SEE + SSR$$

Donde:

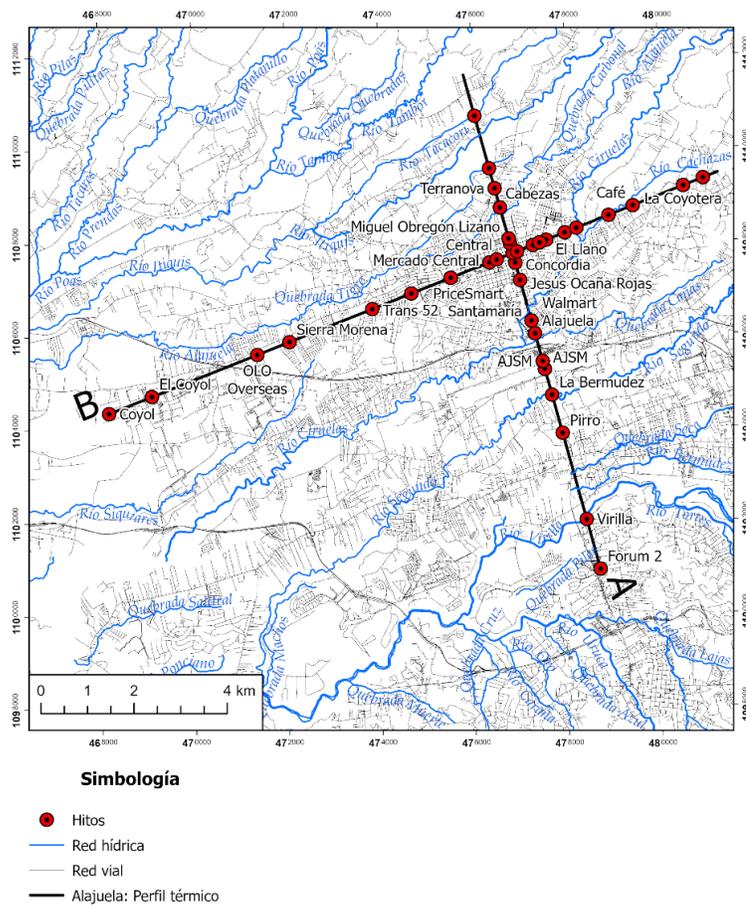
- SST: Es la suma total de cuadrados, que representa la variabilidad total de los datos.
- SSE: Es la suma de cuadrados entre los grupos que mide la variabilidad debida a las diferencias entre los grupos.
- SSR: Es la suma de cuadrados dentro de los grupos que mide la variabilidad dentro de cada grupo.

El estadístico F y el valor p se usan para determinar si las diferencias entre medias de los grupos son significativas. Posteriormente, se aplica la prueba post-hoc Tukey HSD que compara todas las medias de los grupos de dos en dos, calculando la diferencia entre cada par de medias y determinando si estas diferencias son estadísticamente significativas. Esta prueba corrige por la multiplicidad de comparaciones, lo que ayuda a controlar el error tipo I (falsos positivos).

5.2 Método indirecto: análisis de transectos

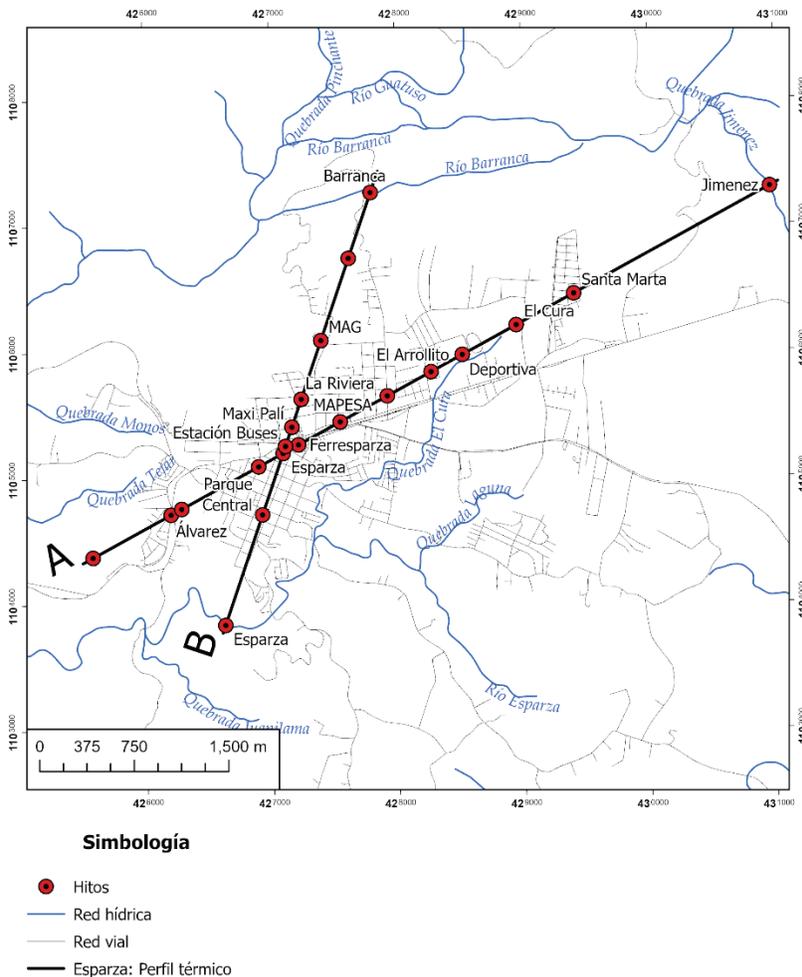
La comparación entre zonas de la ICU utilizando el análisis de transectos consiste en determinar la diferencia de la TST entre la zona urbana y su periferia. Supone la elaboración de perfiles del ICU con direcciones en sentido ortogonal o diagonal al centro medio de la ciudad y extendiéndose hacia la zona externa o periférica. Este método de análisis es uno de los más simples y efectivos para observar el desarrollo de la ICU. En la Figura 4 y la Figura 5 se observan los transectos utilizados para la ciudad de Alajuela y Esparza, respectivamente.

Figura 4. Alajuela: perfil de análisis de las temperaturas superficiales



Al largo de las líneas de los perfiles A y B se extrae la información de TST de un ráster derivado del cubo de datos ráster, al que se le calcula el estadístico de media a todas las imágenes disponibles entre los años 2020 y 2024 (Ver Tabla 21).

Figura 5. Esparza: perfil de análisis de las temperaturas superficiales



5.3 Método directo: estaciones fijas

El método se orienta en la recolección de datos de temperatura y humedad relativa, con el propósito de demostrar la aplicación del método de estación fija y medir las temperaturas superficiales (día - noche). Para este proceso se utilizaron 9 equipos HOBO MX2301. Estos equipos son resistentes a la intemperie con sensores integrados de temperatura y humedad relativa. La descarga de los datos se realiza por medio de tecnología Bluetooth y ofrece mediciones de alta precisión con una incertidumbre de medición determinada por el fabricante en +/- 0,2 °C en temperatura y +/- 2,5 % HR en humedad relativa.

Esto permite contar con datos de serie de tiempo a un período horario, diario, mensual y anual, según sean las necesidades particulares. Al usar este método, es necesario escoger de manera estratégica la ubicación de los colectores de datos. Lo que permite reducir la escala de análisis, y generar un mayor detalle de la ICU, ya que se puede establecer con datos de fuente primaria

el comportamiento térmico a nivel del hábitat humano. Se recomienda la colocación de los dispositivos a una altura sobre el nivel del suelo entre 1,5 – 2 m) (Oke, 2006b; Voogt, 2007).

Los criterios para la colocación de los equipos son los siguientes:

- Distribución en tipos de cobertura y superficies variadas.
- Altura sobre el nivel del suelo y cerca de las superficies.
- Los sitios deben estar alrededor del área urbana principal.

En este estudio, la captura de datos se realizó en intervalos de 5 minutos, por un período de 16 días (entre el 2024-07-02 al 2024-07-18). La colocación de los equipos se coordinó con la municipal de Esparza para la selección de sitios o edificios, que puedan garantizar el resguardo y los datos de los dispositivos. En Tabla 7, así como en las Figura 6 y Figura 7 se muestra la información de distribución de los dispositivos y un ejemplo de la colocación de estos en los sitios seleccionados.

Tabla 7. Esparza: características de los sitios de muestreo

Sitio	Dispositivo	Objeto geográfico	Latitud	Longitud	Altura (msns)
1	6749	140102 - Edificio gubernamental	9,993694	-84,6716	1,20
2	6751	140101 - Viviendas y edificios	9,984261	-84,6666	2,20
3	6750	140104 - Edificios religiosos	9,989388	-84,6658	3,05
4	6752	140116 - Servicios	9,994964	-84,6647	1,55
5	6758	140201 - Centro educativo	9,998186	-84,6648	1,90
6	6755	140202 - Universidades	9,992986	-84,6518	2,02
7	6754	140102 - Edificio gubernamental	10,00313	-84,658	1,45
8	6756	140201 - Centro educativo	9,993099	-84,6582	1,90
9	6757	140401 - Estadio	10,00229	-84,6525	1,85

Nota: Intervalo de recolección de datos cada 5 minutos entre las fechas 2024-07-02 al 2024-07-18. msns: metros sobre el nivel de la superficie.

Si las circunstancias no permitieron la colocación de los dispositivos a una altura estándar, por lo que fue necesario estandarizar los datos a una elevación de referencia (en este caso 1,5 m). En la investigación se aplica la siguiente ecuación de ajuste, para este fin:

$$T_2 = T_1 - (\Delta H * G_h)$$

$$T_2 = T_1 - (h_{sensor} - h_{referencia}) * G * (1 - \frac{HR}{100})$$

Donde:

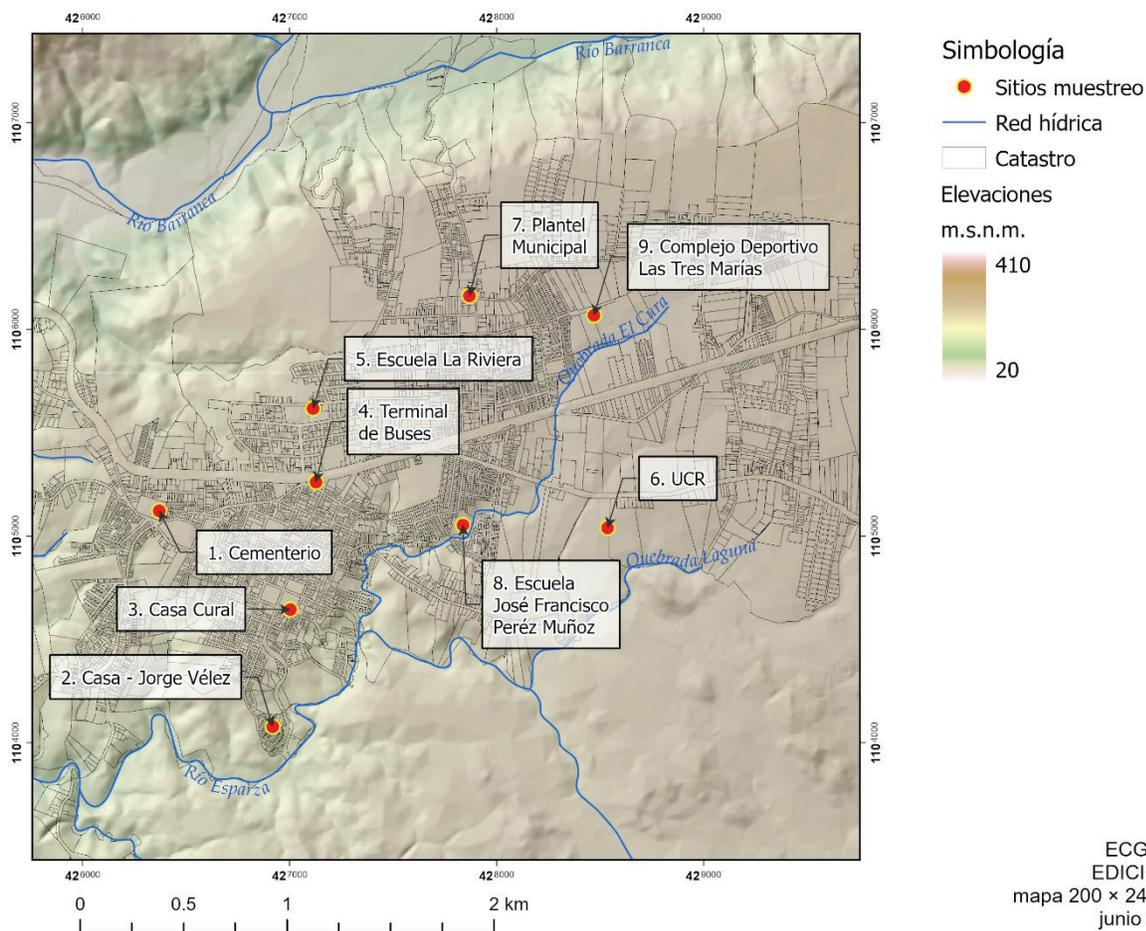
- T2 es la temperatura ajustada a la nueva altitud (1.5 m).
- T1 es la temperatura inicial.
- Δh es el cambio de altitud en metros. Altura del sensor (h_{sensor}) – Altura de referencia ($h_{referencia}$).
- G es el gradiente adiabático térmico aproximado (en °C por metro) es igual a 0,0065 °C/m.
- HR es la humedad relativa en %.

Con los resultados obtenidos de temperatura se realiza una interpolación de ponderación por distancia inversa o en inglés Inverse Distance Weighting (IDW), para construir un mapa térmico. La selección de este interpolador se debe principalmente a la cantidad de sitios de muestreo, en este caso 9 sitios, por lo que no es posible utilizar un interpolador geoestadístico más potente como el Kriging, el cual necesita entre 12 a 20 sitios de observación para obtener resultados robustos.

Respecto de las ventajas de un IDW se encuentran su fácil implementación y la claridad en la influencia de los datos. Sin embargo, entre las desventajas se encuentra su menor precisión en las áreas periféricas, debido a la falta de datos circundantes; su sensibilidad a la densidad de los puntos de muestreo, la generación de estimaciones sesgadas cuando existe una variabilidad significativa entre puntos cercanos y su incapacidad para considerar tendencias espaciales más amplias.

En general, el método de estación fija puede complementar la baja resolución temporal que presenta el uso de imágenes satelitales. También, es posible complementar la información de un método de directo para ICU atmosférico, que usa registros de temperatura por medio de estaciones fijas o móviles alrededor de las áreas de interés. Pero se recomienda una instrumentación en más de 15 sitios para utilizar un interpolador geoestadístico.

Figura 6. Esparza: ubicación de los dispositivos HOBO MX2301 para el registro de temperatura y humedad relativa



ECG-UNA
EDICIÓN: 1
mapa 200 × 240 mm
junio 2024.

⁴En el contexto de Costa Rica, el valor del gradiente adiabático (G) generalmente se aproxima al valor estándar, ya que el país presenta una mezcla de condiciones húmedas y tropicales. Sin embargo, debido a las características climáticas y geográficas de Costa Rica, el **gradiente adiabático húmedo** suele ser más relevante en muchas áreas debido a la alta humedad. En las zonas más húmedas y montañosas de Costa Rica, especialmente en la vertiente del Caribe y zonas altas como la Cordillera Central, el **gradiente adiabático húmedo** tiende a ser más cercano al rango inferior (0,005 °C/m), debido a la gran cantidad de humedad en el aire.

Figura 7. Sitio 5: Escuela La Riviera.



Nota. Colocación del dispositivo 6758 el día 2024-07-02. En la fotografía Luis Guillermo Calderón Ramírez (ECG-UNA) y Esteban Aguilar Castrillo (Municipalidad de Esparza). Fotografía por Omar Barrantes Sotela (ECG-UNA).

6. Resultados

6.1 Caso de estudio: Alajuela

6.1.1 Delimitación del área de estudio

Alajuela es el cantón primero de la provincia del mismo nombre. Las coordenadas geográficas medias del cantón están dadas por 10°09'54" latitud norte y 84° 15'59" longitud oeste. Según la división político-administrativa de la República de Costa Rica, la anchura máxima es de cincuenta y nueve kilómetros, en dirección noreste a suroeste, desde la intersección de la línea imaginaria límite con la provincia de Heredia, en el río Sardinal, a unos 3200 metros al norte del poblado Bajo Latas, en el distrito de Sarapiquí, hasta la confluencia de los ríos Virilla y Grande. En la Figura 10, se observa el área de estudio.

Aspectos históricos relevantes

Según IFAM (2002), en 1777 los vecinos de La Lajuela y de La Ciruelas, ante la obligación que se les impuso de trasladarse a Villa Vieja (hoy Heredia), solicitan la autorización de un oratorio para suspender el traslado. La gobernación suspendió el traslado de los vecinos siempre que tuvieran trabajos y bienes en el lugar, pero debían construir un oratorio. El número de habitantes de la región comprendida por los barrios La Lajuela, Púas, Targuás, Ciruelas y Río Grande aumentó poco a poco, por lo que fue necesario erigir una parroquia. El 11 de octubre de 1782 se autoriza que en La Lajuela, sitio escogido por los vecinos de los cinco barrios,

se erigiera un oratorio provisional. La edificación fue bendecida el 12 de octubre de 1790 y dedicada a San Juan de Nepomuceno. A comienzos de 1854 se inició la construcción del actual templo, el cual fue bendecido el 22 de diciembre de 1863. En 1921 se estableció la provincia eclesiástica de Costa Rica y mediante Bula Praedecessorum se erigió la diócesis de Alajuela, a la iglesia se le otorgó el título de catedral. En 1927 se declaró Santuario Nacional de Santo Cristo de La Agonía a la parroquia del mismo nombre.

El primer Ayuntamiento de Alajuela empezó a funcionar en 1813. Mediante un decreto otorgando el título de Villa a varias poblaciones principales de nuestro territorio, entre las cuales estaba Alajuela. Posteriormente, el 11 de noviembre de 1824, el gobierno promulgó la ley n.o 20 que le confirió a la villa de San Juan Nepomuceno de Alajuela la categoría de ciudad (Meléndez-Chaverri, 2013).

En 1866 se abrió una escuela primaria financiada por la municipalidad de Alajuela. En 1879 se estableció el primer colegio de segunda enseñanza, con el nombre de Instituto Municipal de Varones; el 3 de mayo del mismo año se inauguró el colegio de Nuestra Señora de Sión. El Instituto de Alajuela, colegio público, se fundó en 1887 durante la administración de don Bernardo Soto Alfaro. Mediante ley n.o 6541 del 19 de noviembre de 1980, en el gobierno de don Rodrigo Carazo Odio, se estableció el Colegio Universitario de Alajuela.

Altitudes

Según la división territorial administrativa de Costa Rica, las elevaciones en metros sobre el nivel medio del mar del centro urbano de los distritos del cantón son las siguientes:

Ciudad Alajuela 952, Villa San José 882, Villa Carrizal 1470, Villa San Antonio del Tejar 870, Villa Guácima 803, Villa San Isidro 1.357, Villa Sabanilla 1270, Villa San Rafael 845, Villa Río Segundo 930, Villa Desamparados 1010, Villa Turrúcares 638, Villa Tambor 950, Villa Garita 693 y Villa San Miguel 510.

Características demográficas

Según datos del censo de población del INEC del 2011, el cantón mantenía una población de 254 886 habitantes y para el censo de población del 2022 la cantidad aumentó a 322 143. Se establece en primera instancia que la población impactada está concentrada en el distrito central de Alajuela que para el año 2011 fue de cuarenta y dos mil novecientos veinticinco (42 975) habitantes, y para el año 2022 el INEC se estima la población en cuarenta y ocho mil trescientos veintiséis (48 326) habitantes. Los valores más elevados de densidad poblacional se localizan alrededor del casco histórico y centralidad de la ciudad de Alajuela. Según el cálculo derivado de las Unidades Geoestadísticas Mínimas del Censo de Población del INEC del 2011 destacan en este aspecto las localidades de El Llano, Villahermosa, Las Cañas, Molinos, Villabonita, Jocote, Trinidad, Pueblo Nuevo y Brasilia, con densidades de 1000 habitantes por hectárea (Figura 8 y Figura 9).

Configuración urbana

Presenta un centro urbano bien definido con trama urbana en forma de damero, con una alta densidad de la edificación con alturas predominantemente de uno o dos pisos. En el distrito central se concentran los servicios y equipamientos que abastecen a los habitantes del cantón y a otros cantones colindantes, como es el caso de Santa Bárbara, San Joaquín, Belén, Poás, Grecia y Atenas. La Municipalidad de Alajuela identificó puntualmente 42010 actividades en todo el cantón y establece que el uso urbano predominante es el residencial (94.2 %), el comercio y los servicios ocupan un 2,4 % y las áreas recreativas y deportivas públicas significan un 0.79 % del uso de las edificaciones (Municipalidad de Alajuela, (2024).

Los datos del Plan Regulador del Cantón de Alajuela indican que en el casco central de la ciudad y alrededor del parque central las actividades comerciales y de servicios corresponden a un 6,8 % del total de 10894 lotes estudiados en el distrito central. Las edificaciones comerciales mantienen áreas pequeñas y muestran una gran diversidad de actividades. No obstante, el sector

residencial es el que predomina, ya que representa el 89,26 % de las estructuras identificadas, mientras que los servicios públicos, institucionales y comunales, salud y entidades financieras, así como servicios profesionales en conjunto, forman un 9,8 %. Por tanto, se considera el casco central como de uso mixto. Se destaca que existen 43 propiedades que corresponden a estacionamientos vehiculares. Las actividades de servicios tienden a dispersarse en las periferias con sentido oeste y este, principalmente debido a la forma de la ciudad y presenta poco desarrollo vertical. En el sector sur, la limitación principal de este desarrollo vertical se debe a la zona de aproximación del Aeropuerto Internacional Juan Santamaría. Se considera a Alajuela como una ciudad secundaria e intermedia.

Figura 8. Alajuela: densidad poblacional en el área de interés

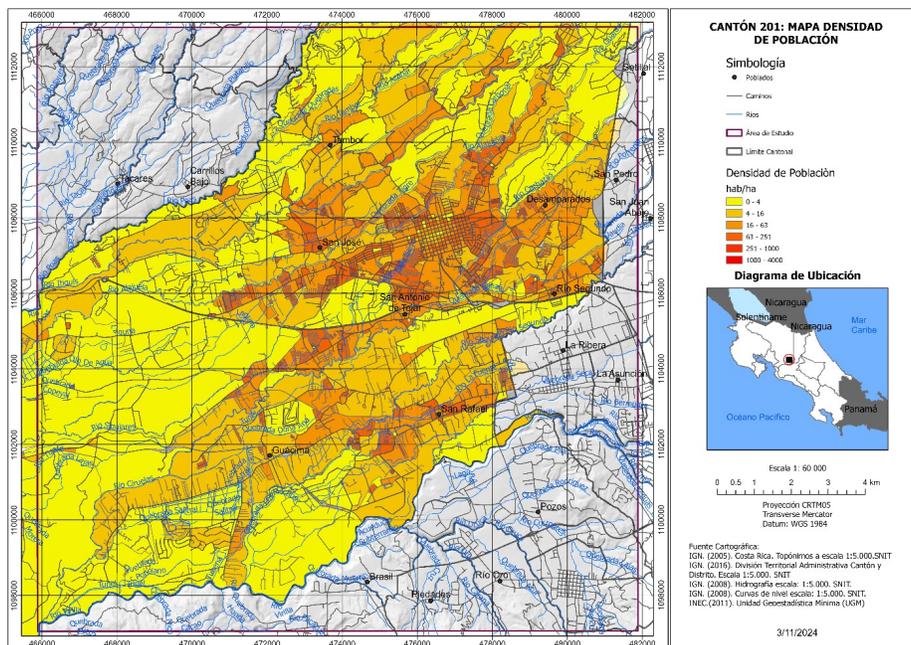
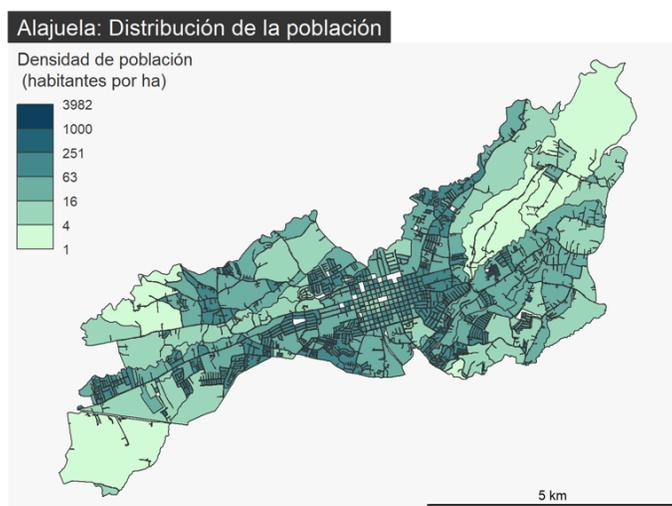
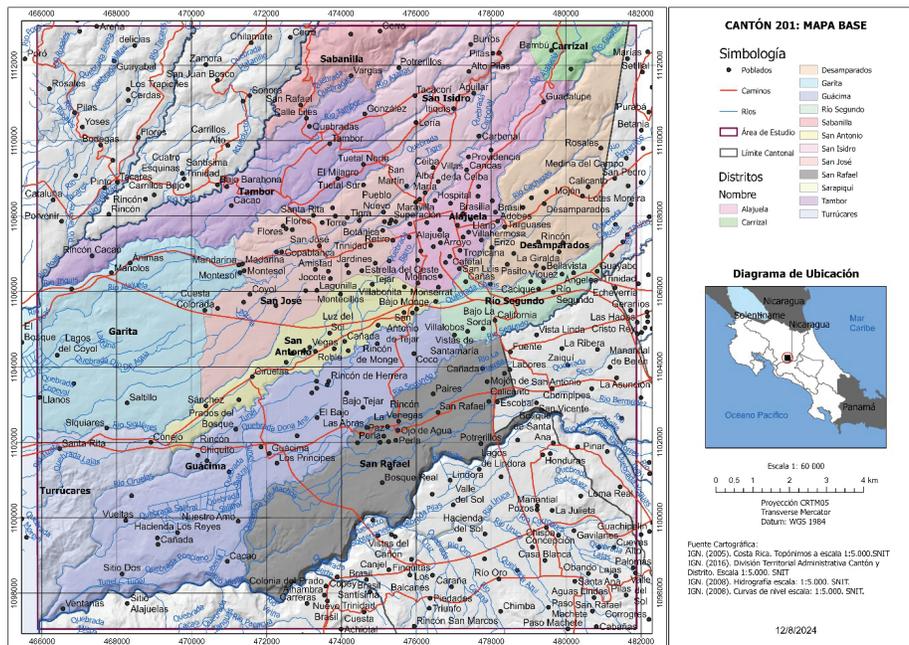


Figura 9. Densidad de población (hab./ha) en los distritos Alajuela, San José y Desamparados



Fuente: Elaborado a partir de datos del Censo de población del 2011, INEC. Datos por Unidad Geoestadística Mínima (UGM).

Figura 10. Alajuela: área de interés.



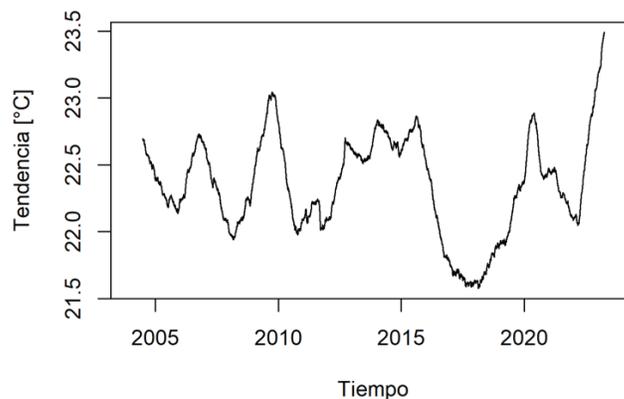
Nota: abarca la totalidad de los distritos Alajuela, Tambor, San José, San Antonio, Guácima, Río Segundo y San Rafael. De manera parcial los distritos Garita, Desamparados, Sabanilla y Carrizal.

