
La ciudad andina
que se calienta
Cuatro décadas de transformación térmica en Ayacucho
José Hugo De la Cruz Flores

La ciudad andina que se calienta

Cuatro décadas de transformación térmica en Ayacucho

Editor

IDEOs
Centro de Investigación
y Producción Científica

La ciudad andina que se calienta

Cuatro décadas de transformación térmica en Ayacucho

José Hugo De la Cruz Flores

Editado por

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y PRODUCCIÓN CIENTÍFICA IDEOS E.I.R.L

Dirección: Calle Teruel N° 292, Urb. Las Américas - Miraflores-Perú

RUC: 20606452153

Primera edición digital, Marzo de 2026

Libro electrónico disponible en www.tecnohumanismo.online

ISBN: 978-612-5241-16-0

Depósito Legal N°: 202603108

ISBN 978-612-5241-16-0

9 786125 241160

CC BY

José Hugo De la Cruz Flores

jose.delacruz@unsch.edu.pe

Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú

RESEÑA

Esta obra analiza de manera integral la dinámica espacio-temporal de la Isla de Calor Urbana en una ciudad interandina, abordando la relación entre morfología urbana y temperatura superficial a lo largo de tres décadas de transformación territorial. A través de un enfoque teórico sólido y una aplicación metodológica rigurosa, el libro demuestra que el fenómeno térmico urbano no es exclusivo de grandes metrópolis, sino que también se manifiesta en ciudades andinas de tamaño intermedio sometidas a procesos de expansión y densificación.

El texto inicia con una profunda revisión conceptual del clima urbano, examinando la evolución histórica del estudio de la Isla de Calor Urbana, el balance energético, la influencia de la vegetación, la densidad poblacional y las fuentes antropogénicas de calor. Posteriormente, desarrolla la relación entre forma urbana y comportamiento térmico, incorporando categorías como compacidad, rugosidad, impermeabilización del suelo y factor de visión del cielo, integrando teoría urbana con fundamentos de teledetección.

El núcleo del libro se concentra en el análisis empírico del caso de Ayacucho para los años 1986, 1996, 2006 y 2016. Mediante el uso de imágenes satelitales Landsat, modelamiento de temperatura superficial, desmezcla espectral para estimación de superficie impermeable y análisis de componentes principales, se construye un índice sintético de Isla de Calor Urbana que permite identificar focos térmicos, evaluar su intensidad y analizar su evolución temporal.

Los resultados evidencian una consolidación progresiva del fenómeno asociada al crecimiento urbano radiocéntrico, la expansión periférica y la reducción de cobertura vegetal. Se confirma que la transformación morfológica modifica el balance energético local, generando gradientes térmicos claramente diferenciados entre el centro urbano y su entorno periurbano.

Más allá del caso específico, la obra aporta una metodología replicable para el estudio del clima urbano en ciudades andinas y propone una reflexión sobre la necesidad de incorporar criterios climáticos en la planificación territorial. En un contexto de cambio

climático global y urbanización acelerada, el libro ofrece herramientas conceptuales y técnicas para avanzar hacia modelos de desarrollo urbano más sostenibles y resilientes.

ÍNDICE

RESEÑA 1
INTRODUCCION 7
CAPÍTULO I. LA ISLA DE CALOR URBANA COMO FENÓMENO CLIMÁTICO 10
1.1 Referentes teóricos 11
1.1.1. Evolución histórica del clima urbano 13
1.1.2. Desarrollo del concepto ICU 16
1.1.3. ICU superficial vs atmosférica 18
1.1.4. Balance energético urbano 20
1.1.5. Influencia de vegetación 22
1.1.6. Densidad poblacional 24
1.1.7. Antropogénesis térmica 26
1.1.8. ICU y cambio climático 28
1.1.9. Tendencias recientes 30
1.2 Nociones básicas de la Isla de Calor Urbana 32
1.2.1. Definición conceptual profunda 34
1.2.2. Dimensiones: 35
1.2.3. Intensidad térmica 44
1.2.4. Dinámica diurna/nocturna 46
1.2.5. Indicadores de medición 48
1.2.6. Métodos tradicionales vs remotos 50
CAPÍTULO II. MORFOLOGÍA URBANA Y TEMPERATURA DE SUPERFICIE .. 53
2.1 Referentes teóricos 54
2.1.1. Teoría de morfología urbana 55
2.1.2. Urban sprawl 57
2.1.3. Cañón urbano 59
2.1.4. Impermeabilización 61
2.1.5. Superficie impermeable (ISA) 63
2.1.6. Indicadores espectrales urbanos 65
2.1.7. Relación forma urbana – energía 67
2.2 Nociones básicas de la Morfología Urbana y TS 68
2.2.1. Definición de morfología urbana 69

2.2.2. Dimensiones: 71
2.2.3. Temperatura superficial (TS) 78
2.2.4. Diferencia TS vs temperatura del aire 79
2.2.5. Índices urbanos (NDBI, EBBI, UI) 81
2.2.6. Desmezcla espectral 83
2.2.7. Relación estadística TS–morfología 84
CAPÍTULO III. CASO DE ESTUDIO: DINÁMICA DEL ICU EN AYACUCHO (1986–2016) 88
3.1. Contexto territorial 89
3.1.1. Localización geográfica 90
3.1.2. Configuración distrital y expansión urbana 92
3.1.3. Condiciones climáticas y físicas 95
3.2. Diseño metodológico 97
3.2.1. Toma de datos in situ 98
3.2.2. Correcciones de imágenes satelitales 100
3.2.3. Desmezcla espectral e Índice de Superficie Impermeable (ISA) 104
3.3. Resultados y análisis 110
3.3.1. Análisis de variables y su incidencia en el fenómeno de ICU 111
3.3.2. Estimación del índice de islas de calor urbana 116
3.3.3. Caracterización espacial y temporal del fenómeno de ICU 139
3.3.4. Patrones temporal y espacial de la temperatura superficial 159
3.3.5. Gradiente térmico y su relación con la expansión urbana 170
REFLEXIONES FINALES 184
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 186

INTRODUCCION

En las últimas décadas, el crecimiento de las ciudades ha seguido un patrón común caracterizado por la concentración acelerada de población en espacios urbanos que, en muchos casos, se expanden con escasa planificación y limitada previsión ambiental. Este proceso, impulsado por dinámicas económicas, migratorias y sociales, ha transformado profundamente el paisaje natural, sustituyendo suelos permeables y coberturas vegetales por superficies construidas, vías asfaltadas y estructuras de alta densidad. Aunque este fenómeno ha permitido el desarrollo de infraestructura y servicios, también ha generado alteraciones significativas en el equilibrio climático local, modificando las condiciones térmicas que históricamente definían a los territorios.

Uno de los efectos más evidentes de esta transformación es la modificación del balance energético urbano. Las superficies artificiales tienden a absorber mayor cantidad de radiación solar durante el día y a liberarla gradualmente durante la noche, produciendo acumulación de calor en el tejido urbano. La reducción de áreas verdes, la impermeabilización del suelo y el incremento de fuentes de calor asociadas al transporte y a las actividades humanas intensifican este proceso, generando diferencias térmicas entre el interior de la ciudad y su entorno rural inmediato. Este contraste térmico, conocido como isla de calor urbana, no constituye únicamente una anomalía ambiental, sino una manifestación tangible de la interacción entre la morfología urbana y los procesos climáticos locales.

El fenómeno adquiere especial relevancia en el contexto actual de cambio climático, donde el aumento general de temperaturas globales se combina con factores locales que potencian el calentamiento en áreas densamente urbanizadas. Las ciudades no solo son escenarios de vulnerabilidad frente a eventos extremos, sino también espacios donde las decisiones de planificación inciden directamente en la calidad ambiental y en la salud de la población. El incremento sostenido de temperaturas en zonas urbanas puede traducirse en mayor demanda energética para climatización, deterioro de la calidad del aire y mayor incidencia de enfermedades asociadas a estrés térmico, especialmente en grupos poblacionales vulnerables.

En las ciudades emplazadas en regiones andinas, estas dinámicas presentan características particulares. La altitud, la topografía accidentada y la atmósfera relativamente seca condicionan la forma en que la energía solar es absorbida y redistribuida en el territorio. La expansión urbana sobre laderas, quebradas y suelos con vocación agrícola modifica no solo el paisaje físico, sino también los microclimas locales. En este tipo de entornos, donde históricamente las variaciones térmicas estaban asociadas a factores naturales, la consolidación de superficies impermeables y el crecimiento radiocéntrico de la trama urbana introducen nuevos patrones de comportamiento térmico que merecen ser estudiados con detenimiento.

La ciudad de Ayacucho constituye un caso representativo de estas transformaciones. En las últimas décadas, su expansión ha estado marcada por el crecimiento de distritos periféricos y por el aumento de densidad en áreas consolidadas, generando una configuración urbana cada vez más compacta y heterogénea. La sustitución progresiva de cobertura vegetal por edificaciones, junto con la ampliación del parque automotor y la ocupación de zonas de expansión, plantea interrogantes sobre el impacto de estas modificaciones en la temperatura superficial y en la dinámica climática local. Comprender si estas transformaciones han dado lugar a la consolidación de islas de calor urbanas no solo es un ejercicio académico, sino una necesidad para orientar políticas de planificación y gestión territorial.

El análisis del clima urbano en contextos como el de Ayacucho enfrenta además limitaciones metodológicas. Las estaciones meteorológicas convencionales ofrecen información puntual que, si bien es valiosa, resulta insuficiente para captar la variabilidad espacial de los procesos térmicos dentro de la ciudad. En territorios donde la heterogeneidad morfológica es significativa, la integración de herramientas de teledetección, análisis geoestadístico y técnicas multivariadas permite aproximarse con mayor precisión a la distribución espacial de la temperatura y a su relación con las características físicas y urbanas del entorno.

En este escenario, el presente libro aborda el estudio de la isla de calor urbana desde una perspectiva integral que articula fundamentos teóricos y aplicación empírica. Se exploran las bases conceptuales del fenómeno, su relación con la morfología urbana y los indicadores biofísicos que permiten su medición, para posteriormente analizar su

manifestación concreta en la ciudad de Ayacucho a lo largo de un periodo de tres décadas. A través de un enfoque que combina datos satelitales, procesamiento digital de imágenes y análisis estadístico multivariado, se busca identificar patrones, tendencias y relaciones que expliquen la configuración térmica actual del territorio.

El propósito de esta obra es contribuir a la comprensión del comportamiento térmico urbano en ciudades interandinas y ofrecer un marco analítico que permita vincular la forma urbana con sus efectos climáticos. Más allá de evidenciar la existencia de islas de calor, el texto pretende aportar herramientas conceptuales y metodológicas que faciliten la planificación de hábitats más sostenibles, donde el crecimiento urbano pueda armonizarse con las condiciones ambientales y con el bienestar de la población.

CAPÍTULO I

LA ISLA DE CALOR URBANA COMO FENÓMENO CLIMÁTICO

El clima de una ciudad no es una simple prolongación del clima regional en el que se encuentra emplazada. A medida que el territorio se urbaniza, la estructura física del espacio modifica los intercambios de energía, humedad y movimiento del aire, generando condiciones atmosféricas propias. En ese proceso, la ciudad deja de ser un receptor pasivo de las dinámicas climáticas y se convierte en un agente que transforma activamente su entorno térmico. La isla de calor urbana constituye una de las expresiones más evidentes de esta transformación.

Este fenómeno se manifiesta cuando las áreas urbanizadas presentan temperaturas superiores a las de sus alrededores rurales o periurbanos. La diferencia térmica no responde únicamente a variaciones naturales del relieve o a cambios meteorológicos estacionales, sino a la modificación sistemática de la superficie terrestre provocada por la urbanización. La sustitución de suelos permeables por concreto y asfalto, la disminución de cobertura vegetal y la concentración de actividades humanas alteran el balance energético, favoreciendo la acumulación de calor en el entramado urbano.

Desde una perspectiva física, la isla de calor urbana está vinculada a la forma en que los materiales constructivos interactúan con la radiación solar. Las superficies artificiales suelen poseer menor reflectividad y mayor capacidad de almacenamiento térmico que los suelos naturales, lo que implica una mayor absorción de energía durante el día y una liberación progresiva durante la noche. Este comportamiento retrasa el enfriamiento nocturno y genera un microclima caracterizado por temperaturas persistentemente más elevadas en comparación con el entorno no urbanizado.

Sin embargo, el fenómeno no puede explicarse únicamente por las propiedades térmicas de los materiales. La geometría urbana —altura de edificaciones, estrechez de calles, disposición de volúmenes construidos— influye en la circulación del aire y en la capacidad de disipación del calor. La reducción del factor de visión del cielo, la formación

de cañones urbanos y la disminución de áreas verdes limitan los procesos naturales de ventilación y evapotranspiración, intensificando el calentamiento local. A ello se suma la emisión de calor proveniente de vehículos, industrias y sistemas de climatización, que refuerza el incremento térmico en sectores densamente ocupados.

La isla de calor urbana adquiere particular relevancia en el contexto actual, donde el aumento global de temperaturas interactúa con procesos locales de urbanización acelerada. En muchas ciudades, el crecimiento no planificado ha privilegiado la expansión horizontal y la impermeabilización extensiva del suelo, generando condiciones propicias para la intensificación térmica. Esta situación tiene implicancias directas en la calidad ambiental, el consumo energético y la salud de la población, especialmente durante periodos de altas temperaturas o eventos extremos.

Comprender la isla de calor urbana implica reconocerla como un fenómeno multidimensional que articula factores físicos, ambientales y sociales. No se trata únicamente de medir diferencias de temperatura, sino de analizar cómo la configuración urbana, la ocupación del suelo y las dinámicas humanas inciden en la estructura climática local. En este sentido, el estudio del fenómeno permite establecer vínculos entre forma urbana y sostenibilidad, evidenciando la necesidad de incorporar criterios climáticos en la planificación y gestión territorial.

El presente capítulo desarrolla los fundamentos conceptuales de la isla de calor urbana, abordando su evolución como objeto de estudio y sus principales dimensiones explicativas. A través de este marco teórico, se busca comprender las condiciones que favorecen su formación y las variables que intervienen en su intensidad y distribución espacial. Esta base permitirá posteriormente analizar de manera crítica su manifestación en contextos urbanos específicos, integrando teoría y evidencia empírica en la comprensión del clima urbano contemporáneo.

1.1 Referentes teóricos

El estudio de la isla de calor urbana se inscribe dentro de un campo más amplio: la climatología urbana. Esta disciplina surge a partir de la necesidad de comprender cómo las transformaciones espaciales asociadas al crecimiento de las ciudades modifican los patrones atmosféricos locales. A lo largo del tiempo, la observación empírica de

diferencias térmicas entre espacios urbanizados y áreas rurales dio paso a investigaciones sistemáticas que permitieron identificar regularidades, causas y consecuencias del fenómeno. De este modo, la isla de calor urbana dejó de ser una simple percepción asociada al confort térmico para convertirse en un objeto de análisis científico con implicancias ambientales y territoriales.

Los primeros aportes teóricos se centraron en describir las diferencias de temperatura entre la ciudad y el campo circundante, estableciendo que la intensidad térmica variaba según la hora del día, la estación del año y las condiciones atmosféricas predominantes. Posteriormente, el enfoque evolucionó hacia la comprensión de los mecanismos físicos responsables de estas diferencias. El balance energético urbano pasó a ocupar un lugar central en la explicación del fenómeno, destacando el papel de la radiación solar, la capacidad de almacenamiento térmico de los materiales constructivos y la reducción de procesos naturales como la evapotranspiración.

Con el avance de las investigaciones, se consolidó la distinción entre isla de calor superficial e isla de calor atmosférica. La primera se refiere a la temperatura de la superficie terrestre captada mediante sensores remotos, mientras que la segunda describe el calentamiento del aire en el entorno urbano medido por estaciones meteorológicas. Esta diferenciación permitió profundizar en el análisis de escalas espaciales y temporales, reconociendo que el comportamiento térmico urbano no es homogéneo y que responde a múltiples factores interrelacionados.

Los referentes teóricos también incorporaron la influencia de la morfología urbana en la configuración térmica. Conceptos como el cañón urbano, el factor de visión del cielo y la rugosidad superficial fueron integrados para explicar cómo la forma y disposición de las edificaciones afectan la ventilación y la disipación del calor. De igual manera, el albedo, entendido como la capacidad reflectante de las superficies, se convirtió en un parámetro clave para evaluar la absorción de radiación en entornos urbanizados. La interacción entre estos elementos estructurales y las condiciones meteorológicas regionales permite comprender por qué la intensidad de la isla de calor varía entre ciudades y dentro de una misma ciudad.

En las últimas décadas, el desarrollo tecnológico amplió las posibilidades de estudio del fenómeno. La incorporación de imágenes satelitales, sistemas de información geográfica y modelos estadísticos multivariados ha permitido analizar la distribución espacial del calor con mayor precisión. Estas herramientas han facilitado la identificación de patrones térmicos asociados a tipos de uso del suelo, densidades constructivas y variaciones en la cobertura vegetal, fortaleciendo el vínculo entre teoría climática y análisis territorial.

Los referentes contemporáneos abordan la isla de calor urbana desde una perspectiva integradora que considera no solo los procesos físicos, sino también sus implicancias socioambientales. El fenómeno es interpretado como un indicador de transformación urbana y, al mismo tiempo, como un factor que incide en la sostenibilidad de las ciudades. En este marco, la investigación teórica ha evolucionado hacia enfoques interdisciplinarios que articulan climatología, urbanismo, ecología y planificación territorial.

Así, los referentes teóricos que sustentan el estudio de la isla de calor urbana permiten comprender su naturaleza compleja y dinámica. Lejos de tratarse de un fenómeno aislado, constituye el resultado de múltiples interacciones entre superficie, atmósfera y estructura urbana. Esta base conceptual resulta esencial para analizar su comportamiento en contextos específicos y para interpretar adecuadamente los resultados derivados de metodologías aplicadas al estudio del clima urbano.

1.1.1. Evolución histórica del clima urbano

La preocupación por las condiciones ambientales de las ciudades no es un fenómeno reciente. Desde la antigüedad clásica ya se reconocía que los asentamientos humanos podían alterar la calidad del aire y las sensaciones térmicas de sus habitantes. En el siglo V a. C., Hipócrates advertía en sus reflexiones sobre el entorno y la salud que el aire de las ciudades presentaba características distintas al de los espacios abiertos, estableciendo una relación temprana entre ambiente urbano y bienestar humano. Siglos más tarde, en el contexto romano, se describían las molestias asociadas a la acumulación de humo y aire viciado en espacios densamente habitados, evidenciando que la experiencia térmica y atmosférica urbana era percibida como diferente respecto del entorno natural.

Durante la Edad Media, el crecimiento de ciudades amuralladas y el hacinamiento poblacional intensificaron los problemas asociados a ventilación deficiente y contaminación. Aunque el conocimiento científico aún era incipiente, se consolidó la idea de que la estructura urbana influía en las condiciones ambientales. En el siglo XVII, con el inicio de transformaciones productivas y el incremento del uso de combustibles, surgieron los primeros intentos sistemáticos por describir la contaminación atmosférica urbana, marcando un punto de inflexión en la relación entre ciudad y clima.

Sin embargo, es recién en el siglo XIX cuando el estudio del clima urbano adquiere un enfoque más científico. Con el desarrollo de instrumentos meteorológicos y la recopilación sistemática de datos, se empezaron a comparar temperaturas registradas en ciudades con aquellas medidas en áreas rurales circundantes. Estas comparaciones permitieron constatar diferencias térmicas persistentes, especialmente durante la noche, sentando las bases empíricas de lo que posteriormente sería conceptualizado como isla de calor urbana. La incorporación de observatorios meteorológicos facilitó la comprensión de la variabilidad espacial y temporal del fenómeno, aunque las mediciones seguían siendo puntuales y limitadas en cobertura.

En el siglo XX, el estudio del clima urbano experimentó un avance significativo. La climatología comenzó a integrar enfoques físicos que explicaban las diferencias térmicas a partir del balance energético. Se reconoció que los materiales constructivos poseían propiedades térmicas distintas a las del suelo natural y que la reducción de cobertura vegetal disminuía la evapotranspiración, favoreciendo la acumulación de calor (Oke, 1978; Landsberg, 1981). Estas investigaciones permitieron establecer que la ciudad modifica el flujo de radiación, la circulación del aire y la distribución de humedad, generando microclimas propios.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, la isla de calor urbana se consolidó como uno de los ejes centrales de la climatología urbana. Se diferenciaron dos manifestaciones principales: la isla de calor superficial y la atmosférica, entendidas como componentes interrelacionados de un mismo proceso (Oke, 1986). Esta distinción permitió ampliar el análisis hacia escalas espaciales más detalladas y hacia la comprensión de las variaciones diurnas y nocturnas del fenómeno. Investigaciones

posteriores destacaron la importancia del albedo, el factor de visión del cielo y la densidad edificatoria en la intensificación térmica (Giridharan et al., 2004).

Con el desarrollo de la teledetección a partir de la década de 1970, el estudio del clima urbano incorporó imágenes satelitales como herramienta fundamental. El lanzamiento de los primeros satélites de la serie Landsat permitió analizar la temperatura superficial a escala regional y realizar estudios multitemporales. La posibilidad de convertir valores digitales en radiancia y reflectancia facilitó la comparación entre distintas fechas, superando las limitaciones de las estaciones meteorológicas convencionales (Chander y Markham, 2003; Chander et al., 2009). Esta innovación metodológica transformó el estudio del fenómeno, al permitir una representación espacial continua del comportamiento térmico urbano.

En las últimas décadas, el análisis del clima urbano se ha enriquecido con enfoques multivariados y técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes. El uso del Análisis de Componentes Principales ha permitido explorar correlaciones entre variables físicas, ambientales y urbanas, identificando patrones sintéticos que explican la formación del fenómeno. Asimismo, técnicas como la desmezcla espectral y la estimación de superficies impermeables han fortalecido la relación entre morfología urbana y comportamiento térmico (Wu y Murray, 2003; Bonafoni et al., 2016).

En América Latina, el interés por la isla de calor urbana se ha incrementado progresivamente, aunque con desigual desarrollo entre países. En ciudades andinas, donde la altitud y la topografía introducen condiciones atmosféricas particulares, el estudio del fenómeno aún se encuentra en consolidación. Esta evolución histórica evidencia que el clima urbano ha pasado de ser una observación empírica a constituirse en un campo interdisciplinario que integra climatología, urbanismo y tecnologías geoespaciales.

En síntesis, la evolución histórica del estudio del clima urbano muestra un tránsito desde percepciones cualitativas hacia análisis cuantitativos y espacialmente detallados. La isla de calor urbana, lejos de ser una simple anomalía térmica, representa el resultado acumulativo de transformaciones territoriales que redefinen la interacción entre ciudad y atmósfera. Esta trayectoria conceptual y metodológica proporciona el sustento necesario

para abordar el fenómeno en contextos específicos, articulando antecedentes históricos con herramientas contemporáneas de análisis climático urbano.

1.1.2. Desarrollo del concepto ICU

El concepto de Isla de Calor Urbana (ICU) se ha consolidado progresivamente como una categoría central dentro de la climatología urbana. Si bien las diferencias térmicas entre ciudad y campo habían sido observadas desde el siglo XIX, fue durante el siglo XX cuando estas variaciones comenzaron a interpretarse como un fenómeno sistemático asociado a la estructura urbana. El reconocimiento de que la ciudad genera un microclima propio permitió superar explicaciones aisladas y avanzar hacia una conceptualización integral del calentamiento urbano.

En sus primeras formulaciones, la ICU fue definida como la diferencia positiva de temperatura del aire registrada en áreas urbanas respecto de zonas rurales circundantes, especialmente durante la noche. Este enfoque inicial estuvo vinculado a mediciones meteorológicas convencionales y al análisis comparativo de estaciones ubicadas dentro y fuera del tejido urbano. Sin embargo, a medida que se profundizó en el estudio del balance energético, se comprendió que la temperatura del aire representaba solo una parte del fenómeno y que la superficie urbana desempeñaba un papel determinante en la acumulación y liberación de calor.

La incorporación del enfoque energético permitió explicar la ICU como resultado de múltiples procesos físicos: mayor absorción de radiación solar debido al bajo albedo de materiales urbanos, almacenamiento térmico en edificaciones y pavimentos, reducción de evapotranspiración por pérdida de cobertura vegetal y emisión adicional de calor antropogénico proveniente de actividades humanas (Oke, 1978; Landsberg, 1981). Bajo esta perspectiva, la ciudad es entendida como un sistema que modifica los flujos de energía, alterando la relación entre radiación entrante, calor sensible, calor latente y almacenamiento térmico.

Posteriormente, el concepto se amplió para diferenciar dos manifestaciones principales del fenómeno: la isla de calor atmosférica y la isla de calor superficial. La primera se refiere al calentamiento del aire urbano, mientras que la segunda alude a la elevación de la temperatura de la superficie terrestre detectada mediante sensores

térmicos (Oke, 1986). Esta distinción resultó fundamental para comprender que la ICU puede presentar comportamientos distintos según la escala de observación y el momento del día, siendo generalmente más intensa en superficie durante el día y más marcada en el aire durante la noche.

Con el avance de la teledetección, el desarrollo del concepto ICU incorporó nuevas dimensiones espaciales. La posibilidad de estimar la temperatura superficial mediante imágenes satelitales permitió analizar la distribución térmica con alta resolución espacial y estudiar la heterogeneidad intraurbana. De este modo, el fenómeno dejó de entenderse como una diferencia global entre ciudad y campo para reconocerse como un mosaico de focos térmicos vinculados a la morfología urbana, densidad edificatoria y tipos de uso del suelo (Voogt y Oke, 2003; Rosenzweig et al., 2005).

En paralelo, se incorporaron variables estructurales como el factor de visión del cielo, la geometría de los cañones urbanos y la rugosidad superficial, que influyen en la capacidad de disipación del calor (Giridharan et al., 2004). Asimismo, investigaciones en ciudades asiáticas y europeas evidenciaron la relación entre densidad poblacional y magnitud de la ICU, destacando el papel indirecto del crecimiento urbano en la intensificación térmica (Hung et al., 2006; Kim et al., 2004). Estas aproximaciones ampliaron el concepto hacia una comprensión más compleja e interdisciplinaria.

En las últimas décadas, el desarrollo conceptual de la ICU ha integrado además la dimensión socioambiental. El fenómeno no solo se interpreta como una anomalía térmica, sino como un indicador de transformación territorial y de vulnerabilidad urbana frente al cambio climático. Se ha reconocido que la intensidad de la isla de calor puede amplificar riesgos sanitarios, aumentar el consumo energético y deteriorar la calidad ambiental en contextos urbanos densamente ocupados (Santamouris, 2015). En este sentido, la ICU se convierte en un parámetro clave para la planificación sostenible y la adaptación climática.

De forma más reciente, el concepto ha evolucionado hacia enfoques cuantitativos basados en modelos multivariados que integran indicadores biofísicos, parámetros urbanos y variables meteorológicas. El uso del Análisis de Componentes Principales y técnicas de desmezcla espectral ha permitido sintetizar múltiples variables en índices compuestos que representan de manera más precisa la configuración térmica urbana (Wu

y Murray, 2003; Bonafoni et al., 2016). Esta etapa marca un tránsito desde definiciones descriptivas hacia formulaciones analíticas orientadas a la modelación espacial del fenómeno.

En síntesis, el desarrollo del concepto de Isla de Calor Urbana refleja una evolución desde observaciones empíricas centradas en diferencias térmicas simples, hacia un marco teórico robusto que integra procesos físicos, estructura urbana y dinámica socioambiental. Actualmente, la ICU es entendida como un fenómeno sistémico que resulta de la interacción entre superficie, atmósfera y organización espacial de la ciudad, constituyéndose en un eje fundamental para comprender el clima urbano contemporáneo.

1.1.3. ICU superficial vs atmosférica

El desarrollo conceptual de la Isla de Calor Urbana permitió reconocer que el fenómeno no se manifiesta de manera uniforme ni puede ser descrito a partir de una sola variable térmica. A medida que se profundizó en el estudio del clima urbano, se estableció una distinción fundamental entre dos formas de expresión del calentamiento urbano: la isla de calor superficial y la isla de calor atmosférica. Ambas representan dimensiones complementarias de un mismo proceso, aunque responden a mecanismos y escalas de análisis diferentes (Oke, 1986).

La isla de calor superficial se refiere a la elevación de la temperatura de la superficie terrestre en áreas urbanizadas en comparación con zonas rurales o periurbanas. Esta manifestación se detecta principalmente mediante sensores térmicos instalados en plataformas satelitales, que permiten estimar la temperatura de emisión superficial a partir de la radiancia registrada en el infrarrojo térmico. La ventaja de este enfoque radica en su capacidad para representar la distribución espacial del calor con alta resolución, evidenciando focos térmicos asociados a tipos específicos de cobertura del suelo, materiales constructivos y densidad edificatoria (Voogt y Oke, 2003).

La intensidad de la isla de calor superficial suele ser mayor durante el día, cuando las superficies artificiales absorben grandes cantidades de radiación solar debido a su bajo albedo y elevada capacidad de almacenamiento térmico. Materiales como el asfalto y el concreto pueden alcanzar temperaturas significativamente superiores a las de suelos naturales o áreas vegetadas, generando contrastes térmicos que, en algunos casos, superan

los diez grados centígrados entre sectores urbanos y rurales (EPA, 2008). Durante la noche, aunque la diferencia disminuye, el calor almacenado continúa liberándose progresivamente, prolongando el calentamiento.