6.1.2 Componente de variabilidad climática: Alajuela

Las estaciones 84169, 84187, 84191, 84197 y 84199 son las más relevantes desde un criterio de proximidad espacial (Figura 2). El resumen de las estadísticas del análisis de tendencia de las estaciones indicadas anteriormente se observa en la Tabla 8. En general, las anomalías positivas de la temperatura observadas en las estaciones descritas ocurren en los años 2009-2010, 2014-2016 y 2023-2024.

La estación 84169 se ubica en el Aeropuerto Juan Santamaría y presenta un período de observación de 20 años, 3 meses y 27 días, acumulando 173 074 registros. La serie temporal revela un patrón cíclico aperiódico. La tendencia muestra una temperatura máxima de 23,49 °C y una mínima de 21,57 °C. El coeficiente de variación interanual (CVI) se estima en un 1,65 %. Además, la tendencia secular indica que la temperatura ha aumentado 0,3698 °C desde el inicio del registro. En los años 2009, 2017, 2021, 2023 y 2024 se detecta un incremento más pronunciado en la variación de la temperatura (Figura 11).

Figura 11. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal



La estación 84187 Fabio Baudrit se ubica al oeste de la ciudad de Alajuela, y tiene un período de observación de 20 años, 3 meses y 25 días. La tendencia de la serie temporal registra una temperatura máxima de 23,76 °C y una mínima de 22,21 °C, con un coeficiente de variación interanual (CVI) de un 1,17 %. Se destacan importantes variaciones de la temperatura en los años 2009, 2016 y, en especial, en 2023 y 2024 (Figura 12). De manera similar, la estación 84191 en La Garita de Alajuela, también al oeste, presenta un CVI de un 2,02 %, con temperaturas que oscilan entre un mínimo de 22,48 °C y un máximo de 24,57 °C. En la Figura 13 se identifican los años de 2009, 2015 y 2024 como periodos de alta variabilidad térmica positiva. Las estaciones 84197 en Santa Bárbara y 84199 en Belén de Heredia muestran patrones similares a partir de 2007. Sin embargo, la estación en Santa Bárbara presenta un CVI menor (1,36 %) en comparación a la estación en Belén (1,49 %), con un desfase de 1 a 2 meses en la amplitud máxima. Además, las dos estaciones difieren en casi un grado Celsius en las temperaturas máximas registradas (Tabla 8).

Para entender mejor las variaciones, se aplica un MAG a los datos de las estaciones. En la Figura 16, se observa el resultado para la estación 84169 en el Aeropuerto Juan Santamaría. En términos de variación significativa, son precisamente los años 2015 y 2024 en los que se produce un aumento positivo de la temperatura (casi medio grado Celsius). Mientras que en el año 2017 se observa la mayor variación negativa (aproximadamente -0,6 a -0,7 °C) con respecto al patrón de la tendencia de la serie temporal.

Figura 12. Estación 84187 – Fabio Baudrit, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

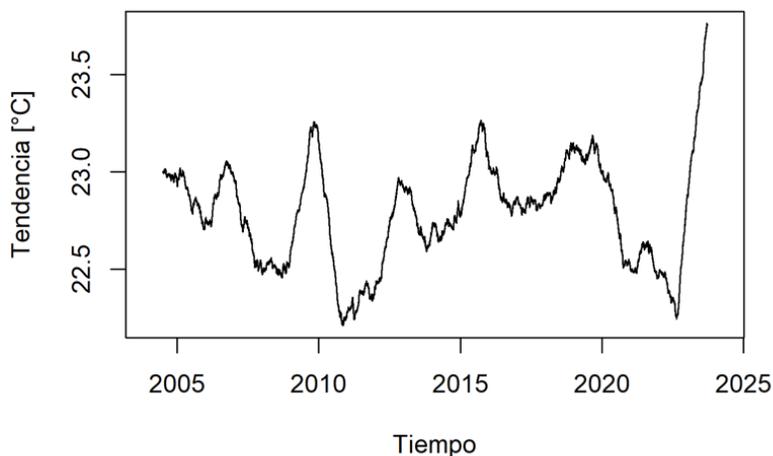
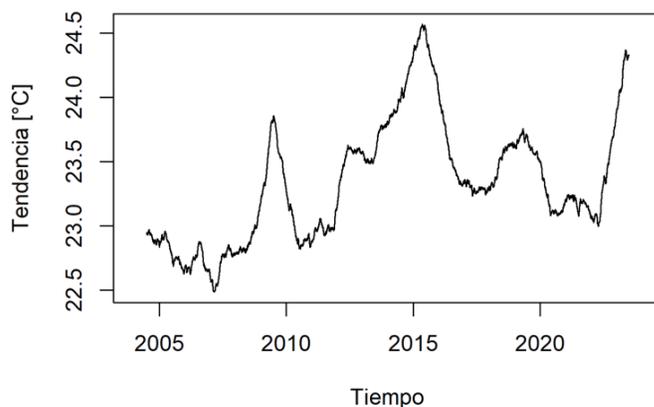


Figura 13. Estación 84191 – RECOPE, La Garita, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal



⁵Para efectos de la presentación de resultados y discusión solo se muestra los gráficos de la estación representativa 84169, pero se disponen de los MAG para todas las estaciones en el listado de la Tabla 4.

Figura 14. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

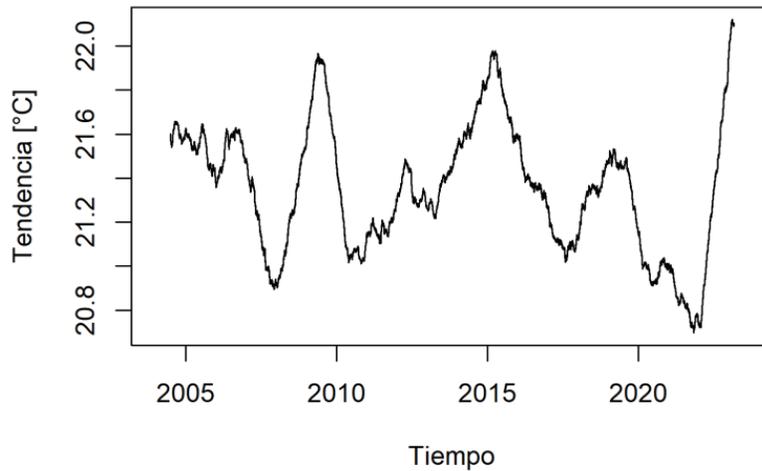


Figura 15. Estación 84199 – Belén, Heredia. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

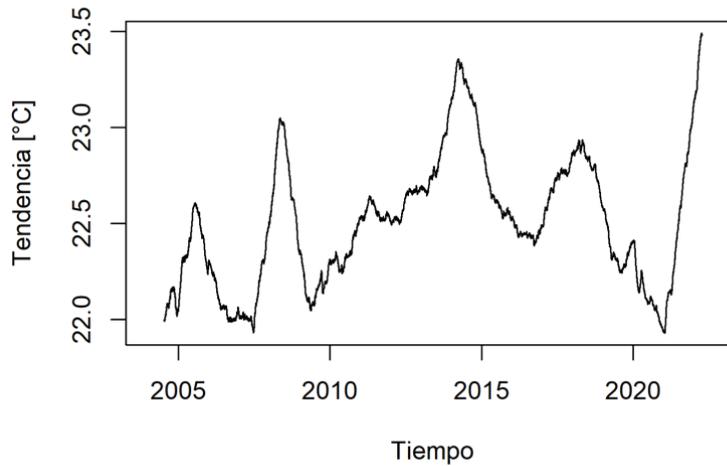


Tabla 8. Estaciones cercanas a la ciudad de Alajuela: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo

Estación	\bar{X}	Sd	Mín.	Máx.	Intervalo	CVI
84169	22,35	0,37	21,57	23,49	1,92	1,65 %
84187	22,79	0,27	22,21	23,76	1,55	1,17 %
84191	23,33	0,47	22,48	24,57	2,08	2,02 %
84197	21,35	0,29	20,70	22,12	1,42	1,36 %
84199	22,51	0,34	21,93	23,49	1,56	1,49 %

Nota: Estadísticas de media, desviación estándar, mínimo, máximo, intervalo y coeficiente de variación interanual CVI (%).

En la Figura 17 se visualiza la variación térmica entre los días del año. Es durante los días 90 y 100 del año (entre los meses de marzo y abril), en el que se experimentan las más elevadas ganancias térmicas positivas. Para efectos del análisis de la ICU superficial, se debe tener en cuenta que el fenómeno presenta sus mayores intensidades en condiciones de calma y cielos despejados; y en Alajuela corresponde a los meses de marzo y abril, en los cuales el cielo se mantiene despejado en un 62 %. En el caso del viento, la velocidad promedio es de 10.9 nudos en marzo y 8.2 nudos en abril. (predominan vientos 3 y 4 en escala de Beaufort) con dirección predominante del Este (Figura 19). En la Figura 18 se representa la variación de la temperatura durante las horas del día, y por las circunstancias geográficas del país se observa que las temperaturas más elevadas se alcanzan entre las 12 y 13 horas del día, mientras que las temperaturas más altas durante de la noche se alcanzan justo a la media noche. Otro aspecto por considerar es la fecha del equinoccio vernal (misma duración del día y la noche, 12 horas cada fase), la cual en Costa Rica ocurre el 9 de abril.

Figura 16. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de las anomalías de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024

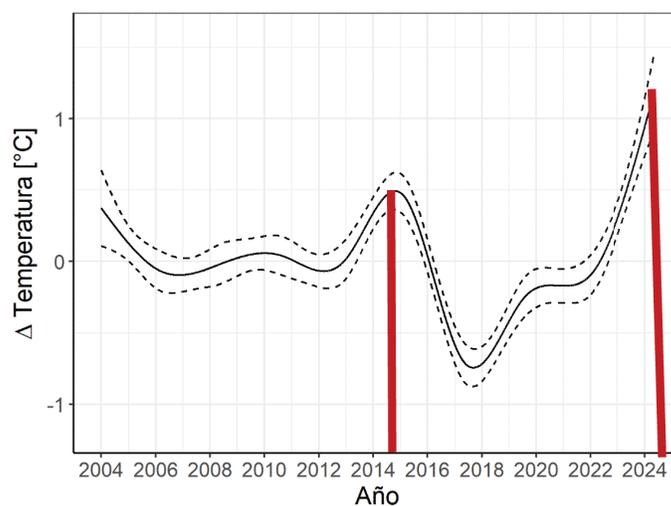


Figura 17. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de las anomalías de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024

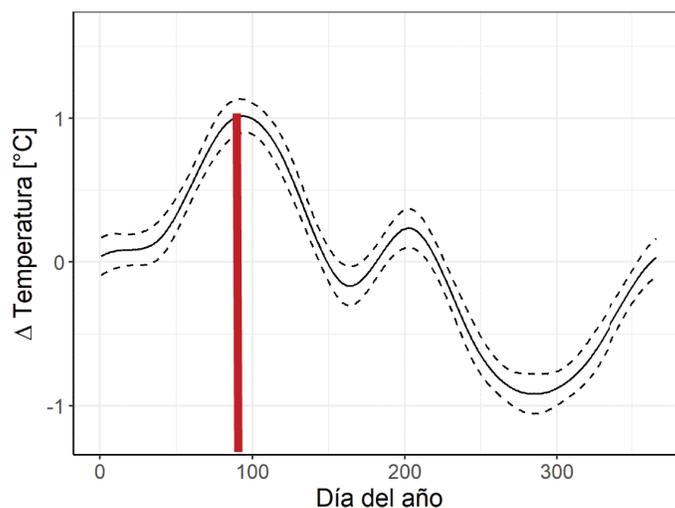


Figura 18. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría.
Comportamiento de las anomalías de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

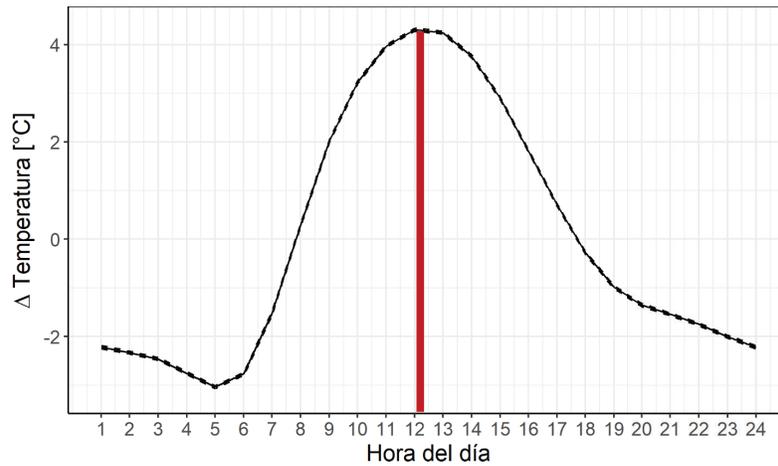
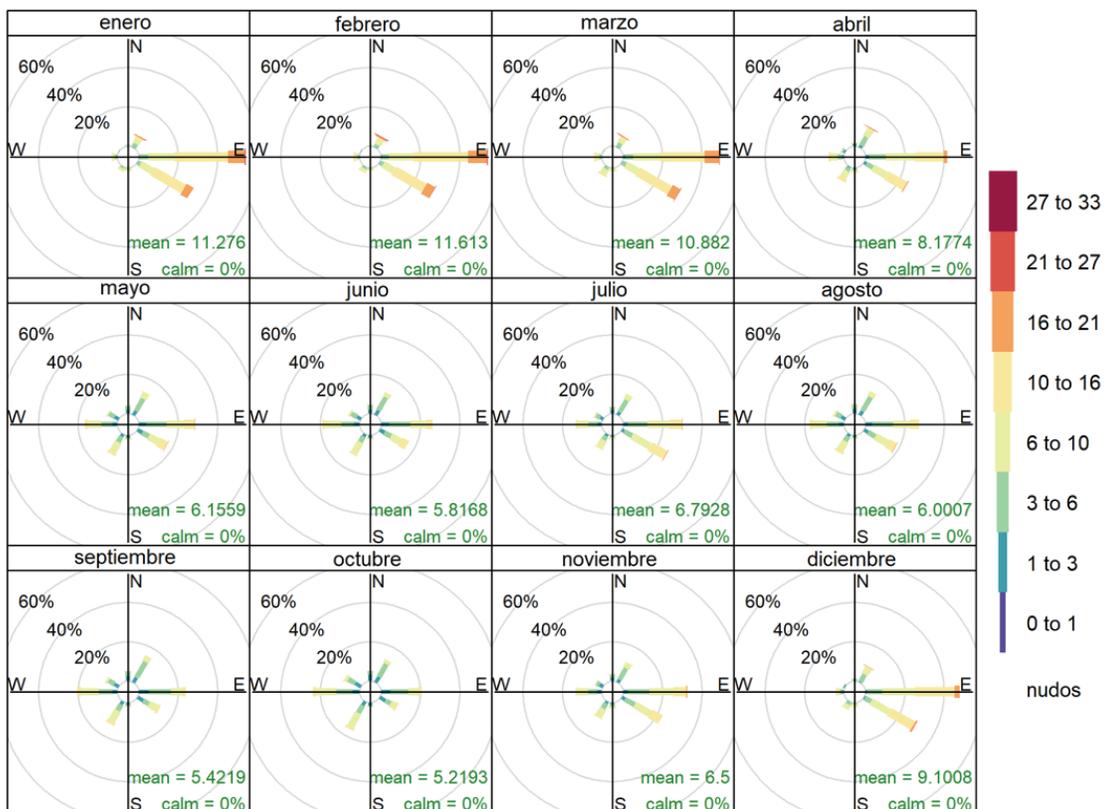


Figura 19. Estación 84169 – Aeropuerto Juan Santamaría. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes. Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort.



6.1.3 Procesamiento de imágenes satelitales: ICU Alajuela

Se presentan los resultados obtenidos en la determinación de las ICU mediante el procesamiento de las imágenes satelitales. Esto permite identificar las zonas donde el fenómeno es más acentuado, así como su variabilidad temporal, según las características del entorno urbano o de la cobertura superficial de la tierra. En estos procesos, las herramientas de los sistemas de información geográfica y de análisis espacial son fundamentales para la visualización y observaciones de patrones de este fenómeno.

Se estiman las temperaturas de la superficie terrestre (TST) promedio por año entre los meses de enero a mayo. Las estadísticas descriptivas para este período en el área de la ciudad de Alajuela se presentan en la Tabla 9. En los años 2020, 2021 y 2023 se estiman los valores medios y máximos de temperatura más altos, destacándose en particular el año 2021 con un valor máximo de 70,96 °C y una desviación estándar de 5,74 °C. En el año 2023, aunque el valor máximo estimado es de 65,58 °C (segundo valor más elevado), es el año con la desviación estándar más baja, con 4,28 °C.

Los sitios donde ocurren estos valores máximos se identifican como áreas de cultivos. Todo parece indicar que esas temperaturas se deben a la quema de cultivos de caña de azúcar, que es una práctica común al oeste de Alajuela. Según el MAG (2021), la mayor solicitud de permisos de quemas agrícolas controladas responde precisamente a los cultivos de caña de azúcar. Según los datos del Departamento de Producción Agroambiental, en Alajuela se otorgaron nueve permisos durante el período 2020-2021, cubriendo una extensión de 23,4 hectáreas.

Tabla 9. Alajuela: resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie entre los meses de enero a mayo

Año	Media	Máxima	Mínimo	Desv. Estándar
2020	40,04	63,53	15,00	7,17
2021	36,45	70,96	15,00	5,74
2022	34,11	55,73	15,00	4,92
2023	38,58	65,58	15,01	4,28
2024	39,98	63,09	23,53	7,48

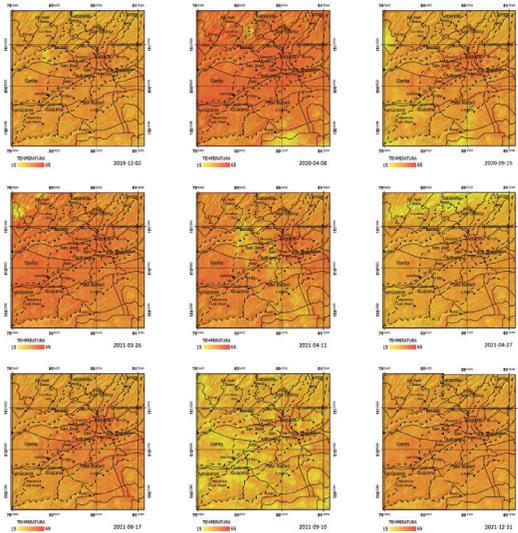
En las Figura 20, Figura 21 y Figura 22, se presentan las temperaturas superficiales por fecha y estimadas a partir de las imágenes satelitales procesadas en el área de estudio. Para obtener una representación más estable y que permita identificar la intensidad, configuración y máximo térmico de la ICU, se procede a analizar solo las imágenes adquiridas entre los meses de enero a mayo. Al conjunto de rásteres se calcula el estadístico de la media muestral. Posteriormente se aplica una función de estadística focal de media alrededor de cada celda, con el propósito de observar las áreas o focos de calor más persistentes en la ciudad de Alajuela. El resultado se observa en la Figura 23.

El mapa de la Figura 23, muestra la distribución espacial de las temperaturas superficiales, con una escala de colores que varía desde amarillo claro (temperaturas más bajas) hasta rojo oscuro (temperaturas más elevadas). En la sección marginal se representa el perfil de las temperaturas promedio a lo largo de la sección transversal del área de estudio, en la parte superior en sentido de la longitud (oeste a este) y en la parte lateral derecha en sentido de la latitud (sur a norte). Las variaciones en el perfil reflejan la influencia de factores como el uso del suelo urbano, la vegetación o las características urbanas.

En la ciudad de Alajuela, las temperaturas más elevadas se concentran en la mancha urbana consolidada, alcanzando entre 40 a 52 °C. Esto ocurre en áreas donde la alta densidad de edificaciones, impermeabilización del suelo y ausencia de vegetación

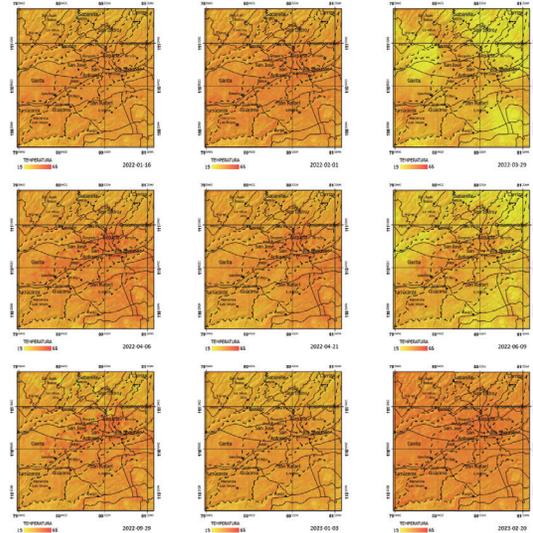
contribuyen a la retención de calor. En los perfiles (sección marginal) las temperaturas más altas corresponden a las zonas de color rojo, mostrando un perfil típico de la ICU descrito en la literatura. La intensidad del fenómeno es más pronunciada en el eje latitudinal que en el longitudinal, lo que se asocia con la forma de la ciudad, que se extiende más en sentido oeste a este. Además, las áreas residenciales densas, aunque menos calientes que el núcleo urbano, presentan temperaturas más altas que en los sectores periféricos o rurales.

Figura 20. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2019-12-02 a 2021-12-31.



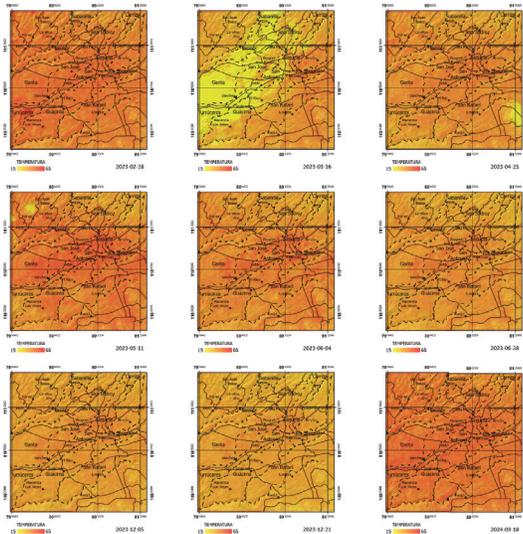
Fuente: elaboración propia a partir del Sensor TIRS del satélite Landsat

Figura 21. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 a 2023-02-20.



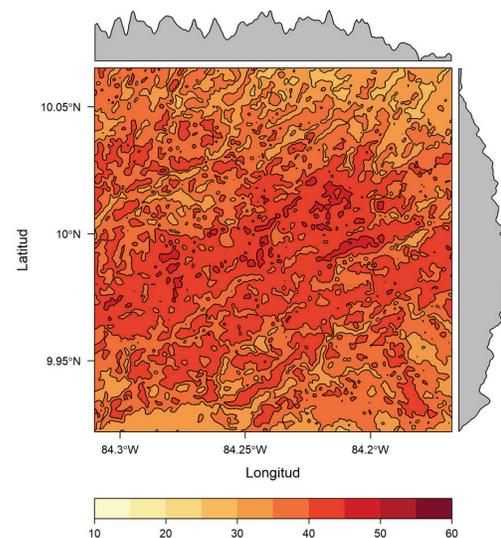
Fuente: elaboración propia a partir del Sensor TIRS del satélite Landsat

Figura 22. Alajuela: temperaturas de la superficie terrestre entre 2023-02-28 a 2024-03-18.



Fuente: elaboración propia a partir del Sensor TIRS del satélite Landsat

Figura 23. Alajuela: Análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de enero a mayo del periodo 2020 al 2024.



Nota: en la sección marginal (superior y derecha) se grafican los perfiles de temperatura.

6.1.4 Método indirecto: cruce de variables, Alajuela

Consiste en la caracterización y clasificación de entidades complejas con dimensiones espaciales presentes en la superficie terrestre. Es una generalización jerárquica según los elementos superficiales que componen la tierra y el tipo de aprovechamiento o uso antrópico al que se somete (Barrantes-Sotela, 2020). Para determinar las coberturas presentes se utiliza el sistema de clasificación de la cobertura y uso de la tierra para Costa Rica (SIMOCUTE). Para implementar este método, además de generar el ráster de la TST zonal, hay que generar la cobertura de la tierra en el área de estudio. Luego se cruzan las variables de temperatura superficial y las categorías de la cobertura de la tierra.

Cobertura de la tierra, Alajuela

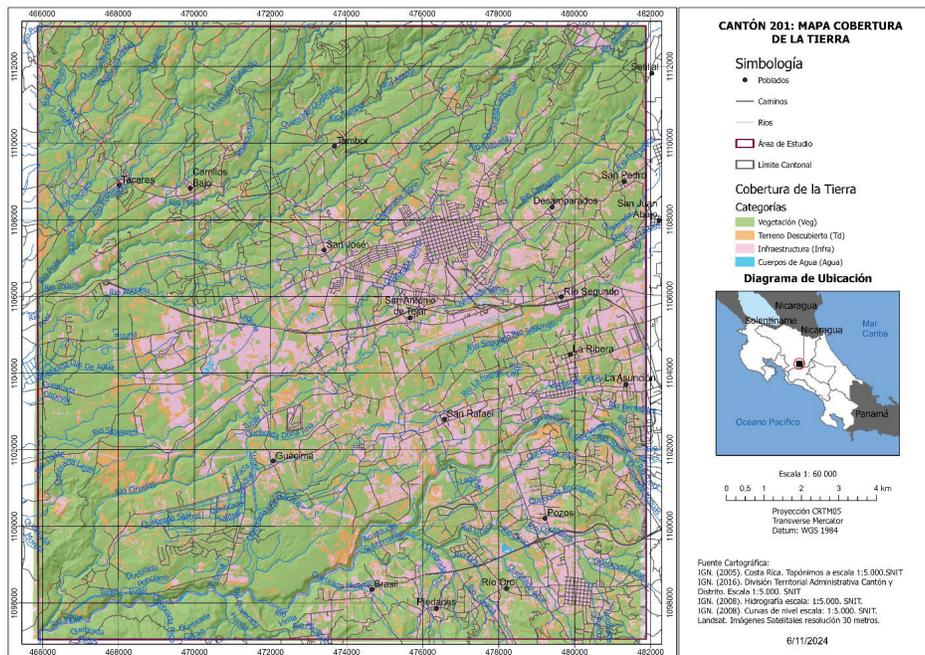
En el año 2024, el área de estudio establecido para el análisis de la ICU en Alajuela presenta una cobertura de la tierra dominada principalmente por vegetación, y se estima en 17118,82 hectáreas, lo que representa el 66,33 % de la superficie total. En segundo lugar, la infraestructura comprende las edificaciones, carreteras y otras construcciones. Esta categoría ocupa, aproximadamente, 5180,02 hectáreas y representa el 20,07 % del área de estudio. Mientras que los terrenos descubiertos, tienen una extensión superficial de 3472,39 hectáreas, lo que representa el 13,45 % del total. Esta categoría de cobertura incluye suelos expuestos o áreas de uso temporal, como tierras agrícolas en desuso, o áreas que son preparadas para la futura ocupación urbana. Finalmente, los cuerpos de agua son la categoría menos representativa, cubriendo solo 36,77 hectáreas, lo que equivale al 0,14 % de la superficie. En este caso se identifica de manera más predominante el cauce del río Virilla. La categoría cuerpo de agua, presenta una dificultad en su identificación, debido a que en varios segmentos la clase está oculta bajo cubierta forestal (bosque de ribera). El detalle de los datos se puede observar en la Tabla 10. La Figura 24 muestra el mapa de coberturas de la tierra del 2024.