Por su parte, la isla de calor atmosférica se refiere al incremento de la temperatura del aire en el entorno urbano respecto de su periferia. Esta dimensión se mide a través de estaciones meteorológicas fijas o móviles, y su análisis requiere una adecuada cobertura espacial para capturar la variabilidad intraurbana. A diferencia de la superficial, la isla de calor atmosférica suele intensificarse durante la noche, cuando la liberación de calor acumulado en superficies urbanas impide el enfriamiento rápido del aire, generando una cúpula térmica sobre la ciudad (Oke, 1978).

El comportamiento diferencial entre ambas formas de ICU responde a la dinámica de transferencia de calor. Mientras la superficie absorbe y almacena energía de manera directa, el aire urbano se calienta por conducción y convección, procesos que dependen de la geometría urbana, la ventilación y la estabilidad atmosférica. Factores como la velocidad del viento, la cobertura nubosa y las condiciones anticiclónicas pueden influir significativamente en la intensidad de la isla de calor atmosférica (Pongracz et al., 2006; Kim et al., 2005).

Además, la morfología urbana desempeña un papel relevante en la interacción entre superficie y atmósfera. La presencia de cañones urbanos reduce el factor de visión del cielo, limitando la pérdida de radiación de onda larga durante la noche y favoreciendo la acumulación térmica. Asimismo, la disminución de vegetación reduce los procesos de enfriamiento por evapotranspiración, lo que impacta tanto en la temperatura superficial como en la del aire circundante (Giridharan et al., 2004). De este modo, ambas dimensiones del fenómeno se encuentran estrechamente interrelacionadas.

La diferenciación entre ICU superficial y atmosférica no implica separación conceptual, sino complementariedad analítica. La superficie actúa como el principal reservorio de energía, mientras que la atmósfera refleja el resultado de los intercambios térmicos generados por esa acumulación. En estudios contemporáneos, la integración de datos satelitales y mediciones meteorológicas permite obtener una visión más completa del fenómeno, articulando escalas espaciales y temporales diversas.

En contextos de investigación aplicada, como el análisis multitemporal del comportamiento térmico urbano, la isla de calor superficial suele constituir la base metodológica por la disponibilidad de imágenes térmicas históricas. No obstante, la validación con datos atmosféricos resulta esencial para comprender la repercusión del calentamiento superficial en el confort térmico y en las condiciones ambientales urbanas. Esta articulación fortalece el enfoque sistémico del fenómeno, permitiendo evaluar tanto su distribución espacial como su impacto climático.

En síntesis, la isla de calor urbana presenta una doble manifestación que responde a procesos físicos diferenciados pero interdependientes. La dimensión superficial revela la configuración térmica del territorio, mientras que la atmosférica evidencia sus efectos en el aire urbano. Comprender esta dualidad es fundamental para interpretar adecuadamente los resultados derivados de estudios climáticos urbanos y para diseñar estrategias de mitigación orientadas a reducir el calentamiento en ciudades contemporáneas.

1.1.4. Balance energético urbano

El análisis del balance energético urbano constituye uno de los pilares fundamentales para comprender la formación y dinámica de la Isla de Calor Urbana. Este enfoque parte del principio de que toda superficie intercambia energía con la atmósfera mediante procesos de radiación, conducción, convección y evaporación. En el contexto urbano, dichos intercambios se ven profundamente alterados por la presencia de materiales constructivos, configuraciones geométricas complejas y actividades humanas que modifican tanto la absorción como la redistribución del calor (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

En términos generales, el balance energético puede expresarse como la relación entre la radiación neta recibida por la superficie y la suma de los flujos de calor sensible, calor latente, almacenamiento térmico y calor antropogénico. En ambientes naturales, una proporción significativa de la energía solar absorbida se destina a la evapotranspiración, proceso que actúa como mecanismo de enfriamiento. Sin embargo, en áreas urbanizadas, la reducción de cobertura vegetal limita este flujo de calor latente, incrementando la proporción de energía transformada en calor sensible y almacenado en materiales constructivos.

Uno de los factores clave en este proceso es el albedo, entendido como la capacidad de una superficie para reflejar la radiación solar incidente. Los materiales urbanos como el asfalto o ciertas cubiertas oscuras presentan valores de albedo bajos, lo que implica una mayor absorción de energía. En contraste, superficies naturales o cubiertas vegetales reflejan una fracción mayor de radiación, contribuyendo a mantener temperaturas más moderadas. Esta diferencia explica en parte por qué las zonas densamente construidas tienden a registrar temperaturas superficiales más elevadas que sus entornos rurales (Voogt y Oke, 2003).

Otro componente relevante es el almacenamiento térmico. Las edificaciones y pavimentos poseen alta capacidad calorífica y conductividad térmica, lo que les permite acumular energía durante el día y liberarla gradualmente durante la noche. Este fenómeno retrasa el enfriamiento nocturno y contribuye a la persistencia de temperaturas elevadas en áreas urbanas, configurando el patrón característico de la isla de calor atmosférica nocturna. La geometría urbana, especialmente en sectores con calles estrechas y edificaciones altas, favorece además la captura y reemisión de radiación de onda larga, intensificando la retención de calor (Oke, 1982).

El calor antropogénico constituye un componente adicional del balance energético urbano. Las emisiones provenientes del transporte, la actividad industrial, los sistemas de climatización y el metabolismo humano introducen energía adicional en el sistema urbano. Aunque su contribución puede variar según la escala y el tipo de ciudad, en áreas densamente pobladas este aporte puede ser significativo, especialmente durante periodos nocturnos o en estaciones frías donde el uso de calefacción es elevado (Santamouris, 2015). En ciudades intermedias, el incremento del parque automotor y la expansión de infraestructura también refuerzan este componente.

La configuración espacial de la ciudad influye igualmente en la redistribución del calor. El denominado “cañón urbano” altera la ventilación natural y modifica los patrones de circulación del aire, reduciendo la capacidad de disipación térmica. La disminución del factor de visión del cielo limita la pérdida de radiación hacia la atmósfera, favoreciendo la acumulación energética en el entorno construido. Asimismo, la impermeabilización del suelo reduce la infiltración de agua y modifica el régimen hídrico, afectando indirectamente los procesos de enfriamiento evaporativo.

El análisis del balance energético urbano ha evolucionado con la incorporación de tecnologías de teledetección y modelación numérica. La estimación de la radiación neta y de la temperatura superficial a partir de imágenes satelitales permite evaluar la distribución espacial de los flujos de energía en distintos periodos temporales. En este marco, el procesamiento de datos Landsat, la conversión de valores digitales a radiancia y reflectancia, y la corrección por emisividad constituyen herramientas esenciales para aproximarse a la dinámica térmica urbana en estudios multitemporales (Chander y Markham, 2003; Chander et al., 2009).

En síntesis, el balance energético urbano ofrece un marco explicativo integral para comprender la génesis y persistencia de la isla de calor urbana. La combinación de mayor absorción radiativa, reducción de evapotranspiración, almacenamiento térmico y aporte de calor antropogénico configura un sistema energético distinto al del entorno natural. Este enfoque permite articular variables físicas, ambientales y urbanas en un esquema coherente que fundamenta el análisis posterior del comportamiento térmico en contextos específicos, como el de ciudades interandinas sometidas a procesos de expansión acelerada.

1.1.5. Influencia de vegetación

La vegetación constituye uno de los elementos más determinantes en la regulación térmica del espacio urbano. Su presencia no solo modifica el paisaje físico, sino que interviene directamente en los procesos de intercambio energético entre la superficie y la atmósfera. En el contexto de la Isla de Calor Urbana, la reducción o sustitución de áreas verdes por superficies impermeables representa uno de los factores estructurales que intensifican el calentamiento local. Comprender la influencia de la vegetación implica analizar su papel en el balance energético, en la dinámica hídrica y en la configuración microclimática de la ciudad.

Desde el punto de vista físico, la vegetación actúa como un mecanismo natural de enfriamiento a través de la evapotranspiración. Este proceso transforma parte de la energía solar absorbida en calor latente, reduciendo la cantidad de energía disponible para elevar la temperatura superficial y del aire. En ambientes naturales o en zonas urbanas con cobertura vegetal significativa, una proporción considerable de la radiación neta se destina a este flujo, lo que contribuye a mantener temperaturas más moderadas. Cuando

la vegetación es eliminada, este componente del balance energético disminuye, incrementándose el calor sensible y el almacenamiento térmico en superficies construidas (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

Además de la evapotranspiración, la vegetación influye en el microclima urbano mediante la provisión de sombra. La presencia de árboles reduce la radiación solar directa sobre el suelo y las edificaciones, disminuyendo la temperatura superficial de pavimentos y fachadas. Este efecto es particularmente relevante en espacios abiertos y áreas de alta exposición solar, donde la sombra puede generar diferencias térmicas significativas a escala local. De este modo, la vegetación no solo actúa como regulador térmico, sino también como elemento que mejora el confort ambiental.

Diversos estudios han demostrado que la disminución de áreas verdes en ciudades densamente urbanizadas se asocia con incrementos progresivos en la intensidad de la isla de calor urbana. Investigaciones desarrolladas en contextos asiáticos evidenciaron que la reducción de cobertura vegetal puede disminuir sustancialmente los niveles de evapotranspiración y, en consecuencia, elevar la temperatura urbana de manera proporcional (Kondoh et al., 1999). Este hallazgo refuerza la idea de que la vegetación cumple una función climática estructural y no meramente ornamental dentro del sistema urbano.

La influencia de la vegetación también puede analizarse mediante indicadores espectrales derivados de imágenes satelitales. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) y otros parámetros biofísicos permiten estimar la densidad y vigor de la cobertura vegetal, facilitando la correlación espacial entre áreas verdes y temperatura superficial. En estudios multitemporales, estos índices han mostrado una relación inversa consistente con la temperatura de superficie, evidenciando que sectores con mayor cobertura vegetal tienden a registrar valores térmicos inferiores (Voogt y Oke, 2003).

En ciudades emplazadas en regiones interandinas, donde la radiación solar puede ser intensa debido a la altitud y a la baja humedad atmosférica, la presencia de vegetación adquiere un rol aún más relevante. La combinación de suelos impermeables, topografía irregular y limitada cobertura verde puede favorecer la acumulación de calor en sectores

urbanizados. En este contexto, la planificación de corredores verdes, parques urbanos y áreas arboladas no solo responde a criterios paisajísticos, sino también a estrategias de mitigación climática.

Es importante señalar que la efectividad de la vegetación como moderadora térmica depende de su distribución espacial, densidad y estado de conservación. No basta con la existencia aislada de áreas verdes; la conectividad ecológica y la integración de vegetación en el tejido urbano influyen en la capacidad de disipación térmica a escala de barrio o distrito. Asimismo, factores como la disponibilidad hídrica y el tipo de especies vegetales pueden incidir en la eficiencia del enfriamiento evaporativo.

En síntesis, la vegetación constituye un componente esencial en la regulación del clima urbano y en la mitigación de la isla de calor. Su influencia se manifiesta en la reducción de temperatura superficial, en la disminución del calor sensible y en la mejora del confort ambiental. La pérdida progresiva de cobertura vegetal en procesos de urbanización acelerada intensifica la acumulación térmica y altera el equilibrio energético del territorio. Por ello, el análisis de la relación entre vegetación y temperatura resulta indispensable para comprender la dinámica térmica urbana y para orientar estrategias de planificación sostenible en ciudades contemporáneas.

1.1.6. Densidad poblacional

La densidad poblacional constituye un factor estructural en la configuración del clima urbano, no solo por su dimensión demográfica, sino por las transformaciones físicas y funcionales que implica sobre el territorio. El incremento del número de habitantes en un espacio determinado suele ir acompañado de mayor concentración de edificaciones, ampliación de infraestructura vial, aumento del parque automotor y expansión de servicios urbanos. Estos procesos, al modificar la superficie y la dinámica energética de la ciudad, influyen de manera directa e indirecta en la formación e intensificación de la Isla de Calor Urbana.

Desde una perspectiva indirecta, el aumento de la densidad poblacional impulsa la verticalización y compactación del tejido urbano. A mayor concentración de habitantes, mayor necesidad de vivienda, equipamientos y redes de transporte. Esta intensificación constructiva incrementa la proporción de superficies impermeables y reduce la presencia

de áreas verdes, alterando el balance energético urbano. La acumulación de materiales con alta capacidad térmica favorece el almacenamiento de calor durante el día y su liberación progresiva durante la noche, contribuyendo a la persistencia del calentamiento urbano (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

Diversos estudios han evidenciado la correlación entre densidad urbana y magnitud de la isla de calor. Investigaciones desarrolladas en ciudades asiáticas demostraron que el crecimiento poblacional se relaciona con incrementos en la intensidad térmica urbana, particularmente en áreas de alta concentración edificatoria (Hung et al., 2006). Este vínculo no responde únicamente al número de habitantes, sino a la forma en que su presencia transforma el entorno físico y modifica los flujos de energía en la superficie urbana.

Desde una perspectiva directa, la densidad poblacional también introduce aportes de calor antropogénico. El metabolismo humano, el uso de sistemas de climatización, la actividad industrial y el tráfico vehicular generan emisiones térmicas adicionales que se suman al balance energético urbano. Aunque el calor metabólico individual pueda parecer marginal, su acumulación en sectores densamente poblados, especialmente en áreas centrales, puede contribuir al incremento de temperatura, particularmente durante la noche o en periodos de estabilidad atmosférica (Kim et al., 2004).

La relación entre densidad y temperatura no es lineal ni homogénea. En algunos contextos, ciudades compactas con adecuada planificación, presencia de espacios verdes y materiales reflectantes pueden mitigar parcialmente el efecto térmico. Sin embargo, en procesos de urbanización acelerada y poco regulada, el aumento de densidad suele ir acompañado de déficit de áreas verdes, ocupación de suelos inadecuados y limitada ventilación natural, condiciones que favorecen la intensificación de la isla de calor urbana.

En ciudades interandinas, donde la expansión urbana puede desarrollarse sobre laderas y quebradas, el crecimiento poblacional modifica además las condiciones topográficas y la circulación del aire. La ocupación de pendientes y la consolidación de barrios periféricos densos pueden generar microclimas diferenciados, especialmente cuando la trama urbana limita la ventilación natural. En este contexto, la densidad

poblacional no solo influye en la magnitud térmica, sino también en la distribución espacial del calor dentro del área urbana.

El análisis de la densidad poblacional como variable explicativa del clima urbano requiere integrarla con otros parámetros, como uso del suelo, morfología urbana y cobertura vegetal. En estudios multivariados, la densidad suele asociarse con indicadores de impermeabilización y reducción de vegetación, mostrando correlaciones significativas con la temperatura de superficie. Este enfoque permite comprender que la densidad actúa como variable sintética que resume múltiples transformaciones territoriales.

En síntesis, la densidad poblacional constituye un elemento clave en la génesis y configuración de la Isla de Calor Urbana. Su influencia se manifiesta tanto a través de la transformación física del territorio como mediante el aporte directo de calor antropogénico. Analizar su papel dentro del sistema urbano permite comprender cómo las dinámicas demográficas se traducen en modificaciones climáticas locales, reforzando la necesidad de integrar criterios ambientales en los procesos de planificación y crecimiento urbano sostenible.

1.1.7. Antropogénesis térmica

La antropogénesis térmica se refiere al conjunto de aportes de calor generados directamente por las actividades humanas dentro del espacio urbano. A diferencia del calor almacenado en materiales constructivos o del derivado de la radiación solar absorbida por superficies impermeables, el calor antropogénico tiene su origen en procesos energéticos asociados al funcionamiento cotidiano de la ciudad: transporte, industria, climatización de edificios, alumbrado público, actividad comercial y metabolismo humano. En el contexto de la Isla de Calor Urbana (ICU), estos aportes constituyen un componente adicional del balance energético que puede intensificar el calentamiento local, especialmente en áreas densamente urbanizadas.

Desde el punto de vista físico, el calor antropogénico se incorpora al sistema urbano como flujo de calor sensible liberado al ambiente. Los motores de combustión interna, los sistemas de aire acondicionado, las maquinarias industriales y los equipos eléctricos transforman energía química o eléctrica en trabajo y, en gran proporción, en calor residual. Este calor es disipado al aire circundante, incrementando la temperatura

ambiental y alterando la dinámica térmica del entorno urbano (Oke, 1986). En ciudades con alta demanda energética, el flujo de calor antropogénico puede representar una fracción significativa del balance energético, particularmente durante la noche o en estaciones frías.

El transporte urbano constituye una de las principales fuentes de antropogénesis térmica. El crecimiento del parque automotor implica emisiones continuas de calor provenientes de motores y sistemas de escape, además de la radiación térmica emitida por superficies vehiculares calentadas por el sol. En sectores de tráfico intenso, este aporte térmico puede generar microambientes más cálidos, reforzando la intensidad de la ICU en áreas centrales o corredores viales.

Por otro lado, los edificios desempeñan un rol relevante en la generación de calor antropogénico. Los sistemas de climatización, especialmente en contextos donde se requiere refrigeración o calefacción intensiva, liberan calor residual hacia el exterior. En climas templados o fríos, la calefacción durante la noche incrementa la temperatura del aire urbano, contribuyendo a la persistencia de la isla de calor atmosférica. En climas secos o de alta radiación, los sistemas de refrigeración pueden amplificar el fenómeno al expulsar aire caliente al entorno inmediato.

La actividad industrial y comercial también añade cargas térmicas adicionales. Procesos productivos, hornos, equipos eléctricos y sistemas de iluminación generan calor continuo que se integra al microclima urbano. En ciudades intermedias o en proceso de expansión, la concentración de actividades económicas en zonas específicas puede originar focos térmicos localizados, que se superponen a los efectos derivados de la morfología urbana y la reducción de vegetación.

Es importante señalar que la magnitud del calor antropogénico varía según el tamaño de la ciudad, el nivel de desarrollo tecnológico y el patrón de consumo energético. En grandes metrópolis, este flujo puede alcanzar valores comparables a la radiación solar neta en determinados periodos. En ciudades medianas, aunque el aporte absoluto sea menor, su efecto puede resultar significativo cuando se combina con superficies altamente impermeables, baja ventilación y limitada cobertura vegetal.

En estudios de modelamiento climático urbano, el calor antropogénico se incorpora como variable independiente dentro del balance energético, permitiendo evaluar su contribución relativa a la intensidad de la ICU. La integración de datos de consumo energético, densidad poblacional y uso del suelo facilita la estimación espacial de este flujo térmico, evidenciando su concentración en áreas centrales y ejes comerciales.

En síntesis, la antropogénesis térmica representa la dimensión energética del metabolismo urbano. Constituye un factor que amplifica el calentamiento local al añadir calor sensible al sistema atmosférico urbano. Su influencia se intensifica en contextos de crecimiento demográfico, aumento del parque automotor y mayor demanda de energía. Comprender este componente resulta fundamental para interpretar la complejidad de la Isla de Calor Urbana y para diseñar estrategias de mitigación orientadas a la eficiencia energética y a la planificación sostenible del territorio.

1.1.8. ICU y cambio climático

La relación entre la Isla de Calor Urbana (ICU) y el cambio climático constituye uno de los ejes contemporáneos más relevantes en los estudios de climatología urbana. Si bien ambos fenómenos operan en escalas distintas —la ICU como proceso climático local y el cambio climático como transformación global del sistema atmosférico—, su interacción genera efectos acumulativos que pueden intensificar los impactos térmicos en las ciudades. En este sentido, comprender su vínculo implica analizar cómo el calentamiento global modifica las condiciones de base sobre las cuales se desarrolla el microclima urbano.

El cambio climático se caracteriza por un incremento sostenido de la temperatura media global, asociado principalmente a la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Este proceso altera los patrones de circulación atmosférica, modifica los regímenes de precipitación y aumenta la frecuencia e intensidad de eventos extremos. Cuando este calentamiento de fondo se superpone a la estructura térmica urbana, se produce un efecto combinado que amplifica la exposición de la población a temperaturas elevadas.

La ICU, por su parte, se origina en la transformación del paisaje natural en superficies construidas, la reducción de cobertura vegetal, la alteración del balance

energético y el aporte de calor antropogénico. Este fenómeno genera diferencias térmicas entre áreas urbanas y rurales, particularmente evidentes durante la noche. En un contexto de cambio climático, el incremento generalizado de temperatura puede intensificar la magnitud absoluta de estas diferencias, aunque no necesariamente su intensidad relativa. Es decir, la ciudad continúa siendo más cálida que su entorno, pero sobre una línea base térmica más elevada.

Uno de los aspectos más críticos de esta interacción se manifiesta durante olas de calor. Estudios internacionales han demostrado que los episodios extremos tienden a ser más severos en áreas urbanas debido a la acumulación de calor diurno y su liberación nocturna. El calentamiento global incrementa la probabilidad de estos eventos, mientras que la ICU dificulta la disipación térmica, prolongando las condiciones de estrés térmico para la población. Esta combinación tiene implicancias directas en la salud pública, especialmente en grupos vulnerables.

En ciudades emplazadas en regiones interandinas, como aquellas ubicadas en la sierra peruana, el impacto puede ser particularmente significativo. La altitud, la radiación solar intensa y la baja humedad atmosférica configuran condiciones donde pequeñas variaciones en el balance energético pueden traducirse en cambios térmicos perceptibles. Si a ello se suma el calentamiento global, las áreas urbanizadas podrían experimentar incrementos progresivos en temperatura superficial y en la frecuencia de noches cálidas.

Es importante diferenciar conceptualmente ambos fenómenos. La ICU no es una causa directa del cambio climático global, ya que su alcance espacial es limitado y su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero es indirecta. Sin embargo, la estructura urbana puede influir en la demanda energética —particularmente en climatización—, generando mayores emisiones que retroalimentan el proceso global. De este modo, se establece una relación bidireccional: el cambio climático intensifica los efectos locales de la ICU, mientras que determinados modelos urbanos pueden contribuir al calentamiento global.

Desde una perspectiva metodológica, el análisis conjunto de ICU y cambio climático requiere enfoques multiescalares. La integración de series temporales satelitales, datos meteorológicos históricos y proyecciones climáticas permite evaluar

tendencias y posibles escenarios futuros. La aplicación de pruebas estadísticas de tendencia, como el test de Mann-Kendall y la estimación de pendiente de Theil-Sen, facilita identificar patrones monotónicos en la evolución térmica urbana, diferenciando variabilidad interanual de cambios estructurales.

En síntesis, la interacción entre la Isla de Calor Urbana y el cambio climático representa un desafío estratégico para la planificación territorial. La superposición de ambos procesos incrementa la vulnerabilidad térmica de las ciudades, especialmente en contextos de crecimiento urbano acelerado. Reconocer esta convergencia permite orientar políticas de mitigación y adaptación que integren infraestructura verde, eficiencia energética y diseño urbano climáticamente sensible, con el fin de reducir riesgos y promover entornos urbanos más resilientes frente al calentamiento global.

1.1.9. Tendencias recientes

En las últimas décadas, el estudio de la Isla de Calor Urbana (ICU) ha experimentado una evolución marcada por notables avances metodológicos, un creciente interés interdisciplinario y una ampliación de su aplicación a contextos geográficos diversos. La investigación contemporánea ha trascendido las primeras aproximaciones descriptivas para incorporar enfoques cuantitativos, multiespaciales y multitemporales que permiten analizar con mayor precisión la dinámica térmica urbana y sus implicancias ambientales y sociales.

Una de las tendencias más destacadas es la integración de tecnologías de teledetección con análisis estadísticos avanzados. La disponibilidad de imágenes satelitales de alta resolución temporal y espacial ha facilitado la estimación de temperatura superficial, cobertura del suelo y variables biofísicas en escalas detalladas. Herramientas como los sensores de la serie Landsat, Sentinel, MODIS y otros sistemas ópticos e infrarrojos han permitido reconstruir series históricas de temperatura superficial, posibilitando el análisis de tendencias térmicas a lo largo de décadas. Esta capacidad temporal ha sido esencial para identificar cambios sostenidos en la configuración térmica urbana y establecer relaciones con procesos de expansión urbana y transformación del uso del suelo.

Otra tendencia relevante es la incorporación de técnicas de minería de datos y análisis multivariado. Entre ellas, el Análisis de Componentes Principales (ACP) ha cobrado protagonismo por su capacidad de sintetizar múltiples variables correlacionadas en factores sintéticos que explican gran parte de la variabilidad térmica. Este enfoque facilita la creación de índices compuestos —como el índice de ICU— que integran indicadores físicos, ambientales y urbanos en una sola medida representativa. Asimismo, la desmezcla espectral y el análisis de fracciones de superficie urbana han permitido discriminar componentes como vegetación, suelos desnudos y superficies impermeables, estableciendo vínculos más directos entre morfología urbana y comportamiento térmico.

En paralelo, las investigaciones han incorporado modelos numéricos y simulaciones numéricas que reproducen la dinámica de flujo de energía en entornos urbanos. El uso de modelos de mesoescala, modelos atmosféricos urbanos y herramientas de simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) ha permitido evaluar cómo variables como la geometría urbana, el factor de visión del cielo y la rugosidad superficial interactúan con condiciones meteorológicas para influir en la formación y evolución de la ICU. Estas aproximaciones ofrecen una perspectiva más integrada de los procesos físico-atmosféricos subyacentes.

La aplicación de métodos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático representa otra tendencia emergente. Redes neuronales, lógica difusa y modelos híbridos han comenzado a utilizarse para predecir patrones térmicos urbanos, manejar grandes volúmenes de datos y evaluar escenarios futuros bajo distinta combinación de variables urbanas y climáticas. Estas técnicas ofrecen ventajas en términos de capacidad predictiva y manejo de complejidad, aunque su adopción aún se encuentra en una fase inicial en comparación con métodos tradicionales.

La investigación también ha mostrado una ampliación temática, incorporando aspectos socioeconómicos y de salud pública. Estudios recientes evalúan cómo la ICU influye en la calidad de vida, el confort térmico, el consumo energético y la vulnerabilidad de grupos sociales específicos. Este enfoque contribuye a interpretar la ICU no solo como un fenómeno físico, sino como un elemento con impacto directo en el bienestar humano y la equidad urbana.

Finalmente, la literatura contemporánea ha puesto especial énfasis en la interacción entre ICU y sostenibilidad urbana. Investigaciones orientadas a políticas públicas exploran estrategias de mitigación basadas en infraestructura verde, diseño urbano climáticamente inteligente, materiales de alta reflectancia y planificación participativa. Este cambio de enfoque refleja una mayor preocupación por integrar el conocimiento científico con soluciones prácticas que promuevan ciudades resilientes frente al calentamiento urbano y al cambio climático global.

En síntesis, las tendencias recientes en el estudio de la Isla de Calor Urbana reflejan una transición desde descripciones empíricas hacia propuestas metodológicas sofisticadas, integradas y contextualizadas. La combinación de tecnología de punta, análisis estadístico riguroso, modelos predictivos y enfoque interdisciplinario ha consolidado a la ICU como un campo de investigación clave para comprender y gestionar los desafíos climáticos en las ciudades contemporáneas.

1.2 Nociones básicas de la Isla de Calor Urbana

La comprensión integral de la Isla de Calor Urbana requiere establecer un marco conceptual claro que permita identificar sus componentes fundamentales, sus dimensiones analíticas y las variables que intervienen en su formación. Más allá de su descripción como una diferencia térmica entre áreas urbanas y rurales, la ICU constituye un fenómeno climático local complejo, resultado de la interacción entre factores físicos, ambientales, morfológicos y antrópicos.

En términos generales, la Isla de Calor Urbana puede definirse como el incremento sistemático de la temperatura en áreas urbanizadas respecto a su entorno no urbanizado. Esta diferencia térmica se manifiesta tanto en la temperatura del aire como en la temperatura superficial, presentando variaciones espaciales y temporales asociadas a la configuración del territorio, la densidad edificatoria, la cobertura vegetal y las condiciones atmosféricas predominantes. Su intensidad no es constante, sino que depende de la hora del día, la estación del año y la estabilidad atmosférica.

Dentro de sus dimensiones principales, se distinguen dos manifestaciones: la isla de calor superficial y la isla de calor atmosférica. La primera se refiere a la temperatura registrada en la superficie terrestre —detectable mediante sensores térmicos—, mientras

que la segunda corresponde al comportamiento térmico del aire urbano. Ambas dimensiones están interrelacionadas, pero responden a dinámicas parcialmente diferenciadas. Esta distinción conceptual resulta esencial para seleccionar métodos de análisis y técnicas de medición adecuadas.

Asimismo, la ICU puede abordarse desde una perspectiva estructural y funcional. En su dimensión estructural, se relaciona con la transformación del uso del suelo, la impermeabilización de superficies, la reducción de vegetación y la morfología urbana. En su dimensión funcional, se vincula con los flujos de energía, la circulación atmosférica local y el aporte de calor antropogénico. Esta doble aproximación permite integrar variables físicas con dinámicas socioeconómicas, ampliando el alcance del análisis.