La infraestructura y los terrenos descubiertos son los principales candidatos para generar ICU superficial, ya que estas superficies tienden a calentarse más durante el día, debido a que las superficies construidas como el asfalto y el concreto tienden a absorber y retener más calor. Mientras que, las áreas dominadas por vegetación y los cuerpos de agua podrían actuar como zonas de enfriamiento. El detalle de las superficies por cada categoría se describe en la Tabla 5.

Tabla 10. Alajuela: Superficies de la cobertura de la tierra en el 2024

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Vegetación	17118,68	66,33
Terreno descubierto	3472,39	13,45
Infraestructura	5180,02	20,07
Cuerpos de agua	36,77	0,14
Total	25807,86	100

Figura 24. Alajuela: cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024.



Fuente: elaboración propia, a partir de imágenes Sentinel 2 mediante el clasificador Random Forest.

Datos de la matriz de concordancia

En el área de estudio en Alajuela, la categoría "Vegetación" cuenta con 15.751 coincidencias correctas, lo que corresponde a un 91,3 % de acierto. Se determina un 6,7 % de coincidencias incorrectas en las categorías de "Terrenos descubiertos" (1.162), un 0,6 % en la categoría "Infraestructura" (102), y un 0,01 % en la categoría "Cuerpo de agua" (2). En la clase "Terrenos descubiertos", el acierto fue del 45,7 % (1.173 coincidencias correctas), un 18,7 % se clasificó incorrectamente como "Vegetación" (479), el 21,4 % como "Infraestructura" (549), y un 0,0 % como "Cuerpos de agua". La categoría "Infraestructura" se establece un acierto del 77,8 % (5,306 coincidencias correctas), con un 3,7 % de coincidencias incorrectas clasificadas como "Vegetación" (252), el 16,3 % como "Terreno descubierta" (1.116), y un 0,0 % como "Cuerpos de agua". Finalmente, en la categoría "Cuerpos de agua" el acierto es del 80,7 % (121 coincidencias correctas), en el que un 7,3 % se consigna como "Vegetación" (11), un 14,0 % como "Terreno descubierta" (21), y un 5,8 % como "Infraestructura" (8). El detalle se observa en la Tabla 11.

Estos datos se utilizaron para calcular el índice Kappa, lo que permitió evaluar la exactitud de la clasificación supervisada en comparación con las categorías reales de uso y cobertura del suelo. Para este caso se obtiene un índice Kappa con un valor de 0,72 y una precisión de 0,855 y se considera una concordancia con un nivel sustancial (ver Tabla 6).

Tabla 11. Alajuela: Matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre

Categorías	Vegetación	Terreno descubierta	Infraestructura	Cuerpos de agua
Vegetación	15751	1162	102	2
Terreno descubierta	479	1173	549	0
Infraestructura	252	1116	5306	0
Cuerpos de agua	11	21	8	121

Es importante establecer los niveles de concordancia entre las categorías de análisis, ya que en caso de existir incoherencias muy amplias entre las clases. Estos errores se propagan al proceso de cruce de la variable TST con respecto a las coberturas de la tierra presentes en el área de estudio.

Cruce de variables, Alajuela

En el cruce de variables se utiliza el ráster de las TST promedio entre los meses enero a mayo y la cobertura de la tierra del área de estudio. Las coberturas que promedian las menores TST son aquellas asociadas a la categoría "Cuerpos de agua" ($\bar{x}=40,38$; $s=4,54$ °C) y la categoría "Vegetación" ($\bar{x}=44,09$; $s =5,76$ °C). Mientras que las coberturas con las mayores TST son aquellas asociadas a la categoría de "Infraestructura" ($\bar{x}=46,63$; $s =5,25$ °C) y a los "Terrenos descubiertos" ($\bar{x}=45,77$; $s =5,51$ °C). En la prueba de ANOVA se estima que el valor p es menor al 0.05, por lo que se establece que al menos una de las medias de las categorías es significativamente diferente (Tabla 12).

Tabla 12. Prueba de ANOVA para comparar las TST en las categorías de cobertura de la tierra

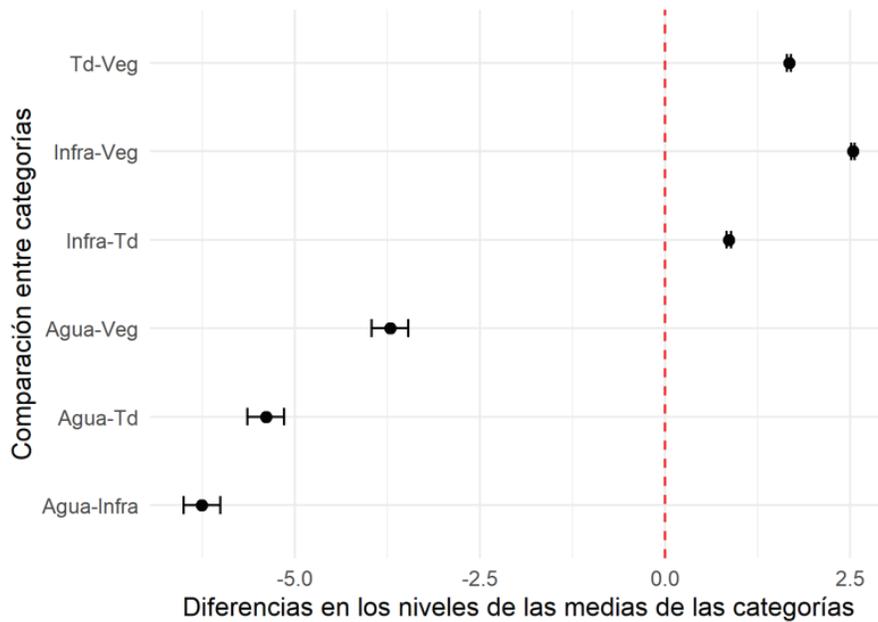
Términos	g.l.	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Estadístico F	Valor p
Clases	3	3093085	1031028	32719,99	2 e-16
Residuales	2587212	81524722	31,51065		

Posteriormente, se utiliza la prueba Tukey HSD para identificar qué pares de grupos tienen diferencias significativas en sus medias (Tabla 13 y Figura 25).

Tabla 13. Prueba post hoc Tukey HSD en cruce de TST con respecto

Clases	Diferencias de medias [°C]	Límites inferiores [°C]	Límites superiores [°C]	Valor de p ajustado
Td-Veg	1,68	1,65	1,70	0,00
Infra-Veg.	2,54	2,52	2,57	0,00
Agua-Veg	-3,71	-3,96	-3,46	0,00
Infra-Td	0,86	0,83	0,89	0,00
Agua-Td	-5,39	-5,64	-5,14	0,00
Agua-Infra	-6,26	-6,50	-6,01	0,00

Figura 25. Prueba Tukey HSD



Nota: Diferencias de TST [°C] promedio entre los meses de enero a mayo según tipo de cobertura de la tierra. Clases: veg – Vegetación, Td – Terrenos descubiertos, Infra – Infraestructura, Agua – Cuerpos de agua. Nivel de confianza del 95 %.

La mayor diferencia entre medias de clase ocurre en las categorías “Cuerpo de agua” e “Infraestructura”, con un valor de $-6,26$ °C. Es decir, la temperatura superficial promedio de los cuerpos de agua es $6,26$ °C menor en relación con la temperatura superficial promedio de la infraestructura existe en área de estudio de Alajuela. La menor diferencia de TST promedio se estima entre las clases de “Infraestructura” y “Terrenos descubiertos” con un valor de $0,86$ °C. Se resalta que es entre estas clases en las que se observó una importante cantidad de coincidencias erróneas en la matriz de concordancia, lo cual puede explicar ese comportamiento tan similar. Con relación a la categoría de “Vegetación”, se establece que la mayor diferencia de esa clase ocurre con respecto a la categoría de “Infraestructura”, en la que se estima es $2,54$ °C menor.

El análisis de comparación de la TST promedio según las categorías de la tierra puede verse afectado por la calidad de la elaboración de la capa de la cobertura, ya una incorrecta asignación de categoría puede sobreestimar o subestimar el efecto de la temperatura en las clases. Por tanto, es importante validar el clasificador, así como buscar generar capas de coberturas de la tierra con un mayor detalle espacial.

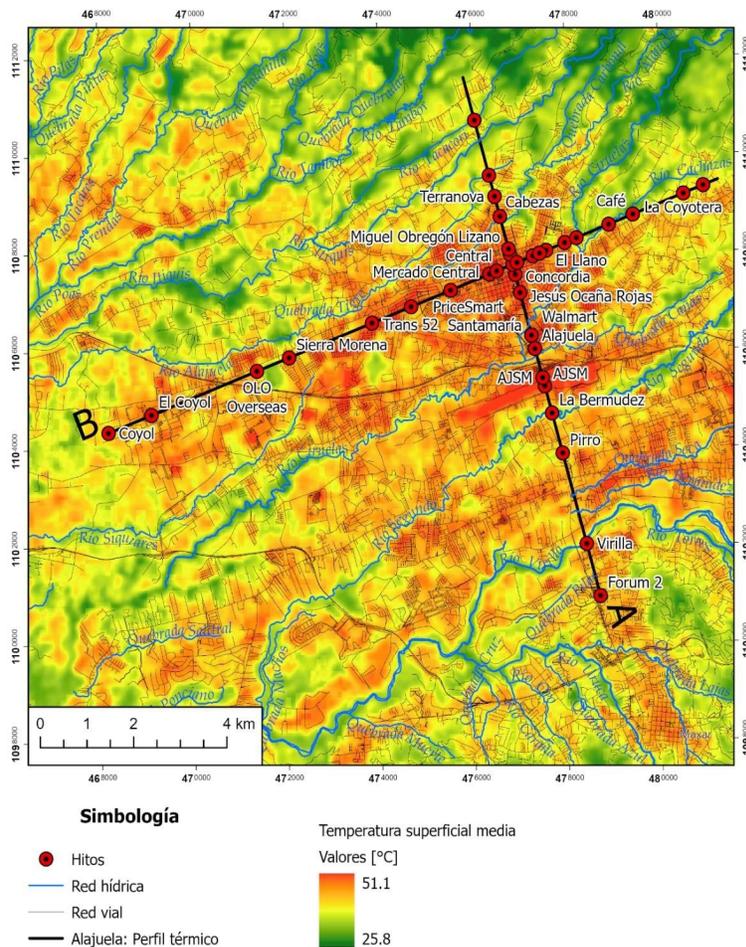
6.1.5 Método indirecto: análisis de transectos, Alajuela

Al aplicar el método de transectos, se observan los resultados en las Figura 26, Figura 27 y Figura 28. Existe un aumento gradual de la temperatura desde las áreas periféricas hasta acercarse al centro urbano. El perfil B muestra muy bien este comportamiento. En Alajuela, las zonas con un aparente impacto por la ICU corresponden al sector oeste de la ciudad, específicamente en La Trinidad. Las temperaturas superficiales tienden a mantenerse altas (aproximadamente 44 °C) y constantes en ese segmento. En el casco central destacan las localidades cercanas al mercado central; mientras que en el sector este se experimentan temperaturas más fluctuantes con altos picos de temperaturas en El Llano.

En el sentido de sur a norte, el segmento que comprende la entrada a la radial de Alajuela que va desde la terminal del Aeropuerto Juan Santamaría hasta Central de Autobuses del Norte presentan un bloque constructivo caracterizado de grandes edificaciones en los que la temperatura superficial es de aproximadamente 45 °C. El otro sector en el que se observan altos valores de temperatura son las aproximaciones a la Escuela Ascensión Esquivel Ibarra y el Instituto de Alajuela. El sector norte presenta una serie de áreas residenciales como Pueblo Nuevo, que experimentan temperaturas superficiales aproximadas a los 44 °C.

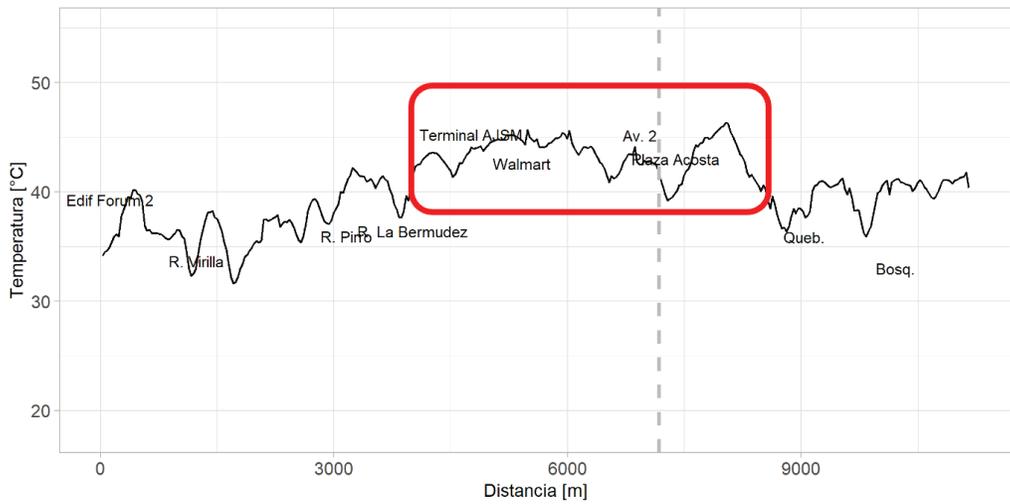
Los espacios verdes asociados a los cauces de agua y vegetación urbana, como los parques con floresta, presentan una menor temperatura superficial y que puede ser estimada entre 8 a 10 °C menos que las superficies con características antrópicas. Esto apoya la recomendación de preservar y expandir las áreas verdes en el contexto urbano, no solo por su valor ecológico, sino como estrategia para reducir las temperaturas superficiales. Se destaca, una mayor presencia de irregularidades térmicas en el perfil B. Estas irregularidades se acentúan aún más al Este del punto de intercepción de los perfiles A y B, lo que sugiere la presencia de superficies compuestas de materiales con albedos diversos. En las Figura 27 y Figura 28, las zonas marcadas de color rojo permiten la identificación de la ICU en la ciudad de Alajuela y muestran un ejemplo muy característico de la ICU.

Figura 26. Alajuela: perfil térmico por transectos A y B que atraviesan la ciudad.



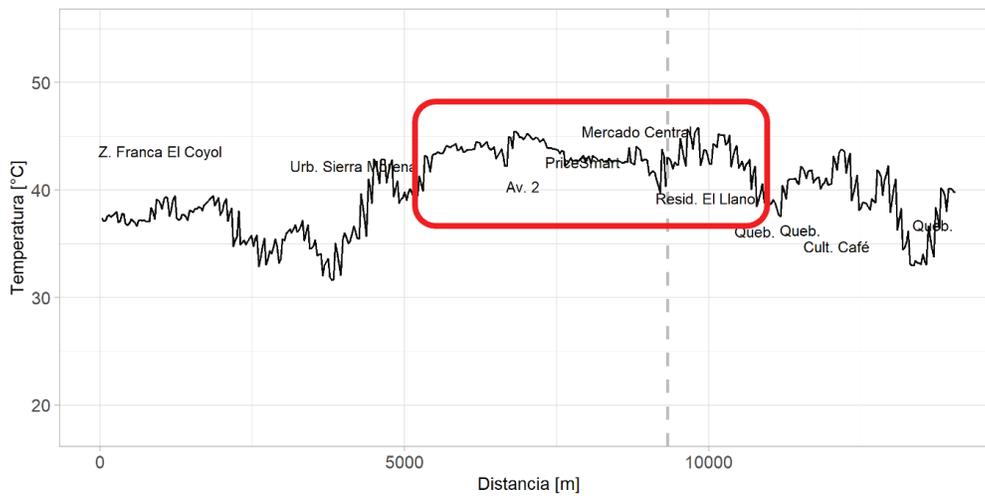
Nota: se colocan hitos de referencia y la temperatura superficial media.

Figura 27. Alajuela: perfil térmico A.



Nota: atraviesa la ciudad en sentido sureste – noroeste. El sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles

Figura 28. Alajuela: perfil térmico B.



Nota: atraviesa la ciudad en sentido suroeste - noreste. El sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles.

6.2 Caso de estudio: Esparza

6.2.1 Delimitación del área de estudio

Las coordenadas geográficas medias del cantón de Esparza son 09° 59' 56" latitud norte y 84° 38' 45" longitud oeste. Según la división político-administrativa de la República de Costa Rica, la anchura máxima es de treinta kilómetros en dirección norte a sur, desde Loma Rincón, unos dos kilómetros al noroeste del poblado de Peñas Blancas, hasta la desembocadura del río Jesús María, en el litoral del golfo de Nicoya. En la Figura 31 se observa el área de estudio.

Aspectos históricos relevantes

Según IFAM (2002), en 1574 se constituye el primer asiento de la ciudad del Espíritu Santo con la población trasladada del asentamiento de Aranjuez; en el antiguo valle de Coyoche, entre los ríos Barranca y Jesús María, cerca del actual poblado Artieda. En 1577 se habilitó el puerto de Caldera.

Entre 1622 y 1629 se estableció el segundo y último asiento de la ciudad del Espíritu Santo de Esparza, unos cinco kilómetros al noroeste del lugar original, la cual fue saqueada dos veces por piratas: la primera vez en 1685 y la segunda al año siguiente. Fue incendiada toda la población en esta última incursión, excepto la iglesia y el convento de San Lorenzo, por lo que sus habitantes se vieron forzados a huir al interior, refugiándose en Las Cañas y Bagaces. El territorio de Esparza se extendía durante los siglos XVI y XVII desde los montes del Aguacate hasta el río Salto (Municipalidad de Esparza, 2021).

La primera ermita de Esparza data de 1574, así como el convento de San Lorenzo. En 1576 fue erigida en parroquia, dedicada a Nuestra Señora de la Candelaria; la cual actualmente es sufragánea de la diócesis de Tilarán de la provincia eclesiástica de Costa Rica (Cartín, 2018). En 1821 se estableció una escuela de primeras letras para varones. En 1862 se abrió una escuela privada. En 1870 fue instalada la primera escuela pública, durante la segunda administración de don Jesús Jiménez Zamora. De 1870 a 1890, la escuela fue mixta y ocupó un edificio al lado norte de la iglesia; la escuela actualmente lleva el nombre de don Arturo Torres Martínez n.º 1 y n.º 2. El Liceo de Esparza inició sus actividades docentes en 1965, durante el gobierno de don Francisco Orlich Bolmarich (IFAM, 2002).

Conforme a la ley n.º 63 de 4 de noviembre de 1825, la ciudad de Esparza formó parte del distrito de Cañas del Departamento Occidental, uno de los dos en que se dividió en esa oportunidad el territorio del Estado. En 1848 Esparza constituyó el cantón segundo de la provincia de Alajuela, mediante decreto ejecutivo n.º 8, del 6 de noviembre de 1851, se segregó este cantón de la provincia de Alajuela y se agregó a la jurisdicción de la comarca de Puntarenas.

La primera municipalidad fue instalada en el año de 1877. El primer alumbrado público fue de canfín, colocado en 1877. El alumbrado eléctrico con bombillos se instaló en 1921, en la administración de don Julio Acosta García. La cañería se inauguró en 1912 en el primer gobierno de don Ricardo Jiménez Oreamuno. El 17 de diciembre de 1981 se inauguraron las instalaciones del Complejo Portuario de Caldera.

Altitudes

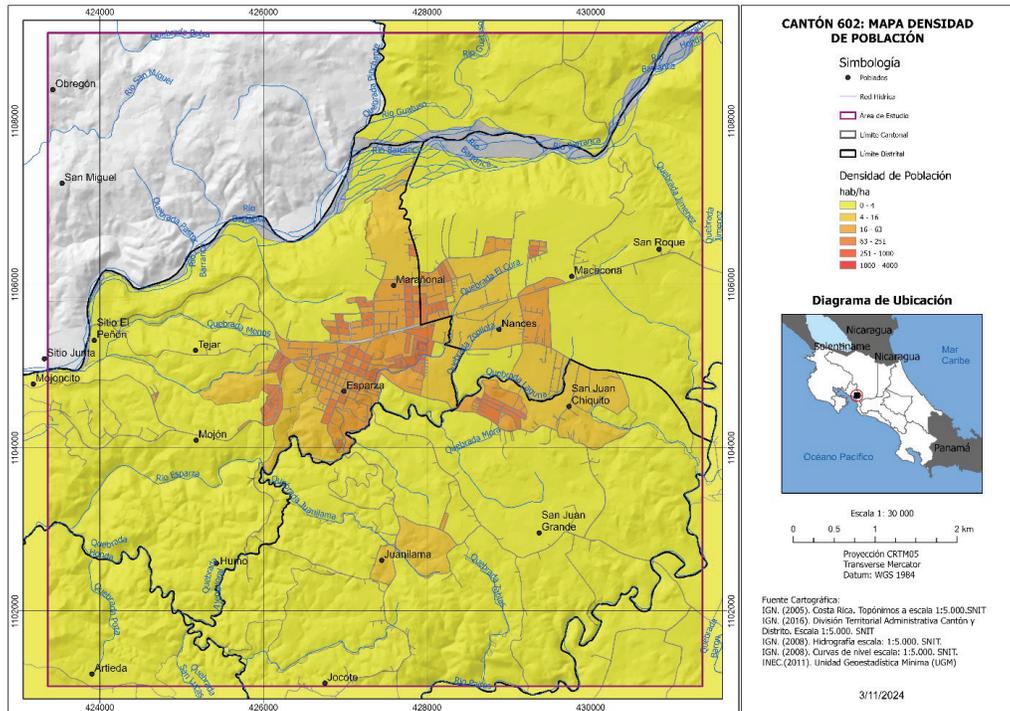
Según la división territorial administrativa de Costa Rica, las elevaciones en metros sobre el nivel medio del mar del centro urbano de los distritos del cantón son las siguientes:

Ciudad Esparza 208, Villa San Juan Grande 224, Villa Machacona de 243, Villa San Rafael 247 y Villa San Jerónimo 260.

Características demográficas

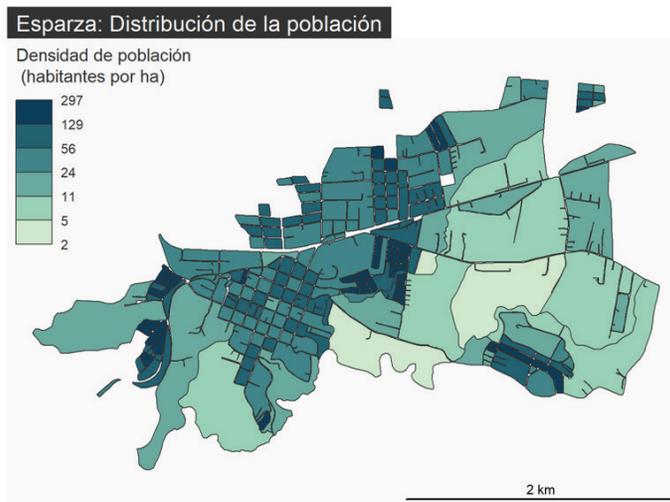
Según el Anuario Estadístico 2021-2022 del INEC, en el año 2022 la población del cantón de Esparza se estima en treinta y ocho mil setecientos catorce habitantes (38 714). Mientras que, la población del distrito central Espíritu Santo es de aproximadamente de veintiún mil ochenta y un habitantes (21 320).

Figura 29. Esparza: densidad poblacional en el área de interés



Según el cálculo derivado de las Unidades Geoestadísticas Mínimas del Censo de Población del INEC del 2011, en la ciudad de Esparza se observa densidades de población entre 130 y 300 habitantes por hectárea (Figura 29 y Figura 30), valores muy por debajo de los observados en el caso de Alajuela. En Esparza la densidad poblacional está bien distribuida y en general existe una concentración importante de población alrededor del casco histórico en Espíritu Santo. Sin embargo, los sitios más densos se localizan en Marañonal, en las urbanizaciones Calderón Fournier, Karen Olsen, La Cima del Cielo, El Rosal, Álvarez y El Mojón. Otro asentamiento para tener en cuenta en términos de su densidad poblacional es la localidad de Esparsol.

Figura 30. Densidad de población (hab./ha) en los distritos Espíritu Santo y Macacona.

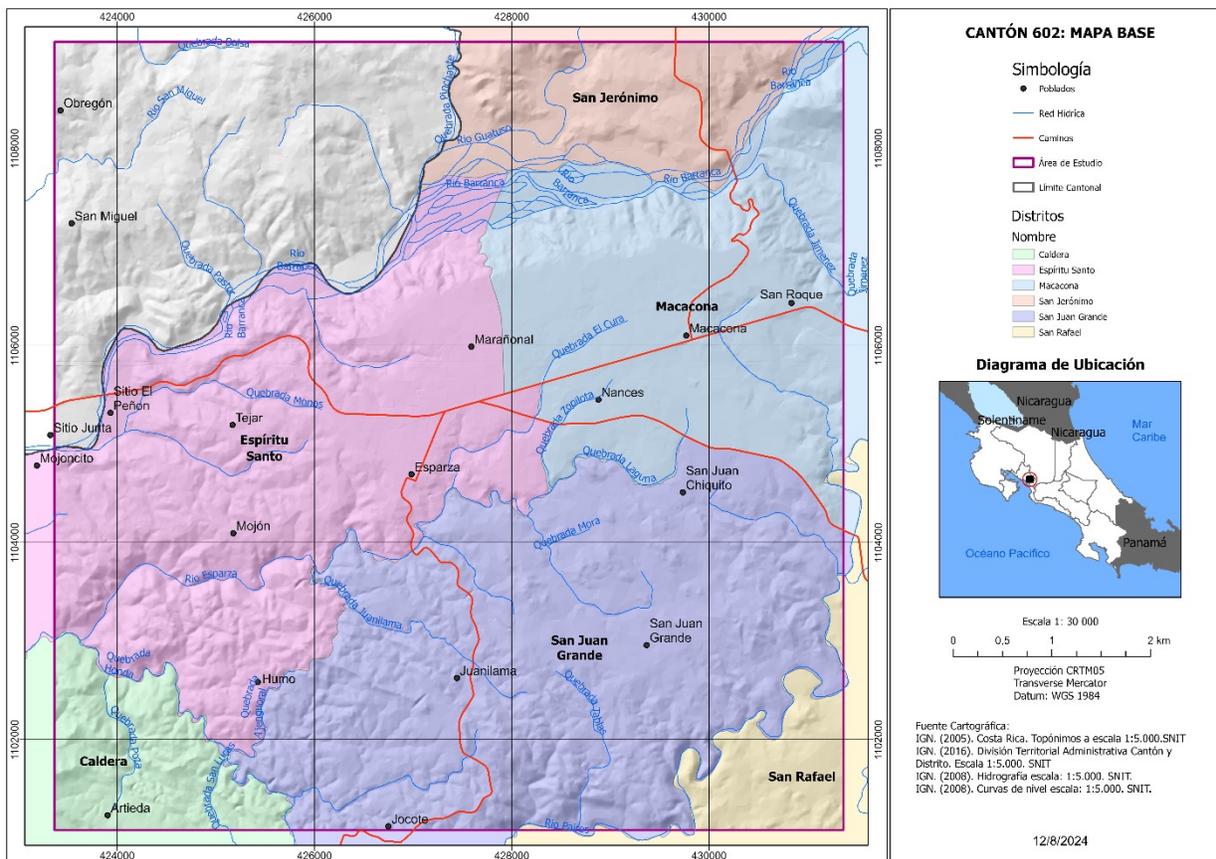


Fuente: Elaborado a partir de datos del Censo de población del 2011, INEC. Datos por Unidad Geoestadística Mínima (UGM).

Configuración urbana

Al igual que muchos de los centros urbanos de Costa Rica, Esparza mantiene un centro urbano bien definido con trama urbana en forma de damero y su estructura está en función de las actividades terciarias. Cuenta con las principales características que establecen una jerarquía urbana de ciudad terciaria. Mantiene una baja y moderada densidad de la edificación con alturas predominantemente de un piso. En el distrito central se concentra los servicios y equipamientos que abastecen a los habitantes del cantón.