Otro aspecto central en las nociones básicas del fenómeno es su carácter multiescalar. Aunque se trata de un proceso local, su intensidad puede variar entre barrios, distritos o sectores específicos dentro de una misma ciudad. Existen microislas de calor asociadas a zonas comerciales, ejes viales o áreas industriales, que coexisten con patrones térmicos más amplios a escala urbana. Esta heterogeneidad espacial exige metodologías capaces de capturar diferencias finas en la distribución térmica.

En el ámbito metodológico, la ICU se estudia mediante la integración de datos meteorológicos, imágenes satelitales y técnicas de análisis espacial. Indicadores como el NDVI, el albedo, los índices de edificación y la temperatura de superficie constituyen herramientas fundamentales para cuantificar y representar el fenómeno. A su vez, el uso de técnicas multivariadas permite sintetizar múltiples variables en índices compuestos que reflejan la intensidad térmica urbana.

En síntesis, las nociones básicas de la Isla de Calor Urbana establecen los fundamentos conceptuales necesarios para abordar su estudio de manera sistemática. Comprender su definición, dimensiones, escalas y variables asociadas constituye el punto de partida para el análisis teórico y aplicado del fenómeno. A partir de estas bases, es posible profundizar en sus mecanismos de generación, en su manifestación espacial y en sus implicancias ambientales y sociales dentro del contexto urbano contemporáneo.

1.2.1. Definición conceptual profunda

La Isla de Calor Urbana (ICU) puede definirse, en términos amplios, como una anomalía térmica espacial caracterizada por temperaturas más elevadas en áreas urbanizadas respecto a sus entornos rurales o periurbanos. Sin embargo, esta definición descriptiva resulta insuficiente si no se aborda su complejidad estructural y funcional. Desde una perspectiva conceptual profunda, la ICU debe entenderse como un fenómeno climático local emergente del metabolismo urbano, producto de la transformación sistemática del balance energético natural por efecto de la urbanización.

En su esencia, la ICU es la manifestación térmica de un proceso de sustitución territorial: la cobertura vegetal y los suelos naturales son reemplazados por superficies impermeables —concreto, asfalto, techos, infraestructura— que poseen propiedades térmicas distintas. Estas superficies presentan mayor capacidad de absorción de radiación solar, menor evapotranspiración y mayor almacenamiento de calor, lo que altera los flujos de energía entre la superficie y la atmósfera. Como consecuencia, se genera una acumulación progresiva de calor sensible que eleva la temperatura urbana (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

Conceptualmente, la ICU no es simplemente una diferencia térmica, sino un sistema dinámico que integra múltiples componentes: radiación solar incidente, albedo superficial, almacenamiento térmico, calor antropogénico, circulación atmosférica local y configuración geométrica urbana. Esta interacción convierte a la ciudad en un espacio climático singular, con comportamiento térmico propio y parcialmente independiente del entorno rural circundante.

Desde el enfoque termodinámico, la ICU puede interpretarse como un desbalance energético urbano. En condiciones naturales, una proporción significativa de la energía solar absorbida se disipa mediante evapotranspiración y flujo latente. En la ciudad, la reducción de vegetación y la presencia de materiales de alta inercia térmica disminuyen el flujo latente y aumentan el flujo sensible y el almacenamiento de calor. Este desequilibrio se traduce en temperaturas superficiales y atmosféricas más elevadas, especialmente durante la noche, cuando el calor almacenado es liberado lentamente hacia el ambiente.

En términos espaciales, la ICU posee un carácter heterogéneo. No se distribuye de manera uniforme en toda la ciudad, sino que presenta gradientes térmicos asociados a la densidad edificatoria, uso del suelo, presencia de áreas verdes y morfología urbana. Por ello, puede hablarse de "núcleos térmicos" o "focos de calor" dentro del entramado urbano, donde la intensidad es mayor. Esta variabilidad espacial convierte a la ICU en un fenómeno susceptible de ser cartografiado y analizado mediante técnicas de teledetección y sistemas de información geográfica.

Desde una perspectiva temporal, la ICU presenta variaciones diurnas, estacionales y multianuales. Durante el día, las superficies urbanas absorben energía y elevan rápidamente su temperatura; durante la noche, el calor acumulado se libera, manteniendo temperaturas superiores respecto al entorno rural. A escala interanual, la expansión urbana y el incremento de superficies impermeables pueden intensificar progresivamente el fenómeno, evidenciando tendencias térmicas sostenidas.

Asimismo, la ICU posee una dimensión socioambiental. No solo constituye un proceso físico, sino también una expresión del modelo de desarrollo urbano. Su intensidad refleja patrones de ocupación del suelo, desigualdad en acceso a áreas verdes y concentración de actividades económicas. En este sentido, la isla de calor puede considerarse un indicador indirecto de la sostenibilidad urbana y de la calidad ambiental de la ciudad.

En síntesis, la definición conceptual profunda de la Isla de Calor Urbana trasciende la simple comparación térmica entre ciudad y campo. Se trata de un fenómeno climático local emergente de la transformación antrópica del territorio, caracterizado por un desbalance energético, una estructura espacial heterogénea y una dinámica temporal compleja. Entender la ICU en esta dimensión integral permite abordarla no solo como objeto de medición, sino como proceso sistémico vinculado al metabolismo urbano y a la planificación del territorio.

1.2.2. Dimensiones:

La Isla de Calor Urbana no puede comprenderse de manera integral si se aborda únicamente como una diferencia térmica entre ciudad y campo. Su naturaleza compleja exige desagregar el fenómeno en distintas dimensiones analíticas que permitan interpretar

sus causas, manifestaciones y efectos. Estas dimensiones no actúan de forma aislada, sino que se interrelacionan dentro de un sistema urbano dinámico en el que confluyen factores físicos, ambientales, morfológicos, sociales y temporales.

En primer lugar, la dimensión física se vincula con los procesos energéticos que regulan el intercambio de radiación y calor entre la superficie y la atmósfera. Incluye variables como el albedo, la capacidad térmica de los materiales, el almacenamiento de calor y los flujos de calor sensible y latente. Esta dimensión permite entender la ICU como resultado de un desbalance energético inducido por la urbanización.

En segundo lugar, la dimensión morfológica está asociada a la configuración espacial del tejido urbano. La altura de las edificaciones, la anchura de las calles, la orientación de las manzanas y el factor de visión del cielo influyen en la ventilación, en la captación de radiación solar y en la acumulación térmica. La forma urbana condiciona la manera en que el calor es absorbido, almacenado y liberado, generando microclimas diferenciados dentro de la ciudad.

Una tercera dimensión es la ambiental, relacionada con la cobertura vegetal, la presencia de cuerpos de agua y la permeabilidad del suelo. La vegetación actúa como regulador térmico mediante sombra y evapotranspiración, mientras que la impermeabilización incrementa la retención de calor. Esta dimensión conecta directamente la ICU con los procesos de transformación del uso del suelo.

Asimismo, existe una dimensión antrópica o socioeconómica que incorpora el papel de la densidad poblacional, el consumo energético, la movilidad urbana y las actividades económicas. El calor antropogénico derivado del transporte, la industria y los sistemas de climatización añade energía al sistema urbano, intensificando el fenómeno térmico.

Finalmente, la dimensión temporal permite analizar la variabilidad diaria, estacional y multianual de la ICU. Las diferencias entre día y noche, entre estaciones secas y húmedas, o entre distintos periodos históricos de expansión urbana, evidencian que la isla de calor es un proceso dinámico y evolutivo.

Abordar estas dimensiones de manera articulada permite estructurar el análisis del fenómeno con mayor profundidad conceptual. En las subsecciones siguientes se desarrollarán cada una de estas dimensiones, detallando sus componentes y su contribución a la comprensión integral de la Isla de Calor Urbana.

1.2.2.1. Física

La dimensión física de la Isla de Calor Urbana constituye el núcleo explicativo del fenómeno, pues se relaciona directamente con los procesos de intercambio energético que ocurren entre la superficie terrestre y la atmósfera. Desde esta perspectiva, la ICU es el resultado de un desbalance en el sistema energético urbano, provocado por la modificación de las propiedades radiativas y térmicas del territorio como consecuencia de la urbanización.

En condiciones naturales, la energía solar incidente sobre la superficie se distribuye en distintos componentes: una parte es reflejada de acuerdo con el albedo del suelo, otra es absorbida y almacenada, y el resto se disipa mediante flujos de calor sensible y calor latente. El flujo latente, asociado principalmente a la evapotranspiración de la vegetación y a la humedad del suelo, actúa como mecanismo de enfriamiento natural. Sin embargo, cuando la cobertura vegetal es sustituida por superficies impermeables, este componente disminuye significativamente, incrementándose el flujo de calor sensible hacia la atmósfera (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

Uno de los elementos fundamentales dentro de esta dimensión es el albedo. Las superficies urbanas, como el asfalto y ciertos materiales de construcción, presentan generalmente un albedo bajo, lo que implica mayor absorción de radiación solar. Esta energía absorbida eleva la temperatura superficial y se almacena en los materiales, que suelen poseer alta capacidad calorífica e inercia térmica. Durante la noche, el calor acumulado es liberado gradualmente, manteniendo temperaturas elevadas en comparación con el entorno rural.

La capacidad térmica y la conductividad de los materiales urbanos también desempeñan un rol clave. El concreto, el ladrillo y el asfalto poseen propiedades que favorecen el almacenamiento prolongado de energía. Esta característica explica por qué

la intensidad de la isla de calor suele ser mayor en horario nocturno, cuando el entorno rural se enfría más rápidamente debido a la menor acumulación térmica.

Otro componente físico relevante es la geometría urbana. La configuración tridimensional de edificaciones y calles influye en la captación y retención de radiación solar. Los denominados "cañones urbanos" pueden reducir la pérdida de radiación de onda larga hacia el cielo, disminuyendo la capacidad de enfriamiento nocturno. Este efecto está estrechamente relacionado con el factor de visión del cielo (SVF), que cuantifica la porción de cielo visible desde un punto determinado. Valores bajos de SVF implican menor disipación térmica y mayor retención de calor.

El balance energético urbano puede expresarse mediante la ecuación general:

$$Rn = H + LE + G + QF$$

Donde Rn representa la radiación neta, H el flujo de calor sensible, LE el flujo de calor latente, G el flujo de calor almacenado en el suelo o estructuras, y QF el calor antropogénico. En el contexto urbano, la disminución de LE y el aumento de G y QF explican el incremento de H, que finalmente se traduce en mayor temperatura del aire y de la superficie.

La estabilidad atmosférica también influye en la dimensión física del fenómeno. En condiciones de baja velocidad del viento y cielos despejados, la disipación del calor es limitada, intensificando la ICU. Por el contrario, la ventilación adecuada y la nubosidad pueden atenuar las diferencias térmicas.

En ciudades ubicadas en zonas interandinas, la altitud y la menor densidad atmosférica pueden potenciar la radiación solar incidente, incrementando la energía disponible para ser absorbida por las superficies urbanas. Este factor físico adicional puede amplificar el efecto térmico en entornos urbanos de montaña, especialmente durante la estación seca.

En síntesis, la dimensión física de la Isla de Calor Urbana se fundamenta en la alteración del balance energético natural debido a la urbanización. La combinación de bajo albedo, alta capacidad térmica, reducción de evapotranspiración y geometría urbana compleja genera un sistema térmico característico, donde el almacenamiento y la

liberación de calor configuran un microclima urbano diferenciado. Comprender esta dimensión resulta esencial para interpretar el origen y la dinámica del fenómeno en contextos urbanos específicos.

1.2.2.2. Atmosférica

La dimensión atmosférica de la Isla de Calor Urbana se refiere a las modificaciones térmicas y dinámicas que experimenta el aire sobre y dentro del espacio urbano como consecuencia de los cambios en la superficie terrestre y de las actividades humanas. A diferencia de la dimensión física, que se centra en el comportamiento energético de los materiales y superficies, la dimensión atmosférica analiza cómo estas transformaciones repercuten en la temperatura del aire, en la circulación local y en la estabilidad atmosférica.

La isla de calor atmosférica se manifiesta como una elevación de la temperatura del aire urbano respecto al entorno rural circundante. Este contraste térmico suele ser más evidente durante la noche, cuando las superficies urbanas liberan el calor almacenado durante el día, manteniendo capas de aire más cálidas sobre la ciudad (Oke, 1986). En condiciones de cielos despejados y vientos débiles, la diferencia térmica puede intensificarse debido a la limitada dispersión del calor acumulado.

Desde el punto de vista dinámico, la mayor temperatura del aire urbano genera gradientes de presión que pueden inducir circulaciones locales. El aire cálido tiende a ascender, favoreciendo movimientos convectivos que modifican la estructura térmica de la capa límite urbana. Este proceso puede originar una circulación urbana-rural en la que el aire más fresco de las zonas periféricas fluye hacia el centro urbano para compensar el ascenso del aire caliente. Tales circulaciones, aunque de pequeña escala, influyen en la distribución espacial del calor y en la ventilación de la ciudad.

La estabilidad atmosférica desempeña un papel determinante en la intensidad de la ICU atmosférica. En situaciones anticiclónicas, caracterizadas por subsidencia y cielos despejados, la atmósfera presenta menor mezcla vertical, lo que favorece la acumulación de aire cálido en niveles bajos. Por el contrario, en condiciones de inestabilidad o presencia de vientos moderados, la ventilación contribuye a reducir el contraste térmico entre áreas urbanas y rurales.

La contaminación atmosférica también interactúa con la dimensión atmosférica del fenómeno. Las partículas en suspensión y los aerosoles pueden absorber y reemitir radiación de onda larga, generando un efecto adicional de retención térmica sobre la ciudad. Este componente contribuye a modificar el balance radiativo y puede intensificar el calentamiento urbano, particularmente en áreas con alta actividad vehicular e industrial (Rosenfeld et al., 1998).

En ciudades de altitud intermedia o elevada, como las emplazadas en regiones andinas, la dinámica atmosférica presenta características particulares. La menor densidad del aire, la fuerte radiación solar y las marcadas diferencias térmicas diurnas pueden influir en la formación de microclimas urbanos diferenciados. Además, la topografía circundante —valles, quebradas y laderas— condiciona los flujos de aire y puede favorecer la acumulación de masas de aire cálido en determinados sectores.

La dimensión atmosférica también incluye la variabilidad vertical de la temperatura. La ICU puede analizarse en distintas capas: la capa superficial urbana, la capa límite urbana y la atmósfera urbana superior. Cada una presenta dinámicas propias, pero todas están interrelacionadas mediante procesos de convección, radiación y advección.

En síntesis, la dimensión atmosférica de la Isla de Calor Urbana aborda el comportamiento térmico del aire urbano como resultado de la interacción entre superficie, energía y circulación atmosférica. La acumulación de calor, la estabilidad atmosférica, la contaminación y la morfología urbana convergen para generar un microclima específico sobre la ciudad. Entender esta dimensión permite interpretar no solo la magnitud térmica del fenómeno, sino también sus implicancias en la calidad del aire, el confort ambiental y la salud de la población urbana.

1.2.2.3. Urbana

La dimensión urbana de la Isla de Calor Urbana se centra en la forma, estructura y funcionamiento del tejido construido como condicionantes directos del comportamiento térmico de la ciudad. A diferencia de la dimensión física —orientada al balance energético— y de la dimensión atmosférica —enfocada en la dinámica del aire—, la dimensión urbana analiza cómo la organización espacial, la morfología edificatoria y el

modelo de crecimiento territorial configuran el escenario donde el fenómeno se desarrolla.

La ciudad no es una superficie homogénea, sino un sistema complejo compuesto por edificaciones, vías, espacios abiertos, áreas verdes, equipamientos e infraestructura. Cada uno de estos elementos posee propiedades térmicas particulares y una distribución espacial específica que influye en la absorción, almacenamiento y liberación de calor. Por ello, la ICU no se manifiesta de manera uniforme, sino que responde a la estructura urbana subyacente.

Uno de los factores centrales en esta dimensión es la morfología urbana. La altura de las edificaciones, la relación ancho-altura de las calles y la disposición de manzanas determinan la formación de los denominados "cañones urbanos". Estos espacios canalizan la radiación solar, modifican la ventilación natural y reducen la pérdida de radiación de onda larga durante la noche. El factor de visión del cielo (Sky View Factor, SVF) se convierte así en un indicador clave para evaluar la capacidad de disipación térmica del espacio urbano. Sectores con SVF bajo tienden a retener mayor cantidad de calor.

La densidad edificatoria constituye otro componente esencial. Áreas con alta concentración de construcciones y escasa vegetación presentan mayor proporción de superficies impermeables, lo que incrementa la acumulación térmica. La compactación urbana, si no está acompañada de planificación climáticamente sensible, puede intensificar la isla de calor al limitar la ventilación y reducir la evapotranspiración.

El uso del suelo también influye de manera significativa. Zonas industriales, comerciales o de alta actividad económica suelen concentrar mayores fuentes de calor antropogénico y mayor impermeabilización. En contraste, áreas residenciales con presencia de jardines o parques pueden mostrar valores térmicos más moderados. La heterogeneidad funcional de la ciudad se traduce, por tanto, en una heterogeneidad térmica.

La expansión urbana representa un aspecto dinámico de esta dimensión. El crecimiento radiocéntrico, la ocupación de laderas y la conversión de suelos agrícolas o naturales en áreas urbanizadas alteran progresivamente la configuración térmica del

territorio. A medida que se amplía la mancha urbana, los patrones térmicos también se transforman, generando nuevos focos de calor y extendiendo la influencia de la ICU hacia zonas periurbanas.

En ciudades interandinas, la dimensión urbana adquiere particular relevancia debido a la interacción entre topografía y morfología edificatoria. La ocupación de quebradas, pendientes y mesetas modifica la circulación del aire y puede generar microclimas diferenciados según orientación y altitud. En estos contextos, la planificación urbana debe considerar no solo la distribución de usos, sino también la adaptación a condiciones geomorfológicas específicas.

Asimismo, el diseño urbano contemporáneo introduce nuevas variables, como materiales reflectantes, techos verdes, pavimentos permeables y corredores ecológicos. Estas estrategias buscan reducir la absorción térmica y mejorar la ventilación, incorporando criterios de sostenibilidad climática en la estructura urbana.

En síntesis, la dimensión urbana de la Isla de Calor Urbana aborda el fenómeno desde la perspectiva de la forma y funcionamiento de la ciudad. La morfología, la densidad, el uso del suelo y los patrones de expansión configuran el soporte espacial sobre el cual se manifiesta el calentamiento urbano. Comprender esta dimensión permite interpretar la ICU como resultado no solo de procesos físicos, sino también de decisiones territoriales y modelos de desarrollo urbano que inciden directamente en el microclima local.

1.2.2.4. Ambiental

La dimensión ambiental de la Isla de Calor Urbana se refiere al conjunto de condiciones ecológicas y biofísicas que intervienen en la regulación térmica del territorio urbano. Esta dimensión integra elementos como la cobertura vegetal, la presencia de cuerpos de agua, la permeabilidad del suelo, la calidad del aire y el estado general del ecosistema urbano. A diferencia de la dimensión estrictamente física, que se enfoca en el balance energético, la dimensión ambiental considera la capacidad del entorno para amortiguar o intensificar los efectos del calentamiento urbano.

Uno de los componentes más relevantes dentro de esta dimensión es la vegetación. Las áreas verdes urbanas —parques, jardines, corredores ecológicos y arbolado urbano— actúan como reguladores térmicos naturales. A través de la evapotranspiración, la vegetación transforma parte de la energía solar en calor latente, reduciendo la temperatura superficial y del aire circundante. Además, la sombra proyectada por árboles y estructuras vegetales disminuye la radiación directa sobre superficies impermeables, limitando el almacenamiento de calor. La reducción o fragmentación de la cobertura vegetal, por tanto, debilita esta función reguladora y favorece la intensificación de la ICU.

La presencia de cuerpos de agua también cumple un rol ambiental importante. Ríos, lagunas y reservorios urbanos poseen mayor capacidad calorífica y procesos de evaporación que contribuyen a moderar las temperaturas locales. Estos elementos generan microclimas más frescos en su entorno inmediato, actuando como amortiguadores térmicos dentro del entramado urbano. En ciudades donde los cuerpos de agua han sido canalizados o reducidos, se pierde parte de esta capacidad de regulación natural.

La permeabilidad del suelo es otro factor ambiental clave. Superficies naturales permiten la infiltración del agua y favorecen procesos de evaporación que contribuyen al enfriamiento. En contraste, la impermeabilización mediante pavimentos y edificaciones limita la infiltración y reduce la evaporación superficial, incrementando la acumulación térmica. El reemplazo progresivo de suelos naturales por superficies selladas constituye uno de los procesos más significativos en la génesis ambiental de la ICU.

La calidad del aire también interactúa con la dimensión ambiental del fenómeno. La acumulación de contaminantes y aerosoles en áreas urbanas puede modificar el balance radiativo, afectando la absorción y emisión de radiación de onda larga. En determinados contextos, la contaminación atmosférica puede actuar como capa adicional de retención térmica, intensificando el calentamiento urbano y generando sinergias entre deterioro ambiental y aumento de temperatura.

En ciudades situadas en entornos interandinos, la dimensión ambiental adquiere particular relevancia debido a la interacción entre altitud, radiación solar intensa y disponibilidad limitada de áreas verdes. La fragilidad de ecosistemas de montaña y la

presión urbana sobre suelos agrícolas o naturales pueden alterar de manera significativa la capacidad de regulación térmica del territorio. La expansión urbana sin planificación ambiental tiende a reducir corredores ecológicos y áreas de amortiguamiento, incrementando la vulnerabilidad climática local.

La dimensión ambiental también se vincula con la sostenibilidad urbana. La incorporación de infraestructura verde, techos y muros vegetados, parques lineales y sistemas de drenaje sostenible representa estrategias orientadas a restaurar funciones ecológicas dentro de la ciudad. Estas intervenciones no solo contribuyen a mitigar la ICU, sino que mejoran la calidad de vida y fortalecen la resiliencia frente al cambio climático.

En síntesis, la dimensión ambiental de la Isla de Calor Urbana destaca el papel de los ecosistemas urbanos en la regulación térmica. La pérdida de vegetación, la impermeabilización del suelo y la degradación ambiental reducen la capacidad natural de disipar calor, intensificando el fenómeno. Comprender esta dimensión permite integrar criterios ecológicos en la planificación territorial, reconociendo que la mitigación de la ICU depende en gran medida de la restauración y conservación de funciones ambientales dentro del espacio urbano.

1.2.3. Intensidad térmica

La intensidad térmica constituye uno de los conceptos centrales en el análisis de la Isla de Calor Urbana, ya que permite cuantificar la magnitud del fenómeno y comparar su comportamiento en distintos contextos espaciales y temporales. En términos generales, se define como la diferencia de temperatura registrada entre el área urbana y su entorno rural o periurbano. Sin embargo, esta definición básica adquiere mayor profundidad cuando se consideran las variables que intervienen en su medición, su variabilidad y su interpretación dentro del sistema climático urbano.

La intensidad térmica puede expresarse tanto en términos de temperatura del aire como de temperatura superficial. En el primer caso, se mide a través de estaciones meteorológicas ubicadas en puntos urbanos y rurales comparables; en el segundo, se obtiene mediante sensores térmicos remotos que registran la radiación emitida por la superficie terrestre. Ambas aproximaciones permiten estimar la magnitud del fenómeno, aunque cada una responde a dinámicas distintas y puede arrojar resultados diferenciados.

Uno de los rasgos más característicos de la intensidad térmica es su variabilidad diurna y nocturna. Durante el día, las superficies urbanas absorben radiación solar y pueden alcanzar temperaturas significativamente superiores a las rurales, especialmente en pavimentos y techos expuestos. No obstante, es durante la noche cuando la diferencia térmica suele intensificarse en términos atmosféricos. La liberación progresiva del calor almacenado en los materiales urbanos mantiene el aire más cálido sobre la ciudad, mientras que las zonas rurales, con menor inercia térmica, se enfrían con mayor rapidez (Oke, 1986).

La intensidad térmica también presenta variaciones estacionales. En climas templados o fríos, puede manifestarse con mayor claridad durante estaciones secas o periodos de estabilidad atmosférica. En regiones interandinas, donde las diferencias entre estación seca y húmeda son marcadas, la intensidad puede incrementarse durante los meses con menor nubosidad y menor contenido de humedad atmosférica, condiciones que favorecen la acumulación de calor diurno y su persistencia nocturna.

Desde una perspectiva espacial, la intensidad térmica no es homogénea dentro del área urbana. Existen gradientes térmicos asociados a la densidad edificatoria, la presencia de vegetación, la altitud relativa y la configuración morfológica. Sectores comerciales densos o áreas industriales suelen presentar valores más elevados, mientras que zonas con parques o cuerpos de agua registran intensidades menores. Esta heterogeneidad convierte a la intensidad térmica en un indicador espacialmente distribuido, susceptible de ser representado mediante cartografía temática.

En estudios multitemporales, la intensidad térmica permite identificar tendencias asociadas al crecimiento urbano. El incremento progresivo de superficies impermeables y la expansión de la mancha urbana pueden traducirse en aumentos sostenidos de la diferencia térmica respecto al entorno rural. La aplicación de pruebas estadísticas de tendencia, como el test de Mann-Kendall o la estimación de la pendiente de Theil-Sen, facilita determinar si estas variaciones responden a fluctuaciones interanuales o a cambios estructurales vinculados a la transformación territorial.

La interpretación de la intensidad térmica también debe considerar factores meteorológicos coyunturales, como velocidad del viento, nubosidad y humedad relativa.

Condiciones de calma atmosférica y cielos despejados tienden a maximizar la diferencia térmica, mientras que vientos moderados o presencia de nubosidad pueden atenuarla. Por ello, la intensidad debe analizarse en relación con el contexto climático específico de cada periodo de estudio.

En síntesis, la intensidad térmica constituye la expresión cuantitativa de la Isla de Calor Urbana. Más que un valor absoluto, representa un indicador dinámico que refleja la interacción entre superficie, atmósfera y estructura urbana. Su análisis permite comparar escenarios temporales, evaluar impactos del crecimiento urbano y orientar estrategias de mitigación climática, convirtiéndose en un elemento fundamental para la comprensión integral del fenómeno térmico urbano.

1.2.4. Dinámica diurna/nocturna

La dinámica diurna y nocturna de la Isla de Calor Urbana constituye uno de los rasgos más característicos del fenómeno, ya que revela cómo el comportamiento térmico de la ciudad varía a lo largo del ciclo diario. La ICU no es un proceso estático ni uniforme en el tiempo; por el contrario, su intensidad y configuración espacial cambian significativamente entre el día y la noche como resultado de los intercambios energéticos entre superficie y atmósfera.

Durante el día, la radiación solar incide sobre las superficies urbanas —techos, pavimentos, fachadas— generando un rápido incremento de la temperatura superficial. Los materiales constructivos, generalmente de bajo albedo y alta capacidad térmica, absorben gran parte de la energía solar y la almacenan en sus estructuras internas. En esta fase, la isla de calor se manifiesta principalmente en términos superficiales, con diferencias térmicas notables entre áreas urbanas y rurales, especialmente en pavimentos asfaltados o zonas densamente edificadas.

Sin embargo, en el periodo diurno la diferencia en temperatura del aire puede ser menos marcada que la superficial. Esto se debe a que la convección atmosférica, el movimiento del aire y la mezcla vertical favorecen la dispersión del calor acumulado. En condiciones de viento moderado o inestabilidad atmosférica, la ventilación contribuye a atenuar el contraste térmico urbano-rural.

La fase nocturna presenta una dinámica distinta y, en muchos casos, más intensa en términos atmosféricos. Una vez que cesa la radiación solar directa, las superficies rurales —con menor capacidad térmica y mayor cobertura vegetal— pierden calor rápidamente mediante radiación de onda larga y enfriamiento evaporativo. En contraste, las superficies urbanas liberan de manera gradual el calor almacenado durante el día. Este proceso mantiene temperaturas más elevadas en el aire urbano, configurando una isla de calor atmosférica más evidente (Oke, 1986).

La persistencia del calor nocturno se ve reforzada por la geometría urbana. Los "cañones urbanos" reducen la pérdida radiativa hacia el cielo y limitan la ventilación, favoreciendo la retención térmica. Además, el calor antropogénico —proveniente del tráfico nocturno, iluminación y sistemas de climatización— puede contribuir a mantener la temperatura elevada durante la noche.

En regiones interandinas, la dinámica diurna/nocturna puede presentar contrastes particularmente marcados debido a la elevada radiación solar durante el día y al rápido enfriamiento nocturno en áreas rurales de mayor altitud. En este contexto, la ciudad actúa como un reservorio térmico que modera el descenso nocturno de temperatura, generando diferencias térmicas más pronunciadas respecto a su entorno.

La comprensión de esta dinámica diaria resulta fundamental para evaluar impactos en salud y confort térmico. Las noches cálidas asociadas a la ICU pueden reducir la capacidad de recuperación térmica del cuerpo humano tras jornadas calurosas, incrementando el estrés térmico acumulativo. Asimismo, la dinámica diurna/nocturna influye en la demanda energética urbana, especialmente en el uso de sistemas de refrigeración.

Desde el punto de vista metodológico, el análisis de imágenes satelitales térmicas permite capturar la temperatura superficial diurna, mientras que sensores como MODIS o GOES facilitan estimaciones nocturnas. La comparación entre ambas fases del ciclo diario proporciona una visión más completa del comportamiento térmico urbano y de su evolución temporal.

En síntesis, la dinámica diurna y nocturna de la Isla de Calor Urbana refleja el carácter cíclico y acumulativo del fenómeno. La absorción de energía durante el día y su

liberación nocturna configuran un patrón térmico diferencial que distingue a la ciudad de su entorno rural. Comprender esta dinámica es esencial para interpretar la intensidad del fenómeno y para diseñar estrategias de mitigación que consideren tanto el comportamiento superficial como el atmosférico del sistema urbano.

1.2.5. Indicadores de medición

La medición de la Isla de Calor Urbana requiere la utilización de indicadores capaces de cuantificar la magnitud, distribución y evolución del fenómeno térmico en el espacio urbano. Dado que la ICU es un proceso complejo que integra dimensiones físicas, atmosféricas y urbanas, su análisis demanda la combinación de variables meteorológicas, biofísicas y morfológicas. Los indicadores constituyen, por tanto, herramientas fundamentales para transformar el fenómeno en valores observables, comparables y cartografiables.

El indicador más directo es la diferencia de temperatura entre el área urbana y el entorno rural, que permite estimar la intensidad térmica. Esta medición puede realizarse mediante estaciones meteorológicas, comparando registros de temperatura del aire en puntos representativos. Sin embargo, la limitada cobertura espacial de estaciones en muchas ciudades hace necesario complementar este enfoque con técnicas de teledetección.

La temperatura de superficie (TS) se ha convertido en uno de los principales indicadores en estudios contemporáneos de ICU. Derivada de sensores térmicos satelitales, permite estimar la energía radiativa emitida por la superficie terrestre y transformarla en valores térmicos. La TS ofrece una cobertura espacial continua, facilitando el análisis detallado de patrones térmicos dentro del área urbana. Aunque no es idéntica a la temperatura del aire, mantiene una estrecha relación con los procesos de acumulación y liberación de calor.

Además de la temperatura, se emplean indicadores biofísicos que explican la distribución térmica. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) permiten estimar la cobertura vegetal y su vigor, evidenciando la relación inversa entre vegetación y temperatura superficial. Por

su parte, índices como el MNDWI permiten identificar cuerpos de agua o humedad superficial, elementos que influyen en la regulación térmica.

Los indicadores relacionados con superficies impermeables también resultan esenciales. Índices como el NDBuI (Índice de Edificación de Diferencia Normalizada), el NDBaI (Índice de Suelo Desnudo) o el EBBI (Índice Mejorado de Edificaciones y Áreas Desnudas) permiten cuantificar la proporción de áreas construidas o selladas. Estas variables se asocian generalmente con mayores valores de temperatura superficial, debido a la reducción de evapotranspiración y mayor almacenamiento térmico.

El albedo constituye otro indicador relevante, ya que mide la fracción de radiación solar reflejada por la superficie. Superficies con bajo albedo absorben mayor cantidad de energía, incrementando la acumulación térmica. El cálculo del albedo ajustado por transmitancia atmosférica permite evaluar el comportamiento radiativo de distintas coberturas urbanas.

En análisis más integrales, se emplean técnicas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales (ACP) para sintetizar múltiples indicadores en factores sintéticos. A partir de la combinación lineal de variables físicas, ambientales y urbanas, es posible construir un índice compuesto de ICU que represente la estructura térmica urbana en cada periodo de estudio. Este enfoque permite reducir redundancias y destacar las variables con mayor peso explicativo.

Asimismo, la evaluación temporal de los indicadores posibilita identificar tendencias térmicas asociadas al crecimiento urbano. La comparación multitemporal de mapas de temperatura superficial, índices de vegetación y parámetros urbanos facilita analizar la evolución del fenómeno en distintos años o décadas.

En síntesis, los indicadores de medición constituyen el soporte metodológico para el estudio de la Isla de Calor Urbana. A través de variables térmicas, biofísicas y morfológicas, es posible cuantificar la intensidad, identificar patrones espaciales y evaluar cambios en el tiempo. La combinación de datos meteorológicos y técnicas de teledetección proporciona una aproximación robusta y espacialmente detallada, indispensable para comprender la dinámica térmica urbana y sustentar propuestas de planificación sostenible.

1.2.6. Métodos tradicionales vs remotos

El estudio de la Isla de Calor Urbana ha evolucionado en paralelo al desarrollo de técnicas de medición climática y herramientas de observación espacial. Tradicionalmente, la identificación del fenómeno se realizaba mediante registros directos de temperatura del aire obtenidos en estaciones meteorológicas fijas o a través de transectos móviles. En la actualidad, estas metodologías se complementan con técnicas de teledetección que permiten estimar temperatura superficial y variables asociadas con alta resolución espacial y cobertura multitemporal. La comparación entre métodos tradicionales y remotos no implica una sustitución, sino una transición hacia enfoques integrados que aprovechan las ventajas de ambos sistemas.

Los métodos tradicionales se basan principalmente en mediciones in situ. Las estaciones meteorológicas registran temperatura mínima, máxima y media, humedad relativa, velocidad del viento y presión atmosférica. A partir de estos datos, se puede calcular la diferencia térmica entre áreas urbanas y rurales, estimando la intensidad de la ICU atmosférica. Asimismo, los transectos térmicos —recorridos con sensores móviles a lo largo de ejes urbanos— permiten capturar gradientes espaciales detallados en periodos específicos.

La principal fortaleza de los métodos tradicionales radica en la precisión y confiabilidad de los datos. Al tratarse de mediciones directas, reflejan condiciones atmosféricas reales en puntos concretos. Sin embargo, presentan limitaciones significativas en términos de cobertura espacial. La distribución de estaciones suele ser escasa y concentrada, lo que dificulta representar la heterogeneidad térmica interna de la ciudad. Además, la instalación y mantenimiento de redes meteorológicas puede implicar altos costos y requerimientos logísticos.

En contraste, los métodos remotos, basados en sensores satelitales, permiten obtener información continua sobre amplias extensiones territoriales. A través de bandas térmicas en el infrarrojo, es posible estimar la temperatura de superficie (TS) y generar mapas detallados de distribución térmica. Sensores como los de la serie Landsat, MODIS o GOES ofrecen registros periódicos que facilitan análisis multitemporales y comparaciones históricas.

Una ventaja clave de la teledetección es su capacidad para integrar múltiples variables biofísicas. Además de la temperatura superficial, es posible derivar índices de vegetación, albedo, humedad y superficies impermeables, lo que permite analizar el fenómeno desde una perspectiva multivariable. Esta integración resulta particularmente útil en estudios que buscan comprender la relación entre morfología urbana y comportamiento térmico.

No obstante, los métodos remotos también presentan limitaciones. La temperatura de superficie no es equivalente a la temperatura del aire, por lo que ambas deben interpretarse de manera complementaria. Asimismo, factores como la cobertura nubosa, la resolución espacial y la necesidad de correcciones atmosféricas pueden introducir incertidumbre en los resultados. La estimación precisa de emisividad y vapor de agua resulta fundamental para garantizar la confiabilidad de los cálculos térmicos.

En ciudades intermedias o en contextos donde la red meteorológica es limitada, la combinación de mediciones in situ con imágenes satelitales constituye una estrategia metodológica robusta. La validación de temperaturas superficiales mediante datos de campo fortalece la consistencia del análisis y permite calibrar modelos térmicos con mayor precisión.

En síntesis, los métodos tradicionales y remotos representan enfoques complementarios en el estudio de la Isla de Calor Urbana. Mientras los primeros aportan precisión puntual y datos atmosféricos directos, los segundos ofrecen cobertura espacial amplia y análisis multitemporal. La integración de ambos sistemas permite una comprensión más completa del fenómeno, facilitando su cuantificación, representación cartográfica y evaluación evolutiva dentro del contexto urbano contemporáneo.

La Isla de Calor Urbana, entendida como fenómeno climático local, no puede reducirse a una simple diferencia térmica entre ciudad y campo. A lo largo del presente capítulo se ha demostrado que se trata de un proceso complejo, resultado de la interacción entre transformaciones físicas del territorio, dinámicas atmosféricas, configuraciones morfológicas urbanas y actividades antrópicas que modifican el balance energético natural.

Desde su evolución histórica hasta las tendencias recientes en investigación, el concepto de ICU ha transitado desde descripciones empíricas basadas en observaciones meteorológicas hasta enfoques integrales sustentados en teledetección, modelamiento energético y análisis multivariable. Esta evolución metodológica ha permitido comprender que la ciudad actúa como un sistema térmico diferenciado, capaz de almacenar, transformar y redistribuir energía de manera distinta a su entorno rural.

El análisis de sus dimensiones —física, atmosférica, urbana y ambiental— ha evidenciado que el fenómeno no responde a una única causa, sino a la convergencia de múltiples variables: reducción de vegetación, impermeabilización del suelo, densidad edificatoria, calor antropogénico, geometría urbana y condiciones meteorológicas específicas. La intensidad térmica, su dinámica diurna y nocturna, y los indicadores de medición confirman que la ICU posee una estructura espacial heterogénea y una evolución temporal dinámica, susceptible de ser cuantificada y modelada.

Asimismo, la comparación entre métodos tradicionales y remotos ha mostrado que la comprensión contemporánea del fenómeno exige integrar mediciones in situ con herramientas de observación satelital, permitiendo analizar no solo la temperatura del aire, sino también la temperatura superficial y los factores biofísicos asociados.

En conjunto, este capítulo ha establecido las bases conceptuales necesarias para interpretar la Isla de Calor Urbana como un proceso sistémico vinculado al metabolismo urbano y al modelo de ocupación territorial. Comprender su lógica interna y sus mecanismos de formación resulta indispensable para abordar, en los capítulos siguientes, el análisis aplicado del fenómeno en un contexto específico, donde teoría y evidencia empírica convergen para explicar la dinámica térmica de una ciudad interandina en proceso de transformación.

CAPÍTULO II

MORFOLOGÍA URBANA Y TEMPERATURA DE SUPERFICIE

El espacio urbano no es únicamente un escenario físico donde se desarrollan actividades humanas; es una estructura tridimensional que condiciona la manera en que la energía solar es absorbida, almacenada y redistribuida. La forma de la ciudad —su trama, densidad, volumetría y configuración espacial— incide directamente en el comportamiento térmico de la superficie. En este sentido, la morfología urbana se convierte en un elemento determinante para comprender las variaciones espaciales de la temperatura de superficie y, por extensión, la intensidad y distribución de la Isla de Calor Urbana.

La temperatura de superficie representa la expresión térmica inmediata de los materiales que conforman la ciudad. Pavimentos, cubiertas, fachadas y espacios abiertos reaccionan de manera diferenciada ante la radiación solar, dependiendo de su composición, color, textura y capacidad térmica. Sin embargo, estas respuestas individuales no pueden analizarse de forma aislada. La disposición geométrica de edificaciones, la orientación de calles, la relación altura-ancho y la presencia o ausencia de vegetación configuran patrones espaciales que modifican la captación y pérdida de energía.

En ciudades de crecimiento acelerado, la expansión urbana suele implicar la sustitución de suelos naturales por superficies impermeables y la densificación del tejido construido. Estos procesos alteran el equilibrio térmico del territorio, generando contrastes entre zonas consolidadas y áreas periurbanas. La morfología urbana, por tanto, no solo describe la forma física de la ciudad, sino que actúa como variable explicativa del comportamiento térmico superficial.

En contextos interandinos, donde la radiación solar es intensa y la topografía introduce variaciones altitudinales y de orientación, la relación entre forma urbana y temperatura adquiere particular relevancia. La ocupación de laderas, la configuración

radiocéntrica del crecimiento y la heterogeneidad de usos del suelo pueden generar microclimas diferenciados dentro de una misma ciudad. Analizar la morfología urbana en estos escenarios permite entender cómo la estructura espacial influye en la acumulación térmica y en la distribución de focos de calor.

Este capítulo aborda la interacción entre morfología urbana y temperatura de superficie desde una perspectiva teórica y conceptual, estableciendo los fundamentos necesarios para interpretar la relación entre configuración espacial y comportamiento térmico. A partir de este marco, será posible comprender cómo la forma urbana no es un elemento neutral, sino un componente activo en la generación y modulación del microclima urbano.

2.1 Referentes teóricos

El estudio de la relación entre morfología urbana y temperatura de superficie se ha consolidado en las últimas décadas como un eje central dentro de la climatología urbana y la planificación territorial. Diversas investigaciones han demostrado que la forma física de la ciudad no solo condiciona la organización funcional del espacio, sino también su comportamiento térmico. En este marco, los referentes teóricos permiten comprender cómo la configuración espacial del tejido urbano influye en la absorción, almacenamiento y redistribución de energía.

Los primeros aportes en esta línea surgieron a partir de estudios sobre el balance energético urbano, donde se identificó que la estructura tridimensional de las ciudades modificaba la captación de radiación solar y la emisión de radiación de onda larga. Posteriormente, el análisis de los llamados “cañones urbanos” evidenció que la relación entre altura de edificaciones y anchura de calles afecta el factor de visión del cielo y, por ende, la capacidad de enfriamiento nocturno. Estos planteamientos sentaron las bases para entender que la morfología urbana tiene implicancias directas en la generación y persistencia de la Isla de Calor Urbana.

Con el desarrollo de la teledetección, los estudios comenzaron a integrar indicadores espaciales derivados de imágenes satelitales, tales como índices de vegetación, albedo y fracciones de superficie impermeable. Esta evolución metodológica permitió establecer correlaciones cuantitativas entre patrones morfológicos y variaciones

de temperatura superficial, ampliando la comprensión del fenómeno desde un enfoque empírico y espacialmente explícito.

En paralelo, la literatura sobre urbanismo climático introdujo conceptos vinculados al diseño urbano sensible al clima, enfatizando la importancia de la orientación de manzanas, la ventilación natural, la presencia de espacios abiertos y la integración de infraestructura verde. Estas aproximaciones teóricas sostienen que la forma urbana no es un resultado aleatorio del crecimiento, sino un factor estratégico que puede intensificar o mitigar el calentamiento superficial.

Los referentes contemporáneos también han incorporado modelos numéricos y análisis multivariados que permiten evaluar la influencia combinada de variables como densidad edificatoria, uso del suelo, rugosidad superficial y cobertura vegetal. Este enfoque sistémico reconoce que la temperatura de superficie es el resultado de múltiples interacciones, donde la morfología urbana actúa como elemento articulador.

En síntesis, los referentes teóricos que sustentan la relación entre morfología urbana y temperatura de superficie convergen en una idea central: la forma de la ciudad condiciona su comportamiento térmico. Comprender estos antecedentes conceptuales y metodológicos resulta fundamental para interpretar, en el contexto del presente estudio, cómo la configuración espacial de una ciudad interandina influye en la distribución y evolución de su temperatura superficial.

2.1.1. Teoría de morfología urbana

La morfología urbana constituye el campo de estudio que analiza la forma física de la ciudad, su estructura espacial y los procesos de transformación que configuran el tejido construido. Más allá de una descripción geométrica, la teoría de la morfología urbana interpreta la ciudad como un sistema organizado de volúmenes, vacíos, redes y usos que evolucionan en el tiempo. Esta perspectiva permite comprender cómo la configuración del espacio urbano influye no solo en la dinámica social y funcional, sino también en el comportamiento ambiental y climático del territorio.

Desde los enfoques clásicos del urbanismo, la morfología urbana se ha abordado a partir de la estructura parcelaria, la trama vial, la tipología edificatoria y la relación entre

espacio público y privado. La ciudad es entendida como una superposición histórica de capas, donde cada periodo deja huellas en la organización del suelo y en la forma del paisaje construido. Sin embargo, con el desarrollo de la climatología urbana, esta dimensión formal comenzó a vincularse con variables ambientales, reconociendo que la forma urbana influye en procesos físicos como la captación de radiación solar, la ventilación y la acumulación térmica.

Uno de los aportes más influyentes en esta relación entre forma urbana y clima proviene de los estudios sobre el balance energético urbano. Oke (1978, 1987) planteó que la geometría tridimensional de la ciudad modifica los flujos de energía, particularmente a través del llamado "cañón urbano". La relación entre la altura de edificaciones y el ancho de calles condiciona la cantidad de radiación solar incidente y la pérdida de radiación de onda larga hacia la atmósfera. Este enfoque introdujo el concepto de factor de visión del cielo (Sky View Factor, SVF), indicador que mide la fracción de cielo visible desde un punto determinado y que se ha convertido en variable clave en estudios de temperatura superficial.

En términos teóricos, la morfología urbana puede analizarse mediante tres componentes estructurales: la trama, el tejido y la volumetría. La trama corresponde al patrón de calles y manzanas; el tejido, a la disposición de parcelas y edificaciones; y la volumetría, a la dimensión tridimensional de las construcciones. Cada uno de estos componentes influye en la distribución espacial del calor. Por ejemplo, tramas compactas con calles estrechas y edificaciones altas tienden a retener mayor energía térmica debido a la reducción de ventilación y menor disipación radiativa.

La teoría contemporánea de la morfología urbana también incorpora el concepto de rugosidad superficial, que describe la resistencia que ofrece el entorno construido al flujo del viento. Ciudades con alta rugosidad —producto de edificaciones densas y heterogéneas en altura— pueden presentar alteraciones en la circulación atmosférica local, afectando la dispersión del calor acumulado. Esta interacción entre forma urbana y dinámica atmosférica refuerza la idea de que la morfología no es un elemento pasivo, sino un factor activo en la configuración del microclima urbano (Landsberg, 1981).

El crecimiento urbano radiocéntrico, frecuente en ciudades intermedias, constituye otro elemento relevante dentro de la teoría morfológica. Este patrón genera una concentración de densidad y actividad en el núcleo central, con expansión progresiva hacia la periferia. Desde el punto de vista térmico, tal configuración puede originar gradientes de temperatura que reflejan la intensidad constructiva y la reducción de áreas verdes en el centro urbano.

Con el avance de la teledetección y los sistemas de información geográfica, la morfología urbana comenzó a cuantificarse mediante indicadores espaciales como densidad edificatoria, fracción de superficie impermeable y distribución de usos del suelo. Estas métricas permiten establecer relaciones estadísticas entre forma urbana y temperatura de superficie, consolidando un enfoque empírico que complementa la base teórica tradicional.

En síntesis, la teoría de la morfología urbana proporciona el marco conceptual para entender cómo la forma física de la ciudad influye en su comportamiento ambiental. Desde la geometría de los cañones urbanos hasta la densidad y patrón de expansión, la estructura espacial condiciona la absorción, almacenamiento y liberación de energía térmica. Integrar esta perspectiva teórica con el análisis climático permite interpretar la ciudad como un sistema morfo-climático, donde la configuración del espacio construido se convierte en variable explicativa fundamental de la temperatura de superficie y de la dinámica térmica urbana.

2.1.2. Urban sprawl

El concepto de *urban sprawl* —expansión urbana dispersa o crecimiento urbano extensivo— se refiere al proceso de expansión horizontal de la ciudad hacia su periferia, caracterizado por baja densidad, fragmentación del territorio, consumo acelerado de suelo y dependencia del transporte motorizado. Desde la teoría urbana contemporánea, este modelo de crecimiento representa una transformación estructural del paisaje, con implicancias no solo sociales y económicas, sino también ambientales y climáticas.

En términos morfológicos, el *urban sprawl* implica la conversión progresiva de suelos agrícolas o naturales en áreas urbanizadas, generalmente con tramas discontinuas, infraestructura extendida y menor compactación. A diferencia de la ciudad tradicional

compacta, donde las actividades se concentran en un núcleo consolidado, el crecimiento disperso genera un mosaico heterogéneo de urbanizaciones aisladas, equipamientos y vacíos intermedios. Esta configuración altera la continuidad ecológica y modifica el equilibrio energético del territorio.

Desde la perspectiva climática, la expansión urbana extensiva incrementa la superficie impermeable y reduce la cobertura vegetal, factores directamente relacionados con el aumento de temperatura superficial. La sustitución de suelos naturales por pavimentos y edificaciones disminuye la evapotranspiración y aumenta la absorción de radiación solar, intensificando los procesos de acumulación térmica (Oke, 1978). En consecuencia, el *urban sprawl* puede contribuir a la ampliación espacial de la Isla de Calor Urbana, extendiendo sus efectos hacia zonas previamente rurales.

Diversos estudios han señalado que la dispersión urbana tiende a generar patrones térmicos más complejos, donde aparecen múltiples focos de calor asociados a nuevas centralidades o nodos de desarrollo. A diferencia de la ciudad compacta, donde la isla de calor suele concentrarse en el centro histórico o comercial, el crecimiento fragmentado produce microislas térmicas distribuidas en la periferia. Esta fragmentación dificulta la planificación climática y complica la gestión ambiental del territorio.

Otro aspecto relevante del *urban sprawl* es su relación con la movilidad y el consumo energético. La expansión horizontal incrementa la dependencia del transporte privado, lo que a su vez eleva el aporte de calor antropogénico y emisiones asociadas. Este fenómeno no solo intensifica el calentamiento local, sino que también contribuye indirectamente al cambio climático global, estableciendo una relación entre modelo urbano y sostenibilidad ambiental.

En ciudades interandinas de crecimiento acelerado, el *urban sprawl* puede manifestarse en la ocupación de laderas, quebradas y suelos con restricciones geomorfológicas. Este patrón no planificado altera la topografía natural y modifica los flujos de aire, generando condiciones propicias para la acumulación térmica en determinados sectores. Además, la expansión hacia zonas periurbanas reduce áreas de amortiguamiento ecológico que podrían actuar como reguladores térmicos naturales.

Desde el enfoque de planificación urbana, el debate entre ciudad compacta y ciudad dispersa adquiere relevancia climática. Si bien la compacidad puede generar concentraciones térmicas elevadas, también facilita la implementación de infraestructura verde integrada y sistemas de transporte más eficientes. Por el contrario, el crecimiento disperso amplía la superficie urbanizada, multiplicando áreas impermeables y fragmentando corredores ecológicos.

En síntesis, el *urban sprawl* representa un modelo de expansión territorial con profundas implicancias morfológicas y térmicas. Su influencia en la configuración del paisaje urbano modifica el balance energético y puede ampliar la extensión espacial de la Isla de Calor Urbana. Analizar este proceso dentro del marco teórico de la morfología urbana permite comprender cómo los patrones de crecimiento condicionan el comportamiento térmico de la ciudad y su entorno, reforzando la necesidad de estrategias de planificación orientadas hacia modelos más sostenibles y climáticamente sensibles.

2.1.3. Cañón urbano

El concepto de cañón urbano constituye uno de los pilares teóricos en la relación entre morfología urbana y comportamiento térmico. Se define como el espacio tridimensional formado por calles flanqueadas por edificaciones a ambos lados, cuya configuración geométrica condiciona la captación de radiación solar, la ventilación y la disipación del calor. Este modelo conceptual ha sido ampliamente desarrollado en la climatología urbana para explicar cómo la forma construida influye en la intensidad y persistencia de la Isla de Calor Urbana.

Desde el punto de vista geométrico, el cañón urbano se caracteriza por la relación altura-ancho (H/W), que expresa la proporción entre la altura de los edificios y el ancho de la calle. Esta relación determina la cantidad de cielo visible desde el nivel del suelo, lo que se traduce en el denominado factor de visión del cielo (Sky View Factor, SVF). Valores bajos de SVF —propios de calles estrechas con edificaciones altas— reducen la pérdida de radiación de onda larga durante la noche, favoreciendo la retención térmica (Oke, 1987).

Durante el día, la geometría del cañón urbano regula la distribución de la radiación solar directa y reflejada. Dependiendo de la orientación de la calle y del ángulo solar,

ciertas superficies reciben mayor exposición, incrementando la temperatura de fachadas y pavimentos. Las múltiples reflexiones de radiación entre las superficies verticales y horizontales pueden amplificar la energía absorbida, intensificando el calentamiento superficial.

En el periodo nocturno, el efecto del cañón urbano se vuelve aún más significativo. Las superficies edificadas liberan el calor almacenado durante el día; sin embargo, la presencia de edificaciones altas limita la emisión radiativa hacia el cielo abierto. Esta reducción del enfriamiento radiativo contribuye a mantener temperaturas más elevadas en el interior del cañón, reforzando la isla de calor atmosférica (Landsberg, 1981).

La ventilación es otro componente fundamental en la teoría del cañón urbano. La configuración espacial puede favorecer o limitar el flujo de aire, dependiendo de la orientación respecto a los vientos predominantes. Cañones urbanos mal orientados o excesivamente compactos pueden obstaculizar la circulación, reduciendo la capacidad de disipar el calor acumulado. Por el contrario, diseños urbanos que incorporan corredores de ventilación pueden mitigar parcialmente el calentamiento superficial.

En ciudades interandinas, la topografía introduce un elemento adicional en la dinámica del cañón urbano. Calles emplazadas en pendientes o orientadas hacia determinadas exposiciones solares pueden experimentar patrones térmicos diferenciados. La combinación de altitud, radiación solar intensa y morfología edificatoria puede generar microclimas particulares dentro de un mismo distrito urbano.

La medición del efecto del cañón urbano se ha fortalecido con herramientas de modelamiento y análisis espacial. Programas como Relief Visualization Toolbox y SkyHelios permiten estimar el factor de visión del cielo y simular condiciones microclimáticas a escala local. Estas aproximaciones han consolidado el concepto como variable cuantificable dentro de estudios de temperatura superficial y planificación climática urbana.

En síntesis, el cañón urbano representa una unidad morfológica fundamental para comprender la relación entre forma urbana y comportamiento térmico. Su geometría condiciona la captación solar, la ventilación y la disipación radiativa, influyendo directamente en la intensidad de la Isla de Calor Urbana. Analizar esta estructura

tridimensional permite interpretar cómo decisiones de diseño y configuración espacial pueden intensificar o mitigar el calentamiento en el entorno urbano.

2.1.4. Impermeabilización

La impermeabilización del suelo constituye uno de los procesos más determinantes en la transformación térmica del territorio urbano. Se refiere al reemplazo de superficies naturales —suelo expuesto, vegetación, áreas agrícolas— por materiales artificiales como asfalto, concreto y cubiertas edificadas que impiden la infiltración del agua y alteran el balance energético. Desde la teoría urbana y ambiental, este fenómeno es considerado un indicador directo del grado de artificialización del paisaje y un factor estructural en la formación de la Isla de Calor Urbana.

En condiciones naturales, el suelo cumple funciones esenciales de regulación hídrica y térmica. La infiltración del agua favorece procesos de evaporación y evapotranspiración que consumen energía en forma de calor latente, contribuyendo al enfriamiento del entorno. Cuando el suelo es sellado por superficies impermeables, estos procesos se reducen significativamente, incrementándose el flujo de calor sensible hacia la atmósfera (Oke, 1978). Como resultado, la energía solar absorbida se almacena en los materiales y se libera posteriormente, elevando la temperatura superficial.

Los materiales impermeables presentan generalmente bajo albedo y alta capacidad térmica. El asfalto, por ejemplo, absorbe una gran proporción de radiación solar y puede alcanzar temperaturas superficiales considerablemente superiores a las del suelo natural. El concreto, aunque puede presentar albedos variables, también acumula calor debido a su masa térmica. Esta combinación de propiedades físicas favorece la persistencia del calor durante el periodo nocturno, intensificando la dinámica de la isla de calor atmosférica.

La impermeabilización no solo modifica el comportamiento térmico, sino también la dinámica hidrológica urbana. La reducción de infiltración incrementa la escorrentía superficial, altera el microclima local y reduce la humedad disponible para procesos evaporativos. Este efecto contribuye a disminuir el enfriamiento natural del entorno urbano, reforzando el desbalance energético característico de la ICU (Landsberg, 1981).

En el marco de la morfología urbana, la impermeabilización se asocia directamente con la densidad edificatoria y el patrón de crecimiento. Procesos de expansión urbana extensiva (*urban sprawl*) amplían la superficie sellada, mientras que la densificación en áreas consolidadas incrementa la proporción de pavimentos y techos. En ambos casos, el resultado es una mayor acumulación térmica y una reducción de superficies permeables capaces de amortiguar el calentamiento.

La cuantificación de la impermeabilización se ha fortalecido con el uso de teledetección. Índices como el NDBuI, NDBaI o EBBI permiten estimar la proporción de superficies construidas o desnudas en áreas urbanas, facilitando el análisis espacial de su relación con la temperatura de superficie. Asimismo, técnicas de desmezcla espectral permiten identificar fracciones de superficie impermeable (ISA), integrando esta variable en modelos multivariados de estimación de ICU.

En ciudades interandinas, donde la radiación solar puede ser intensa y la disponibilidad hídrica estacional, la impermeabilización adquiere una relevancia adicional. La reducción de suelos naturales en contextos de topografía accidentada puede generar microambientes con mayor acumulación térmica, especialmente en zonas de reciente expansión urbana.

Desde la planificación territorial, la mitigación de la impermeabilización se ha convertido en un eje estratégico para reducir el calentamiento urbano. La implementación de pavimentos permeables, techos verdes y sistemas de drenaje sostenible representa alternativas orientadas a restaurar parcialmente la capacidad reguladora del suelo.

En síntesis, la impermeabilización es un proceso estructural que altera la función térmica y ecológica del territorio urbano. Al reducir la evapotranspiración y aumentar el almacenamiento de calor, se convierte en un factor clave en la intensificación de la temperatura de superficie y en la configuración espacial de la Isla de Calor Urbana. Comprender su papel dentro de la morfología urbana permite interpretar cómo el modelo de ocupación del suelo influye directamente en el comportamiento térmico de la ciudad.