Figura 31. Esparza: área de interés.



Nota: abarca de manera parcial los distritos Espíritu Santo, Macacona y San Juan Grande

6.2.2 Componente de variabilidad climática: Esparza

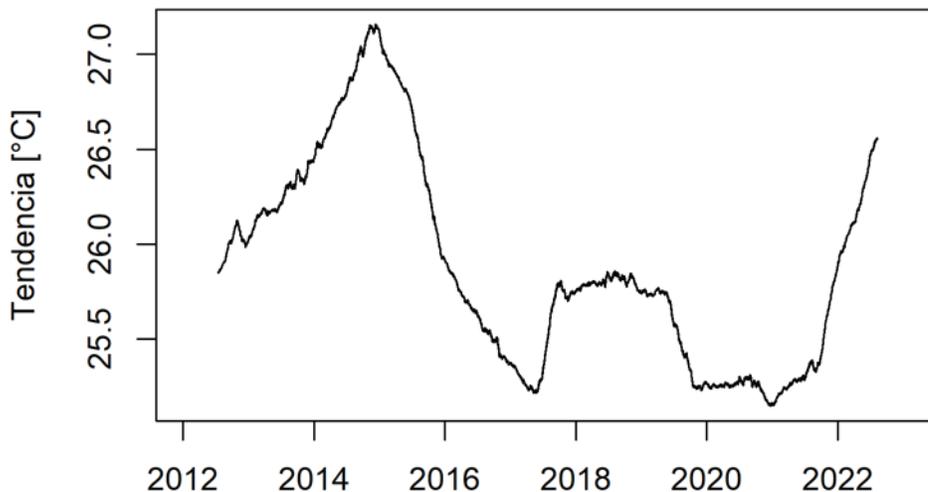
Determinar la variabilidad climática en esta área de estudio tiene varias limitaciones. La más importante es que no se cuenta con estaciones meteorológicas dentro del área propuesta para desarrollar la investigación (Figura 3). Por lo tanto, usando el criterio de proximidad espacial, se identifican las estaciones más cercanas, las cuales se enumeran con su respectivo código 78033, 82011, 82013, 82015 y 82019. En algunos casos solo se cuenta con un registro de datos muy reducido en comparación con el caso anterior.

Es importante destacar que la estación 78033 en Pitahaya, Puntarenas; pertenece a la cuenca hidrográfica del río Abangares, mientras que las estaciones 82011, 82013, 82015 y 82019 pertenecen a la cuenca hidrográfica del río Jesús María (Rojas, 2011). A su vez, el área de estudio se localiza en la cuenca hidrográfica del río Barranca. Aunque es posible extrapolar los resultados al

contexto del área de estudio, por ser cuencas próximas y localizadas en la misma vertiente del Pacífico costarricense, puede significar la introducción de sesgos asociados por esa condición. Incluso es recomendado por esta investigación iniciar las gestiones para la colocación de estaciones meteorológicas en la cuenca del río Barranca. El resumen de las estadísticas del análisis de tendencia de las estaciones indicadas anteriormente se observa en la Tabla 14.

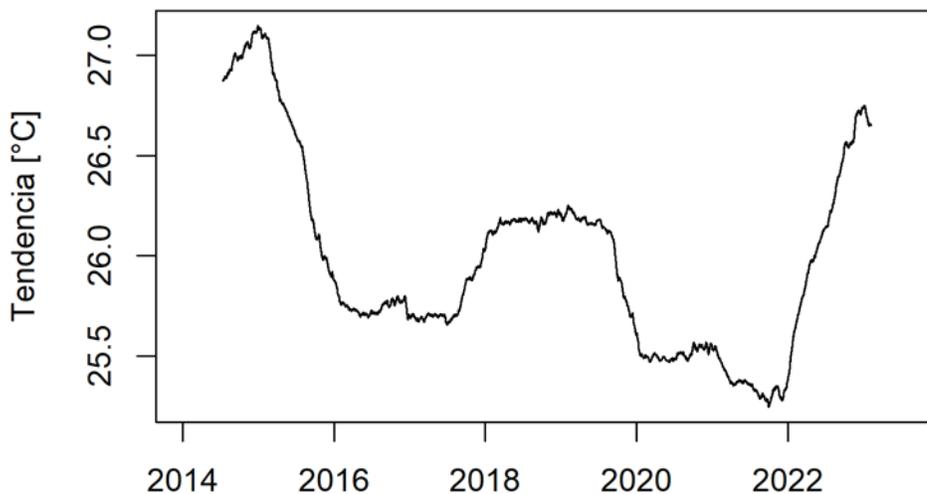
Para efectos del análisis de la variación de la temperatura, se utiliza la estación 82011 San Mateo que presenta las altitudes más semejantes a la ciudad de Esparza (208 msnm) y cuenta con el registro más prolongado de las estaciones indicadas anteriormente. La estación 82011 presenta un registro que va desde el año 2012 al 2024 y dispone de 97002 observaciones.

Figura 32. Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.



En la tendencia se registra un máximo de temperatura de 27,16 °C y un mínimo de 25,15 °C. Se estima que el coeficiente de variación interanual (CVI) es de un 2,09 %. A su vez, la tendencia secular indica que la temperatura es 0,37 °C más cálida que al inicio del registro. En los años 2015, 2023 y 2024 se observa un incremento más elevado en la temperatura, aunque entre los años 2018 y 2019 se visualiza un comportamiento “estable” de la temperatura (Figura 32). Este mismo patrón se observa en la estación 82015 en Orotina, el cual presenta un valor medio de tendencia de 25,98 °C y una desviación estándar de 0,48 °C. Los valores mínimo y máximo del componente de tendencia de la serie de tiempo son 25,24 °C y 27,15 °C, respectivamente (Figura 33).

Figura 33. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal.



La estación 82019 localizada en Guayabal de Orotina, cuenta con menos registros (60458) y en el periodo que comprende los años 2017 al 2024. De igual manera, su comportamiento tendencial es similar al observado en las estaciones 82011 y 82015, por esta razón el CVI tiende a ser más bajo (se estima en un 1,52 %). Los períodos con las mayores temperaturas fueron en el 2015, 2023 y 2024. Mientras que la estación 78033 en Pitahaya de Aranjuez en Puntarenas solo cuenta con datos entre los años 2016 al 2024. Esta estación meteorológica registra un aumento en las temperaturas entre los años 2018 al 2019 y en el período 2023 al 2024.

Para el análisis de las anomalías de temperatura se utiliza la estación meteorológica 82011 en San Mateo. En la Figura 36 se visualiza las anomalías de la temperatura y se destaca los años 2014-2016 y 2023-2024 (período con los que la estación contiene información). En la Figura 37 se visualizan las variaciones de la temperatura entre los días del año, y se estima que es durante los días 80 y 100 del año (entre los meses de marzo y abril), en los que se experimentan las anomalías más intensas de la variable temperatura del aire. Un factor en el desarrollo de las ICU es la probabilidad de cielos despejados. En la ciudad de Esparza existe una probabilidad del 50 % durante los meses de marzo y abril.

Los datos de viento en la estación 82015 – Oroceiba, Orotina, indican que durante los meses de marzo y abril la velocidad promedio es de 4,99 nudos y 4,21 nudos (valor de 2 en escala de Beaufort) y con dirección predominante del noreste en marzo y suroeste en abril (Figura 39). Durante las horas del día, las temperaturas más elevadas se alcanzan entre las 11 y 13 horas del día, mientras que durante la noche se alcanzan a la media noche (00:00 horas) (Figura 38).

Figura 34. Estación 82019 – Guayabal, Orotina. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

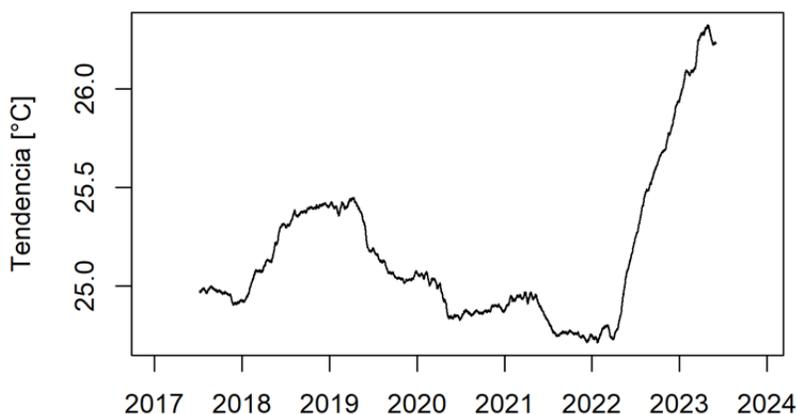


Figura 35. Estación 78033 – Pitahaya, río Aranjuez, Puntarenas. Componente de tendencia de la descomposición de la serie temporal

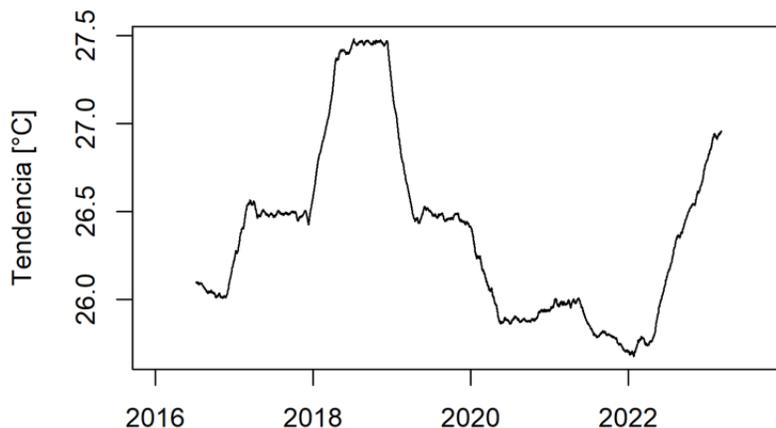


Tabla 14. Estaciones cercanas a la ciudad de Esparza: estadísticas de las tendencias de temperaturas [°C] derivadas de las series de tiempo

Estación	\bar{X}	Sd	Mín.	Máx.	Intervalo	CVI
78033	26,38	0,51	25,67	27,48	1,81	1,92
82011	25,89	0,54	25,15	27,16	2,01	2,09
82013	27,31	0,56	25,94	28,50	2,56	2,06
82015	25,98	0,48	25,24	27,15	1,90	1,85
82019	25,16	0,38	24,71	26,32	1,61	1,52

Nota: Estadísticas de media, desviación estándar, mínimo, máximo, intervalo y coeficiente de variación interanual CVI (%).

Figura 36. Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2012 al 2024.

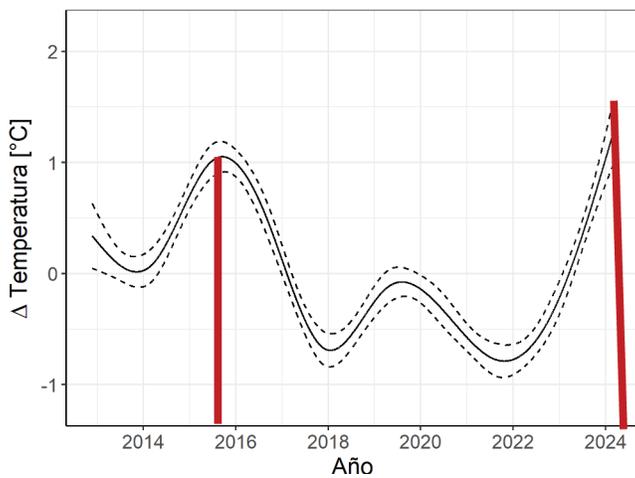


Figura 37. Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2012 al 2024.

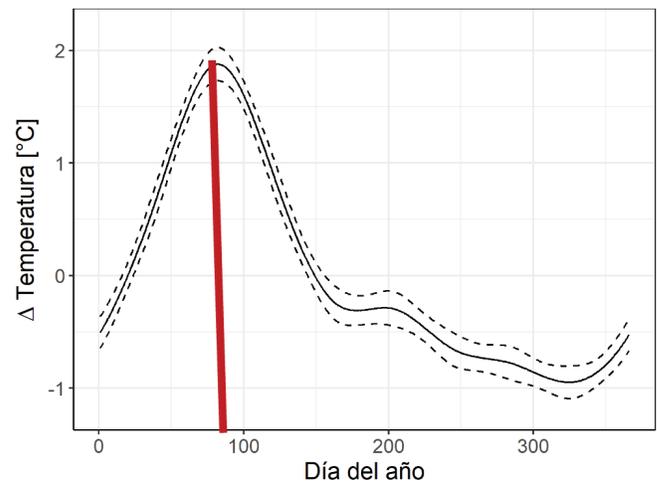


Figura 38. Estación 82011 – San Mateo, Alajuela. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2012 al 2024.

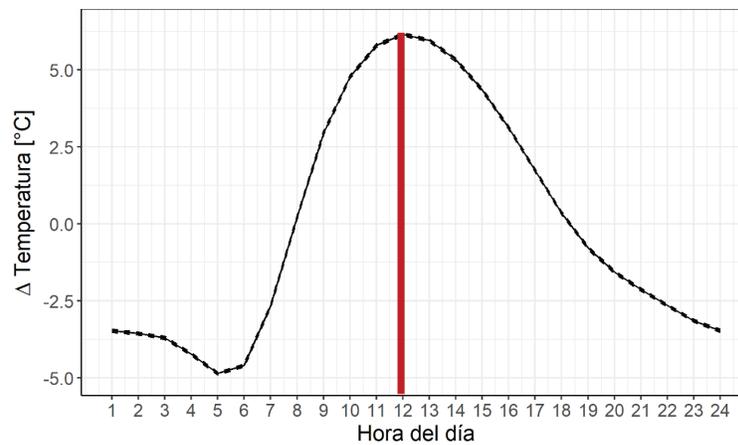
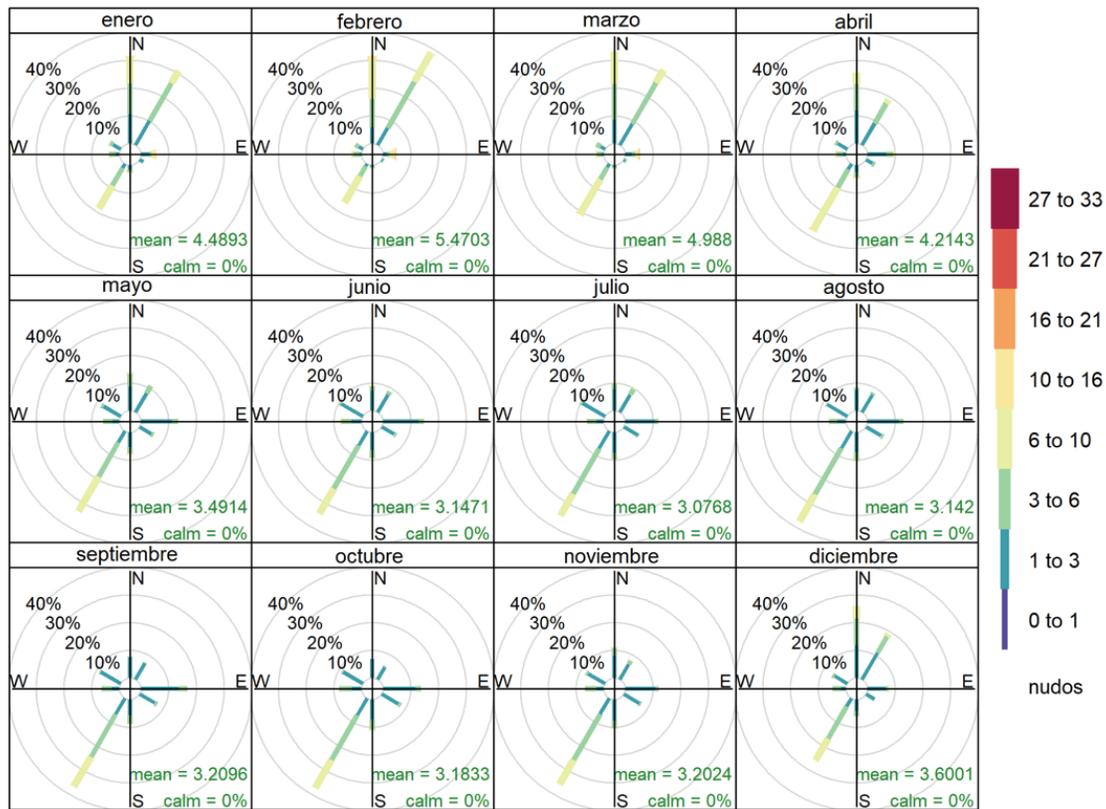


Figura 39. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina. Comportamiento de la variación de la dirección y magnitud del viento por mes. Agrupados por categorías de magnitud de vientos en escala de Beaufort.



6.2.3 Procesamiento de las imágenes satelitales: ICU Esparza

Se estiman las temperaturas superficiales terrestres (TST) promedio para el área de estudio en la ciudad de Esparza. Las estadísticas descriptivas de esta variable se presentan en la Tabla 15. Al igual que en el caso de Alajuela, en los años 2020, 2023 y 2024 se estimaron los valores medios de temperatura más elevados. En el año 2023 se observa el valor máximo más elevado de 66,82 °C y se calcula la desviación estándar en 7,38 °C. En general, las TST promedio en Esparza son menores, pero las desviaciones estándar son mayores que las observadas en Alajuela. Este comportamiento puede atribuirse a las características rural-urbanas, donde la densificación urbana es menos intensa y más dispersa, lo que influye en la variación de las temperaturas.

En las Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se observa el comportamiento espacial de las temperaturas superficiales por imagen procesada, lo que permite observar la dinámica de la ICU. Estas son las TST estimadas de forma indirecta por el sensor TIRS del satélite Landsat.

Tabla 15. Esparza: Resumen estadístico de la estimación de la temperatura de la superficie en las imágenes de satélite

Año	Media	Máxima	Mínimo	Desv, Estándar
2020	38,58	57,92	16,60	5,92
2021	36,44	60,25	15,00	8,29
2022	34,28	55,48	15,00	6,54
2023	37,99	66,82	15,00	7,38
2024	41,40	61,33	29,09	8,02

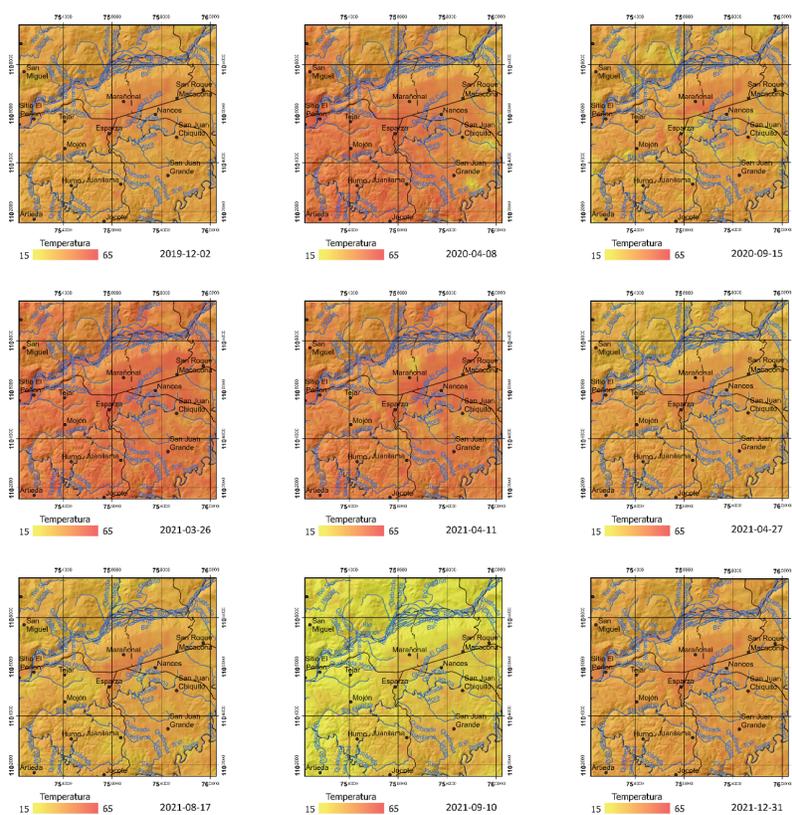
En la Figura 43 se muestra el resultado del cálculo estadístico de la media muestral del conjunto de imágenes en los meses de enero a mayo (la temporada con la tendencia en presentar las más temperaturas del aire más altas se prolonga de marzo a abril), es decir en época seca. Con el propósito de establecer la variabilidad espacial de la TST en diferentes zonas de la ciudad. Se recalca que este método facilita una identificación rápida de las áreas donde el efecto de la ICU es más pronunciado.

Según los resultados, la centralidad de Espíritu Santo, La Riviera, Marañonal y Santa Marta presentan una temperatura superficial de hasta 52 °C. También, otras localidades dispersas experimentan TST elevadas como ALUNASA al sur y al este, Esparsol, San José y San Juan Chiquito. Es decir, el incremento de la TST en el área de estudio se asocia principalmente a la ocupación y densidad constructiva en la ciudad de Esparza y otros asentamientos humanos cercanos.

Se enfatiza la situación observada en las áreas cercanas al río Barranca. En estos sectores se identifican temperaturas superficiales elevadas. Al realizar una revisión más detallada, se determina que el aumento térmico que se experimenta en el cauce no corresponde al cuerpo de agua per se, sino a que el nivel del agua disminuye de una manera significativa durante los meses de enero a abril, por lo que quedan expuestas las formaciones rocosas claras y bancos de arena. Estos materiales presentan albedos con valores aproximados entre 0,2 y 0,35, por lo cual se les considera como superficies absorbentes (es decir, un 65 % a un 80 % de la radiación solar es absorbida por la superficie).

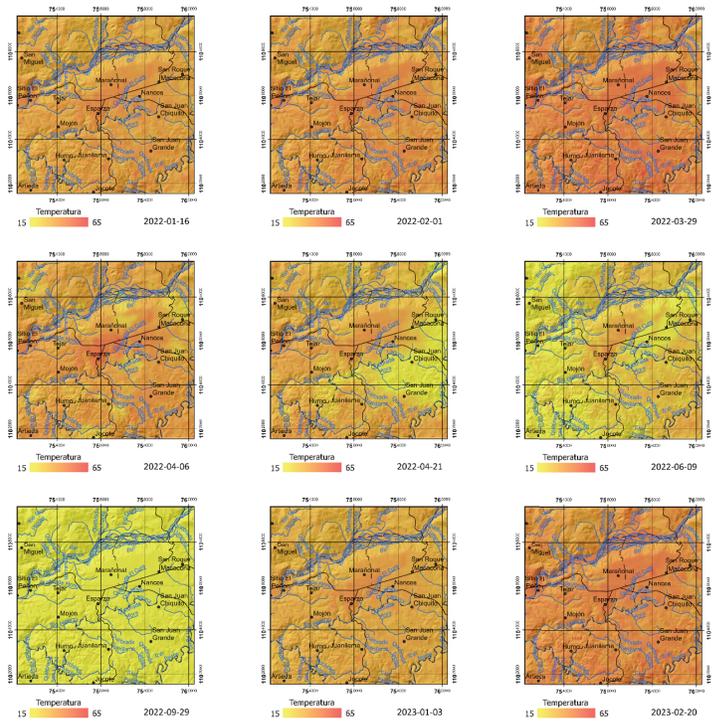
La teoría establece que un cuerpo de agua absorbe más energía solar y, como resultado, se calienta más que las superficies más reflectivas, pero su capacidad térmica permite almacenar y liberar el calor de una manera gradual. Además, en el caso de un río, el agua al estar en movimiento constante genera una redistribución del calor.

Figura 40. Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2019-12-02 a 2021-12-31.



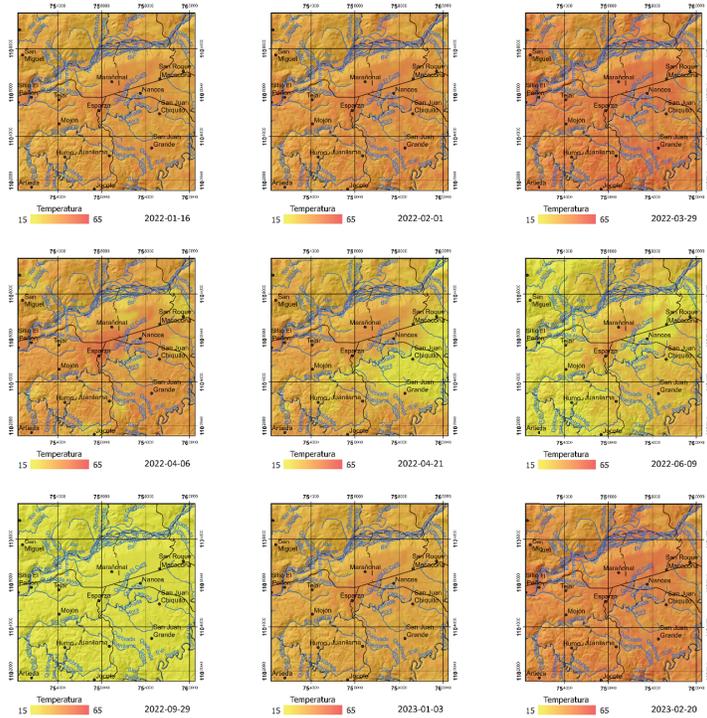
Fuente: elaboración propia a partir de Sensor TIRS del satélite Landsat.

Figura 41. Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2022-01-16 a 2023-02-20.



Fuente: elaboración propia a partir de Sensor TIRS del satélite Landsat.

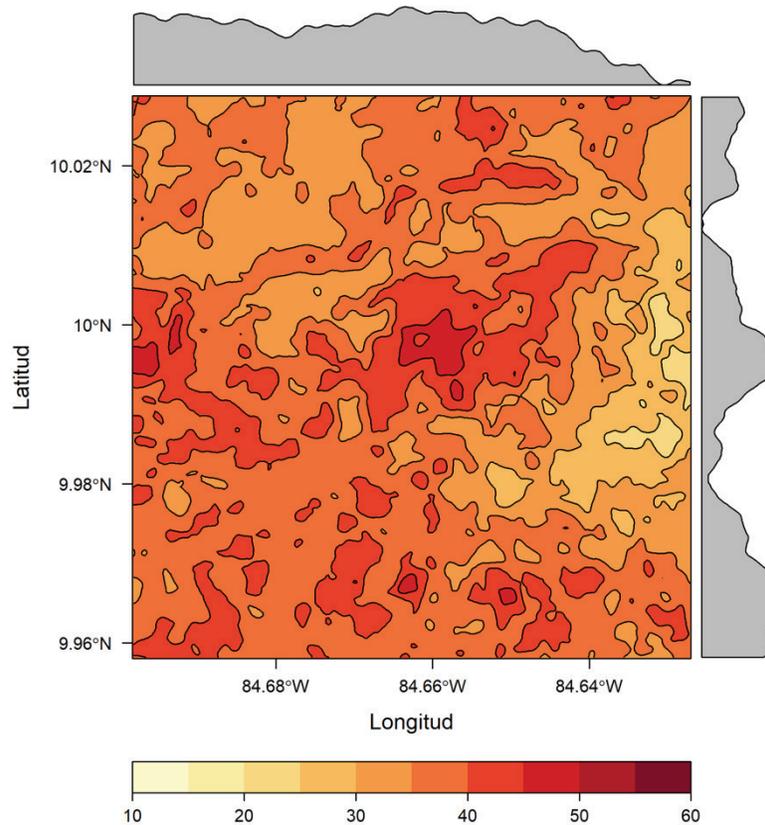
Figura 42. Esparza: temperaturas de la superficie terrestre entre 2023-02-28 a 2024-01-14.



Fuente: elaboración propia a partir de Sensor TIRS del satélite Landsat.