2.1.5. Superficie impermeable (ISA)

La superficie impermeable, comúnmente denominada *Impervious Surface Area* (ISA), representa la fracción del territorio urbano cubierta por materiales artificiales que impiden la infiltración del agua y modifican sustancialmente el balance energético natural. Este concepto constituye uno de los indicadores más utilizados en estudios de climatología urbana, ya que permite cuantificar el grado de artificialización del paisaje y su relación directa con la temperatura de superficie y la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

Desde una perspectiva física, las superficies impermeables incluyen pavimentos asfálticos, concreto, cubiertas edificadas, estacionamientos y cualquier infraestructura que selle el suelo natural. Estos materiales poseen propiedades térmicas específicas: alta capacidad de absorción de radiación solar, baja reflectancia en muchos casos y elevada inercia térmica. Como consecuencia, tienden a acumular calor durante el día y liberarlo lentamente durante la noche, incrementando tanto la temperatura superficial como la temperatura del aire en su entorno inmediato (Oke, 1978; Landsberg, 1981).

El concepto de ISA trasciende la simple identificación de superficies pavimentadas. En el análisis climático urbano, la fracción de superficie impermeable se interpreta como una variable sintética que resume múltiples transformaciones territoriales: densidad edificatoria, expansión urbana, reducción de vegetación y cambios en el uso del suelo. A medida que la proporción de ISA aumenta, disminuye la capacidad del territorio para disipar energía mediante evapotranspiración, generándose un desbalance térmico característico del entorno urbano.

En términos espaciales, la distribución de ISA dentro de la ciudad no es homogénea. Sectores comerciales, industriales o de alta densidad residencial suelen presentar valores elevados de superficie impermeable, mientras que áreas con parques, jardines o suelos agrícolas conservados muestran menores proporciones. Esta heterogeneidad espacial se traduce en patrones térmicos diferenciados, donde los focos de mayor ISA suelen coincidir con mayores temperaturas de superficie.

La medición de ISA ha evolucionado significativamente con el uso de teledetección. Mediante técnicas de desmezcla espectral (*Spectral Mixture Analysis,*

SMA) es posible estimar fracciones de superficie impermeable a partir de imágenes satelitales. Este procedimiento identifica componentes espectralmente puros —como vegetación, suelo y superficies de alto y bajo albedo— y calcula su proporción en cada píxel (Roberts et al., 1998; Wu y Murray, 2003). La suma ponderada de fracciones de albedo alto y bajo suele emplearse como representación de ISA en estudios urbanos.

El análisis de ISA resulta particularmente relevante en estudios multitemporales. El incremento progresivo de esta fracción en periodos de expansión urbana permite explicar tendencias ascendentes en la temperatura de superficie. La correlación estadística entre ISA y TS ha sido documentada en múltiples investigaciones, evidenciando que el aumento de superficie impermeable constituye uno de los principales motores del calentamiento urbano.

En ciudades interandinas, donde la topografía y la altitud influyen en la distribución del tejido urbano, la expansión de ISA puede generar microclimas localizados, especialmente en áreas de reciente consolidación. La ocupación de laderas y mesetas mediante pavimentos y edificaciones incrementa la absorción térmica en contextos de alta radiación solar, reforzando la dinámica de la Isla de Calor Urbana.

Desde el enfoque de planificación sostenible, la reducción o mitigación de ISA se ha convertido en estrategia clave para enfrentar el calentamiento urbano. La incorporación de superficies permeables, techos verdes y materiales de alta reflectancia contribuye a disminuir la acumulación térmica y restaurar parcialmente funciones ecológicas del suelo.

En síntesis, la superficie impermeable (ISA) constituye un indicador estructural del grado de urbanización y un factor determinante en la configuración térmica de la ciudad. Su incremento modifica el balance energético, reduce la capacidad de enfriamiento natural y favorece la intensificación de la temperatura de superficie. Comprender su papel dentro de la morfología urbana permite establecer vínculos claros entre transformación territorial y dinámica térmica, fundamentales para el análisis aplicado del fenómeno urbano-climático.

2.1.6. Indicadores espectrales urbanos

Los indicadores espectrales urbanos constituyen herramientas fundamentales para el análisis cuantitativo de la estructura física de la ciudad mediante datos de teledetección. Se basan en la respuesta diferencial que presentan las superficies urbanas frente a distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, permitiendo identificar y caracterizar materiales, coberturas y patrones de ocupación del suelo. En el estudio de la morfología urbana y su relación con la temperatura de superficie, estos indicadores actúan como variables proxy que traducen propiedades físicas en información espacialmente explícita.

La base teórica de los indicadores espectrales radica en la reflectancia. Cada tipo de cobertura —vegetación, suelo desnudo, pavimento, edificaciones o agua— refleja y absorbe radiación de manera distinta en las bandas visible, infrarroja cercana (NIR) e infrarroja de onda corta (SWIR). Estas diferencias permiten construir índices normalizados que resaltan determinadas características del paisaje urbano. Desde esta perspectiva, la ciudad puede interpretarse como un mosaico espectral compuesto por materiales con firmas diferenciadas.

Entre los indicadores más utilizados se encuentran los índices asociados a vegetación, humedad y superficie construida. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), propuesto por Rouse et al. (1974), permite estimar la fracción de cobertura vegetal a partir de la diferencia entre reflectancia en el infrarrojo cercano y el rojo. Su relevancia en estudios urbanos radica en su relación inversa con la temperatura de superficie: áreas con mayor NDVI tienden a presentar menor acumulación térmica debido a la evapotranspiración.

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), desarrollado por Huete (1988), mejora la estimación en zonas áridas o con cobertura vegetal dispersa, reduciendo la influencia del suelo en el cálculo. Este indicador resulta especialmente útil en ciudades interandinas donde la vegetación puede presentar densidades intermedias y suelos parcialmente expuestos.

En el ámbito urbano construido, destacan índices como el NDBuI (Normalized Difference Built-up Index) y el NDBaI (Normalized Difference Bare Land Index), que utilizan combinaciones de bandas SWIR y NIR para resaltar áreas edificadas o suelos

desnudos (Zha et al., 2003; Chen et al., 2006). Estos indicadores permiten identificar zonas de alta impermeabilización, estrechamente vinculadas con la intensificación térmica. Asimismo, el EBBI (Enhanced Built-up and Bare land Index) incorpora transformaciones matemáticas adicionales para mejorar el contraste entre superficies construidas y otros tipos de cobertura (As-syakur et al., 2012).

El albedo superficial constituye otro indicador espectral clave en el análisis térmico urbano. Representa la fracción de radiación solar reflejada por una superficie y se calcula mediante combinaciones lineales de reflectancias en distintas bandas espectrales (Bastiaanssen, 2000). Superficies con bajo albedo absorben mayor cantidad de energía, incrementando la temperatura superficial. Por ello, la estimación espacial del albedo permite identificar áreas con mayor potencial de acumulación térmica.

En estudios avanzados, los indicadores espectrales se integran mediante técnicas multivariadas, como el Análisis de Componentes Principales (ACP), para sintetizar múltiples variables correlacionadas en factores explicativos del fenómeno térmico urbano. Esta integración permite comprender la interacción entre vegetación, humedad, suelo desnudo, superficies construidas y temperatura de superficie, transformando datos espectrales en información climáticamente relevante.

En ciudades de topografía compleja, como las interandinas, la corrección atmosférica, geométrica y topográfica de las imágenes resulta indispensable para garantizar la consistencia de los indicadores espectrales en análisis multitemporales. La conversión de valores digitales (DN) a reflectancia de superficie asegura que las variaciones observadas correspondan a cambios reales en la cobertura y no a diferencias en condiciones de adquisición satelital (Moran et al., 2001).

En síntesis, los indicadores espectrales urbanos constituyen herramientas esenciales para la cuantificación de la morfología urbana y su relación con la temperatura de superficie. Permiten traducir propiedades físicas del territorio en variables medibles, facilitando el análisis espacio-temporal de la transformación urbana. Su integración en modelos climáticos urbanos fortalece la comprensión de la dinámica térmica y proporciona bases técnicas sólidas para la planificación y gestión sostenible del territorio.

2.1.7. Relación forma urbana – energía

La relación entre forma urbana y energía constituye uno de los ejes conceptuales centrales para comprender la dinámica térmica de las ciudades. La configuración espacial del tejido urbano —su geometría, densidad, orientación y materialidad— condiciona la manera en que la energía solar es captada, transformada, almacenada y liberada. En este sentido, la ciudad puede interpretarse como un sistema energético complejo, donde la morfología actúa como regulador de flujos térmicos.

Desde la perspectiva del balance energético urbano, la superficie terrestre intercambia energía mediante radiación, conducción, convección y evaporación. En entornos naturales, estos flujos tienden a mantenerse en equilibrio gracias a la presencia de vegetación y suelos permeables. Sin embargo, en la ciudad, la sustitución de coberturas naturales por materiales constructivos altera significativamente este balance (Oke, 1987). La forma urbana modifica la cantidad de radiación absorbida y la eficiencia con la que esta energía es redistribuida hacia la atmósfera.

Uno de los mecanismos más estudiados es la interacción entre geometría urbana y radiación solar. La orientación de calles y manzanas determina la exposición a la radiación directa, mientras que la relación altura-ancho de los edificios influye en las múltiples reflexiones de radiación entre superficies. Estas reflexiones incrementan la absorción energética total del sistema urbano, fenómeno particularmente relevante en áreas densamente edificadas.

Asimismo, la masa térmica de los materiales urbanos desempeña un papel determinante. Superficies como concreto y asfalto presentan alta capacidad calorífica y conductividad térmica, lo que favorece el almacenamiento de energía durante el día y su liberación gradual durante la noche. Esta inercia térmica, combinada con la reducción del enfriamiento radiativo debido a la geometría urbana, explica la persistencia de temperaturas elevadas en horas nocturnas, característica distintiva de la Isla de Calor Urbana (Landsberg, 1981).

La ventilación urbana es otro componente clave en la relación forma-energía. La rugosidad superficial generada por edificaciones densas modifica la circulación del aire, pudiendo reducir la dispersión del calor acumulado. En configuraciones urbanas

compactas, la disminución del flujo de viento limita la convección y prolonga la permanencia del calor en el entorno inmediato.

En ciudades interandinas, la altitud y la intensidad de radiación solar amplifican la importancia de la forma urbana en el balance energético. La ocupación de laderas y la orientación topográfica influyen en la captación diferencial de energía, generando contrastes térmicos entre sectores con distintas exposiciones solares. En estos contextos, la morfología urbana interactúa con variables geomorfológicas, configurando microclimas específicos.

La relación entre forma urbana y energía también se vincula con el consumo energético antrópico. Edificaciones mal orientadas o con baja eficiencia térmica requieren mayor uso de climatización artificial, incrementando el calor antropogénico liberado al ambiente. Así, la forma urbana no solo regula la energía natural, sino que incide indirectamente en los flujos energéticos derivados de la actividad humana.

El análisis contemporáneo integra estas dimensiones mediante indicadores espaciales derivados de teledetección y modelos energéticos urbanos. La combinación de variables como albedo, fracción de superficie impermeable, densidad edificatoria y factor de visión del cielo permite evaluar cuantitativamente la relación entre configuración espacial y acumulación térmica.

En síntesis, la forma urbana actúa como mediadora en los intercambios energéticos del sistema ciudad-atmósfera. Su geometría, materialidad y densidad determinan la eficiencia con la que la energía es absorbida y liberada, configurando patrones térmicos específicos. Comprender esta relación resulta fundamental para interpretar la temperatura de superficie como expresión física de la estructura urbana y para orientar estrategias de planificación climáticamente sensibles.

2.2 Nociones básicas de la Morfología Urbana y TS

La comprensión de la relación entre morfología urbana y temperatura de superficie exige establecer previamente un marco conceptual claro sobre ambas variables y su interacción. La forma de la ciudad no puede analizarse únicamente desde su dimensión arquitectónica o funcional; debe entenderse también como una estructura física

que condiciona procesos energéticos y microclimáticos. De igual manera, la temperatura de superficie no es solo un dato térmico aislado, sino la manifestación directa del comportamiento energético de los materiales y coberturas que conforman el espacio urbano.

La morfología urbana se expresa a través de elementos como la trama vial, la densidad edificatoria, la volumetría, la ocupación del suelo y la distribución de espacios abiertos. Estos componentes configuran un patrón espacial que influye en la captación de radiación solar, la ventilación y la capacidad de disipación del calor. En paralelo, la temperatura de superficie representa la respuesta térmica inmediata de dichas configuraciones ante las condiciones atmosféricas y radiativas.

En este apartado se desarrollan las nociones fundamentales que permiten entender cómo la estructura física del entorno construido se vincula con el comportamiento térmico superficial. Se abordan los conceptos esenciales que definen la forma urbana desde una perspectiva ambiental, así como los principios físicos que explican la variación espacial y temporal de la temperatura de superficie. Esta base conceptual resulta indispensable para interpretar posteriormente los patrones térmicos observados y su relación con la configuración espacial de la ciudad.

Establecer estas nociones básicas no solo facilita la articulación entre teoría urbana y climatología, sino que también permite integrar herramientas de análisis espacial, indicadores espectrales y modelos energéticos en un marco coherente. De este modo, la morfología urbana y la temperatura de superficie dejan de analizarse como variables independientes y pasan a comprenderse como componentes interrelacionados dentro de un sistema urbano-climático dinámico.

2.2.1. Definición de morfología urbana

La morfología urbana puede definirse como el estudio sistemático de la forma física de la ciudad y de los procesos que configuran su estructura espacial a lo largo del tiempo. No se limita a describir edificaciones o calles de manera aislada, sino que analiza la organización del tejido urbano como un sistema compuesto por tramas, parcelas, volúmenes construidos, espacios abiertos y redes de infraestructura. Desde esta

perspectiva, la ciudad es entendida como una configuración espacial dinámica, resultado de interacciones históricas, sociales, económicas y ambientales.

En términos conceptuales, la morfología urbana aborda tres dimensiones fundamentales: la estructura planimétrica (disposición de calles y manzanas), la estructura parcelaria (subdivisión del suelo y ocupación predial) y la estructura volumétrica (altura, forma y continuidad de edificaciones). Estas dimensiones configuran patrones espaciales que determinan densidades, proporciones de vacíos y llenos, continuidad de fachadas y relaciones entre espacio público y privado.

Autores clásicos del urbanismo han sostenido que la forma urbana es el producto acumulado de procesos históricos de crecimiento y transformación. Cada etapa de desarrollo imprime características específicas en la organización del espacio, generando configuraciones que pueden ser compactas, dispersas, radiocéntricas, lineales o fragmentadas. Estas tipologías morfológicas no solo influyen en la funcionalidad urbana, sino también en su comportamiento ambiental.

Desde el enfoque de la climatología urbana, la morfología adquiere una dimensión energética. La disposición tridimensional de la ciudad condiciona la interacción entre superficie y atmósfera, modificando la captación de radiación solar, la circulación del aire y la capacidad de enfriamiento nocturno (Oke, 1987). En este sentido, la forma urbana se convierte en variable explicativa de la distribución espacial de la temperatura de superficie y de la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

La morfología urbana también puede analizarse mediante indicadores cuantitativos, tales como densidad edificatoria, índice de ocupación del suelo, relación altura-ancho de calles, fracción de superficie impermeable y factor de visión del cielo. Estos parámetros permiten traducir la forma física en variables medibles, facilitando su integración en modelos espaciales y análisis multivariados.

En ciudades intermedias y en contextos interandinos, la morfología urbana suele reflejar procesos de crecimiento radiocéntrico y expansión hacia áreas periurbanas. Este patrón genera gradientes espaciales de densidad y cobertura construida que influyen directamente en el comportamiento térmico del territorio. La ocupación de laderas, la consolidación del centro histórico y la expansión informal en la periferia son ejemplos de

cómo la forma urbana evoluciona en función de condicionantes geográficos y socioeconómicos.

En síntesis, la morfología urbana es el marco conceptual que permite interpretar la ciudad como una estructura espacial compleja, donde la forma física influye en múltiples procesos ambientales. Comprender su definición y dimensiones resulta fundamental para analizar la relación entre configuración urbana y temperatura de superficie, estableciendo la base teórica para estudios aplicados que integren geomática, indicadores espectrales y modelamiento climático urbano.

2.2.2. Dimensiones:

La morfología urbana no puede entenderse como un concepto unidimensional. Su complejidad exige descomponerla en distintas dimensiones que permitan analizar cómo la forma física de la ciudad influye en procesos ambientales y energéticos. Estas dimensiones integran aspectos geométricos, materiales, funcionales y espaciales que, en conjunto, configuran el comportamiento térmico del entorno construido.

Desde una perspectiva climática, las dimensiones de la morfología urbana adquieren especial relevancia, ya que cada una incide de manera diferenciada en la captación de radiación solar, la ventilación, la acumulación de calor y la interacción superficie–atmósfera. La estructura planimétrica determina patrones de exposición solar; la volumetría regula el intercambio radiativo; la densidad y ocupación del suelo condicionan la proporción de superficies impermeables; y la presencia de espacios abiertos y vegetación introduce mecanismos de regulación térmica.

Desarrollar estas dimensiones permite comprender que la relación entre forma urbana y temperatura de superficie no responde a un único factor, sino a la interacción simultánea de múltiples componentes espaciales. El análisis dimensional facilita la identificación de variables medibles y su posterior integración en modelos que expliquen la distribución espacial del calor urbano.

En los apartados siguientes se examinan las principales dimensiones de la morfología urbana desde un enfoque ambiental, destacando su incidencia directa en la dinámica térmica y en la configuración de microclimas urbanos.

2.2.2.1. Densidad

La densidad constituye una de las dimensiones más relevantes de la morfología urbana, ya que sintetiza la intensidad de ocupación del suelo y la concentración de población y edificaciones en un determinado espacio. En términos urbanos, puede expresarse como densidad poblacional (habitantes por unidad de superficie), densidad edificatoria (volumen construido por área) o densidad de ocupación del suelo (proporción de superficie cubierta por edificaciones). Cada una de estas variantes incide de manera directa en el comportamiento térmico de la ciudad.

Desde la perspectiva climática, la densidad influye en el balance energético urbano al modificar la proporción entre superficies impermeables y áreas vegetadas. A mayor densidad edificatoria, generalmente aumenta la cobertura construida y disminuye la presencia de suelo permeable y vegetación, reduciendo los procesos de evapotranspiración que contribuyen al enfriamiento natural. Esta relación ha sido ampliamente documentada en estudios de climatología urbana, donde se observa que sectores de alta densidad tienden a presentar mayores temperaturas de superficie (Oke, 1987).

La densidad también afecta la geometría tridimensional del espacio urbano. En áreas densamente edificadas, la proximidad entre construcciones incrementa la rugosidad superficial y altera la circulación del viento. Esta reducción en la ventilación limita la dispersión del calor acumulado, favoreciendo la persistencia de temperaturas elevadas, especialmente durante la noche. Asimismo, la menor exposición al cielo abierto —reflejada en valores bajos del factor de visión del cielo— disminuye el enfriamiento radiativo nocturno (Landsberg, 1981).

No obstante, la relación entre densidad y temperatura no es lineal ni absoluta. Ciudades compactas bien planificadas pueden integrar infraestructura verde, orientación adecuada y materiales de alta reflectancia que compensen parcialmente los efectos térmicos de la concentración edificatoria. En contraste, áreas de baja densidad pero altamente impermeabilizadas pueden experimentar temperaturas igualmente elevadas debido a la extensión de pavimentos y superficies selladas.

En contextos interandinos, la densidad urbana suele concentrarse en el núcleo central, generando un patrón radiocéntrico de crecimiento. Este modelo produce gradientes térmicos donde el centro urbano, con mayor concentración poblacional y constructiva, presenta temperaturas superiores respecto a la periferia. A medida que la ciudad se expande, la densificación de distritos colindantes modifica progresivamente la distribución espacial del calor.

La medición de la densidad puede realizarse mediante datos censales y catastros urbanos, así como a través de indicadores derivados de teledetección, como fracción de superficie impermeable, índice de urbanización o análisis volumétricos tridimensionales. Integrar estas métricas en modelos multivariados permite evaluar la contribución relativa de la densidad en la formación de la Isla de Calor Urbana.

En síntesis, la densidad urbana constituye un factor estructural que influye en la configuración térmica del territorio. Al intensificar la ocupación del suelo y modificar la geometría del espacio construido, incide en la absorción, almacenamiento y disipación de energía. Comprender su papel dentro de las dimensiones morfológicas resulta fundamental para interpretar la relación entre forma urbana y temperatura de superficie, así como para orientar estrategias de planificación climáticamente sensibles.

2.2.2.2. Compacidad

La compacidad es una dimensión morfológica que describe el grado de concentración y continuidad del tejido urbano dentro de un determinado espacio. A diferencia de la densidad —que cuantifica la intensidad de ocupación— la compacidad se refiere a la forma en que los elementos construidos se agrupan y estructuran, evaluando la proximidad entre edificaciones, la continuidad de fachadas y la relación entre vacíos y llenos en la ciudad.

En términos espaciales, una ciudad compacta presenta una trama continua, con escasa fragmentación y una alta integración entre usos del suelo. Este patrón reduce la dispersión territorial y concentra actividades en un perímetro relativamente definido. Por el contrario, configuraciones poco compactas se caracterizan por discontinuidades, vacíos intermedios y crecimiento disperso, asociados comúnmente a procesos de expansión urbana extensiva.

Desde el punto de vista energético, la compacidad influye directamente en el comportamiento térmico urbano. En entornos altamente compactos, la proximidad entre edificaciones favorece la formación de cañones urbanos con bajos valores de factor de visión del cielo (SVF), lo que reduce la pérdida de radiación de onda larga durante la noche (Oke, 1987). Esta condición contribuye a la retención de calor y a la persistencia de temperaturas elevadas en áreas centrales consolidadas.

Sin embargo, la compacidad también puede generar efectos positivos cuando se integra con planificación adecuada. Un tejido compacto facilita la implementación de transporte eficiente, reduce la necesidad de desplazamientos motorizados y puede concentrar infraestructura verde en espacios estratégicos. Desde esta perspectiva, la compacidad no es intrínsecamente negativa en términos térmicos; su impacto depende de la calidad del diseño urbano y de la integración de elementos reguladores como áreas verdes, materiales reflectantes y corredores de ventilación.

En ciudades interandinas, la compacidad suele manifestarse en núcleos históricos con tramas regulares y continuidad edificatoria, rodeados por áreas de expansión más fragmentadas. Este contraste morfológico puede generar diferencias térmicas significativas entre centro y periferia, evidenciando cómo la forma urbana condiciona la distribución espacial de la temperatura de superficie.

La compacidad puede medirse mediante indicadores como el índice de ocupación del suelo, la relación entre área construida y área total, la proximidad entre edificaciones y métricas de configuración espacial derivadas de sistemas de información geográfica. Integrar estos indicadores en análisis multivariados permite evaluar su influencia relativa en la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

En síntesis, la compacidad representa una dimensión estructural de la morfología urbana que condiciona la interacción entre superficies construidas, radiación y ventilación. Su influencia en la retención o disipación del calor depende tanto de la concentración edificatoria como de la calidad del diseño urbano. Analizar esta dimensión resulta fundamental para comprender cómo la configuración espacial de la ciudad incide en la dinámica térmica y en la formación de microclimas urbanos.

2.2.2.3. Rugosidad

La rugosidad urbana es una dimensión morfológica que describe el grado de irregularidad tridimensional de la superficie construida y su capacidad para modificar el flujo del aire en el entorno urbano. Se relaciona con la variabilidad en altura de edificaciones, la disposición volumétrica, la presencia de obstáculos y la complejidad geométrica del tejido urbano. Desde la climatología urbana, la rugosidad constituye un parámetro fundamental para comprender la interacción entre forma urbana y dinámica atmosférica.

En términos físicos, la rugosidad superficial determina la resistencia que ofrece la ciudad al movimiento del viento. Superficies lisas y homogéneas generan menor fricción, mientras que entornos con edificaciones de distintas alturas y formas producen turbulencias y alteraciones en la circulación del aire. Este fenómeno influye directamente en los procesos de convección y en la capacidad de dispersión del calor acumulado (Oke, 1987).

En áreas con alta rugosidad, el flujo de aire tiende a fragmentarse y perder velocidad, lo que puede limitar la ventilación natural. Esta reducción del intercambio de aire favorece la permanencia de masas de aire cálido en el interior del tejido urbano, intensificando la isla de calor atmosférica. Por otro lado, en determinadas configuraciones, la turbulencia generada por la rugosidad puede favorecer la mezcla vertical del aire, contribuyendo a la redistribución térmica. La influencia de esta dimensión, por tanto, depende de la escala y de la organización espacial de las edificaciones.

La rugosidad también interactúa con la geometría de los cañones urbanos. La variación en alturas y la discontinuidad volumétrica pueden alterar la incidencia solar y modificar los patrones de sombra, influyendo indirectamente en la temperatura de superficie. Además, la presencia de vegetación arbórea introduce elementos adicionales de rugosidad, que si bien aumentan la fricción aerodinámica, pueden generar enfriamiento mediante sombra y evapotranspiración (Landsberg, 1981).

En ciudades interandinas, donde la topografía presenta pendientes y variaciones altitudinales, la rugosidad urbana se combina con la morfología natural del terreno. La

ocupación de laderas mediante edificaciones escalonadas incrementa la complejidad del relieve urbano, afectando la dirección y velocidad de los vientos locales. Este factor puede generar microclimas diferenciados en sectores específicos de la ciudad.

La medición de la rugosidad urbana puede abordarse mediante indicadores como la altura promedio de edificaciones, la desviación estándar de alturas, la relación altura-ancho en cañones urbanos y modelos digitales de superficie derivados de sensores remotos. Herramientas de análisis espacial permiten estimar parámetros aerodinámicos que posteriormente se integran en modelos climáticos urbanos.

En síntesis, la rugosidad representa una dimensión clave para entender cómo la estructura tridimensional de la ciudad condiciona la dinámica del aire y la redistribución térmica. Al modificar la ventilación y la mezcla atmosférica, influye en la intensidad y persistencia de la temperatura urbana. Su análisis complementa las dimensiones de densidad y compacidad, proporcionando una visión más integral de la relación entre forma urbana y comportamiento energético del sistema ciudad-atmósfera.

2.2.2.4. SVF

El Factor de Visión del Cielo, conocido por sus siglas en inglés como *Sky View Factor* (SVF), es un parámetro geométrico que expresa la fracción del cielo visible desde un punto determinado dentro del entorno urbano. Se trata de un indicador clave en la climatología urbana, ya que sintetiza la relación entre la forma tridimensional de la ciudad y los intercambios radiativos entre superficie y atmósfera. Su valor oscila entre 0 y 1: valores cercanos a 1 indican espacios abiertos con amplia exposición al cielo, mientras que valores próximos a 0 corresponden a espacios confinados por edificaciones altas y calles estrechas.

El SVF se encuentra estrechamente vinculado al concepto de cañón urbano. En calles donde la relación altura-ancho es elevada, el campo visual hacia el cielo se reduce, disminuyendo la capacidad de enfriamiento radiativo nocturno. Durante la noche, las superficies urbanas liberan la energía almacenada en forma de radiación de onda larga; sin embargo, en entornos con bajo SVF, parte de esta radiación es interceptada y reemitida por las fachadas circundantes, limitando la pérdida neta de calor (Oke, 1987). Esta

dinámica contribuye a la persistencia de temperaturas elevadas en áreas densamente edificadas.

En el periodo diurno, el SVF también influye en la distribución de la radiación solar directa y difusa. Espacios con alto factor de visión del cielo reciben mayor radiación directa, incrementando potencialmente la temperatura superficial. No obstante, estos mismos espacios permiten mayor ventilación y enfriamiento nocturno, lo que puede equilibrar el efecto térmico. En contraste, entornos con bajo SVF presentan mayor sombreado durante ciertas horas del día, pero tienden a acumular calor debido a la reducción del intercambio radiativo con la atmósfera.

El SVF no solo depende de la altura de edificaciones, sino también de su disposición espacial y orientación. La configuración del tejido urbano, la continuidad de fachadas y la presencia de elementos verticales —como árboles o infraestructura— modifican la porción de cielo visible. En ciudades con crecimiento radiocéntrico y densificación progresiva, el SVF suele disminuir en zonas centrales, reforzando la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

En contextos interandinos, la topografía introduce variaciones adicionales en el SVF. La ocupación de laderas puede alterar el ángulo de exposición al cielo, generando diferencias microclimáticas incluso dentro de un mismo distrito urbano. Asimismo, la altitud y la intensidad de radiación solar potencian la relevancia de este parámetro en la regulación térmica.

La estimación del SVF puede realizarse mediante modelos digitales de elevación y superficie, utilizando herramientas especializadas como Relief Visualization Toolbox o SkyHelios. Estos métodos permiten simular la obstrucción del cielo y generar mapas espaciales del factor de visión, integrándolo posteriormente en análisis multivariados junto con variables como temperatura de superficie, densidad y superficie impermeable.

En síntesis, el Factor de Visión del Cielo constituye una dimensión geométrica esencial para comprender la interacción entre forma urbana y energía. Al regular el intercambio radiativo y la ventilación, el SVF influye directamente en la intensidad térmica y en la dinámica diurna y nocturna del entorno urbano. Su análisis aporta una

perspectiva tridimensional al estudio de la morfología urbana y su impacto en la temperatura de superficie.

2.2.3. Temperatura superficial (TS)

La temperatura superficial (TS) se refiere a la temperatura radiativa de la capa más externa de la superficie terrestre, ya sea natural o construida. A diferencia de la temperatura del aire, que se mide a determinada altura sobre el suelo y refleja el estado térmico de la masa atmosférica, la TS expresa la energía térmica emitida directamente por los materiales que componen el territorio. En el contexto urbano, esta variable adquiere especial relevancia, ya que permite identificar zonas de acumulación de calor asociadas a la morfología y a la composición del tejido construido.

Desde el punto de vista físico, la TS depende del balance energético superficial, que integra radiación solar incidente, radiación reflejada (albedo), radiación emitida en onda larga, flujos de calor sensible y latente, y conducción hacia capas inferiores. En superficies naturales con cobertura vegetal, parte de la energía absorbida se destina a procesos de evapotranspiración, reduciendo la temperatura efectiva. En cambio, en superficies impermeables como asfalto o concreto, la energía se almacena y se transforma principalmente en calor sensible, elevando la temperatura superficial (Oke, 1987).

La temperatura superficial presenta una marcada variabilidad espacial dentro del entorno urbano. Sectores con alta densidad edificatoria y elevada fracción de superficie impermeable tienden a registrar valores más altos de TS, mientras que áreas con mayor cobertura vegetal o presencia de cuerpos de agua muestran temperaturas más moderadas. Esta heterogeneidad espacial convierte a la TS en un indicador clave para delimitar focos térmicos y analizar la distribución de la Isla de Calor Urbana.

La dinámica temporal de la TS también es significativa. Durante el día, la radiación solar incrementa rápidamente la temperatura de pavimentos y cubiertas; sin embargo, en el periodo nocturno, la liberación gradual del calor almacenado puede mantener valores elevados en zonas densamente urbanizadas. Esta inercia térmica está relacionada con la capacidad calorífica y conductividad de los materiales urbanos, así como con la geometría que condiciona el enfriamiento radiativo (Landsberg, 1981).

La estimación de la temperatura superficial se ha consolidado mediante técnicas de teledetección térmica. Sensores como Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI/TIRS permiten convertir valores digitales (DN) en radiancia y posteriormente en temperatura de brillo, incorporando correcciones por emisividad y vapor de agua atmosférico. Este procedimiento posibilita generar mapas espaciales de TS con resolución adecuada para estudios urbanos multitemporales. La incorporación de emisividad basada en índices como el NDVI mejora la precisión de las estimaciones, ajustando el cálculo según el tipo de cobertura presente.

En ciudades interandinas, la TS puede verse influida adicionalmente por factores topográficos y altitudinales. La orientación de laderas, la intensidad de radiación solar y la variabilidad estacional en humedad atmosférica contribuyen a generar patrones térmicos diferenciados dentro de la misma ciudad. Estas condiciones hacen indispensable integrar variables geomorfológicas y meteorológicas en el análisis de la temperatura superficial.

Desde la perspectiva metodológica, la TS no solo se analiza como variable independiente, sino que se integra en modelos multivariados junto con indicadores espectrales urbanos, fracción de superficie impermeable y parámetros morfológicos. Esta integración permite explicar su comportamiento como resultado de la interacción entre forma urbana y procesos energéticos.

En síntesis, la temperatura superficial constituye la expresión térmica directa del paisaje urbano y un componente esencial para evaluar la intensidad y distribución espacial del calor en la ciudad. Su análisis permite identificar gradientes térmicos, evaluar tendencias temporales y comprender cómo la configuración morfológica condiciona el comportamiento energético del territorio urbano.

2.2.4. Diferencia TS vs temperatura del aire

La distinción entre temperatura superficial (TS) y temperatura del aire es fundamental en estudios de climatología urbana, ya que ambas variables describen procesos térmicos distintos dentro del sistema ciudad–atmósfera. Aunque están relacionadas, no son equivalentes ni responden a los mismos mecanismos físicos.

La temperatura superficial representa la energía térmica emitida directamente por la capa externa de los materiales que conforman el territorio —suelo, pavimentos, techos, vegetación— y se mide a partir de radiación infrarroja térmica. Es, por tanto, una variable radiativa que expresa el estado térmico inmediato de las superficies. En cambio, la temperatura del aire corresponde al estado térmico de la masa atmosférica a cierta altura sobre el suelo, generalmente medida a 1.5 o 2 metros, bajo condiciones estandarizadas de exposición.

Desde el punto de vista físico, la TS responde con mayor rapidez a los cambios en radiación solar. Durante el día, superficies impermeables como asfalto o concreto pueden alcanzar temperaturas considerablemente superiores a la temperatura del aire, debido a su alta capacidad de absorción y almacenamiento de energía. En contraste, la temperatura del aire refleja un proceso de integración térmica más complejo, donde intervienen convección, mezcla atmosférica, humedad y circulación del viento (Oke, 1987).

En el periodo nocturno, la relación entre ambas variables también presenta diferencias. La superficie comienza a liberar el calor acumulado en forma de radiación de onda larga, proceso que influye en el calentamiento del aire cercano. Sin embargo, en entornos con baja ventilación o con reducido factor de visión del cielo, la pérdida radiativa se limita, manteniendo temperaturas superficiales y del aire relativamente elevadas. Aun así, la TS suele presentar mayores contrastes espaciales que la temperatura atmosférica, debido a la heterogeneidad de materiales y coberturas urbanas.

La Isla de Calor Urbana puede manifestarse tanto en términos de temperatura del aire (ICU atmosférica) como de temperatura superficial (ICU superficial). La primera se refiere a la diferencia térmica entre el aire urbano y el rural; la segunda, a la diferencia en radiación térmica emitida por superficies urbanas respecto a su entorno natural. Si bien ambas están interrelacionadas, la ICU superficial suele presentar mayor intensidad y variabilidad espacial, siendo detectada con precisión mediante sensores remotos (Landsberg, 1981).

En términos metodológicos, la temperatura del aire se obtiene mediante estaciones meteorológicas, las cuales ofrecen series temporales continuas pero con limitada cobertura espacial. Por su parte, la TS se estima a partir de imágenes satelitales térmicas,

permitiendo generar mapas detallados de distribución espacial en distintos periodos. Esta diferencia en escala y resolución explica por qué la TS es ampliamente utilizada en estudios de análisis espacio-temporal de fenómenos térmicos urbanos.

En ciudades interandinas, donde la topografía y la radiación solar influyen significativamente en el comportamiento térmico, la discrepancia entre TS y temperatura del aire puede ser aún más marcada. Sectores con alta exposición solar pueden presentar elevadas temperaturas superficiales sin que ello implique incrementos proporcionales en la temperatura atmosférica general.

En síntesis, la temperatura superficial y la temperatura del aire representan dos dimensiones complementarias del sistema térmico urbano. Mientras la TS refleja la respuesta inmediata de los materiales al balance energético, la temperatura del aire expresa la integración atmosférica de esos intercambios. Diferenciarlas conceptualmente permite interpretar con mayor precisión la dinámica de la Isla de Calor Urbana y comprender la interacción entre forma urbana, superficie y atmósfera.

2.2.5. Índices urbanos (NDBI, EBBI, UI)

Los índices urbanos derivados de teledetección constituyen herramientas cuantitativas fundamentales para identificar, delimitar y caracterizar áreas construidas dentro del entorno urbano. Entre los más utilizados se encuentran el NDBI (Normalized Difference Built-up Index), el EBBI (Enhanced Built-up and Bare land Index) y el UI (Urban Index). Estos indicadores permiten estimar la presencia e intensidad de superficies edificadas e impermeables a partir de la respuesta espectral registrada por sensores satelitales, integrando información relevante para el análisis de la morfología urbana y su relación con la temperatura superficial.

El NDBI se basa en la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Las superficies construidas tienden a reflejar más energía en el SWIR que en el NIR, lo que permite diferenciarlas de la vegetación, que presenta un comportamiento espectral opuesto (Zha et al., 2003). Matemáticamente, el índice resalta valores positivos en áreas edificadas o con suelo desnudo, mientras que valores negativos corresponden a coberturas vegetales. Su

simplicidad y eficacia lo han convertido en uno de los indicadores más empleados para mapear expansión urbana y evaluar procesos de impermeabilización.

El EBBI fue desarrollado con el propósito de mejorar la discriminación entre superficies construidas y otras coberturas espectralmente similares, como suelos desnudos. Este índice incorpora transformaciones matemáticas adicionales —incluyendo una función raíz— para aumentar el contraste entre materiales urbanos y el entorno natural (As-syakur et al., 2012). Al integrar información de bandas visibles, NIR y SWIR, el EBBI permite una representación más robusta de áreas edificadas, especialmente en ciudades donde la heterogeneidad espectral dificulta la clasificación tradicional.

Por su parte, el Urban Index (UI) combina relaciones espectrales diseñadas para resaltar zonas urbanizadas frente a áreas vegetadas o cuerpos de agua (Kawamura et al., 1996). Este índice sintetiza la intensidad de urbanización a partir de la diferencia entre bandas sensibles a la reflectancia de materiales artificiales y aquellas asociadas a vegetación. El UI resulta particularmente útil en estudios comparativos multitemporales, donde se busca evaluar cambios en el grado de urbanización a lo largo del tiempo.

Desde la perspectiva climática, estos índices no solo identifican superficies construidas, sino que actúan como variables explicativas del comportamiento térmico urbano. Diversos estudios han demostrado una correlación positiva entre valores elevados de NDBI, EBBI o UI y mayores temperaturas superficiales, debido a la mayor proporción de superficies impermeables y a la reducción de cobertura vegetal (Oke, 1987). Así, estos indicadores se integran frecuentemente en modelos multivariados para estimar la intensidad de la Isla de Calor Urbana.

En análisis espacio-temporales, la aplicación consistente de estos índices requiere correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas que aseguren la comparabilidad entre imágenes de distintos años. La conversión de valores digitales a reflectancia de superficie permite que las variaciones observadas respondan a cambios reales en la cobertura urbana y no a diferencias en condiciones de adquisición satelital.

En ciudades interandinas, donde la topografía y la variabilidad de coberturas pueden generar firmas espectrales complejas, el uso combinado de NDBI, EBBI y UI mejora la precisión en la delimitación de áreas urbanas. La integración de estos índices

con fracción de superficie impermeable (ISA), albedo y temperatura superficial fortalece la interpretación de la relación entre morfología urbana y comportamiento térmico.

En síntesis, los índices urbanos NDBI, EBBI y UI constituyen instrumentos clave para cuantificar la estructura construida de la ciudad mediante teledetección. Su aplicación permite identificar patrones de urbanización, analizar procesos de expansión territorial y evaluar su influencia en la dinámica térmica urbana, consolidando un enfoque empírico que vincula forma urbana y energía.

2.2.6. Desmezcla espectral

La desmezcla espectral es una técnica de análisis aplicada en teledetección que permite estimar la proporción de diferentes coberturas presentes dentro de un mismo píxel satelital. En entornos urbanos, donde la heterogeneidad espacial es elevada y un solo píxel puede contener simultáneamente vegetación, suelo desnudo y superficies construidas, esta metodología resulta especialmente útil para obtener información más precisa sobre la composición real del territorio.

El principio fundamental de la desmezcla espectral se basa en que la reflectancia registrada por el sensor es el resultado de una combinación lineal de las firmas espectrales de los materiales presentes en la superficie. Cada material —denominado *endmember*— posee una respuesta espectral característica en distintas bandas del espectro electromagnético. Mediante modelos matemáticos, es posible estimar la fracción de cada endmember dentro del píxel, descomponiendo la señal total en sus componentes constitutivos (Roberts et al., 1998).

En estudios urbanos, los endmembers más comúnmente utilizados incluyen vegetación, suelo desnudo, superficies de alto albedo y superficies de bajo albedo. Estas últimas suelen asociarse a materiales impermeables como asfalto o concreto oscuro, mientras que las de alto albedo pueden corresponder a techos claros o pavimentos reflectantes. La suma ponderada de las fracciones de bajo y alto albedo permite aproximar la proporción de superficie impermeable (ISA), variable clave en la evaluación de la dinámica térmica urbana (Wu y Murray, 2003).

El modelo de mezcla lineal asume que la reflectancia observada es una combinación proporcional de los materiales presentes, más un término residual que representa el error no modelado. Para mejorar la precisión del análisis, suele emplearse la transformación de Mínima Fracción de Ruido (MNF), que reorganiza la información espectral maximizando la relación señal-ruido y facilitando la identificación de endmembers espectralmente puros (Green et al., 1988). Esta etapa es crucial en áreas urbanas complejas, donde la variabilidad de materiales puede dificultar la clasificación directa.

Desde el punto de vista climático, la desmezcla espectral aporta una ventaja significativa frente a los índices tradicionales, ya que no solo identifica la presencia de superficies construidas, sino que cuantifica su proporción exacta en cada unidad espacial. Esta precisión permite establecer correlaciones más robustas entre fracción de superficie impermeable y temperatura superficial, fortaleciendo los modelos explicativos de la Isla de Calor Urbana.

En contextos interandinos, donde la topografía y la diversidad de coberturas generan variaciones espectrales complejas, la desmezcla espectral facilita la discriminación entre áreas urbanas, suelos naturales y vegetación dispersa. Además, su aplicación en análisis multitemporales permite evaluar la evolución de la superficie impermeable a lo largo de distintos periodos, proporcionando evidencia empírica sobre procesos de expansión urbana y su impacto térmico.

En síntesis, la desmezcla espectral es una herramienta metodológica avanzada que permite descomponer la señal satelital en fracciones representativas de los materiales urbanos. Su aplicación en estudios de morfología urbana y temperatura superficial mejora la precisión en la estimación de superficie impermeable y fortalece la comprensión de la relación entre transformación territorial y dinámica energética del entorno urbano.

2.2.7. Relación estadística TS–morfología

La relación entre temperatura superficial (TS) y morfología urbana no se limita a una observación cualitativa de patrones espaciales; requiere sustentarse en análisis estadísticos que permitan cuantificar el grado de asociación entre variables térmicas y parámetros morfológicos. En este sentido, la aproximación estadística constituye un

puente metodológico entre teoría urbana y evidencia empírica, permitiendo explicar cómo la configuración espacial influye en el comportamiento energético del territorio.

Desde un enfoque analítico, la TS puede considerarse variable dependiente, mientras que indicadores morfológicos —como densidad edificatoria, fracción de superficie impermeable (ISA), índices urbanos (NDBI, EBBI, UI), albedo o factor de visión del cielo (SVF)— actúan como variables independientes. La hipótesis subyacente sostiene que cambios en la estructura urbana generan variaciones sistemáticas en la temperatura superficial.

Las primeras aproximaciones suelen basarse en análisis de correlación lineal, que permiten identificar la fuerza y dirección de la relación entre dos variables. En estudios urbanos, se ha observado generalmente una correlación positiva entre TS y superficie impermeable o índices de urbanización, y una correlación negativa entre TS y cobertura vegetal (Oke, 1987). Estos resultados reflejan la lógica física del balance energético: materiales impermeables incrementan la acumulación térmica, mientras que la vegetación introduce mecanismos de enfriamiento por evapotranspiración.

No obstante, la relación entre TS y morfología raramente es unidimensional. Las variables urbanas suelen estar correlacionadas entre sí, generando redundancias y dificultando la interpretación directa. Por ello, se emplean técnicas multivariadas como el Análisis de Componentes Principales (ACP), que permiten reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y sintetizar la información en factores explicativos. Este procedimiento facilita identificar combinaciones lineales de variables que concentran la mayor parte de la varianza total, integrando múltiples dimensiones morfológicas en indicadores sintéticos.

En análisis espacio-temporales, también se aplican pruebas de tendencia como el test no paramétrico de Mann-Kendall y la estimación de la pendiente Theil-Sen, que permiten evaluar si la TS presenta cambios significativos a lo largo del tiempo en función de transformaciones morfológicas. Estos métodos resultan particularmente útiles cuando se dispone de series multitemporales derivadas de imágenes satelitales.

La incorporación de técnicas geoestadísticas amplía el análisis al considerar la dependencia espacial de los datos. Métodos de interpolación y análisis de autocorrelación

espacial permiten identificar clusters térmicos y evaluar si la distribución de la TS responde a patrones estructurales de la forma urbana.

En ciudades interandinas, donde la topografía y la altitud influyen en el comportamiento térmico, el análisis estadístico debe integrar variables geomorfológicas y meteorológicas para evitar interpretaciones simplificadas. La relación TS–morfología se entiende así como el resultado de múltiples interacciones, cuya cuantificación requiere enfoques integrales.

En síntesis, la relación estadística entre temperatura superficial y morfología urbana constituye un elemento central para validar empíricamente las hipótesis teóricas sobre la Isla de Calor Urbana. Mediante técnicas de correlación, análisis multivariado y pruebas de tendencia, es posible demostrar cómo la transformación espacial de la ciudad se traduce en modificaciones cuantificables del comportamiento térmico. Esta articulación entre forma urbana y evidencia estadística fortalece la comprensión científica del fenómeno urbano-climático y sienta las bases para el análisis aplicado en el caso de estudio.

La morfología urbana, entendida como la configuración espacial y tridimensional del tejido construido, constituye un elemento estructural en la dinámica térmica de las ciudades. A lo largo del presente capítulo se ha demostrado que la forma urbana no es un componente neutro del territorio, sino un factor determinante en la captación, almacenamiento y redistribución de energía. Densidad, compacidad, rugosidad, factor de visión del cielo e impermeabilización son dimensiones que, en conjunto, modelan el comportamiento térmico superficial.

La temperatura de superficie, por su parte, se ha analizado como la expresión física inmediata del balance energético urbano. Su variabilidad espacial refleja la heterogeneidad morfológica de la ciudad y evidencia cómo las transformaciones en el uso del suelo, la expansión urbana y la intensificación constructiva generan patrones térmicos diferenciados. La distinción conceptual entre temperatura superficial y temperatura del aire ha permitido comprender que la primera constituye un indicador más sensible y espacialmente detallado para identificar focos de acumulación térmica.

La incorporación de índices urbanos como NDBI, EBBI y UI, junto con técnicas avanzadas como la desmezcla espectral, ha reforzado el enfoque cuantitativo de la morfología urbana. Estas herramientas permiten traducir la forma física de la ciudad en variables medibles, integrables en modelos estadísticos que explican la relación entre estructura urbana y comportamiento térmico. La evidencia empírica muestra que la fracción de superficie impermeable, la reducción de cobertura vegetal y la configuración geométrica del tejido urbano mantienen asociaciones significativas con la temperatura superficial.

Asimismo, el análisis estadístico de la relación TS–morfología consolida la articulación entre teoría y evidencia. La aplicación de técnicas multivariadas y pruebas de tendencia permite identificar patrones consistentes en el tiempo y el espacio, demostrando que la transformación territorial se traduce en modificaciones cuantificables del microclima urbano.

En conjunto, este capítulo ha establecido las bases conceptuales y metodológicas para comprender cómo la forma urbana condiciona la dinámica térmica de la ciudad. La integración de dimensiones morfológicas, indicadores espectrales y análisis estadísticos proporciona un marco sólido para abordar el estudio aplicado del fenómeno en un contexto específico. De esta manera, la morfología urbana y la temperatura de superficie se consolidan como variables interdependientes dentro de un sistema urbano-climático complejo, cuya comprensión resulta indispensable para la planificación sostenible y la mitigación del calentamiento urbano.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: DINÁMICA DEL ICU EN AYACUCHO (1986–2016)

El análisis teórico desarrollado en los capítulos anteriores encuentra su validación y contraste en la aplicación empírica a un territorio específico. La ciudad de Ayacucho, ubicada en la vertiente oriental de la cordillera andina y caracterizada por un crecimiento urbano progresivo en las últimas décadas, constituye un escenario pertinente para examinar la dinámica de la Isla de Calor Urbana en un contexto interandino.

Durante el periodo comprendido entre 1986 y 2016, la ciudad experimentó transformaciones significativas en su estructura espacial: expansión del área urbanizada, incremento de la densidad poblacional, consolidación de nuevos distritos y sustitución de superficies naturales por materiales impermeables. Estos cambios morfológicos modificaron el balance energético local, generando condiciones propicias para la formación y consolidación de focos térmicos urbanos.

El estudio multitemporal permite evaluar no solo la existencia del fenómeno, sino también su evolución espacial y temporal. La integración de imágenes satelitales Landsat, indicadores biofísicos, parámetros urbanos y datos meteorológicos posibilita construir un índice sintético de Isla de Calor Urbana y mapear su distribución en distintos momentos históricos. Este enfoque ofrece una visión comparativa que evidencia tendencias, intensidades y patrones de concentración térmica en el tejido urbano.

El caso de Ayacucho reviste especial interés debido a sus condiciones geográficas particulares: altitud superior a los 2,700 m s.n.m., clima de estepa fría y marcada estacionalidad seca. En este contexto, la interacción entre radiación solar intensa, topografía y expansión urbana genera dinámicas térmicas diferenciadas respecto a ciudades de llanura o zonas costeras. Analizar el fenómeno en este entorno contribuye a ampliar el conocimiento sobre la Isla de Calor Urbana en ciudades intermedias de la sierra peruana.

Este capítulo desarrolla la metodología aplicada para la estimación de la temperatura superficial y la construcción del índice de ICU, así como la caracterización de su comportamiento espacio-temporal. A través del análisis estadístico y la integración de variables morfológicas, se examina cómo la transformación territorial de Ayacucho entre 1986 y 2016 se traduce en modificaciones térmicas medibles y espacialmente identificables. De este modo, la evidencia empírica complementa el marco conceptual previo y permite comprender la dinámica concreta del fenómeno en una ciudad andina en proceso de expansión.

3.1. Contexto territorial

El análisis de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho no responde únicamente a la disponibilidad de información satelital o a la delimitación administrativa de su área urbana, sino a la convergencia de condiciones territoriales, climáticas y urbanas que la convierten en un caso particularmente relevante. Se trata de una ciudad intermedia emplazada a más de 2,700 metros sobre el nivel del mar, situada en una penillanura disectada con presencia de laderas, quebradas y variaciones altitudinales que influyen directamente en la distribución de radiación solar y en la circulación atmosférica local. Estas características geográficas configuran un escenario donde pequeñas modificaciones en la cobertura del suelo pueden generar efectos térmicos perceptibles.

Desde el punto de vista climático, Ayacucho presenta un régimen de estepa fría (BSk), con atmósfera relativamente seca, marcada estacionalidad y alta incidencia de radiación solar, especialmente durante los meses secos. La combinación de baja humedad atmosférica y elevada insolación favorece un calentamiento eficiente de las superficies expuestas. En contextos donde la evapotranspiración natural es limitada por la estacionalidad, la sustitución de coberturas vegetales por superficies impermeables intensifica el flujo de calor sensible, generando condiciones propicias para la formación de gradientes térmicos urbanos.

El proceso de urbanización experimentado entre 1986 y 2016 constituye un segundo elemento determinante. La ciudad ha mostrado un crecimiento radiocéntrico, con consolidación progresiva del núcleo central y expansión hacia distritos periféricos como San Juan Bautista, Andrés Avelino Cáceres, Carmen Alto y Jesús Nazareno. Este crecimiento implicó la transformación de áreas agrícolas y espacios abiertos en

superficies edificadas y pavimentadas, incrementando la fracción de suelo impermeable y reduciendo la cobertura vegetal. La densificación poblacional y la expansión horizontal alteraron la configuración morfológica del territorio, modificando el balance energético local.

La relevancia del caso radica también en la escala urbana. Ayacucho no es una megaciudad ni un centro metropolitano de gran magnitud; es una ciudad intermedia andina donde los procesos de transformación pueden analizarse con mayor claridad en términos de causa–efecto. En este contexto, la identificación de la Isla de Calor Urbana adquiere importancia estratégica, ya que permite anticipar impactos térmicos antes de que alcancen niveles críticos asociados a grandes conglomerados urbanos.

La interacción entre territorio, urbanización y clima constituye el eje articulador de este caso de estudio. La topografía condiciona la orientación y exposición solar; el clima seco potencia el calentamiento superficial; y la expansión urbana incrementa la absorción y almacenamiento de energía. Esta convergencia genera un sistema urbano-climático sensible a las transformaciones espaciales, donde la variación de la temperatura superficial puede interpretarse como respuesta directa a los cambios morfológicos.

En consecuencia, Ayacucho representa un laboratorio territorial idóneo para evaluar la dinámica de la Isla de Calor Urbana en ciudades interandinas. Su localización geográfica, régimen climático y proceso de urbanización reciente configuran condiciones estructurales que justifican el análisis multitemporal del fenómeno, permitiendo comprender cómo la transformación del territorio se traduce en modificaciones térmicas cuantificables.

3.1.1. Localización geográfica

La ciudad de Ayacucho se localiza en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, dentro de la provincia de Huamanga, región Ayacucho, en la sierra sur-central del Perú. Su emplazamiento corresponde a un entorno interandino, caracterizado por valles intramontanos rodeados de relieves elevados que configuran una topografía compleja y condicionan la dinámica atmosférica local.

El área urbana objeto de estudio se sitúa a una altitud promedio de 2,774 m s.n.m., con coordenadas geográficas aproximadas de 13°08’51’’ de latitud sur y 74°13’06’’ de longitud oeste, bajo el sistema de proyección UTM, huso 18 sur, datum WGS 84. Esta posición altitudinal determina condiciones específicas de radiación, presión atmosférica y comportamiento térmico superficial, dado que en altitudes elevadas la atmósfera presenta menor densidad y menor capacidad de retención de humedad, favoreciendo mayores amplitudes térmicas diurnas (Barry & Chorley, 2010).

Ayacucho se encuentra enclavada en un valle interandino rodeado por colinas y laderas que forman parte de una penillanura disectada. Esta configuración geomorfológica genera un espacio relativamente contenido, donde el relieve circundante actúa como barrera parcial para la circulación horizontal del aire. En términos climáticos, la influencia orográfica es determinante, ya que condiciona la dirección y velocidad de los vientos, así como los procesos de mezcla atmosférica y disipación térmica (Oke, 1987).

La condición interandina implica que la ciudad no dispone de amplias llanuras abiertas que faciliten la ventilación natural continua. Por el contrario, la topografía puede favorecer fenómenos de acumulación térmica en periodos de estabilidad atmosférica, especialmente durante los meses secos, cuando la radiación solar es intensa y la cobertura nubosa es reducida. Esta limitación en la ventilación natural constituye un factor estructural que puede potenciar la formación de gradientes térmicos urbanos y reforzar la persistencia de la Isla de Calor Urbana (Landsberg, 1981).

Además, la orientación del valle y la disposición del relieve influyen en la exposición diferencial a la radiación solar, generando microclimas locales dentro del área urbana. Sectores con mayor exposición solar directa pueden experimentar mayores temperaturas superficiales, mientras que zonas parcialmente sombreadas por el relieve presentan comportamientos térmicos distintos. Esta interacción entre orografía y urbanización refuerza la necesidad de analizar el fenómeno térmico desde una perspectiva territorial integrada.

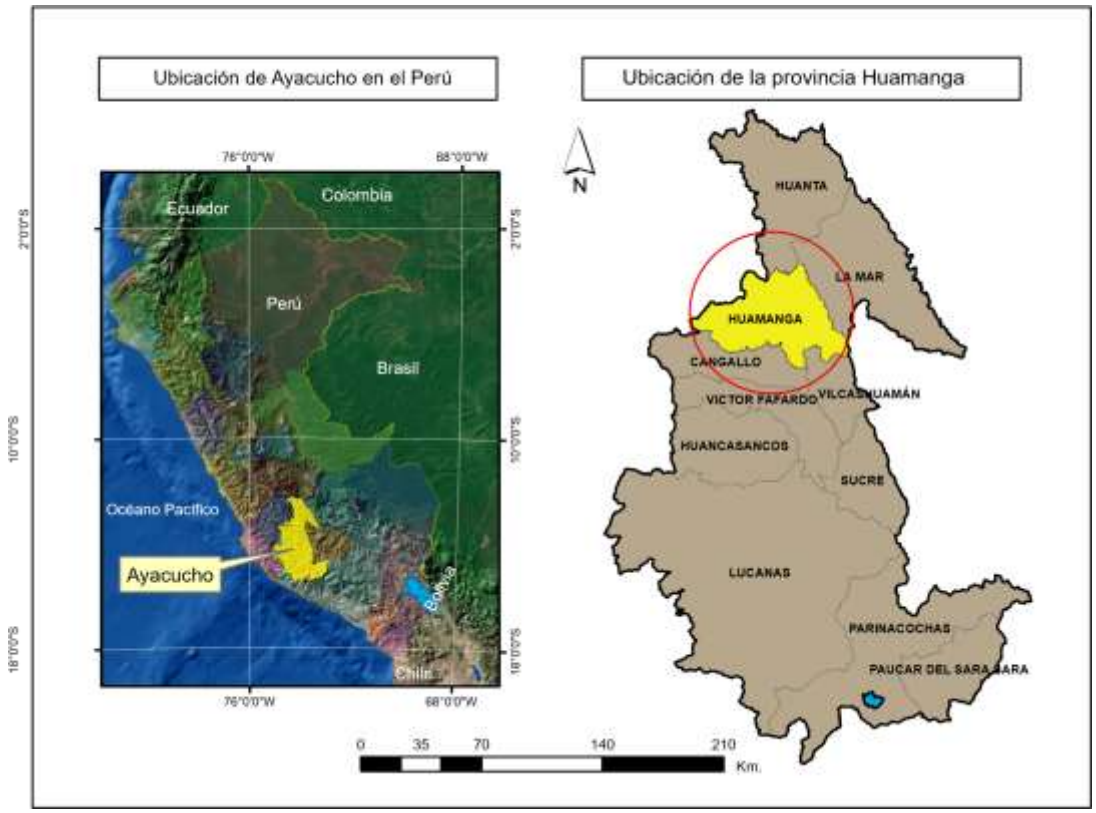


Ilustración 3.1: Ubicación del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

La representación cartográfica permite visualizar cómo la ciudad se integra en el contexto regional andino, evidenciando su localización en un valle intermontano y su relación con las unidades fisiográficas circundantes. Esta condición geográfica, lejos de ser un elemento descriptivo secundario, constituye una variable estructural que influye en la dinámica microclimática y en la configuración espacial de la temperatura superficial, justificando su consideración como parte fundamental del análisis del fenómeno de Isla de Calor Urbana en Ayacucho.