De la misma manera que en el caso de Alajuela, se analiza en conjunto todas las imágenes, se elabora una sola imagen derivada del estadístico de la media muestral entre fechas o intervalo determinado y posteriormente se aplica el estadístico de media en las celdas dentro de una vecindad alrededor de cada celda (función estadística focal de media), con el propósito de observar los tres parámetros de la ICU: intensidad, configuración y máximo térmico.

Figura 43. Esparza: análisis zonal de la TST [°C] por media de las celdas vecinas entre los meses de marzo a abril del período 2020 al 2024.



Nota: en la sección margen (superior y derecha) se grafican los perfiles de temperatura.

En la Figura 43 se observa el patrón de distribución espacial de la TST promedio entre los meses de enero a mayo del periodo 2020 al 2024. Además de la TST promedio en la ciudad de Esparza (coordenadas 9,99° N; 84,66° O), también se destacan otras áreas importantes: hacia el oeste, cerca del cauce del río Barranca, se desarrollan actividades de extracción de materiales. Mientras que al sur se encuentra el poblado de San Juan Grande. En el área urbana las temperaturas pueden alcanzar hasta los 49 °C.

6.2.4 Método indirecto: cruces de variables, Esparza

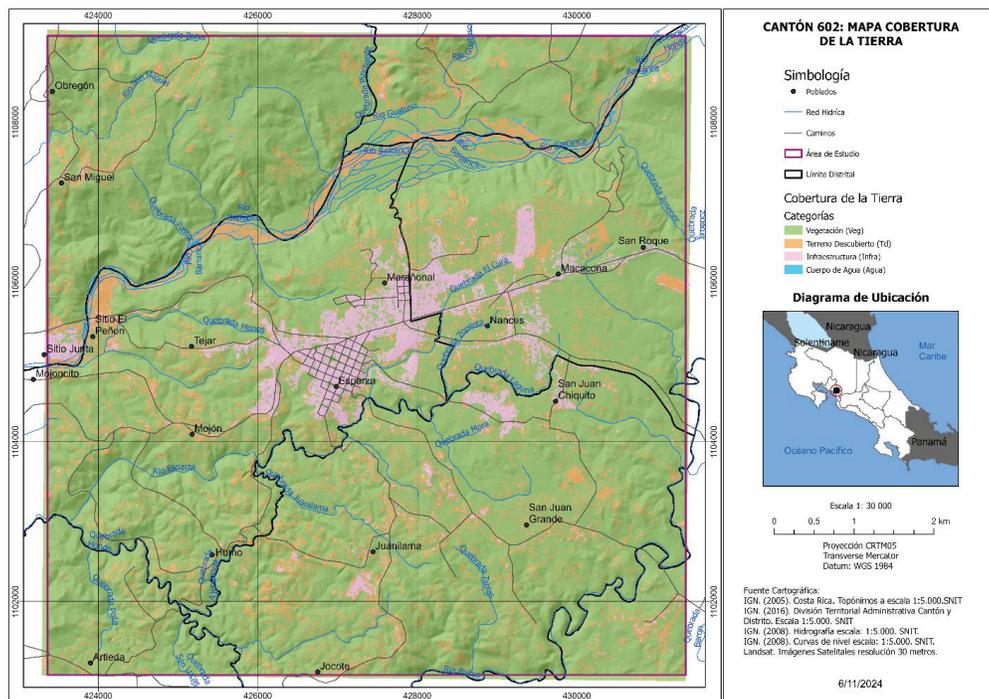
Cobertura de la tierra

En el año 2024, la mayor parte del territorio en Esparza está cubierto por vegetación, con 5321,91 hectáreas, lo que equivale al 81,52 % del área total. Esto resalta el predominio de las áreas naturales en esta región. Los terrenos descubiertos, que incluyen áreas sin vegetación significativa, ocupan 840,97 hectáreas, representando el 12,88 % del territorio en estudio. Las áreas dedicadas a infraestructura, como edificaciones y caminos, son más reducidas y cubren solo 331,72 hectáreas, lo que corresponde al 5,08 % del área. Finalmente, los cuerpos de agua tienen una extensión mínima de 34,04 hectáreas, lo que representa el 0,52 % del total. Tabla 16. El mapa de cobertura de la tierra se observa en la Figura 44.

Tabla 16. Esparza: superficies de la cobertura de la tierra en el 2024

Categoría	Hectáreas	Porcentaje
Vegetación	5321,91	81,52
Terreno descubierto	840,97	12,88
Infraestructura	331,72	5,08
Cuerpos de agua	34,04	0,52
Total	6528,64	100,00

Figura 44. Esparza: cobertura de la superficie de la tierra en el año 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Sentinel 2 y mediante el clasificador Random Forest.

Matriz de concordancia

En el área de estudio de Esparza, la categoría "Vegetación" (Veg) obtuvo 13,234 coincidencias correctas, lo que representa un 98,9 % de acierto en la clasificación dentro de esta categoría. Hubo un 1,0 % de coincidencias incorrectas en la categoría "Terreno descubierto" (Td) (128), un 0,1 % con "Infraestructura" (Infra) (16), y un 0,0 % con "Cuerpos de agua". Para la categoría de Terreno descubierto (Td), el acierto fue del 76,8 % (808 coincidencias correctas), mientras que el 5,1 % fue mal clasificado como "Vegetación" (Veg) (61), el 19,8 % como "Infraestructura" (Infra) (200) y el 1,9 % como "Cuerpos de agua" (16). La categoría "Infraestructura" tuvo un acierto del 63,7 % (643 coincidencias correctas), con un 4,4 % de coincidencias incorrectas clasificadas como "Vegetación" (44), el 28,2 % como "Terreno descubierto" (288), y un 0,0 % como "Cuerpos de agua". Finalmente, la categoría "Cuerpos de agua" (Agua) mostró un acierto del 56,3 % (126 coincidencias correctas), con un 1,8 % de clasificaciones consignadas como "Vegetación" (4), el 26,5 % como "Terreno descubierto" (59), y el 15,4 % como "Infraestructura" (74). Los resultados se observan en la Tabla 17.

Tabla 17. Esparza: matriz de concordancia de la clasificación de la cobertura terrestre

Categorías	Vegetación	Terreno descubierto	Infraestructura	Cuerpos de agua
Vegetación	13234	128	16	0
Terreno descubierto	61	808	200	16
Infraestructura	44	288	643	0
Cuerpos de agua	4	59	74	126

Estos datos se utilizaron para calcular el índice Kappa, lo cual permite evaluar la exactitud de la clasificación supervisada en comparación con las categorías reales de uso y cobertura del suelo. Se obtiene un valor del Índice Kappa de 0,785 con una precisión de 0,943, el cual se considera como de concordancia sustancial según la Tabla 6.

Este análisis proporciona una medida cuantitativa del desempeño del clasificador y ayuda a identificar áreas de mejora en el proceso de clasificación. En ambos casos los resultados son consistentes, en función a que las coberturas con asignación sobresaliente se observan en las categorías "Vegetación" y "Cuerpos de Agua". Mientras que los resultados menos favorables ocurren en las clases "Terreno descubierto e Infraestructura".

En general, las calificaciones obtenidas se consideran aceptables y es importante destacar que las asignaciones incorrectas ocurren principalmente en coberturas en las que la respuesta espectral de reflectancia es similar. Para el estudio de las ICU, se observa los albedos en este tipo de superficies (infraestructura y terrenos descubiertos), lo cual ocurre en las condiciones de suelos descubiertos cercanos al río Barranca donde las actividades de extracción de material para la producción de concreto y piedra es frecuente.

Cruce de variables

Para este método se utiliza un ráster de las TST promedio entre los meses enero a mayo y la cobertura de la tierra del área de estudio del 2024. Las coberturas correspondientes a la vegetación ($\bar{x}=41,85$ °C; $s=5,98$ °C) y a los cuerpos de agua ($\bar{x}=41,51$ °C; $s=5,69$ °C) promedian las menores TST. Las coberturas "Infraestructura" ($\bar{x}=47,46$ °C; $s=4,29$ °C) y "Terrenos descubiertos" ($\bar{x}=44,97$; $s=5,31$ °C) registran las mayores TST en el área de análisis, y está acorde a lo esperado por estas clases. En la prueba de ANOVA se estima un valor p menor al 0,05, por lo que se establece que al menos una de las medias de las categorías es significativamente diferente (Tabla 18).

Tabla 18. Prueba de ANOVA para comparar las TST en las categorías de cobertura de la tierra

Términos	g.l	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Estadístico F	Valor de p
Clases	3	1352848	450949.4	13300,49	0,00
Residuales	651245	22080286	33,90		

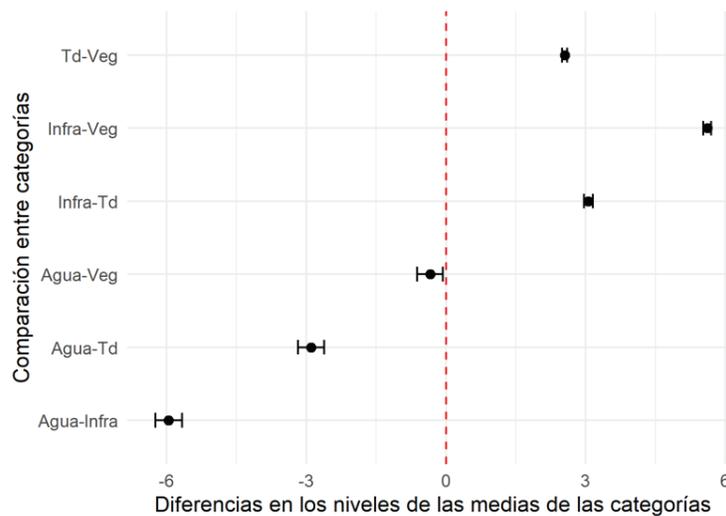
Posteriormente, se utiliza la prueba Tukey HSD para identificar qué pares de grupos tienen diferencias significativas en sus medias (Tabla 19 y Figura 45).

Tabla 19. Prueba post hoc Tukey HSD en cruce de TST con respecto

Clases	Diferencias de medias [°C]	Límites inferiores [°C]	Límites superiores [°C]	Valor de p ajustado
Td-Veg	2,55	2,50	2,61	0,00
Infra-Veg	5,61	5,53	5,70	0,00
Agua-Veg	-0,34	-0,62	-0,07	0,01
Infra-Td	3,06	2,96	3,16	0,00
Agua-Td	-2,89	-3,17	-2,62	0,00
Agua-Infra	-5,96	-6,24	-5,67	0,00

La mayor diferencia entre medias de clase ocurre en las categorías “Cuerpos de agua” e “Infraestructura”, con un valor de -5,96 °C. Es decir, la temperatura superficial promedio de los cuerpos de agua es 5,96 °C menor en relación con la temperatura superficial promedio de la infraestructura existe en área de estudio de Esparza. La menor diferencia de TST promedio se estima entre las clases de “Cuerpos de agua” y “Vegetación” con un valor de -0,34 °C. Con relación a la categoría de “Vegetación”, se establece que la mayor diferencia de esa clase ocurre con respecto a la categoría de “Infraestructura”, en la que se estima es menor en 5,61 °C.

Figura 45. Prueba Tukey HSD.



Nota: Diferencias de TST [°C] promedio de enero a mayo según tipo de cobertura de la tierra. Clases: veg – Vegetación, Td – Terrenos descubiertos, Infra – Infraestructura, Agua – Cuerpos de Agua. Nivel de confianza del 95 %.

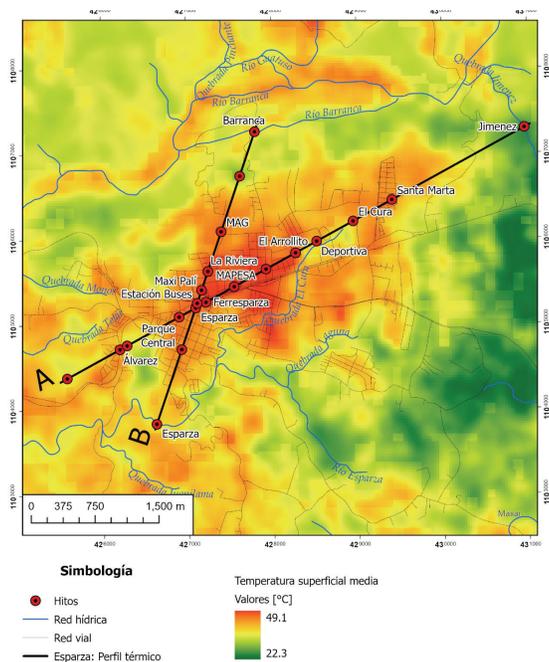
Es importante destacar que el principal cuerpo de agua identificado en el área es el río Barranca. Este río varía su caudal de forma significativa y disminuye drásticamente en época seca. Además, su curso es variable con meandros en sus tramos medios y bajos. También, se identifican meandros abandonados o fósiles que son tramos de antiguos cauces y que están desconectados del cauce principal. Estas características del río influyen al cruzar la clase con los datos de TST, de tal manera que esos no sean correspondientes a la cobertura designada. Esto supone una debilidad en la metodología, y se debe prestar especial atención a aquellas coberturas con una gran dinámica de cambio superficial durante el período de estudio.

6.2.5 Método indirecto: análisis de transectos, Esparza

Mediante el método de transectos, se identifica de una forma más evidente la distribución espacial de la ICU en la ciudad de Esparza. Según la Figura 46, se determina que las áreas más cálidas se localizan en el Rosal, Karen Olsen, Calderón Fournier, La Riviera, Marañonal y Las Tres Marías, las cuales son zonas residenciales con densidades de población entre 56 a 256 hab/ha. El perfil A muestra un incremento paulatino desde Barrio Álvarez hasta la Plaza el Arrollito. En Esparza la centralidad urbana histórica de Espíritu Santo presenta temperaturas menores, que en la aglomeración urbana del distrito de Macacona, y se puede decir que la carretera interamericana marca una división del cambio abrupto de las temperaturas (Figura 47). En otras palabras, la centralidad histórica no se le puede definir como la centralidad en la que ocurre el fenómeno de ICU. Además, se visualiza la disminución de las TST a medida que se acerca a las zonas periféricas cercanas al complejo Deportivo Hugo Carranza Arce.

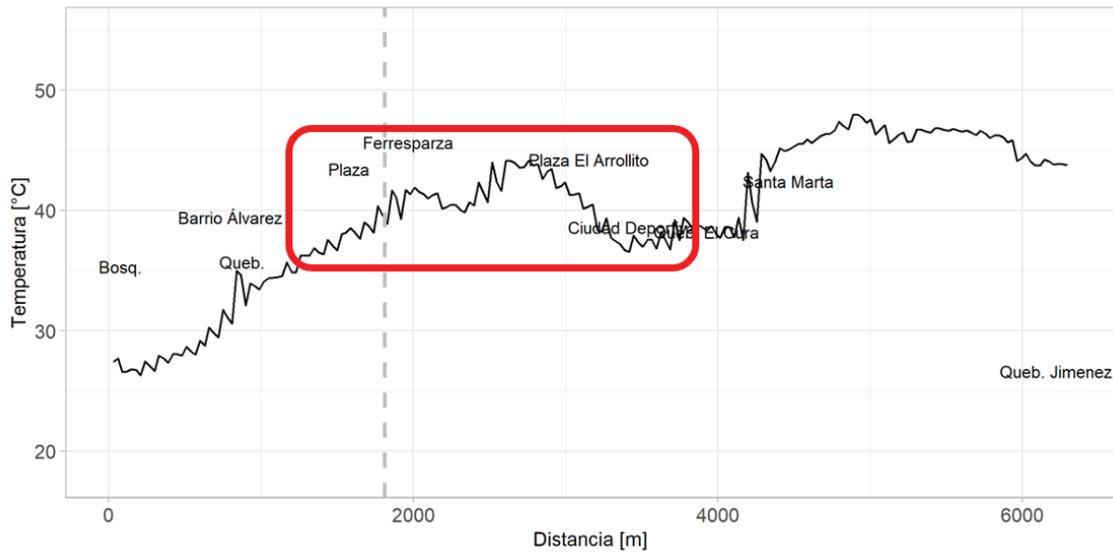
En el perfil A (Figura 47) se observa una fluctuación más frecuente que en el perfil B (Figura 48), este último con un patrón más suavizado. El perfil B (Figura 48) identifica que las mayores intensidades de la ICU se presentan en la centralidad urbana comprendida entre las distancias de 1500 a 2500 m, e incluso mantiene patrón térmico más estable y forma un tipo de meseta. En los perfiles se establece que las áreas verdes y cauces de agua contribuyen en la reducción de la temperatura hasta en 12 a 14 °C. Esto es una diferencia muy significativa con respecto a la temperatura que experimentan las edificaciones e infraestructura como las vías de comunicación. En general, se nota cómo las diferencias de temperatura entre las áreas periféricas de la ciudad y su centralidad son mayores con respecto al caso de Alajuela y de cierta manera es algo esperado en una ciudad rural-urbana como Esparza. Este método es muy consistente al identificar la ICU.

Figura 46. Esparza: perfil térmico por transectos A y B, que atraviesan la ciudad.



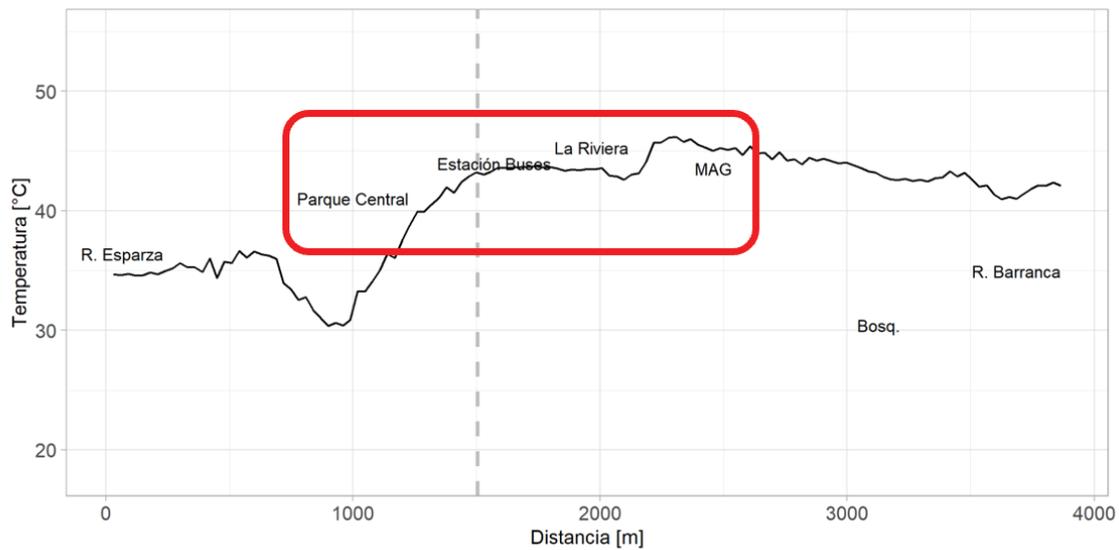
Nota: se colocan hitos de referencia y la temperatura superficial media.

Figura 47. Esparza: perfil térmico A. Atraviesa la ciudad en sentido suroeste – noreste.



Nota: el sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles

Figura 48. Esparza: perfil térmico B. Atraviesa la ciudad en sentido suroeste - norte.



Nota: el sector marcado en rojo identifica la centralidad urbana. La línea punteada muestra el punto de intersección de los perfiles

6.2.6 Método directo: estaciones fijas

En la ciudad de Esparza se efectúa un análisis piloto de la ICU bajo la metodología de registro de temperatura superficial mediante estaciones fijas (data loggers). El propósito principal de este piloto es la demostración de un método para determinar la ICU, que pueda ser implementado de manera fácil y a un bajo costo por los gobiernos locales. Otra consideración de peso fue el faltante

de información de estaciones meteorológicas en el área de estudio.

Si bien el periodo de muestreo es corto y ocurre en momentos del año que no coinciden con lo establecido en la investigación para comprender las características de la mayor intensidad de la ICU, los resultados obtenidos son interesantes de presentar. Esto se debe, en especial, por tratarse de observaciones obtenidas en época lluviosa, una temporada en la cual también se desconoce el comportamiento o patrón de la ICU desde un abordaje de medición indirecta, dada la disponibilidad de imágenes es limitada por la nubosidad característica de la época.

Se obtuvo un registro continuo de datos por 16 días, entre el 2 al 18 de julio del 2024. Los dispositivos recolectaron datos en un intervalo definido a cada cinco minutos, por lo que posteriormente se establecieron las temperaturas horarias máximas por hora en las fases diurnas y nocturnas, con el fin de identificar la ICU durante estas franjas horarias. Este aspecto es clave, ya que la principal limitante del método de estimación de la TST por imágenes satelitales es que no permite identificar la ICU durante la fase nocturna y hasta la fecha no se cuenta con estudios que detallen las características nocturnas de la ICU en Costa Rica. Los resultados se pueden observar en la Tabla 20. Además, en las Figura 50 y Figura 51 se observa las series temporales de los sitios 4 y 5, que son las ubicaciones que presentan las temperaturas superficiales más elevadas en la noche y en el día respectivamente. Estos sitios corresponden a la Estación de Buses de Transportes Unidos [Sitio 4] (noche) y la Escuela de la Riviera [sitio 5] (día).

Al disponer solo de 9 sitios de observación, se opta por aplicar una interpolación de ponderación por distancia inversa (IDW), los resultados se muestran en la Figura 49. Este tipo de interpolación es común para estimar valores de una variable no muestreada, basado en los valores observados en sitios cercanos. Los valores de temperatura se calculan como una media ponderada de los puntos de muestreo cercanos y su influencia decrece conforme aumenta la distancia. Sin embargo, se enfatiza que no es un método recomendado para analizar la variable de temperatura por su tendencia a suavizar los valores, a su vez que es influenciado por la cercanía de puntos de observación. Se recomienda usar al menos 20 puntos de medición para construir una buena red de los sitios de observación, con el fin de obtener una interpolación más precisa mediante un método de interpolación geoestadístico como Originó. Ante esta aclaración se describen los resultados.

Tabla 20. Temperaturas diurnas y nocturnas máximas promediadas por dispositivo de registro

Sitio	Detalle	ID dispositivo	Temperatura diurna media máxima [°C]	Temperatura nocturna media máxima [°C]
1	Cementerio	6749	33,22	24,90
2	Residencial Jorge Vélez	6751	32,49	25,89
3	Casa Cural	6750	30,71	25,24
4	Terminal de Buses	6752	30,83	26,47
5	Escuela La Riviera	6758	34,71	24,62
6	UCR	6755	30,92	25,23
7	Plantel Municipal	6754	32,42	25,49
8	Esc. José Francisco Pérez	6756	30,84	24,91
9	Complejo Deportivo	6757	30,96	25,41

Nota: En rojo se muestran los valores más elevados de todos los sitios de observación y con diferencia superior al error instrumental de los dispositivos (0.2 °C).

Durante la fase diaria, las temperaturas superficiales tienden a concentrarse al sur, al oeste y al norte de la centralidad histórica (parque Ignacio Pérez Zamora). Muy cerca de la carretera interamericana, en las localidades de Álvarez, Barrio Escondido, La Riviera y Marañonal, se registran las temperaturas más elevadas. En este aspecto, la Escuela de La Riviera es sitio importante de tener en cuenta en futuros monitoreos, ya que alberga a población menor de edad en horario diurno. Según datos del Ministerio

de Educación Pública, en el año 2024, en este centro educativo se imparten lecciones a 408 menores de edad estudiantes (361 cursan I y II ciclo; y 47 en nivel preescolar) (Brenes-Vindas, 2024). Mediante la observación de campo se identificó la presencia de una cubierta de plástico (césped sintético) en el suelo, y donde estudiantes del jardín de niños realizan sus juegos y actividades fuera del aula.

Las localidades con un promedio máximo menor de temperatura son precisamente el núcleo de Espíritu Santo, alrededores al campus de la UCR y en el Complejo Deportivo Hugo Carraza Arce y sectores cercanos a la Quebrada del Cura. Se infiere presentan valores más bajos por la cantidad de vegetación presente en esos sectores de la Ciudad y al estar en espacios abiertos (Figura 49).

La fase nocturna es más estable, es decir en general no se establece una variabilidad espacial de la intensidad térmica de la ICU. Aunque si se logra identificar un punto caliente sobresaliente, el cual está ubicado en el sector donde se localiza la Estación de Buses de Empresarios Unidos y que está muy cerca de la carretera Interamericana (Ruta 1). Las temperaturas más elevadas durante la noche fueron registradas entre el intervalo horario de las 00:00 horas y la 01:00 horas. Se deduce que existe una asociación entre el material de asfalto y la emisión de energía, que producen un aumento de la temperatura durante la noche. Se recomienda realizar estudios que busquen asociar la ICU con emisiones y flujo vehicular, ya que en general no se disponen de los datos necesarios para abordar este tema.

Figura 49. Ciudad de Esparza: Distribución térmica durante el día y la noche (15 días de observación).

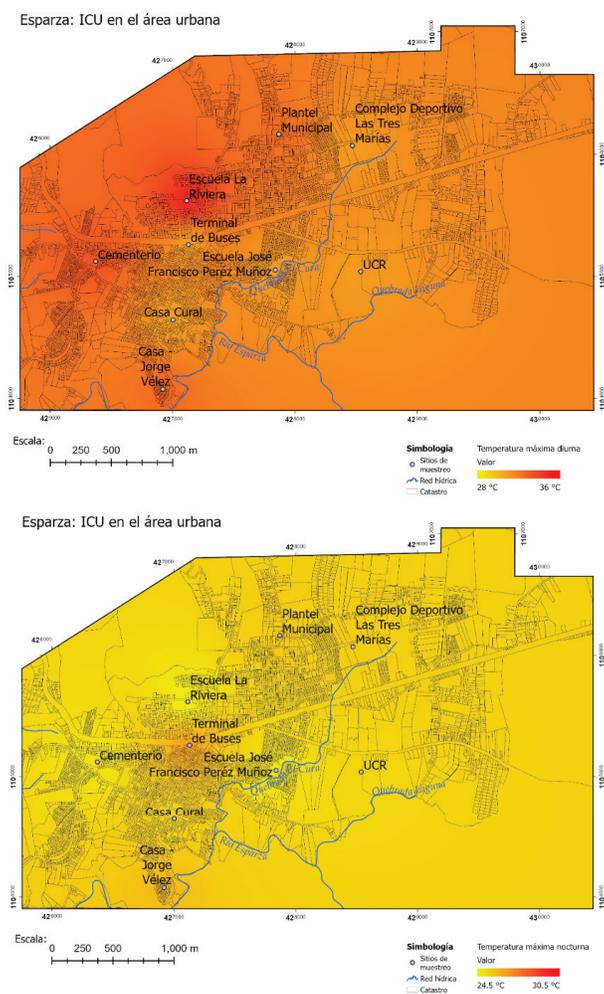


Figura 50. Sitio 4 -Sensor 6752: Terminal de Buses. Datos de temperatura superficial.