3.1.2. Configuración distrital y expansión urbana

El área urbana de Ayacucho está conformada por los distritos de Ayacucho, San Juan Bautista, Jesús Nazareno, Andrés Avelino Cáceres y Carmen Alto, todos pertenecientes a la provincia de Huamanga. Estos distritos constituyen un continuo urbano funcional que, a lo largo de las últimas décadas, ha experimentado transformaciones significativas en términos de ocupación territorial, densificación y expansión espacial.

Históricamente, el núcleo urbano se consolidó en el distrito de Ayacucho, donde se concentra el centro histórico, las principales actividades administrativas y comerciales, y la mayor infraestructura de servicios. A partir de este núcleo central, el crecimiento se ha desarrollado bajo un patrón radiocéntrico, extendiéndose progresivamente hacia distritos colindantes. Este modelo de expansión ha generado una estructura donde la mayor intensidad constructiva y densidad poblacional se localiza en el centro, disminuyendo gradualmente hacia la periferia.

Desde finales del siglo XX y con mayor intensidad después del año 2005, la ciudad experimentó un proceso de expansión periférica asociado al incremento poblacional y a la demanda de suelo urbano. Distritos como San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres registraron aumentos significativos en densidad, consolidándose como nuevas áreas residenciales. Este proceso implicó la transformación de suelos agrícolas y áreas abiertas en superficies edificadas, incrementando la fracción de suelo impermeable y modificando la estructura morfológica del territorio.

La densificación post-2005 representa un punto de inflexión en la dinámica urbana. El aumento de habitantes por kilómetro cuadrado y la consolidación de nuevas urbanizaciones generaron cambios en la compacidad del tejido urbano, alterando la relación entre vacíos y llenos, y configurando nuevas centralidades. Este proceso no solo modificó la organización espacial, sino también el balance energético urbano, al incrementar la proporción de materiales constructivos con alta capacidad térmica.

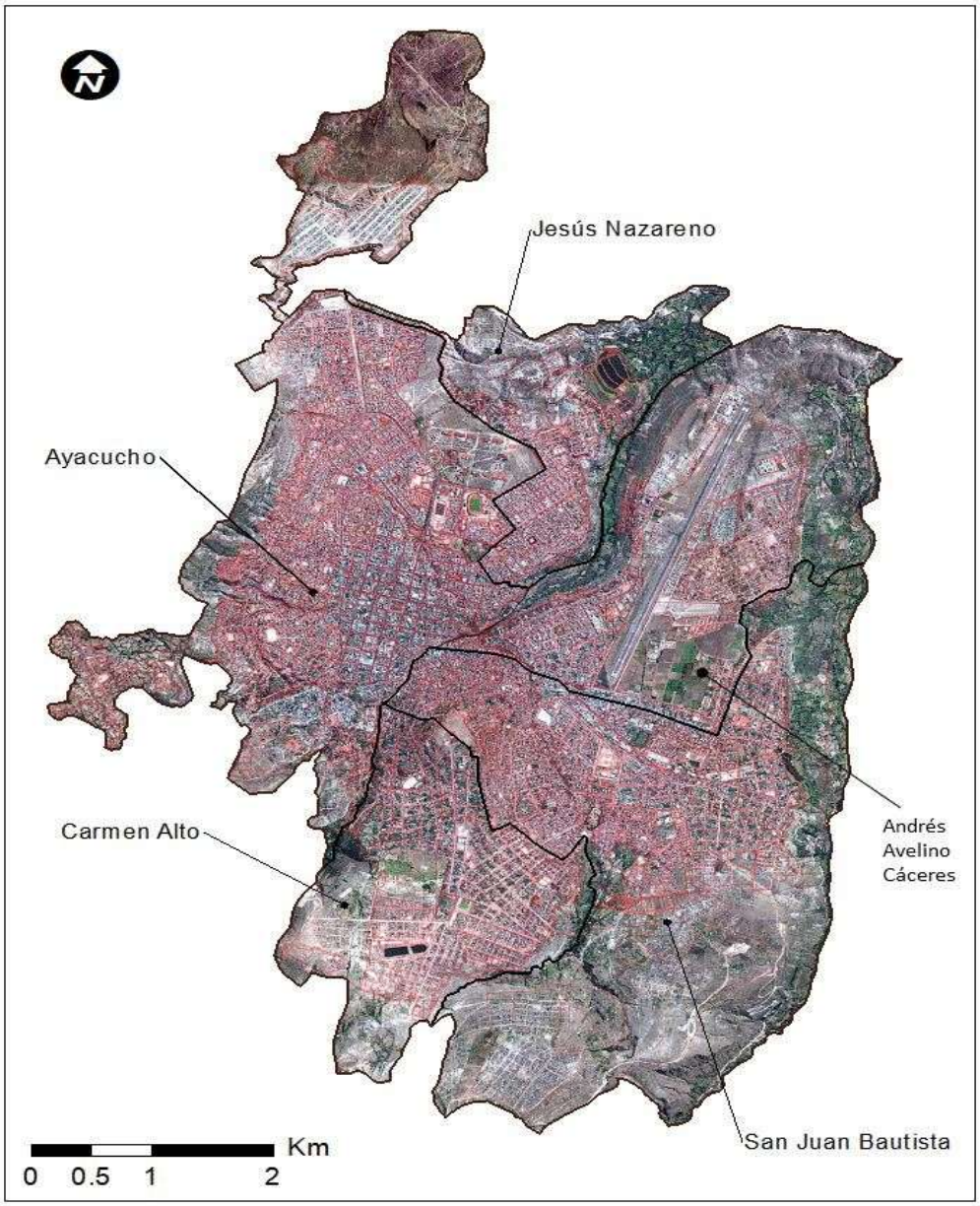


Ilustración 3.2: Mapa de distritos de la ciudad de Ayacucho. Fuente: Elaboración propia.

La representación distrital permite observar la concentración central del tejido urbano y la progresiva expansión hacia sectores periféricos. El análisis espacial evidencia cómo la morfología urbana se articula con la ocupación territorial: el centro histórico mantiene alta compacidad y continuidad edificatoria, mientras que las áreas periféricas muestran patrones de expansión más recientes, con densificación progresiva y consolidación parcial.

Este patrón de crecimiento tiene implicancias directas en la configuración térmica de la ciudad. La concentración central favorece la acumulación de calor debido a la mayor densidad y menor presencia de áreas verdes, mientras que la expansión periférica introduce nuevas superficies impermeables que amplían la extensión espacial de posibles focos térmicos. La relación entre morfología y ocupación territorial, por tanto, constituye un elemento clave para comprender la dinámica espacio-temporal de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho.

3.1.3. Condiciones climáticas y físicas

La ciudad de Ayacucho se encuentra bajo un régimen climático clasificado como BSk, correspondiente a clima de estepa fría según la tipología de Köppen. Este tipo climático se caracteriza por precipitaciones moderadas pero concentradas estacionalmente, temperaturas medias anuales relativamente bajas en comparación con regiones costeras, y una marcada amplitud térmica diaria. La combinación de altitud elevada y atmósfera relativamente seca configura un entorno donde la radiación solar desempeña un papel determinante en el comportamiento térmico superficial (Barry & Chorley, 2010).

La precipitación anual promedio es limitada y se concentra principalmente en los meses de verano austral, mientras que el periodo seco —que abarca aproximadamente de mayo a agosto— presenta escasa nubosidad y reducida humedad atmosférica. Esta sequedad favorece una mayor transmisión de radiación solar hacia la superficie terrestre, incrementando el calentamiento diurno. La menor presencia de vapor de agua en la atmósfera reduce la absorción y dispersión de radiación, intensificando la energía incidente sobre pavimentos, techos y suelos expuestos.

La estacionalidad marcada influye en los procesos energéticos urbanos. Durante la estación seca, la combinación de radiación elevada y baja humedad limita los mecanismos de enfriamiento por evapotranspiración, especialmente en áreas con cobertura vegetal reducida. Esta condición potencia la acumulación de calor en superficies impermeables, reforzando la posibilidad de formación de gradientes térmicos urbanos (Oke, 1987).

Desde el punto de vista físico, el entorno presenta procesos erosivos activos asociados a lluvias torrenciales estacionales y a la configuración geomorfológica del valle interandino. Las quebradas y laderas circundantes evidencian transporte de sedimentos hacia zonas urbanas, fenómeno que refleja una dinámica física constante del territorio. La presencia de suelos expuestos y depósitos coluviales incrementa la heterogeneidad superficial, influyendo en la reflectancia espectral y en la capacidad de absorción térmica.



Ilustración 3.3: Acarreo de sedimentos de la parte alta de la quebrada San Martín. Fuente: INDECI, 2003.

La imagen evidencia la dinámica geomorfológica activa del entorno, mostrando procesos de arrastre y acumulación de materiales en zonas urbanas. Este tipo de procesos no solo tiene implicancias en la gestión del riesgo, sino también en la configuración térmica del territorio. Los suelos expuestos y los sedimentos depositados presentan propiedades reflectantes y térmicas distintas a las superficies vegetadas, pudiendo incrementar la absorción de radiación solar y modificar la temperatura superficial local.

En conjunto, el clima seco, la radiación solar elevada, la estacionalidad pronunciada y la dinámica física activa del relieve configuran un escenario propicio para

el desarrollo de contrastes térmicos urbanos. Estas condiciones naturales, al interactuar con procesos de urbanización y expansión del suelo impermeable, generan un sistema territorial donde la formación de la Isla de Calor Urbana encuentra bases ambientales estructurales que potencian su manifestación.

3.2. Diseño metodológico

El análisis de la dinámica de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho entre 1986 y 2016 requiere un diseño metodológico capaz de integrar información climática, variables morfológicas y datos satelitales en una estructura analítica coherente. Dado que el fenómeno involucra múltiples factores interrelacionados —radiación, cobertura del suelo, densidad urbana, topografía y condiciones atmosféricas— se adoptó un enfoque multivariable y espacio-temporal que permitiera identificar patrones, cuantificar relaciones y evaluar tendencias.

El diseño metodológico se fundamenta en tres pilares complementarios. En primer lugar, la estimación de la temperatura superficial mediante procesamiento de imágenes térmicas Landsat, aplicando correcciones atmosféricas, geométricas y radiométricas que aseguren la comparabilidad entre distintos años de análisis. En segundo lugar, el cálculo de indicadores biofísicos y parámetros urbanos derivados de bandas espectrales, orientados a representar vegetación, humedad, superficie impermeable y características morfológicas. Finalmente, la integración estadística de estas variables a través de técnicas multivariadas, particularmente el Análisis de Componentes Principales, para construir un índice sintético de Isla de Calor Urbana.

El enfoque adoptado es de tipo exploratorio-descriptivo con alcance explicativo, ya que no se limita a identificar la presencia del fenómeno, sino que busca explicar su comportamiento en función de transformaciones territoriales. El carácter no experimental del estudio se sustenta en el análisis retrospectivo de información histórica, lo que permite evaluar cambios en periodos específicos sin intervenir directamente en el entorno urbano.

La dimensión espacio-temporal constituye un elemento central del diseño. Se seleccionaron años representativos con intervalos de aproximadamente una década (1986, 1996, 2006 y 2016), priorizando meses del periodo seco para minimizar interferencias

atmosféricas y resaltar el componente térmico urbano. Este criterio asegura consistencia en las condiciones climáticas de comparación y fortalece la interpretación de tendencias.

En conjunto, el diseño metodológico articula geomática, climatología urbana y análisis estadístico para transformar datos físicos en evidencia territorial. Esta estructura permite avanzar desde la medición de variables individuales hacia la construcción de un modelo sintético que represente la dinámica del fenómeno en el contexto específico de Ayacucho, garantizando rigor técnico y coherencia conceptual en el desarrollo del caso de estudio.

3.2.1. Toma de datos in situ

La estimación de la temperatura superficial a partir de sensores remotos requiere un proceso de validación empírica que garantice la confiabilidad de los resultados. En este estudio se realizó una campaña de medición *in situ* de temperatura del suelo en 39 puntos distribuidos estratégicamente dentro del área urbana de la ciudad de Ayacucho. Estas mediciones fueron registradas mediante termómetro digital de superficie y georreferenciadas con GPS navegador, asegurando precisión espacial en la localización de cada punto.

De los 39 puntos levantados, 30 fueron utilizados para la construcción y calibración del modelo de interpolación espacial de temperatura superficial, mientras que 9 puntos adicionales se destinaron exclusivamente a la validación estadística del modelo derivado de imágenes satelitales. Esta separación metodológica permitió contrastar los valores estimados por teledetección con datos reales medidos en campo, fortaleciendo la robustez del análisis.

La distribución espacial de los puntos respondió a un criterio de representatividad territorial. Se incluyeron sectores de alta densidad edificatoria en el núcleo urbano consolidado, zonas residenciales en expansión, áreas con predominio de suelo desnudo y espacios periurbanos con mayor cobertura vegetal. Este diseño permitió capturar la heterogeneidad morfológica y térmica del territorio, evitando sesgos asociados a concentraciones puntuales.

Asimismo, la inclusión de áreas periurbanas resultó fundamental para establecer contrastes térmicos entre sectores consolidados y zonas de transición urbano-rural. Esta comparación es clave para evaluar la magnitud del diferencial térmico urbano–no urbano, componente esencial en la identificación de la Isla de Calor Urbana.

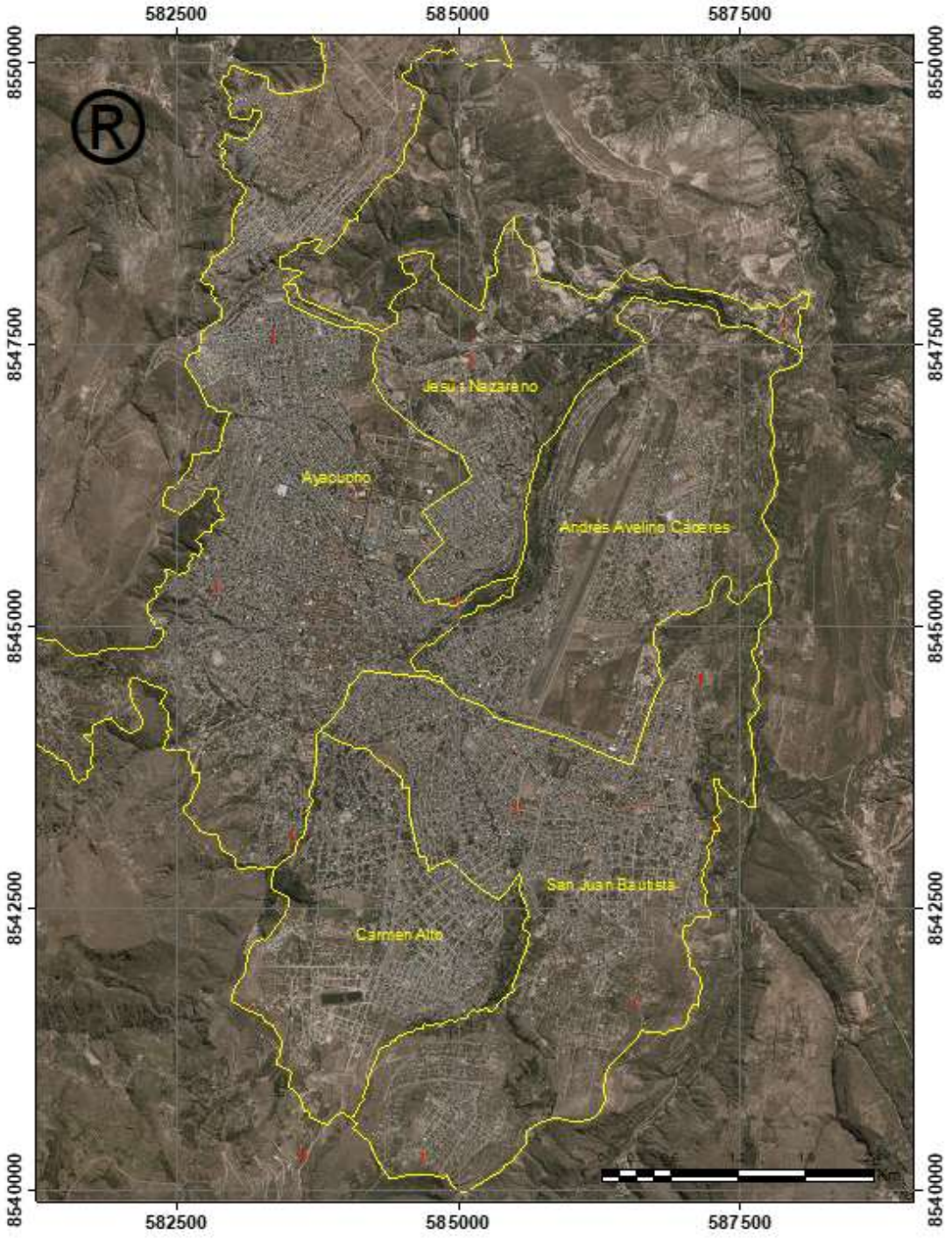


Ilustración 3.4: Ubicación de los puntos de muestreo para el registro de Ts.

La representación cartográfica evidencia una cobertura espacial adecuada de los puntos de medición, distribuidos tanto en el centro urbano como en distritos periféricos y áreas de expansión reciente. Esta distribución garantiza que el modelo térmico no se limite a un sector específico, sino que represente de manera integral la diversidad morfológica del área de estudio.

Desde el punto de vista metodológico, la toma de datos *in situ* cumple una doble función: por un lado, proporciona información directa sobre la temperatura superficial real; por otro, permite validar y ajustar los valores obtenidos mediante procesamiento satelital. Esta triangulación entre datos de campo y datos remotos fortalece la confiabilidad del modelo espacial y respalda la interpretación de la dinámica térmica urbana en Ayacucho.

3.2.2. Correcciones de imágenes satelitales

El análisis multitemporal de la temperatura superficial y de los indicadores urbanos exige garantizar que las imágenes satelitales utilizadas sean comparables entre sí. Los valores digitales originales registrados por los sensores no representan directamente propiedades físicas del territorio, sino señales influenciadas por condiciones atmosféricas, ángulos solares, calibración instrumental y características geométricas de adquisición. Por ello, antes de proceder al cálculo de variables térmicas y espectrales, es indispensable aplicar un conjunto de correcciones que aseguren consistencia radiométrica y espacial.

Las correcciones de imágenes constituyen un paso metodológico crítico en estudios espacio-temporales, ya que permiten transformar los valores digitales (DN) en reflectancia de superficie y radiancia físicamente interpretables. Sin este proceso, las diferencias observadas entre años podrían atribuirse erróneamente a cambios territoriales cuando en realidad responderían a variaciones atmosféricas o geométricas.

En este estudio se aplicaron cuatro tipos principales de corrección: atmosférica, geométrica, radiométrica y topográfica. Cada una cumple una función específica dentro del flujo de procesamiento. La corrección atmosférica reduce los efectos de absorción y dispersión de la radiación solar; la corrección geométrica garantiza la coincidencia espacial entre imágenes de distintos años; la calibración radiométrica convierte los

valores digitales en magnitudes físicas comparables; y la corrección topográfica compensa variaciones de iluminación asociadas a la pendiente y orientación del terreno.

La aplicación sistemática de estas correcciones permitió construir una base de datos satelital homogénea para los años 1986, 1996, 2006 y 2016, asegurando que las variaciones detectadas en temperatura superficial e indicadores urbanos respondan a transformaciones reales del territorio y no a artefactos del proceso de adquisición. De esta manera, el análisis posterior se fundamenta en información estandarizada y técnicamente consistente, fortaleciendo la validez del modelo de Isla de Calor Urbana desarrollado para el caso de Ayacucho.

a) Corrección geométrica

La corrección geométrica constituye un procedimiento esencial para garantizar la correspondencia espacial entre imágenes satelitales de distintos periodos. En estudios multitemporales como el presente, donde se comparan escenas Landsat correspondientes a los años 1986, 1996, 2006 y 2016, resulta indispensable que cada píxel represente exactamente la misma ubicación geográfica en todos los momentos analizados. De lo contrario, las variaciones detectadas podrían atribuirse a desplazamientos espaciales y no a cambios reales en el territorio.

Para este estudio se aplicó un modelo de transformación polinomial de segundo orden (polinomial cuadrático), el cual permite corregir distorsiones geométricas derivadas de la curvatura terrestre, la inclinación del sensor y otros factores asociados a la adquisición de la imagen. Este tipo de modelo es adecuado para escenas Landsat debido a su capacidad de ajustar deformaciones no lineales sin introducir excesiva complejidad matemática.

El proceso de georreferenciación se realizó mediante la identificación de puntos de control terrestre (GCPs), seleccionados a partir de elementos reconocibles en cartografía base confiable, como la red hidrográfica y elementos urbanos permanentes. La imagen fue proyectada en el sistema UTM, huso 18 sur, bajo el datum WGS 84, garantizando compatibilidad con información geográfica oficial y con el resto de capas temáticas utilizadas en el análisis.

El parámetro clave para evaluar la calidad de la corrección es el Error Medio Cuadrático (RMS). En este caso, el valor obtenido fue de 4.87 metros, cifra considerada aceptable teniendo en cuenta que la resolución espacial de las imágenes Landsat es aproximadamente 30 metros por píxel. Este nivel de error implica que el desplazamiento residual promedio es inferior a una sexta parte del tamaño del píxel, asegurando alta precisión en la superposición multitemporal.

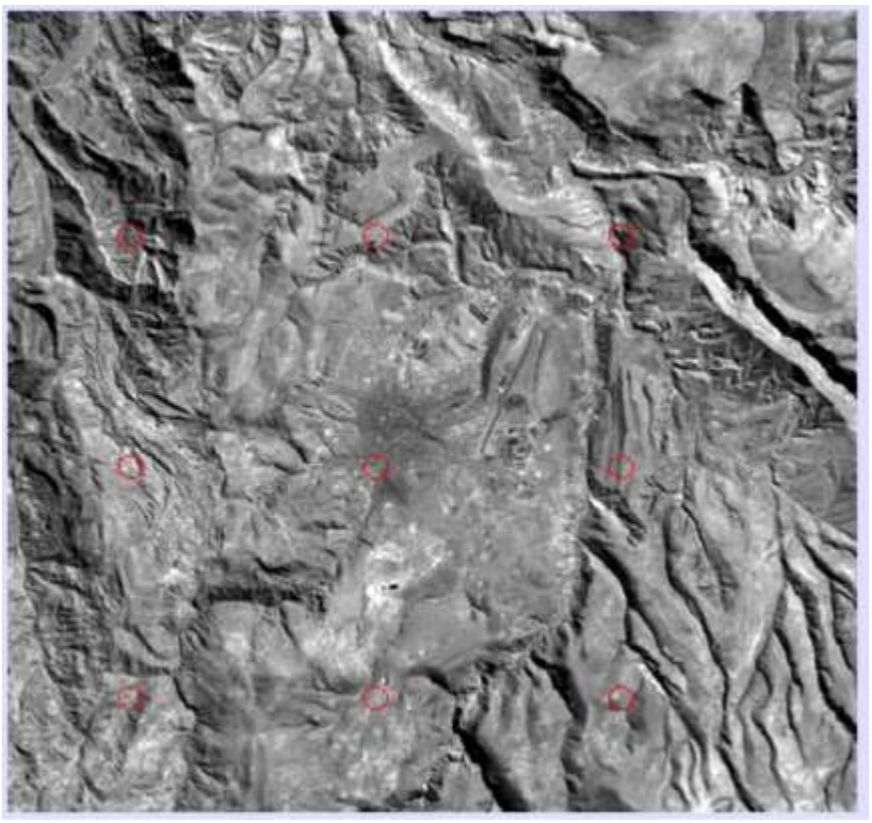


Ilustración 3.7: Puntos de control sobre la Banda 4 del Landsat de 26.jul.1986.

La ilustración muestra la distribución espacial de los puntos de control utilizados en el ajuste geométrico. La adecuada dispersión de estos puntos en toda la escena garantiza una corrección homogénea y minimiza distorsiones locales.

Desde el punto de vista metodológico, esta precisión geométrica constituye la base para el análisis comparativo entre años. Solo a partir de una correcta alineación espacial es posible evaluar cambios en temperatura superficial, expansión urbana o variaciones en indicadores espectrales sin incurrir en errores de desplazamiento. En consecuencia, la corrección geométrica no es un procedimiento técnico accesorio, sino un requisito

fundamental para la validez del análisis espacio-temporal de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho.

b) Corrección topográfica

La corrección topográfica resulta indispensable en áreas con relieve accidentado, como es el caso de Ayacucho, donde la presencia de laderas y variaciones altitudinales genera diferencias significativas en la iluminación de la superficie. La pendiente y orientación del terreno influyen directamente en la cantidad de radiación solar incidente sobre cada píxel, produciendo zonas con mayor exposición y otras parcialmente sombreadas. Si este efecto no se corrige, la variabilidad espectral podría interpretarse erróneamente como cambio en cobertura del suelo cuando en realidad responde a diferencias geomorfológicas (Riaño et al., 2003).

Para este estudio se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) proveniente de la misión ASTER, el cual permitió calcular parámetros derivados como pendiente y orientación. A partir de esta información se aplicó un modelo de normalización de iluminación, ajustando la reflectancia de cada píxel en función del ángulo de incidencia solar y la geometría del terreno. Este procedimiento compensa las variaciones de brillo asociadas a la topografía y reduce la influencia de sombras proyectadas.

El proceso incluyó la generación de un mapa de sombreado analítico y la estimación de la relación lineal entre el sombreado y la imagen original, considerando la imagen como variable dependiente. Posteriormente, se aplicó una compensación radiométrica que permitió homogeneizar la iluminación, eliminando gradientes artificiales generados por la pendiente. De este modo, la reflectancia resultante depende principalmente de las características intrínsecas de la cobertura y no de su orientación respecto al sol.

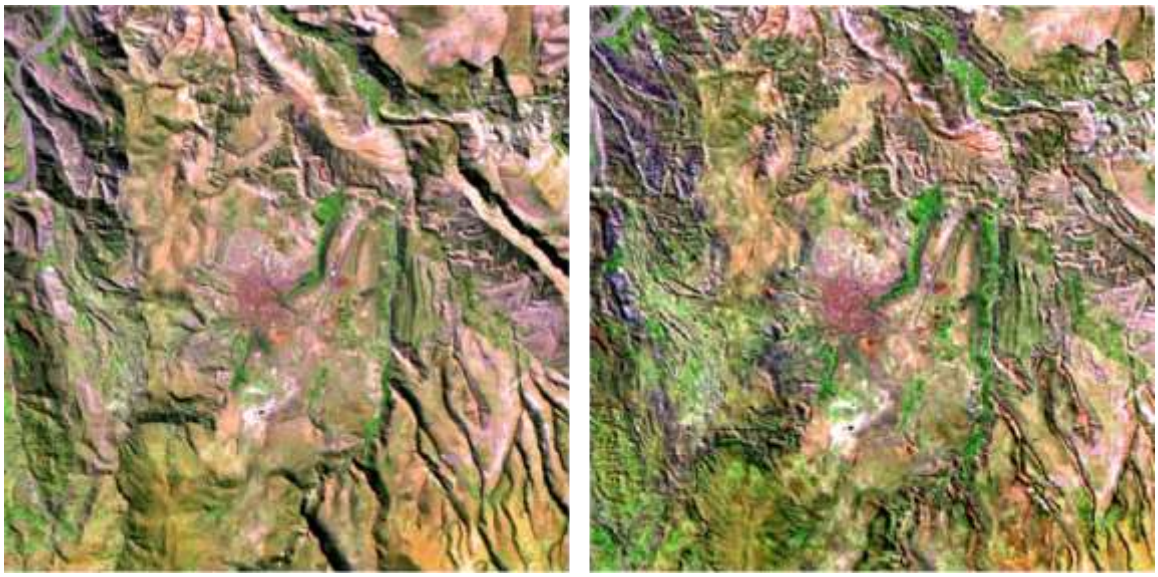


Ilustración 3.8: Detalle de la imagen Landsat, en falso color 741, de julio 1986 antes (izquierda) y después de la corrección topográfica (derecha).