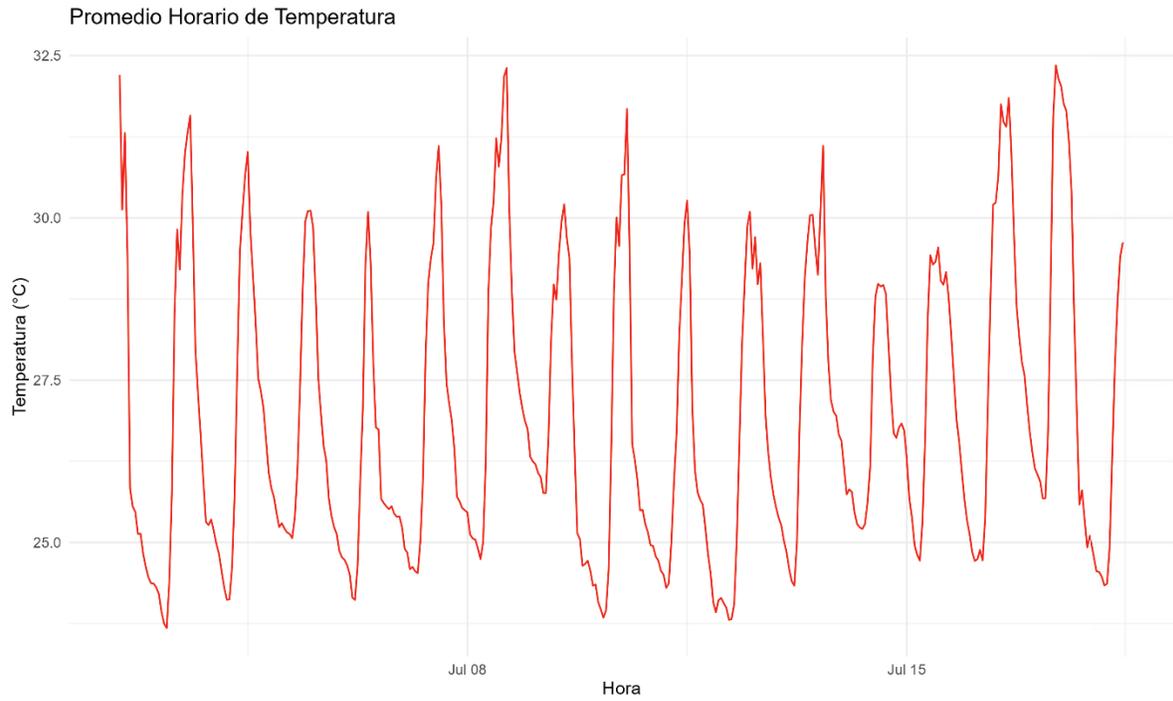
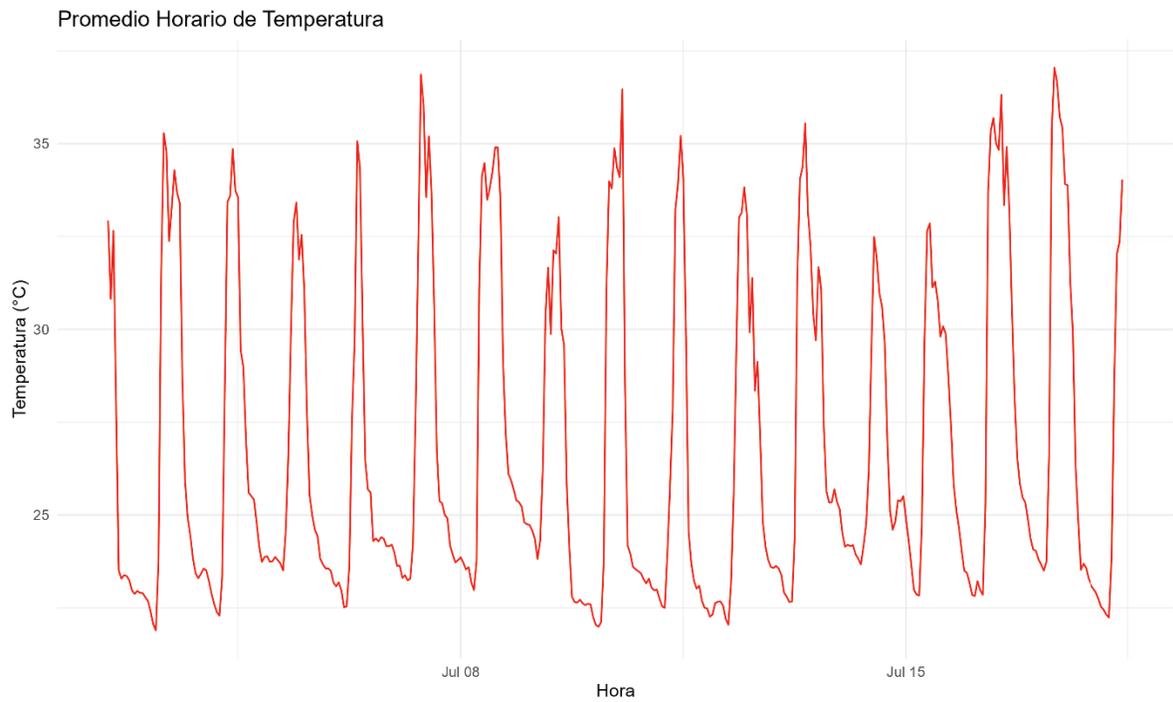


Figura 51. Sitio 5 -Sensor 6758: Escuela La Riviera. Datos de temperatura superficial



7. Hallazgos

Se identificó que los días 75 a 110 de año son los que tendrán mayor posibilidad de experimentar las mayores intensidades de la ICU; mientras que las horas del día con la mayor temperatura se encuentran en la franja horaria de 12:00 a 13:00.

En el método indirecto de cruce de variables, se estableció que las categorías nominales de cuerpos de agua y vegetación presentaron las temperaturas superficiales promedio más bajas en comparación con las coberturas de terrenos descubiertos e infraestructura. Las coberturas de terrenos descubiertos e infraestructura mostraron diferencias reducidas en las temperaturas medias. Además, el clasificador RF presentó más problemas en la asignación correcta entre esas clases. Esto supone una debilidad en la metodología, debido a que las coberturas con alto potencial de cambio superficial o respuesta espectral similar durante el período de estudio pueden significar consignar comportamientos térmicos entre las categorías. Se recomienda el uso de coberturas de más detalle y con un proceso de validación en el terreno.

Sobre el método de transectos, los perfiles térmicos longitudinales o de transectos muestran un incremento gradual de la temperatura desde las zonas periféricas hasta acercarse al centro urbano consolidado. Los puntos máximos de temperatura superficial ocurren en el centro urbano o en las zonas altamente urbanizadas. Se rescata la importancia de utilizar los perfiles térmicos (transectos) para caracterizar la distribución espacial de la ICU a través del paisaje urbano. Se considera el método más consistente y de fácil implementación en la identificación de la ICU.

Se identificaron las áreas más afectadas por la ICU en Alajuela, y estas se ubicaron principalmente en los sectores oeste y norte de la ciudad, donde predominan zonas residenciales como La Trinidad y Pueblo Nuevo. Además, destaca la concentración de grandes infraestructuras en la radial de Alajuela, que incluye el aeropuerto, centros comerciales, zonas de oficinas y el Hospital de Alajuela. En estos sectores las temperaturas superficiales oscilan entre los 45 y 50 °C.

En Esparza, los sectores residenciales de Rosal, Karen Olsen, Calderón Fournier al oeste y Marañonal y Las Tres Marías al norte presentan las temperaturas más elevadas, con rangos que van de los 44 °C a 47 °C. Por su parte, el casco central e histórico de Esparza registra temperaturas más moderadas, cercanas a los 42 °C, considerablemente inferiores a las de las zonas residenciales mencionadas.

Con respecto al método directo de estaciones fijas para la identificación de la ICU superficial, supone un gran potencial de implementación, por parte de los gobiernos locales para el monitoreo de la ICU. Por limitaciones de tiempo, este método solo realizó observaciones durante dieciséis días en intervalos de cada cinco minutos (entre el 2 al 18 de julio del 2024). A partir de las observaciones se generaron dos mapas de ICU diurno y nocturno de temperaturas superficiales.

La instalación de estaciones fijas ofrece un valioso complemento a otras metodologías, como el método indirecto basado en imágenes satelitales, especialmente para mejorar la calibración de datos remotos, incrementando la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos a partir de imágenes satelitales. El objetivo de la puesta en práctica de este método no son los resultados per se, sino que más bien fue examinar la experiencia de vincular a un municipio y técnicos municipales en el proceso de planificación e implementación de mediciones de las temperaturas a través del sistema urbano. Esa experiencia permitió evaluar requerimientos técnicos y criterios para retroalimentar la elaboración de una guía técnica y lineamientos claros para la instalación de estaciones fijas en el monitoreo de la ICU.

8. Estrategias de mitigación y adaptación en la planificación urbana

Los cambios de la cobertura y el uso del suelo urbano tienen un impacto en el comportamiento térmico de la ciudad y sus inmediaciones. Al cruzar los resultados de la TST con respecto a las coberturas de la tierra entre los años 2020 – 2024 en el estudio de caso en Esparza y en Alajuela, se determinó que existen diferencias térmicas entre las diferentes categorías de uso. Esta diferencia es aún más marcada si se toma de referencia la categoría urbana (“Infraestructura”).

De ahí que los límites de confianza de las estimaciones estadísticas indicaron que las áreas urbanas son más cálidas que las otras coberturas para ambos casos. En consecuencia, es prudente proponer estrategias de mitigación y adaptación ante el efecto de la ICU, para que los gobiernos locales las consideren en sus políticas, reglamentos de Plan Regulador y acciones relacionadas con la planificación y el diseño urbano de nuestras ciudades.

En consecuencia, con los resultados obtenidos se proponen las siguientes cuatro líneas de acción:

1. **Configuración y diseño urbano**
2. **Superficie urbana: infraestructura y red vial**
3. **Áreas verdes y espacios públicos**
4. **Actividad humana**

1. Configuración y diseño urbano: consiste en la disposición de la infraestructura y el patrón del diseño urbano que afecta la temperatura y el microclima entre las edificaciones. También tiene relación con el desarrollo vertical/horizontal. Los edificios altos y las estructuras continuas pueden bloquear el flujo del aire y el movimiento del viento, lo que provoca que el área urbana sea más cálida. Es importante considerar la orientación de los edificios. A continuación, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

- Regular el uso de patios o jardines internos de las edificaciones y centros de cuadra. Actualmente, cuando un contribuyente o desarrollador inicia los trámites de permisos de construcción, se le solicita que en los planos del diseño de la infraestructura se destine un porcentaje de espacio descubierto para la captación de aguas de pluviales. De igual manera, es posible mediante reglamentación local solicitar un espacio para ventilación lateral, con la finalidad de estimular la ventilación natural entre infraestructuras. Además, un espacio para patio trasero, con el objetivo de crear patios colindantes en el centro de las cuadras, lo que ayudaría a cambiar la configuración cerrada de las cuadras actuales.
- Regular la construcción y remodelaciones de las infraestructuras con diseños que consideren el confort bioclimático de sus usuarios. La implementación de aleros para el bloqueo o disminución de la entrada de rayos solares directos dentro de la infraestructura es una alternativa de bajo costo para controlar las altas temperaturas dentro de las infraestructuras y ayuda a aumentar el confort climático de los usuarios.
- Generar infraestructura en las vías cantonales para la movilidad sostenible y la intermodalidad dentro de los cantones y entre cantones. Para solicitarles a los ciudadanos que disminuyan el uso de los vehículos particulares, es necesario ofrecerles alternativas de desplazamiento que sean iguales o mejores de las que cuentan. Por ello, es necesario crear

espacios para la movilidad activa, que sean accesibles, seguras y planificados para tener acceso a los principales hitos de la ciudad mediante movilidad activa.

- Promover la reconfiguración de las cuadras con aperturas diagonales arborizadas. La arborización controlada y planificada proporcionará sombra y confort. Además, con este cambio en el diseño urbano de nuestras ciudades se crearán caminos peatonales y ciclovías, facilitando un tránsito más fluido, accesible y seguro.
- Estimular los diseños de los edificios en orientaciones y alturas que incentiven mediante su diseño la ventilación y el enfriamiento natural. Implementar fachadas ventiladas que permitan el flujo de aire a través de ellas y mejoran el enfriamiento pasivo.
- Promover la conectividad de espacios públicos mediante una trama verde urbana. Esta iniciativa, además de proporcionar espacios de acceso público a los ciudadanos, promueve la biodiversidad urbana.
- Aumentar la relación de la altura edificada y ancho de la vía, con el fin de propiciar la ventilación natural entre cuadras. La disposición de edificios con alturas variadas propicia la ventilación natural.
- Implementar bulevares, ciclovías y vías arborizadas. Incrementar la cantidad y calidad de la vegetación en la ciudad ayudará a filtrar los contaminantes del aire. Ayuda a mitigar el efecto de la ICU mediante la regulación de la evapotranspiración y la sombra.
- Recuperar los derechos de vía o ampliar el existente con el fin de promover la creación de antejardines en las aceras. Para esto, es necesario planificar el diseño de antejardines que incluyan vegetación, bancas y otras instalaciones que mejoren la experiencia peatonal.

2. Superficie urbana: se ha demostrado que los materiales de la superficie urbana tienen una capacidad de absorción térmica relativamente alta durante el día y una capacidad muy lenta de disipar la energía durante la noche. A continuación, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

a) Infraestructura

- Fomentar el uso de materiales de alta reflectancia en los edificios que reflejen la radiación solar en lugar de absorberla, con el fin de reducir el calentamiento del edificio.
- Utilizar cubiertas o pinturas de color claro o térmicas en el techado. Es necesario realizar campañas de concientización sobre los beneficios de las cubiertas y pinturas de color claro o térmicas, incluyendo la reducción del consumo energético y la mejora del confort térmico.
- Estimular la implementación de paredes y techos verdes. Se recomienda incluir en los requisitos de construcción el uso de paredes verdes en nuevas edificaciones y renovaciones. Además, se recomienda establecer vínculos con asociaciones, Cámara de Comercio, desarrolladores inmobiliarios y otras empresas privadas para fomentar la inversión en jardines verticales y su integración en proyectos comerciales y residenciales.
- Implementar y regular el uso de elementos y mobiliario urbano con materiales que absorban ni generen incrementos térmicos. Es necesario utilizar materiales que reflejen la luz solar en lugar de absorberla, como pavimentos de colores claros y bancos hechos con materiales compuestos que no retengan calor.
- Establecer regulaciones para que las viviendas y edificios cuenten con aleros que generen sombra y que también mejoren la ventilación y la eficiencia energética de los edificios.
- Regular el tipo de portones que protegen las viviendas y edificios, estos deben permitir una ventilación natural de la

infraestructura y el flujo de aire entre cuadras. También es necesario establecer criterios para los materiales y métodos de construcción de portones que optimicen la ventilación natural.

b) Red vial

- Sustituir el uso de asfalto en las vías por otro tipo de pavimentación que sea menos reflectante y más permeable, tales como, cemento que brilla en la oscuridad: elaborado con material ecológico y duradero que puede ser utilizado para construir carreteras más seguras. Carreteras solares: son vías con paneles de células fotovoltaicas en la parte superior que generan electricidad o energía alternativa. Hormigón reinventado: es una alternativa para reducir el calor urbano y la factura de la luz.
- Diseñar aceras con superficies permeables, como el adoquín permeable. Las superficies permeables ayudan a gestionar el agua de lluvia, reduciendo la escorrentía y mejorando la infiltración.
- Promover la arborización de una sección del derecho de vía. Como ya se indicó, la arborización urbana proporciona sombra y reduce la temperatura del entorno, mitigando el efecto de las islas de calor.

3. Áreas verdes: la cantidad, calidad y disposición espacial de las áreas verdes y la vegetación afectan la temperatura en la ciudad. Se ha determinado que disponer de parques o áreas verdes de grandes proporciones hace que los espacios sean 2 °C más fríos que las áreas urbanizadas, incluso esta diferencia de temperatura puede alcanzar hasta 5 °C. La falta de vegetación en el área urbana disminuye la evapotranspiración, la sombra y los efectos de enfriamiento de la vegetación que calientan la ciudad y favorecen la ICU. A continuación, se proponen las siguientes acciones estratégicas:

- Aumentar la cantidad y calidad de zonas verdes en la ciudad. Asegurar una buena iluminación y señalización en los corredores verdes y senderos para aumentar la seguridad y su accesibilidad.
- Incentivar en empresas y ciudadanos procesos de arborización controlada y gestionada con criterios científicos. Organizar talleres con la comunidad para recoger sus opiniones y sugerencias sobre el diseño, las especies y las ubicaciones de los individuos que se vayan a plantar.
- Recuperación de zonas de protección de cauces de los ríos. Crear parques lineales a lo largo de ríos, vías férreas desactivadas, o avenidas principales que conecten diferentes áreas de la ciudad.
- Incentivar proyectos de recuperación y rehabilitación de espacios con potencial para la conectividad biológica. Establecer proyectos de jardinería comunitaria donde los residentes puedan participar en la plantación y mantenimiento de espacios verdes.
- Garantizar el aprovisionamiento de áreas verdes con funcionalidad ecosistémica mediante la creación de corredores biológicos interurbanos. Es necesario establecer normativa municipal que proteja los corredores biológicos y regulen las actividades humanas que puedan afectarlos. Los corredores biológicos aumentan la cobertura vegetal, que ayuda a capturar carbono y reducir las temperaturas urbanas.
- Crear jardines de lluvia en las aceras, red vial y espacios públicos para captar y filtrar el agua de lluvia, y que beneficien al medioambiente urbano. Este tipo de jardín no solo ayuda a controlar la escorrentía superficial, sino que también mejora la calidad del agua al permitir que esta se infiltre en el suelo, y promueven la recarga de acuíferos y reduciendo la contaminación.

4. Actividad humana: acciones como la climatización artificial de vivienda y los edificios, el tráfico y los diferentes procesos productivos inciden en el aumento de la temperatura. El calor producido por estas acciones entra en el medioambiente

de manera directa e indirecta. Además, el calor y la humedad que liberan estas actividades, también contaminan el aire y afectan la radiación entrante y saliente. A continuación, se proponen las siguientes acciones:

- Evitar el uso de climatización artificial en viviendas, edificios y vehículos. Promover el diseño arquitectónico que maximice la ventilación natural y el uso de materiales aislantes.
- Disminuir el consumo energético en actividades domésticas y productivas. Fomentar el uso de electrodomésticos con alta eficiencia energética. Incentivar la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias y sostenibles.
- Propiciar el uso de tecnologías limpias en los diferentes procesos de producción de bienes y servicios. Fomentar la instalación de paneles solares, aerogeneradores y otras fuentes de energía renovable.
- Incentivar las certificaciones bioclimáticas en los desarrollos inmobiliarios. Establecer normativas que promuevan o exijan certificaciones bioclimáticas.
- Fomentar el uso de medios de transporte alternativos (caminatas, bicicletas, patinetas, otros). Para esto es necesario asegurar que las estaciones de transporte público sean accesibles para ciclistas y peatones, con conexiones directas a ciclovías y senderos peatonales.
- Incentivar el uso de transporte público y la intermodalidad dentro del cantón como entre cantones. Desarrollar estaciones que faciliten la intermodalidad, lo que permite la combinación de diferentes modos de transporte.
- Fomentar los programas o los talleres de sensibilización y educación climática. Es necesario dar a conocer las causas y las consecuencias, así como posibles soluciones a los efectos producidos por la ICU.

8.1 Estrategias puntuales para Alajuela

Se derivan de los resultados obtenidos de los mapas de ICU para el caso de la ciudad de Alajuela. En general, se recomienda la implementación de techos verdes y fachadas vegetadas, que ayuden a reducir la absorción de calor en las edificaciones, especialmente en el centro de la ciudad. Aumentar las áreas verdes urbanas y promover la reforestación en espacios públicos en la ciudad puede reducir significativamente las temperaturas superficiales y en particular es una medida que se debería aplicar en el sector oeste en el distrito San José (La Trinidad) y en el sector norte (Pueblo Nuevo). El uso de pavimentos fríos y materiales reflectantes en infraestructuras también podría contribuir a reducir la acumulación de calor. Esta sería una medida que puede ser implementada a mediano plazo en el sector de la radial de Alajuela, zona en la que se identifican estructuras de gran tamaño. También, en esta zona se podría optar por una solución a corto a mediano plazo como la creación de corredores ecológicos, que busquen integrar las áreas verdes existentes con un proceso de arborización de las vías públicas.

8.2 Estrategias puntuales para Esparza

Se derivan de los resultados obtenidos de los mapas de ICU para el caso de la ciudad de Esparza. Es necesario implementar acciones específicas en los sectores residenciales de Rosal, Karen Olsen, Calderón Fournier, Marañonal y Las Tres Marías. Las temperaturas superficiales en estas zonas pueden estar asociadas a su diseño urbano, por lo que una estrategia a corto plazo es incentivar la implementación de jardines y patios con árboles en las viviendas. También, se debe considerar el aumento del acceso a zonas de sombra y descanso, en parques, áreas recreativas y vías públicas.

Una de las estrategias a largo plazo sería la reconfiguración de las cuadras con aperturas diagonales arborizadas. Sin embargo, se debe excluir de esta propuesta a las urbanizaciones Karen Olsen y Calderón Fournier, ya que el promedio del tamaño de los predios es de aproximadamente 180 m². No obstante, estos residenciales deben ser considerados como zonas prioritarias, en gran medida por su alta densidad poblacional y constructiva. Como propuesta a corto plazo, podría incentivarse el uso de pintura

reflectante en techos, también conocida como pintura de techo frío. Esta técnica ayuda a reflejar una mayor cantidad de radiación solar, al disminuir la absorción de calor y, por lo tanto, la temperatura tanto de las superficies como del interior de las viviendas.

Asimismo, la educación y la sensibilización de la población sobre prácticas que reduzcan su exposición al calor y el uso de energías limpias pueden complementar los esfuerzos para enfrentar los efectos de la ICU.

9. Limitaciones y recomendaciones

El presente estudio tiene como objetivo principal evaluar y analizar las islas de calor urbanas (ICU) en las ciudades de Esparza y Alajuela, con el fin de identificar sus causas, efectos y posibles estrategias de mitigación. Para lograrlo, se ha llevado a cabo un enfoque multidisciplinario que incluye la recopilación de datos meteorológicos, el uso de tecnologías de teledetección y los sistemas de información geográfica.

Sin embargo, durante el desarrollo de este estudio se han identificado varias limitaciones que podrían influir en el análisis de los resultados. Estas limitaciones surgen de diversas restricciones metodológicas y contextuales, que es importante reconocer para entender el alcance y la aplicabilidad de los hallazgos. A continuación, se describen las principales limitaciones encontradas:

9.1 Ausencia de estudios de la estructura urbana

Identificar y cuantificar las ICU sin contar con estudios detallados de la estructura urbana puede presentar varios desafíos significativos. Sin un entendimiento claro de la estructura urbana es difícil identificar patrones específicos de calor relacionados con la distribución de edificios, calles y áreas verdes. También, desconocer los materiales utilizados en los edificios, aceras y red vial puede llevar a interpretaciones erróneas a la hora de establecer medidas de mitigación y adaptación específicas.

Recomendación: Llevar a cabo estudios detallados de la estructura urbana que incluyan la distribución de edificios, materiales, alturas y áreas verdes.

9.2 Disponibilidad de imágenes satelitales

Se cuenta con una limitada cantidad de imágenes satelitales disponibles en los períodos de interés para determinar la ICU. Si bien los intervalos de registro y captura de los sensores del satélite ocurren en intervalos regulares, las condiciones del tiempo pueden provocar que imágenes no puedan usarse para la identificación de la ICU, lo que genera registros temporales irregulares. Específicamente para Costa Rica ocurren en un horario no tan favorable (aproximadamente a las 16:00 hora local).

Recomendación: Apoyarse en otros instrumentos de medición de temperatura, humedad relativa y viento para establecer redes de monitoreo urbano de las ICU, en los que se detallan, por ejemplo, las características de los materiales cercanos a las observaciones de los dispositivos.

9.3 Cantidad de observaciones en método directo

El período de observación fue limitado. Esto afecta la precisión y la generalización de los resultados, ya que una mayor cantidad de datos en una línea temporal más amplia podría proporcionar una imagen más completa y representativa de las tendencias y patrones estudiados.

Recomendación: Establecer una red de monitoreo continuo que permita la recopilación y análisis de datos en tiempo real.

9.4 Datos poblacionales

La distribución y densidad de la población es importante para evaluar la posible exposición al calor urbano en los habitantes de la ciudad. Es necesario contar con un nivel de desagregación espacial de la variable de densidad de población a escala urbana para asociar la variable de temperatura superficial. Para llevar a cabo el análisis se realizó la solicitud de compra de los datos de UGM del censo de población del 2022 al Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC); sin embargo, se indicó que con respecto a UGM solo están disponibles los datos del censo de población del 2011, los cuales fueron adquiridos. Esto supone un desfase de los datos en más de 13 años. Si bien es posible estimar una proyección de la población en términos generales, ya que se dispone de la tasa de crecimiento a nivel cantonal al año 2022, no es recomendable aplicar la tasa de crecimiento a una unidad espacial a la escala de la UGM.

Recomendación: Elaborar estudios de la información de población de detalle, como por ejemplo a través del registro del Ministerio de Salud Pública, y que recopilan los asistentes técnicos de atención primaria (ATAP) y vincularlos a las UGM definidas por el INEC.

9.5 Cuantificación de la contribución del tráfico vehicular al fenómeno

Existe un desafío en la obtención de datos de flujo vehicular en diferentes momentos del día, en diversas zonas de la ciudad y en el periodo de análisis. Los datos agregados de tráfico no necesariamente capturan las variaciones temporales ni espaciales que puedan determinar el impacto en las temperaturas locales.

Recomendación: Se recomienda el uso de sensores de tráfico o datos móviles para explorar la obtención de estimaciones en los lugares identificados en la ciudad como de interés para asociarlos a los estudios de ICU.

9.6 Estaciones meteorológicas

El estudio enfrenta las limitaciones de que no se cuentan estaciones meteorológicas en la cuenca del río Barranca. Las estaciones meteorológicas más cercanas se localizan en la cuenca del río Jesús María, por lo que este factor no pudo valorarse de manera directa en la ciudad de Esparza.

Recomendación: Utilización de modelos de simulación del comportamiento del viento o colocación de estaciones meteorológicas en la ciudad de Esparza. También, es importante considerar para futuros estudios el uso de modelos climáticos. En particular, las proyecciones del incremento de las temperaturas regionales y locales tendrían un impacto significativo en la intensidad y extensión del fenómeno de la ICU. A medida que las temperaturas del aire aumentan, se espera que las áreas urbanas experimenten efectos intensos debido a la combinación de los factores climáticos y características urbanas que contribuyen a la retención y generación de calor.

9.7 Otras recomendaciones

Equipo técnico profesional

Para determinar y analizar las ICU, se requiere un equipo técnico profesional multidisciplinario que incluya expertos en diversas áreas.

1. Geógrafos y especialistas en sistemas de información geográfica (SIG):

- Utilizan tecnologías de teledetección y SIG para mapear y visualizar las islas de calor.
- Analizan datos espaciales y crean modelos detallados de la ciudad.

2. Urbanistas:

- Diseñan y analizan la estructura urbana, incluyendo la distribución de edificios, calles y áreas verdes.
- Evalúan cómo la geometría urbana afecta la temperatura y la radiación solar.

3. Meteorólogos y climatólogos:

- Recopilan y analizan datos meteorológicos, como temperatura, humedad y velocidad del viento.
- Utilizan modelos climáticos para predecir y entender las islas de calor.

4. Científicos de datos:

- Implementan y mantienen sensores y sistemas de monitoreo.
- Analizan grandes volúmenes de datos para identificar patrones y tendencias.

5. Planificadores urbanos y especialistas en ordenamiento territorial

- Desarrollan políticas y planes de acción para mitigar las islas de calor.
- Colaboran con otros profesionales para implementar soluciones sostenibles.

6. Ingenieros ambientales:

- Estudian el impacto ambiental de las islas de calor y desarrollan estrategias de mitigación.
- Analizan la calidad del aire y la contaminación atmosférica.

7. Especialistas en salud pública:

- Evalúan los efectos de las islas de calor en la salud de la población.
- Desarrollan programas de concienciación y prevención para proteger la salud pública.

Herramientas y tecnologías necesarias

Contar con equipos y personal capacitado en el uso de las siguientes herramientas y tecnologías:

- **Sensores meteorológicos:** Para medir la temperatura, humedad y otros parámetros climáticos en entornos urbanos.
- **Drones y teledetección:** Para recopilar datos visuales y térmicos de la ciudad.
- **Modelos climáticos y simulaciones:** Para predecir y analizar las islas de calor.
- **Sistemas de información geográfica (SIG):** Para mapear y visualizar datos espaciales.
- **Software de análisis de datos:** Para procesar y analizar grandes volúmenes de datos.

10. Agradecimientos

El equipo de trabajo expresa el más sincero agradecimiento al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica por su invaluable colaboración al suministrar la información de las estaciones meteorológicas necesarias para este estudio. Asimismo, agradecemos a su equipo de profesionales por la disposición para revisar y validar los resultados obtenidos. Sus observaciones contribuyeron

significativamente al desarrollo de esta investigación.

También, se agradece a la Municipalidad de Esparza por su invaluable acompañamiento a lo largo del desarrollo de este proyecto. Su apoyo y disposición para brindar acceso a la información local, así como su compromiso con el bienestar ambiental y urbano, han sido fundamentales para el desarrollo de insumos de esta investigación. Se extiende el agradecimiento al U.S. Geological Survey por proporcionar acceso a las imágenes satelitales Landsat (Landsat Collection 2 Level- 2 Surface Temperature Science Product courtesy of the U.S. Geological Survey), así como a la European Space Agency por proporcionar las imágenes Sentinel (Sentinel 2A y 2B). Estas imágenes fueron esenciales para llevar a cabo el análisis de la cobertura terrestre y la evaluación de la isla de calor urbana en este estudio. La calidad y disponibilidad de estos datos fueron claves para obtener el desarrollo de esta investigación.

11. Referencias bibliográficas

Acevedo, H. & Villalobos, Y. (2023). Sistema Nacional de Monitoreo de la Cobertura y Uso de la Tierra y Ecosistemas (SIMOCUTE) para Costa Rica: versión 2.0. San José, Costa Rica.

Arce, M., & Acevedo, V. (2014). Análisis Comportamiento término y su relación con el uso de suelo en la formación del fenómeno Islas de Calor, en la aglomeración urbana de Heredia.

Arnett, J. T. T. R., Coops, N. C., Gergel, S. E., Falls, Robert W., & Baker, R. H. (2014). Detecting Stand-Replacing Disturbance using RapidEye Imagery: A Tasseled Cap Transformation and Modified Disturbance Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 40(1), 1–14.

Barrantes-Sotela, O. (2020). Análisis del efecto del cambio de la cobertura de la tierra en el fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU) en la ciudad de Heredia, Costa Rica [Tesis de maestría Académica]. Universidad de Costa Rica.

Bermúdez Méndez, E., & Sánchez Moreira, S. (2022). Incidencia del crecimiento urbanístico en el cambio climático: caso de estudio isla de calor urbana en la ciudad de Liberia, Guanacaste, Costa Rica. In A. Martí Ezpeleta, N. Lorenzo González, D. Royé, & A. Díaz Poso (Eds.), Congreso AEC (pp. 263–272). Asociación Española de Climatología. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/14043>

Boundary Layer Climates, 464 (1987).

Brenes-Vindas, D. (2024). Nómima de Centros Educativos, Clasificados por Dirección Regional y Circuito.

Cartín, M. (2018, January 12). Iglesia de Esparza, Puntarenas. *Mi Costa Rica de Antaño*.

Chandler, R. E. (2005). On the use of generalized linear models for interpreting climate variability. *Environmetrics*, 16(7), 699–715. <https://doi.org/10.1002/env.731>

Cochran, N. E. (2014). Detection of Urban Heat Islands in the Great Lakes Region wuth Globe Student Surface Temperature Measurements (Issue December) [University of Toledo]. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=toledo1418421488

Corrales, L., Brenes-Peréz, C., & Ramos, Z. (2019). Islas de calor, impactos y respuestas: El caso del cantón de Curridabat.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2020). Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared (TIRS) Collection 2 Level 2 Science Products 30-meter multispectral data.

Espinoza, P. S., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de

- Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 141(57), 123–141. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022014000100009>
- Fan, Y., Li, Y., Wang, X., & Catalano, F. (2016). A New Convective Velocity Scale for Studying Diurnal Urban Heat Island Circulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(10), 2151–2164. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0099.1>
- Fang, Q., Liu, C., Ren, Z., Fu, Y., Fan, H., Wang, Y., & Yu, Z. (2024a). Spatiotemporal Analysis of Surface Urban Heat Island Dynamics in Central Yunnan City Cluster. *Sustainability (Switzerland)*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/su16114819>
- Fang, Q., Liu, C., Ren, Z., Fu, Y., Fan, H., Wang, Y., & Yu, Z. (2024b). Spatiotemporal Analysis of Surface Urban Heat Island Dynamics in Central Yunnan City Cluster. *Sustainability*, 16(11), 4819. <https://doi.org/10.3390/su16114819>
- Garbanzo-Salas, M., & Hocking, W. (2019). Characterization of atmospheric structures observed by a VHF MST-type radar in the troposphere over Santa Cruz, Costa Rica. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-0985-y>
- Gartland, L. (2008). Heat islands. Earthscan.
- Ghulam, A. (2010). Calculating surface temperature using Landsat thermal imagery. *Calculating Surface Temperature Using Landsat Thermal Imagery*, 1(1), 1–9.
- IFAM. (2002). Atlas Cantonal de Costa Rica.
- Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22), 3821–3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2)
- Jin, M. S. (2012). Developing an Index to Measure Urban Heat Island Effect Using Satellite Land Skin Temperature and Land Cover Observations. *Journal of Climate*, 25(18), 6193–6201. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00509.1>
- Johnson, D. B. (1985). Urban modification of diurnal temperature cycles in Birmingham, U.K. *Journal of Climatology*, 5(2), 221–225. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050208>
- Kala, J., Evans, J. P., Pitman, A. J., Schaaf, C. B., Decker, M., Carouge, C., Mocko, D., & Sun, Q. (2014). Implementation of a soil albedo scheme in the CABLEv1.4b land surface model and evaluation against MODIS estimates over Australia. *Geoscientific Model Development*, 7(5), 2121–2140. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2121-2014>
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., & Sobrino, J. A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.008>
- Liu, L., & Zhang, Y. (2011). Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and. *Remote Sensing*, 3(7), 1535–1552. <https://doi.org/10.3390/rs3071535>
- Liu, Y., Li, Q., Yang, L., Mu, K., Zhang, M., & Liu, J. (2020). Urban heat island effects of various urban morphologies under regional climate conditions. *Science of the Total Environment*, 743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140589>
- MAG. (2021). Informe de quemas agrícolas controladas período 2020–2021.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359), 70–72. <https://doi.org/10.1002/qj.49708435910>
- Meléndez-Chaverri, C. (2013). Los Orígenes de Alajuela. 11 de Abril Cuadernos de Cultura, 8.

Moreno-García, M. del C. (1999). *Climatología urbana*. Universidad de Barcelona.

Municipalidad de Alajuela. (2024). *Diagnóstico Territorial: Eje Infraestructura y Desarrollo*.

Municipalidad de Esparza. (2021). *Historia del Cantón de Esparza*.

Oke, T. R. (1973). City Size and Urban Heat Island. *Atmospheric Environment Pergamon Press*, 7, 769–779. <https://doi.org/10.1145/2702123.2702189>

Oke, T. R. (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. In J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate, & D. X. Viegas (Eds.), *Wind Climate in Cities*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2>

Oke, T. R. (2006). *Representative Meteorological Observations at Urban Sites*.

Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

Piracha, A., & Chaudhary, M. T. (2022). Urban Air Pollution, Urban Heat Island and Human Health: A Review of the Literature. *Sustainability*, 14(15), 9234. <https://doi.org/10.3390/su14159234>

Quesada-Román, A., Villalobos-Portilla, E., & Campos-Durán, D. (2021). Hydrometeorological disasters in urban areas of Costa Rica, Central America. *Environmental Hazards*, 20(3), 264–278. <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1791034>

Rojas, N. (2011). *Estudio de Cuencas Hidrográficas de Costa Rica*.

Romero Aravena, M., & Romero Aravena, H. (2005). Relación espacial y estadística entre las islas de calor de superficie, coberturas vegetales, reflectividad y contenido de humedad del suelo, en la ciudad de Santiago y su entorno rural. XXVI CONGRESO NACIONAL Y XVI CONGRESO INTERNACIONAL DE GEOGRAFÍA.

Romero Dávila, S., Morales Méndez, C., & Némiga, X. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*, 11, 1–10.

Romero-Dávila, S., Morales-Méndez, C. C., & Némiga, X. A. (2011). Identificación de las islas de calor de verano e invierno en la ciudad de Toluca, México. *Revista de Climatología*, 11, 1–10. <http://webs.ono.com/reclim5/reclim11a.pdf>

Rozenstein, O., Qin, Z., Derimian, Y., & Karnieli, A. (2014). Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm. 5768–5780. <https://doi.org/10.3390/s140405768>

Sarricolea Espinoza, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 123–141. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>

Sarricolea, P. (2012). *La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago* [Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/86936>

Sarricolea, P. (2021). Análisis de la distribución e intensidad de las Islas de Calor Urbanas Superficiales diurnas (ICUS) en el Cantón Manta, Manabí y su relación con la vegetación local y otras variables geográficas. Universidad de Barcelona.

Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008). Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71–84.

- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou. *Ecological Indicators*, 72, 738–746. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2008). Urban Heat Island Basics. In *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies* (pp. 2–22). U.S. Environmental Protection Agency.
- Voogt, J. (2007). How Researchers Measure Urban Heat Islands. *Department of Geography*, 34. http://epa.gov/heatisland/resources/pdf/EPA_How_to_measure_a_UHI.pdf
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003a). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003b). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015a). An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268–4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>
- Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015b). An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sensing*, 7(4), 4268–4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>
- Wang, S., Ma, Q., Ding, H., & Liang, H. (2018). Detection of urban expansion and land surface temperature change using multi-temporal landsat images. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 526–534. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.011>
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China megacities. *Science of the Total Environment*, 671, 1036–1046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.421>
- Zhang, Z. (2018). *Multivariate Time Series Analysis in Climate and Environmental Research*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67340-0>
- Zhao, S., Zhou, D., & Liu, S. (2016). Data concurrency is required for estimating urban heat island intensity. *Environmental Pollution*, 208, 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.037>

12. Anexos

12.1 Listado de imágenes satelitales

Tabla 21. Listado de imágenes sensor Landsat para análisis de la ICU

Nombre	Fecha
LC08_L2SP_015053_20191202_20200825_02_T1	2019-12-02
LC08_L2SP_015053_20200408_20200822_02_T1	2020-04-08
LC08_L2SP_015053_20200915_20200919_02_T1	2020-09-15
LC08_L2SP_015053_20210326_20210402_02_T1	2021-03-26
LC08_L2SP_015053_20210411_20210416_02_T1	2021-04-11
LC08_L2SP_015053_20210427_20210507_02_T1	2021-04-27
LC08_L2SP_015053_20210817_20210827_02_T1	2021-08-17
LC08_L2SP_015053_20210902_20210910_02_T1	2021-09-10
LC09_L2SP_015053_20211231_20230503_02_T1	2021-12-31
LC09_L2SP_015053_20220116_20230501_02_T1	2022-01-16
LC09_L2SP_015053_20220201_20230429_02_T1	2022-02-01
LC08_L2SP_015053_20220329_20220406_02_T1	2022-03-29
LC09_L2SP_015053_20220508_20230417_02_T1	2022-04-06
LC09_L2SP_015053_20220406_20230421_02_T1	2022-04-21
LC08_L2SP_015053_20220601_20220609_02_T1	2022-06-09
LC09_L2SP_015053_20220929_20230327_02_T1	2022-09-29
LC09_L2SP_015053_20230103_20230315_02_T1	2023-01-03
LC09_L2SP_015053_20230220_20230309_02_T1	2023-02-20
LC08_L2SP_015053_20230228_20230315_02_T1	2023-02-28
LC08_L2SP_015053_20230316_20230324_02_T1	2023-03-16
LC09_L2SP_015053_20230425_20230427_02_T1	2023-04-25
LC09_L2SP_015053_20230511_20230516_02_T1	2023-05-11
LC08_L2SP_015053_20230604_20230613_02_T1	2023-06-04
LC09_L2SP_015053_20230628_20230701_02_T1	2023-06-28
LC09_L2SP_015053_20231205_20231206_02_T1	2023-12-05
LC09_L2SP_015053_20231221_20231223_02_T1	2023-12-21
LC09_L2SP_015053_20231221_20231223_02_T1	2024-01-14
LC08_L2SP_015053_20240318_20240402_02_T1	2024-03-18

Tabla 22. Listado de imágenes sensor Sentinel 2 para la elaboración de las coberturas de la tierra

Nombre	Fecha
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0207_R054_T16PGS_20190322T205739.SAFE	2019-03-22
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0500_R054_T16PGS_20221121T185447.SAFE	2019-03-22
S2B_MSIL1C_20190322T160509_N0500_R054_T16PHS_20221121T185447.SAFE	2019-03-22
S2A_MSIL2A_20210326T160511_N0500_R054_T16PHR_20230511T060504.SAFE	2021-03-26
S2A_MSIL1C_20210326T160511_N0500_R054_T16PHS_20230511T021437.SAFE	2021-03-26
S2A_MSIL2A_20240330T160511_N0510_R054_T16PGS_20240330T223951.SAFE	2024-03-30
S2A_MSIL2A_20240330T160511_N0510_R054_T16PHS_20240330T223951.SAFE	2024-03-30

12.2 Gráficos de las tendencias de temperatura de las estaciones meteorológicas

Figura 52. Estación 84187 – Fabio Baudrit. Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024

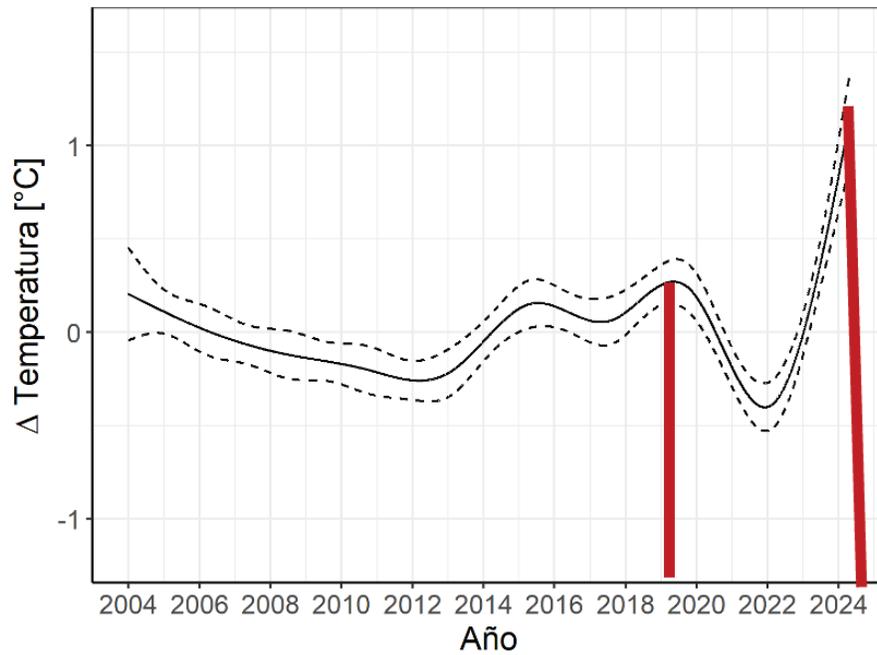


Figura 53. Estación 84187 – Fabio Baudrit. Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024

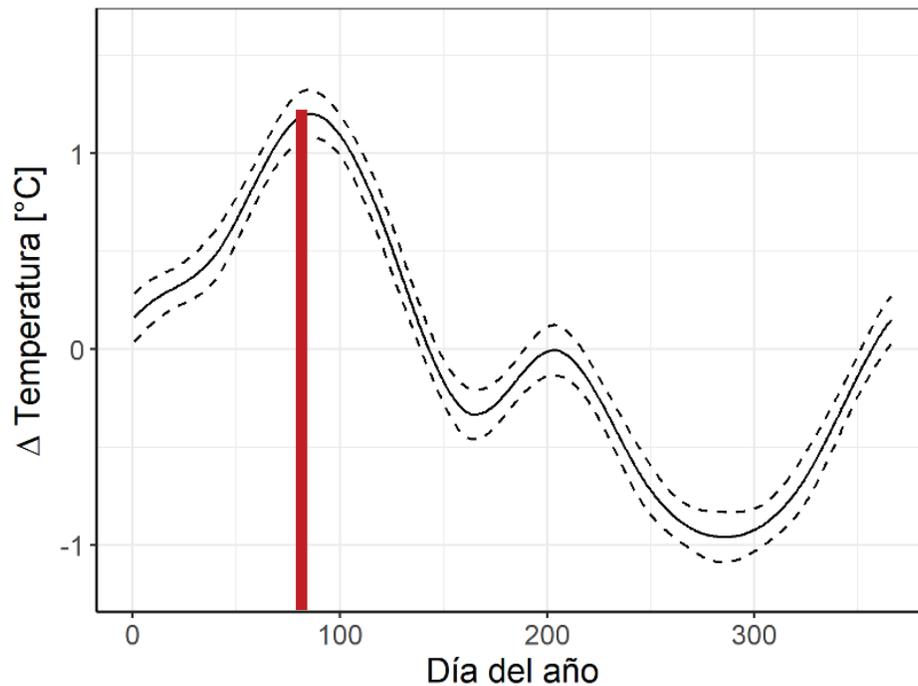


Figura 54. Estación 84187 – Fabio Baudrit.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

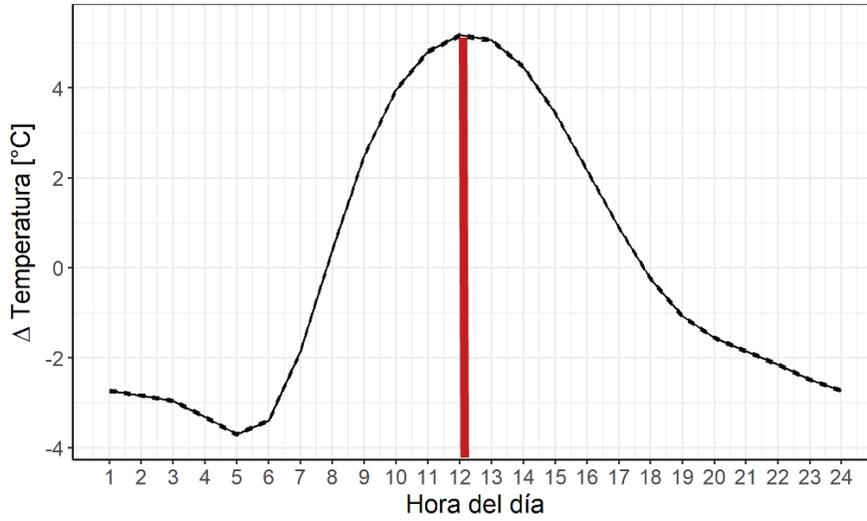


Figura 55. Estación 84191 – La Garita (Recope).
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024

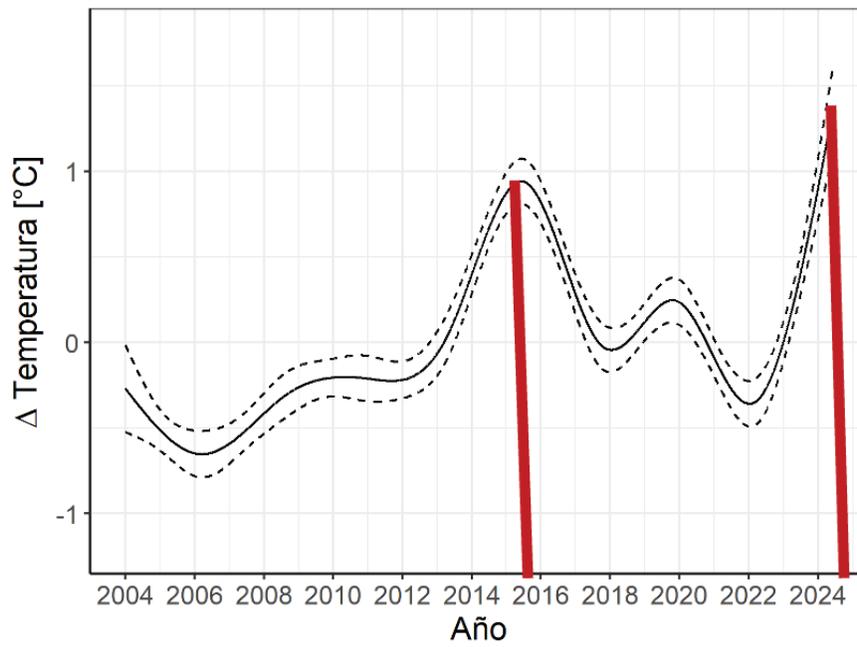


Figura 56. Estación 84191 – La Garita (Recope).
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024

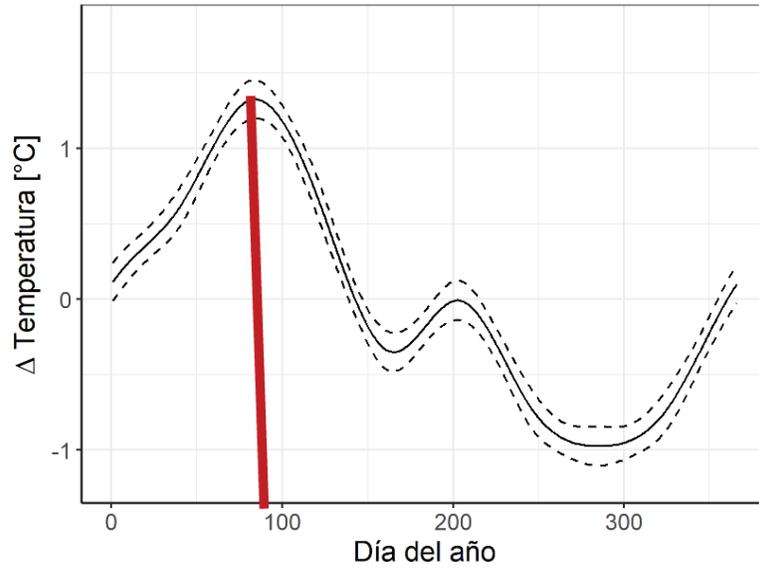


Figura 57. Estación 84191 – La Garita (Recope).
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

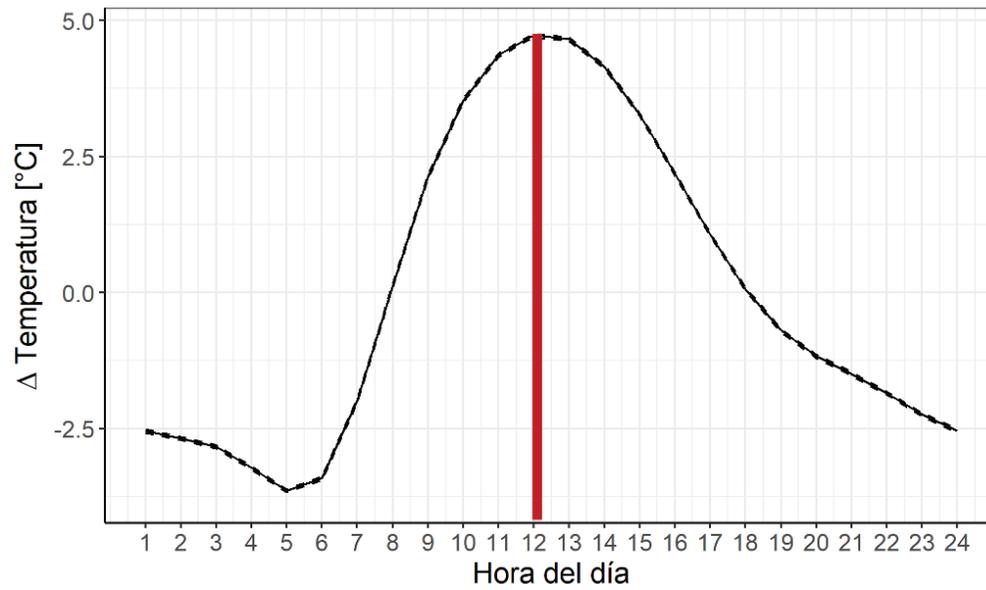


Figura 58. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024

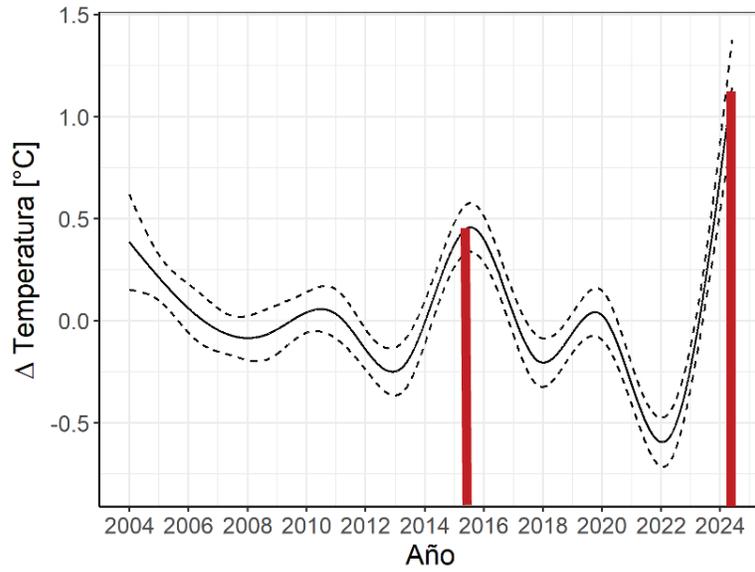


Figura 59. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024

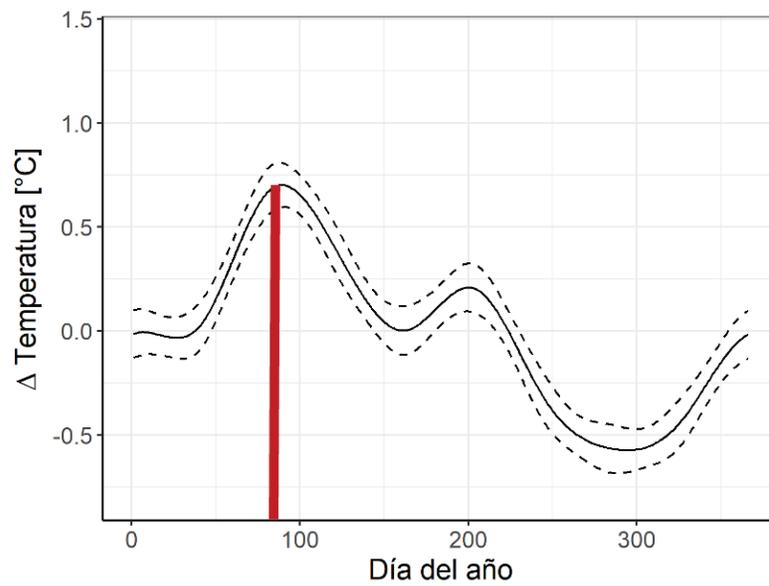


Figura 60. Estación 84197 – Santa Bárbara, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

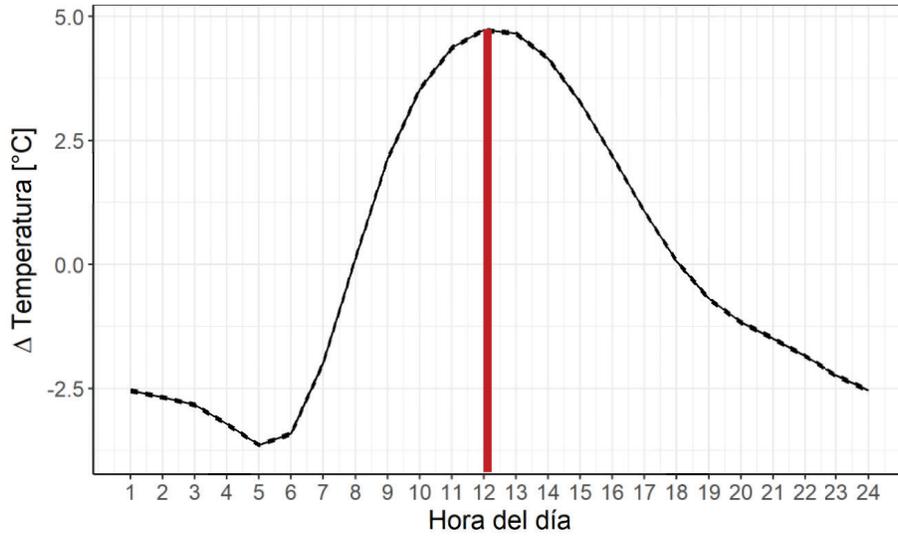


Figura 61. Estación 84199 – Belén, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2004 al 2024

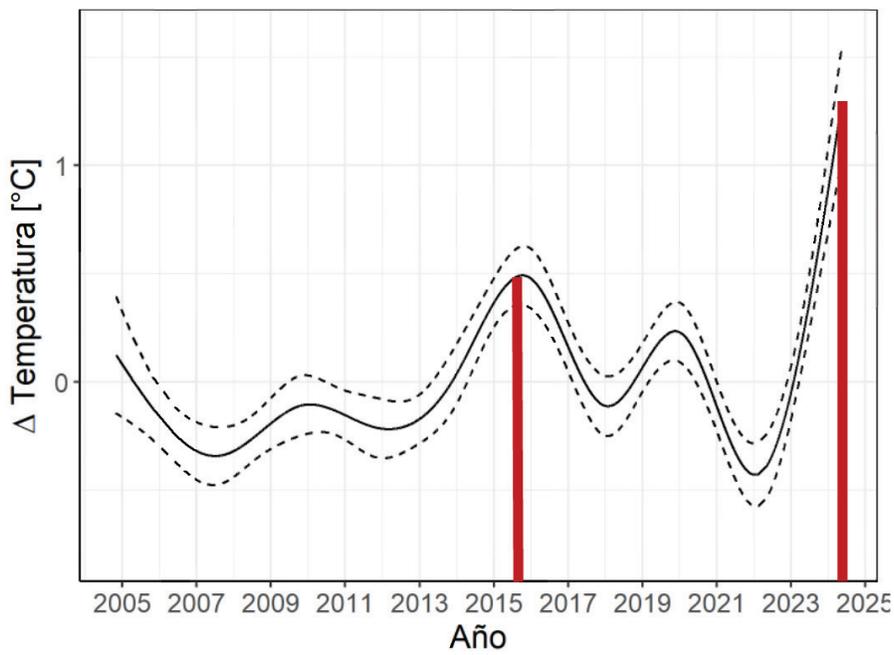


Figura 62. Estación 84199 – Belén, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2004 al 2024

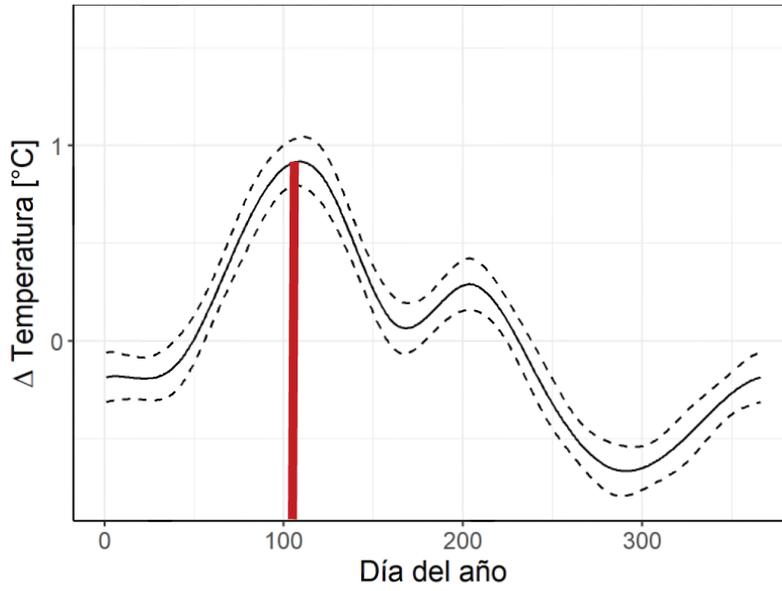


Figura 63. Estación 84199 – Belén, Heredia.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2004 al 2024

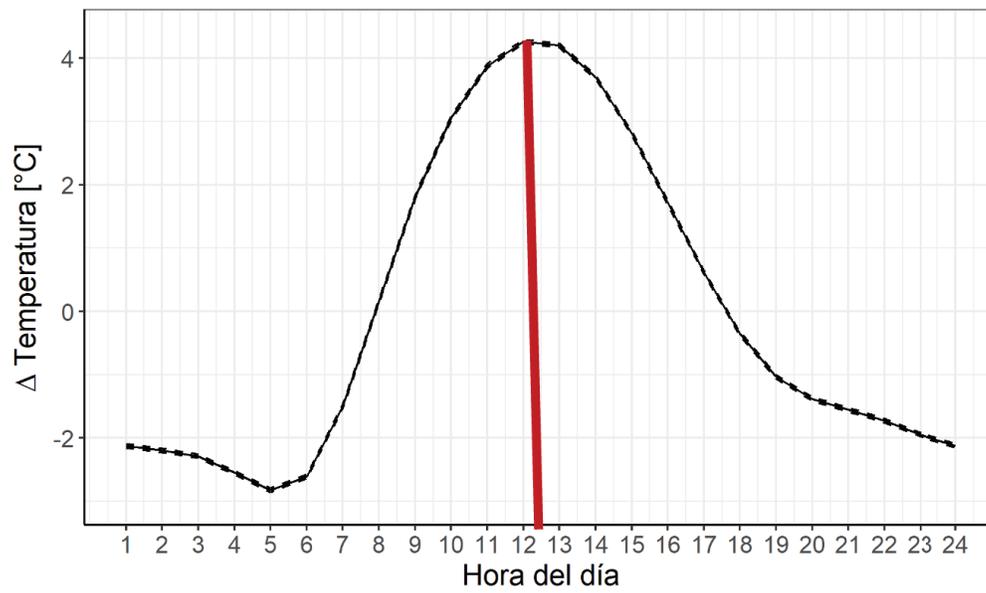


Figura 64. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2016 al 2024

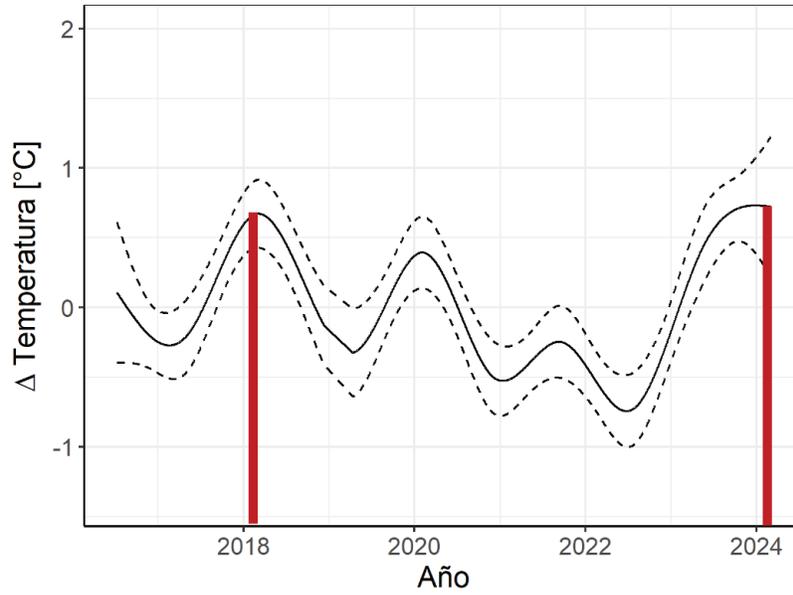


Figura 65. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2015 al 2024

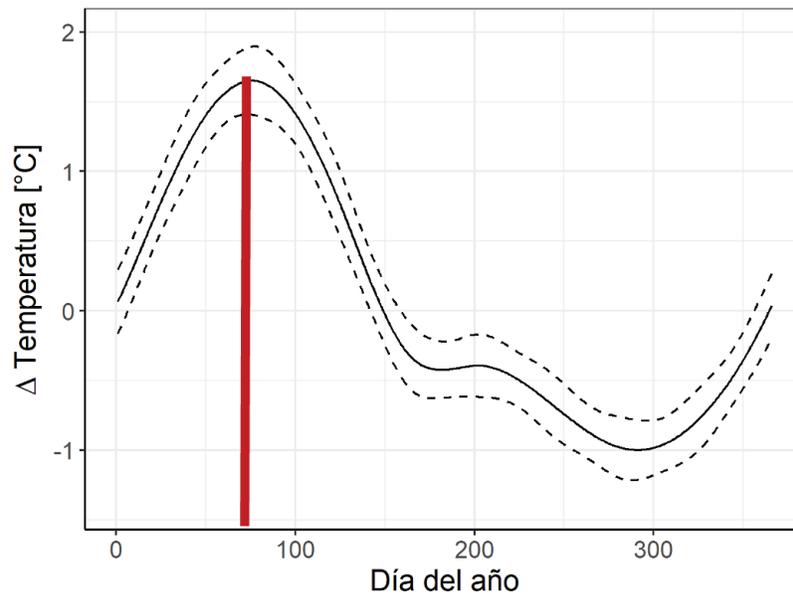


Figura 66. Estación 78033 – Pitahaya, Puntarenas.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2016 al 2024

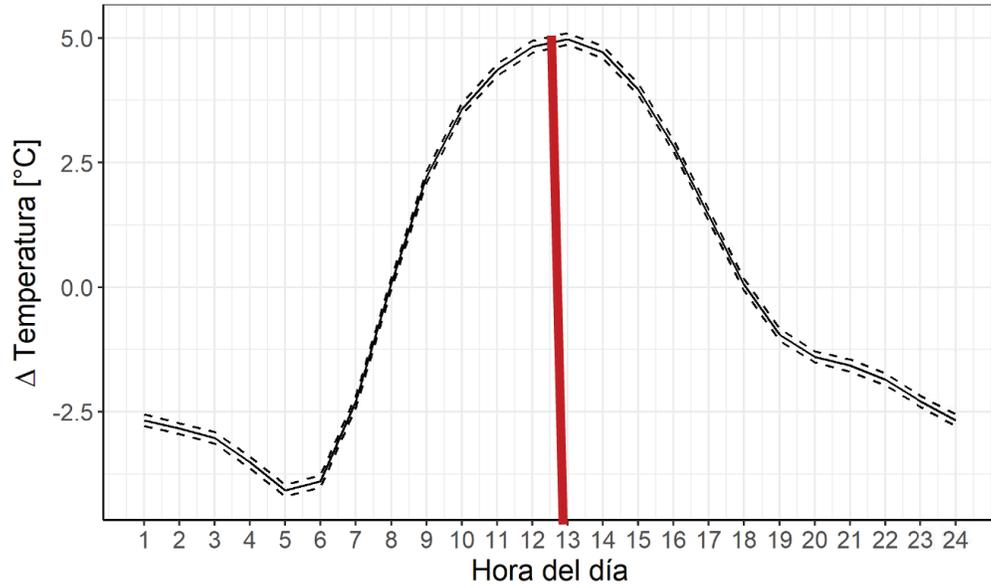


Figura 67. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2016 al 2024

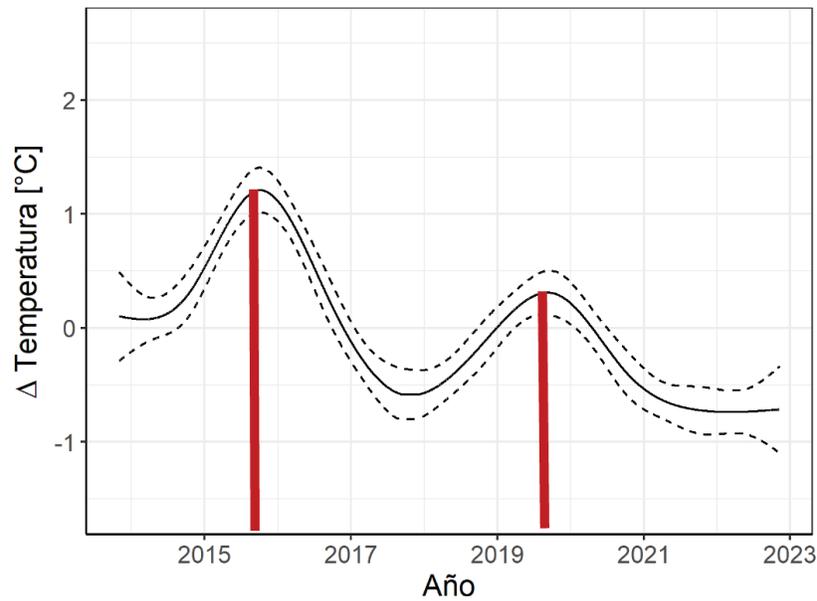


Figura 68. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2015 al 2024

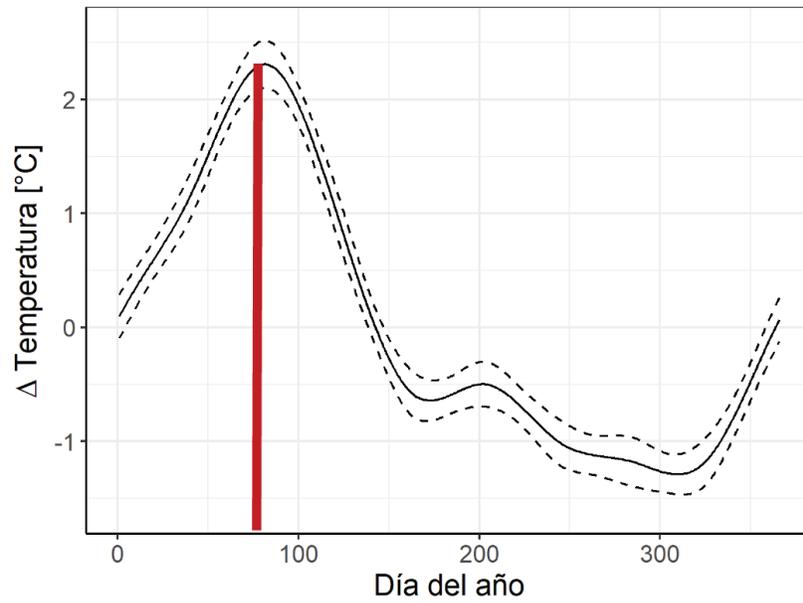


Figura 69. Estación 82013 – La Trinidad Vieja, ABOPAC.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2013 al 2024



Figura 70. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2014 al 2024

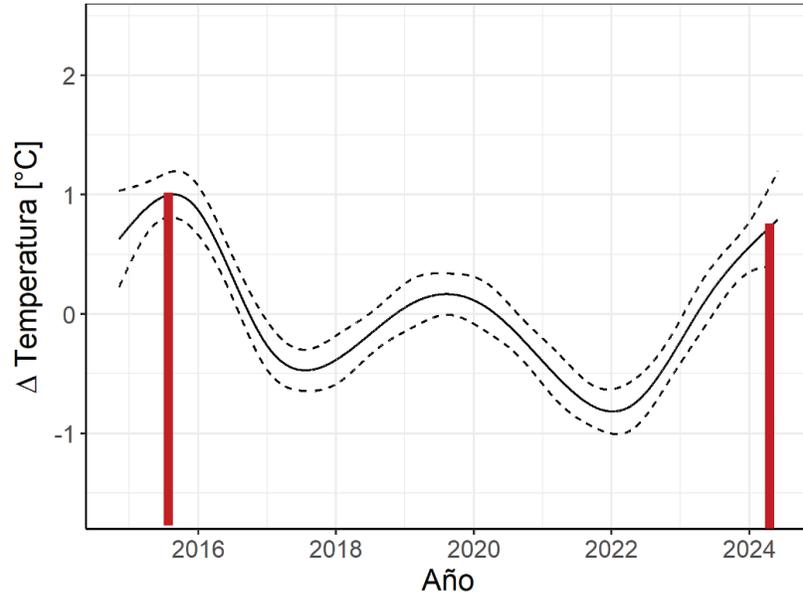


Figura 71. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2014 al 2024

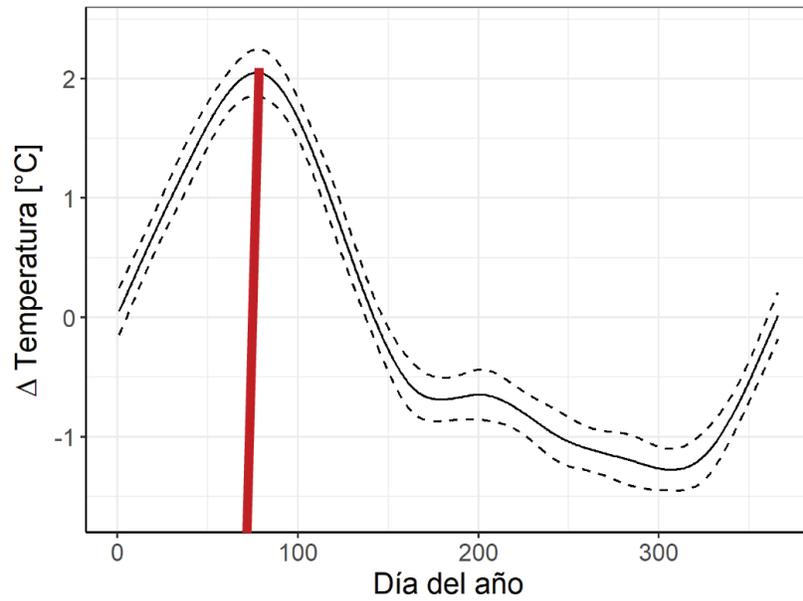


Figura 72. Estación 82015 – Oroceiba, Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2014 al 2024

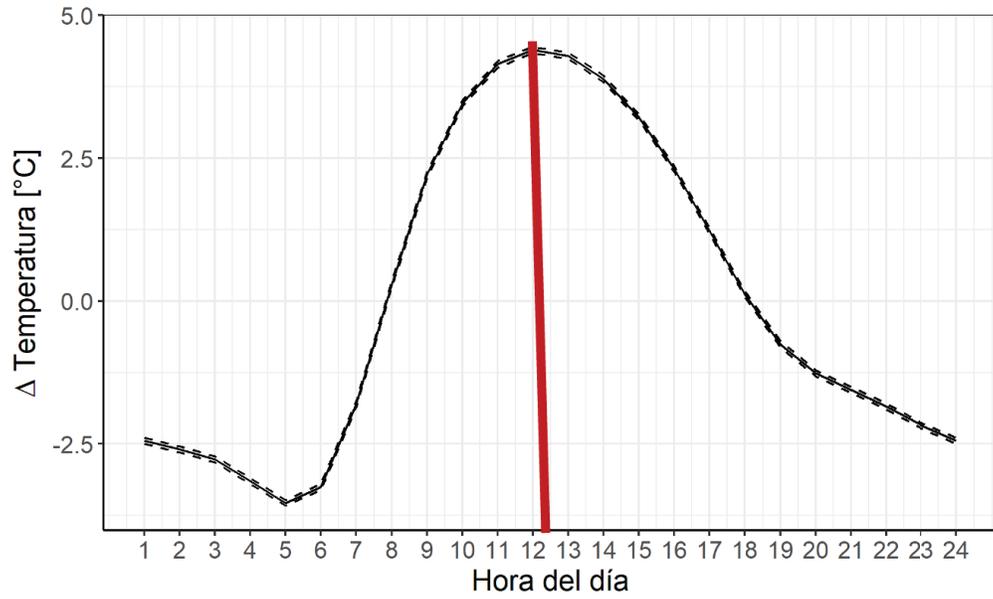


Figura 73. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura por año, durante el período 2017 al 2024

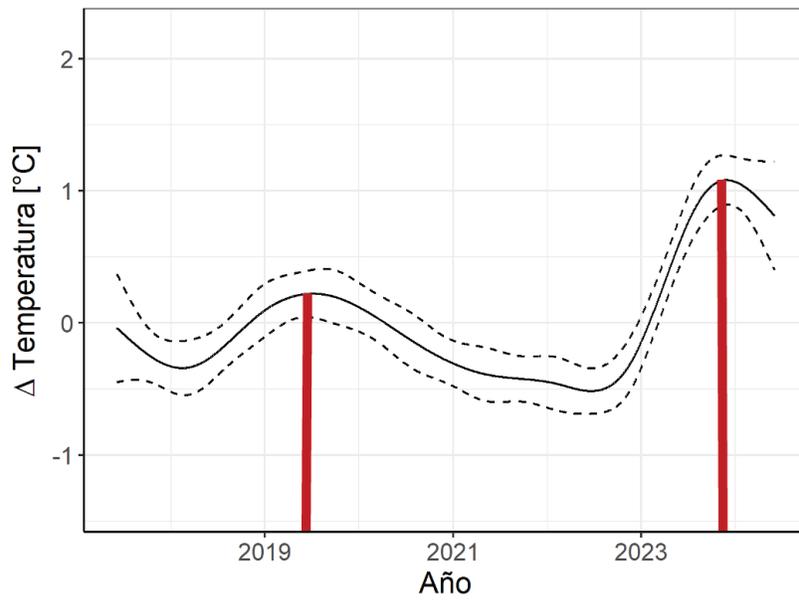


Figura 74. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según día del año, durante el período 2017 al 2024

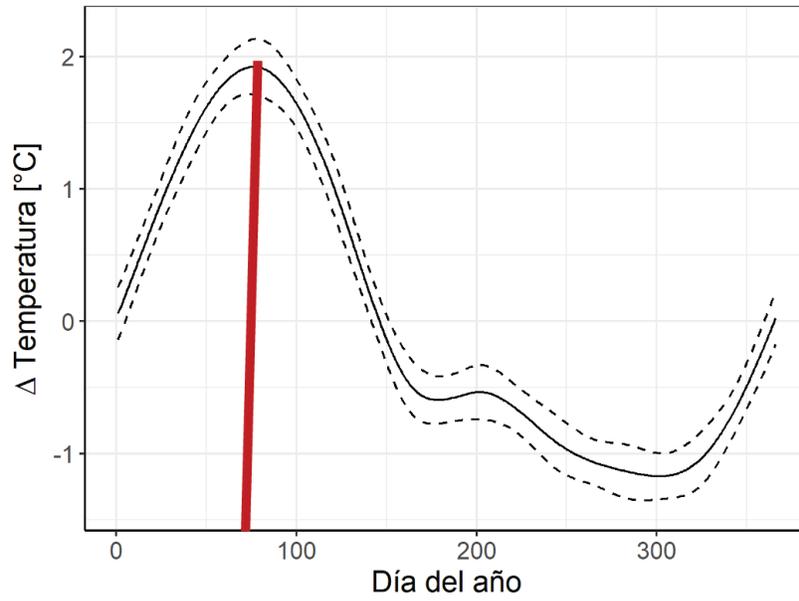
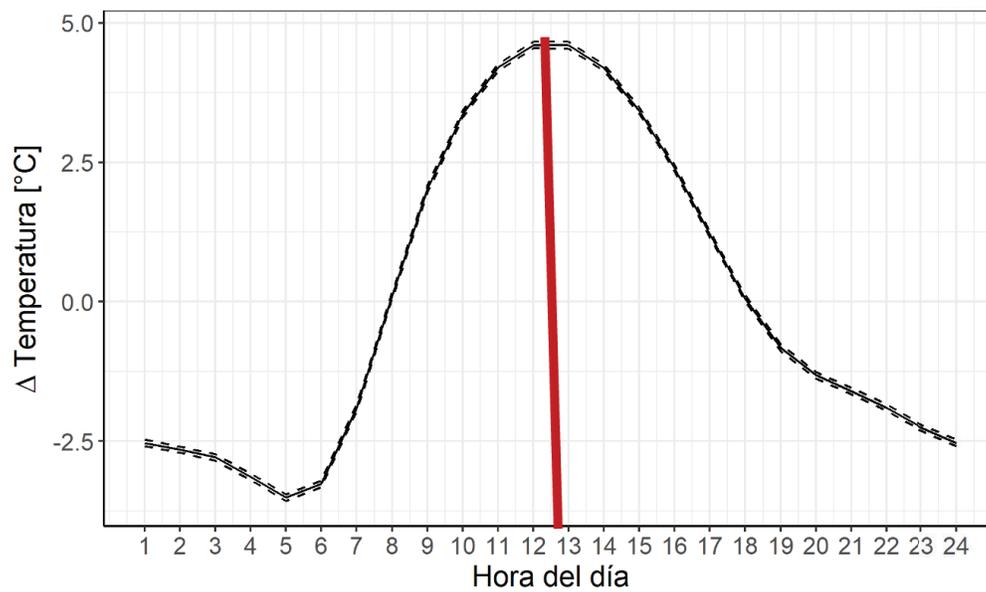
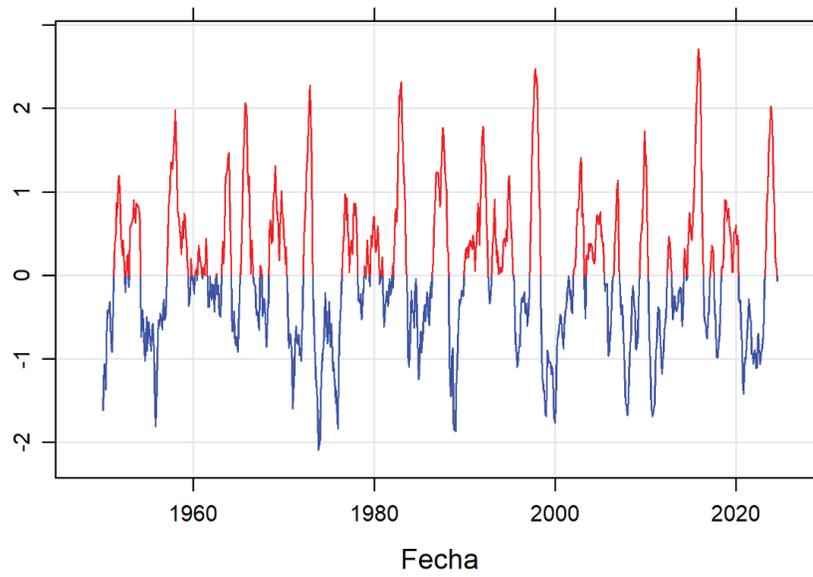


Figura 75. Estación 82019 – Guayabal, Mastate Orotina.
Comportamiento de la anomalía de la temperatura según hora del día, durante el período 2017 al 2024



12.3 ENOS

Figura 76. El Niño - Índice del Niño Oceánico (ONI)



Nota: Elaborado a partir de los datos de la NOAA.

12.4 Propiedades de radiancia de materiales naturales

Tabla 23. Propiedades radiativas de materiales naturales

Superficie	Rasgos principales	Albedo [α]	Emisividad [ϵ]
Suelo	Oscuro, húmedo	0.05 -	0.90 -
	Iluminado, seco	0.4	0.98
Desierto		0.20 - 0.45	0.84 - 0.91
Pasto	Alto (1.0 m)	0.16 -	0.90 -
	Corto (0.02m)	0.26	0.95
Cultivos agrícolas, tundra		0.18 - 0.25	0.90 - 0.99
Huertos		0.15 - 0.20	
Bosques			
	Deciduos	Descubierto	0.15 - 0.97
		Cubierto de hojas	0.2 - 0.98
	Coníferas		0.05 - 0.15 - 0.97 - 0.99
Agua		ángulo de zenit pequeño	0.03 - 0.10 - 0.925 - 0.97
		ángulo de zenit largo	0.10 - 1.00 - 0.92 - 0.97
Nieve		Vieja	0.40 - 0.82 -
		Fresca	0.95 - 0.99
Hielo		Mar	0.30 - 0.45 - 0.92 - 0.97
		Glaciar	0.20 - 0.40