La comparación visual entre la imagen original y la imagen corregida evidencia una reducción significativa de zonas excesivamente sombreadas o sobreiluminadas. Tras la corrección, las diferencias de reflectancia se asocian de manera más consistente con tipos de cobertura y no con variaciones topográficas.

Desde el punto de vista analítico, la corrección topográfica mejora la discriminación espectral de materiales urbanos y naturales, permitiendo calcular índices como NDVI, SAVI, NDBI o albedo con mayor precisión. Asimismo, incrementa la confiabilidad de la estimación de temperatura superficial, ya que reduce el sesgo asociado a la orientación del terreno. En consecuencia, este procedimiento fortalece la calidad de los datos de entrada para el modelo multivariado de Isla de Calor Urbana y garantiza mayor robustez en el análisis comparativo multitemporal.

3.2.3. Desmezcla espectral e Índice de Superficie Impermeable (ISA)

La heterogeneidad del tejido urbano impide que cada píxel satelital represente un único material puro. En áreas urbanas, un mismo píxel puede contener proporciones variables de vegetación, suelo desnudo, concreto, asfalto o techos metálicos. Esta mezcla espectral dificulta la identificación directa de superficies impermeables a partir de clasificaciones convencionales. Para superar esta limitación, se aplicó un modelo de

desmezcla espectral lineal orientado a estimar la fracción de superficie impermeable (ISA, Impervious Surface Area).

El procedimiento inició con la Transformación de Fracción Mínima de Ruido (MNF), técnica que reorganiza la información espectral maximizando la relación señal–ruido y permitiendo identificar componentes dominantes con mayor claridad (Green et al., 1988). Esta transformación facilita la selección de firmas espectrales representativas y reduce redundancias en los datos.

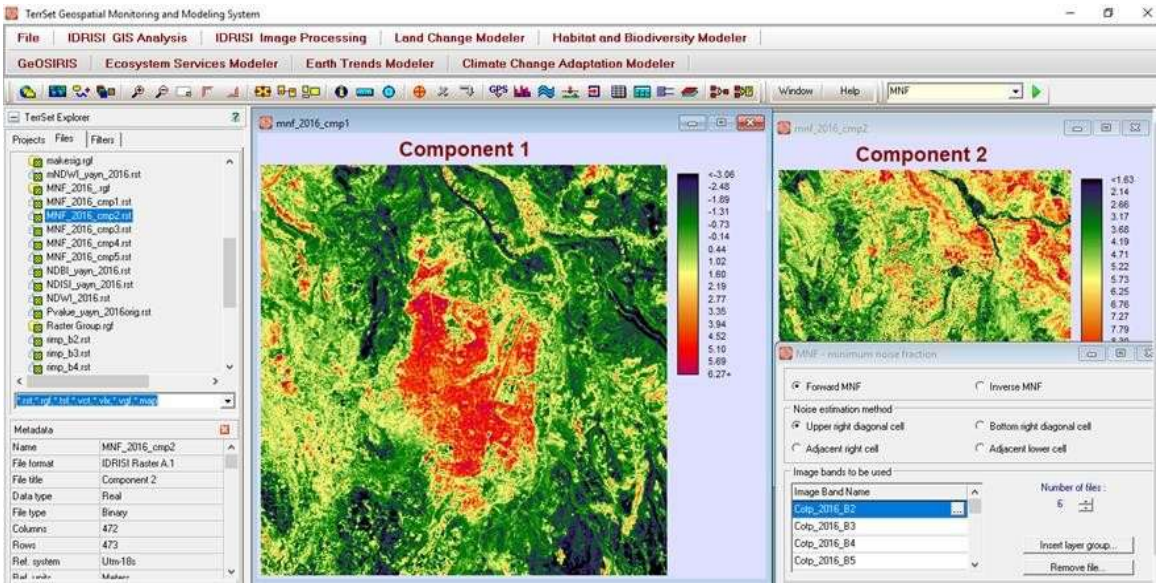
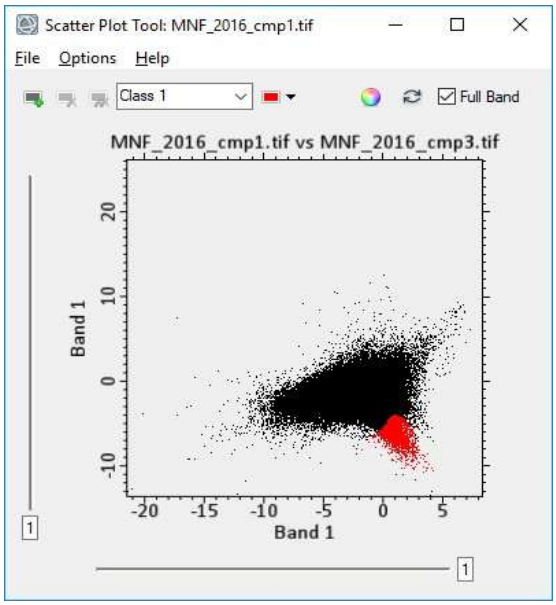


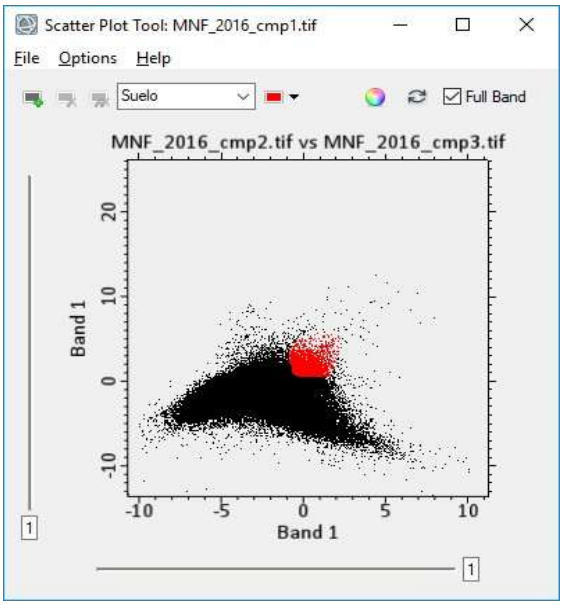
Ilustración 3.9: Aplicación de MNF en TerrSet y resultados para el 2016.

La imagen muestra el resultado inicial de la transformación MNF, donde los primeros componentes concentran la mayor parte de la información útil, mientras que los últimos reflejan principalmente ruido espectral.

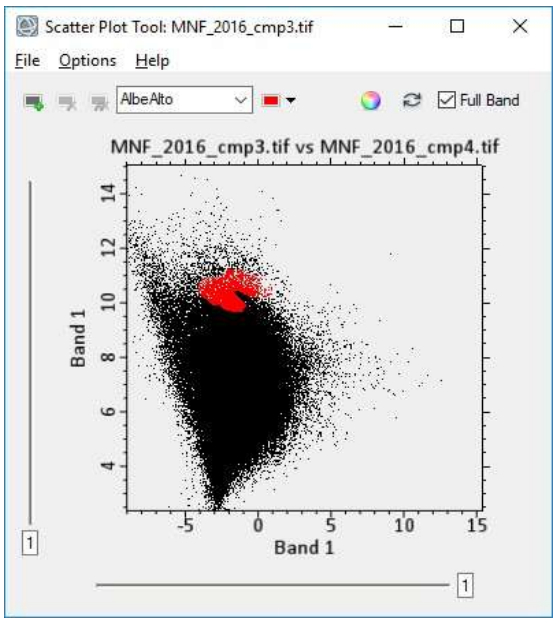
Posteriormente, se analizaron los diagramas de dispersión de componentes para identificar agrupamientos espectralmente diferenciables. Esta etapa permitió seleccionar regiones de interés asociadas a materiales puros o *Endmembers*.

1 2





3 4



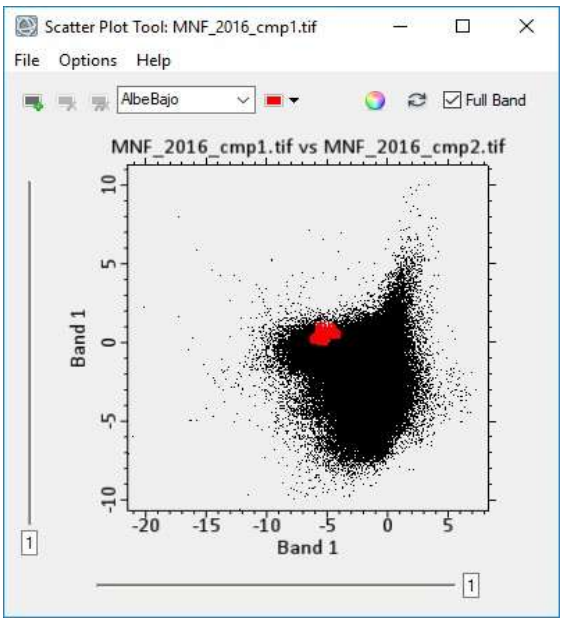


Ilustración 3.10: Diagrama de dispersión de componentes para la identificación de los Endmembers: (1) Vegetación, (2) Suelo, (3) Albedo alto, (4) Albedo bajo.

El análisis de dispersión evidencia una adecuada separabilidad espectral entre cuatro clases principales: vegetación, suelo, albedo alto (superficies claras como concreto o techos reflectantes) y albedo bajo (asfalto y materiales oscuros).

Con base en esta separación, se procedió a la selección de píxeles representativos para cada *Endmember*, garantizando un tamaño mínimo de muestra que permita estabilidad estadística.

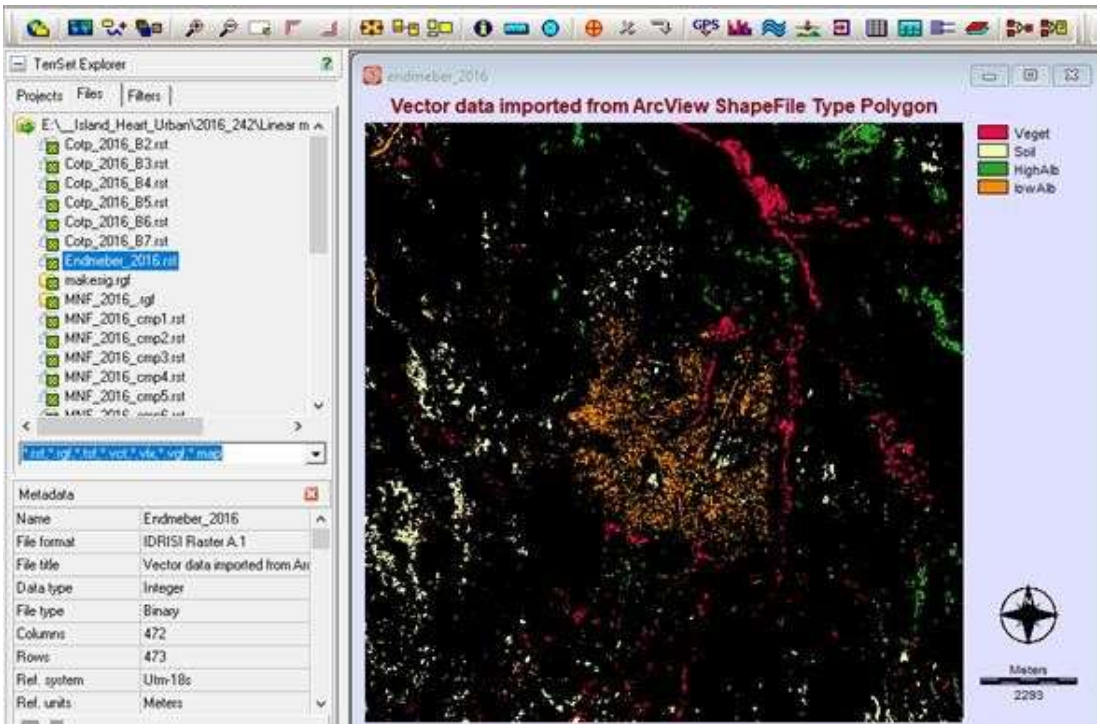


Ilustración 3.11: Pixeles de Endmembers seleccionados para el análisis.

La identificación precisa de estos píxeles es clave para asegurar que las firmas espectrales utilizadas en la desmezcla representen materiales lo más puros posible.

Una vez definidos los *Endmembers*, se generaron sus respectivas firmas espectrales y se compararon con patrones conocidos, verificando coherencia en la respuesta reflectiva de cada clase.

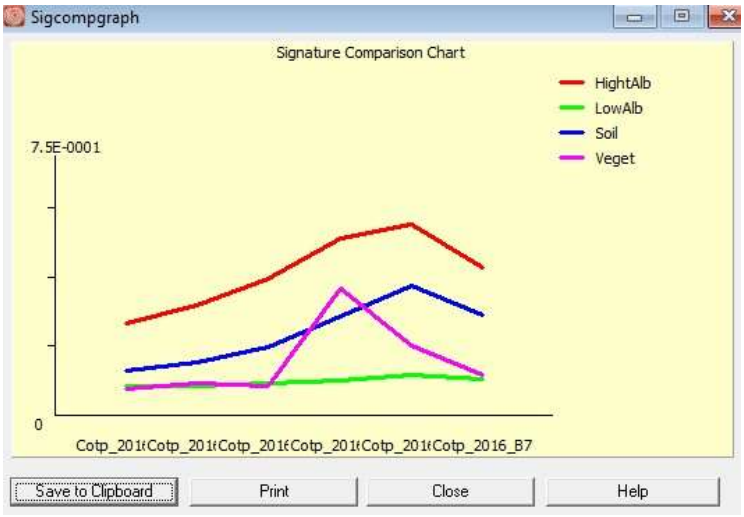


Ilustración 3.12: Firmas espectrales generados de los Endmembers.

Las curvas espectrales muestran comportamientos diferenciados: la vegetación presenta alta reflectancia en el infrarrojo cercano; el suelo mantiene una respuesta más lineal; el albedo alto refleja intensamente en bandas visibles y SWIR; mientras que el albedo bajo muestra menor reflectancia general.

Finalmente, se aplicó el modelo de desmezcla lineal para estimar la fracción de cada componente en todos los píxeles urbanos. La superficie impermeable fue calculada como combinación ponderada de fracciones de albedo alto y bajo, incorporando el residuo espectral mínimo según el modelo propuesto para áreas urbanas.

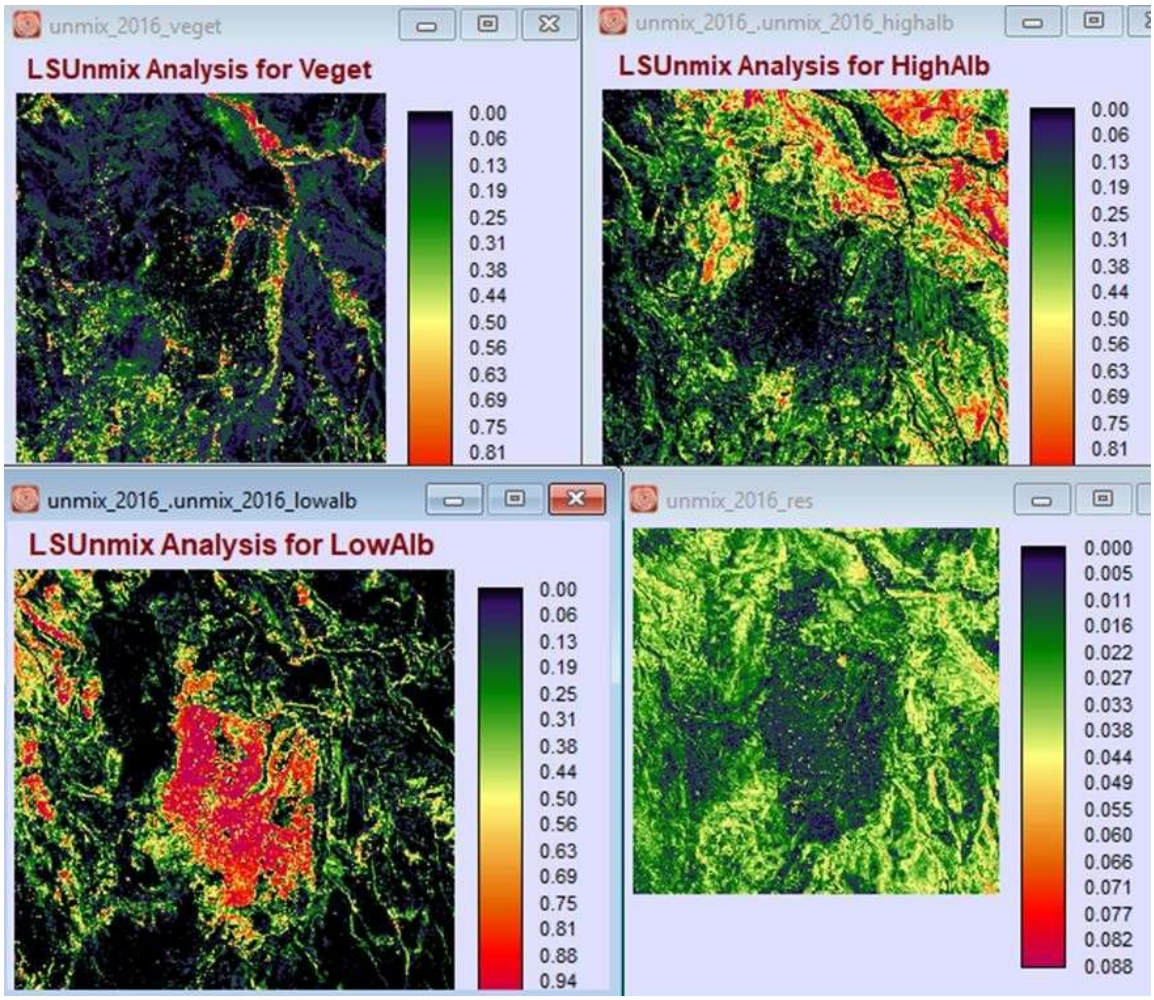


Ilustración 3.13: Fracción de Endmembers resultantes y su residual.

El resultado evidencia mapas continuos de fracciones, donde las zonas con mayor proporción de albedo alto y bajo corresponden a áreas urbanizadas consolidadas.

Desde el punto de vista metodológico, la adecuada separabilidad espectral observada en los diagramas de dispersión confirma que las clases seleccionadas presentan suficiente diferenciación radiométrica. Asimismo, el bajo error residual obtenido en el modelo de desmezcla indica que la combinación lineal explica satisfactoriamente la variabilidad espectral de la escena. Estos elementos respaldan la validez del modelo ISA como representación cuantitativa de la superficie impermeable urbana.

En consecuencia, la estimación de ISA no solo permite caracterizar la expansión física de la ciudad, sino también establecer una variable clave para analizar la relación

entre morfología urbana y temperatura superficial, componente esencial en la dinámica de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho.

3.3. Resultados y análisis

El procesamiento de información climática, espectral y morfológica desarrollado en las secciones anteriores converge en la obtención de resultados que permiten evaluar de manera integrada la dinámica de la Isla de Calor Urbana en Ayacucho entre 1986 y 2016. Esta etapa no se limita a la presentación descriptiva de mapas o valores numéricos, sino que busca interpretar patrones espaciales, contrastes térmicos y tendencias temporales en función de la transformación territorial de la ciudad.

Los resultados se estructuran en tres niveles complementarios. En primer lugar, se analizan las variaciones de temperatura superficial y su distribución espacial en cada periodo de estudio. En segundo lugar, se examinan los cambios en indicadores biofísicos y parámetros urbanos, especialmente la expansión de superficie impermeable y la modificación de la cobertura vegetal. Finalmente, se integran estas variables mediante el índice sintético de Isla de Calor Urbana derivado del análisis multivariado, lo que permite identificar focos térmicos, evaluar su intensidad y determinar su evolución en el tiempo.

El análisis adopta una perspectiva espacio-temporal comparativa, observando no solo la existencia del fenómeno, sino su consolidación progresiva. De este modo, se contrasta el comportamiento térmico de los años iniciales —donde las variaciones responden en mayor medida a factores climáticos naturales— con periodos posteriores en los que la expansión urbana adquiere un rol determinante en la configuración térmica.

Asimismo, se examina la relación estadística entre temperatura superficial y morfología urbana, identificando correlaciones significativas que respaldan la hipótesis de que la transformación del suelo y la densificación influyen directamente en el balance energético local. La incorporación de pruebas de tendencia permite evaluar si el fenómeno presenta un comportamiento sistemático a lo largo del tiempo.

En conjunto, esta sección traduce el modelo metodológico en evidencia empírica, articulando mapas, estadísticas y análisis interpretativo para demostrar cómo la evolución urbana de Ayacucho se refleja en su configuración térmica. Los resultados permiten

comprender no solo dónde se manifiesta la Isla de Calor Urbana, sino cómo y por qué se consolida en determinados sectores del territorio.

3.3.1. Análisis de variables y su incidencia en el fenómeno de ICU

En total se procesaron 17 variables, de las cuales 12 fueron seleccionados para la aplicación del modelo ICU adaptado para el área de estudio. Las variables han sido elaboradas en formato raster con el procedimiento señalado en la metodología, para un mejor análisis de influencia de cada variable en el fenómeno de la Isla de Calor Urbana se ha realizado una regresión de componentes principales (ACP), método considerado superior en estimación y predicción con respecto al método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), puesto que en este trabajo se utilizan variables multicolineales y los estimadores MCO no son confiables por presentar elevada correlación y una alta inestabilidad en la varianza.

Luego de analizar la multicolinealidad de las variables, se seleccionaron un grupo apropiado para ser usadas en la ecuación del modelo ICU para la ciudad de Ayacucho, es decir se ajustaron las variables de predicción usando la menor cantidad posible de variables explicativas o regreso.

En la tabla 4.1 se muestra las variables analizadas en este estudio

Tabla 4.1: Variables elaborados y analizados en el estudio de ICU, periodo 2016.

Variables	Código	Calificación
Albedo de superficie terrestre	Albsup_2016	Seleccionado
Elevación digital del terreno	Altitud	Descartado
Aspecto del terreno	Aspect	Descartado
Índice de suelo desnudo	BI_2016	Seleccionado
Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas	EBBI_2016	Seleccionado
Índice de suelo urbanizado	IU_2016	Seleccionado
Índice de humedad de hojas	LWCI_2016	Descartado
Índice modificado de contenido de agua de diferencia	MNDWI_2016	Seleccionado
normalizada		
Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada	NDBal_2016	Seleccionado

Índice de edificaciones de diferencia normalizada	NDBuI_2016	Seleccionado
Índice de vegetación de diferencia normalizada	NDVI_2016	Descartado
Presión real de vapor de agua	PvWreal_2016	Seleccionado
Índice de vegetación ajustada al suelo	SAVI_2016	Seleccionado
Pendiente del terreno	Slope	Descartado
Factor visión del cielo	SVF_2016	Seleccionado
Temperatura de superficie terrestre	TS_2016	Seleccionado
Velocidad del viento	Windspeed_2016	Seleccionado
Total	17	12

Para el análisis de colinealidad se realizaron corridas de ACP utilizando el software TerrSet. La tabla 4.2 resume los resultados de la operación, en donde se muestra la matriz de varianza/covarianza y la matriz de correlación obtenido con la aplicación del análisis tipo Forward T-Mode y la opción no estandarizada, que utiliza la matriz de varianza/covarianza, matriz estadísticamente centrada y expresa variabilidad con respecto a la media.

En la tabla 4.2, las variables señaladas con letras rojas son aquellas correlacionadas con una o más variables, siendo las resaltadas en amarillo las que finalmente fueron descartados. Entre ellos están las variables geográficas de altitud, pendiente y el aspecto o exposición del terreno; a pesar que éstas influyen en la radiación solar, el régimen de vientos, la humedad ambiental etc., por tanto condicionantes importantes en la generación del fenómeno ICU en un territorio, estas variables tienen muy alta varianza con respecto a las demás incluso cuando son normalizadas, indicando qué tan dispersos están los datos alrededor de su media. Si la proporción de la varianza explicada con la varianza no explicada es alta, las medias son estadísticamente diferentes, por la cual se opta descartar del modelo. Por otra parte, estas variables se utilizan en la obtención de variables intermedios, por ejemplo la altitud en el ajuste de la variable velocidad del viento y la presión de vapor de agua; el aspecto del terreno en el modelo de sombreado en la corrección topográfica de imágenes satelitales.

La variable NDVI se correlaciona con LWCI y MNDWI, al igual que SAVI se correlaciona con estas variables, por ello se selecciona la variable SAVI porque es mejor indicador de vegetación para zonas de montaña y zonas de escasa cobertura vegetal; el

NDVI también es utilizada en la obtención de variables intermedias como la emisividad en el cálculo de temperatura de superficie. Al igual, la variable MNDWI es mejor que LWCI, esta última es indicadora de humedad de hojas de la vegetación, mientras el MNDWI es indicadora de humedad de la vegetación y del grado de saturación de humedad del suelo.

El Albedo se correlaciona con el NDBaI, el EBBI con las variables BI y NDBuI, pese a ello se dejan para el análisis por tratarse de índices que utilizan distintas longitudes de onda del espectro electromagnético de las imágenes satelitales; por lo tanto, son índices que se complementan bien en estudios urbanos.

En teledetección, la adquisición de imágenes en bandas adyacentes del espectro implica, con frecuencia, detectar información redundante. Por ello, los DN (digital number) de los píxeles de un índice temático pueden presentar una importante relación con los de otra, resultando una o más de una de ellas irrelevantes; este inconveniente de información redundante en el modelo de ICU es corregido con la aplicación del APC.

Tabla 4.2: Correlación de variables analizados en el estudio de ICU.

T-MODE VAR/COVAR	Albsup_2016	Altitud	Aspect	BI_2016	EBBI_2016	IU_2016	LWCI_2016	MNDWI_2016	NDBal_2016	NDBuI_2016	NDVI_2016	PvWreal_2016	SAVI_2016	Slope	SVF_2016	TS_2016	Windspeed_2016
Albsup_2016	0.0046	-1.4297	0.1743	0.0005	0.0004	-0.0002	-0.0001	-0.0005	-0.0014	-0.0003	-0.0018	0.0000	0.0001	-0.1662	0.0022	0.0882	0.0002
Altitud	-1.4297	64,035.9963	614.7820	0.5632	-0.4071	-2.7249	-0.9821	13.4010	0.0989	-1.1968	1.8056	2.9098	1.1845	209.7775	5.0958	99.7648	-9.3973
Aspect	0.1743	614.7820	12,868.4884	0.1457	0.0201	-1.2084	-0.2799	-0.0941	-0.3230	-0.0284	-0.3260	0.0618	-0.1041	-34.5347	1.3242	-189.0390	-0.0902
BI_2016	0.0005	0.5632	0.1457	0.0021	0.0010	0.0026	-0.0013	-0.0023	-0.0005	0.0023	-0.0017	-0.0001	-0.0010	0.0630	0.0009	0.0609	-0.0001
EBBI_2016	0.0004	-0.4071	0.0201	0.0010	0.0006	0.0017	-0.0003	-0.0007	-0.0003	0.0013	-0.0005	-0.0001	-0.0003	0.0287	0.0003	0.0310	0.0001
IU_2016	-0.0002	-2.7249	-1.2084	0.0026	0.0017	0.0291	-0.0002	-0.0064	-0.0003	0.0041	-0.0024	-0.0005	-0.0018	-0.0810	0.0001	0.0556	0.0004
LWCI_2016	-0.0001	-0.9821	-0.2799	-0.0013	-0.0003	-0.0002	0.0048	0.0074	0.0002	-0.0007	0.0039	-0.0001	0.0027	-0.0576	-0.0007	-0.0254	0.0001
MNDWI_2016	-0.0005	13.4010	-0.0941	-0.0023	-0.0007	-0.0064	0.0074	0.0319	0.0001	-0.0023	0.0127	0.0003	0.0087	-0.1428	0.0007	0.0160	-0.0020
NDBal_2016	-0.0014	0.0989	-0.3230	-0.0005	-0.0003	-0.0003	0.0002	0.0001	0.0005	-0.0004	0.0006	0.0000	0.0000	0.0330	-0.0008	-0.0207	0.0000
NDBuI_2016	-0.0003	-1.1968	-0.0284	0.0023	0.0013	0.0041	-0.0007	-0.0023	-0.0004	0.0030	-0.0010	-0.0003	-0.0008	0.1045	0.0001	0.0449	0.0002
NDVI_2016	-0.0018	1.8056	-0.3260	-0.0017	-0.0005	-0.0024	0.0039	0.0127	0.0006	-0.0010	0.0068	-0.0001	0.0041	-0.0068	-0.0016	-0.0532	-0.0003
PvWreal_2016	0.0000	2.9098	0.0618	-0.0001	-0.0001	-0.0005	-0.0001	0.0003	0.0000	-0.0003	-0.0001	0.0003	0.0000	0.0150	0.0003	0.0030	-0.0004
SAVI_2016	0.0001	1.1845	-0.1041	-0.0010	-0.0003	-0.0018	0.0027	0.0087	0.0000	-0.0008	0.0041	0.0000	0.0028	-0.0571	-0.0003	-0.0107	-0.0002
Slope	-0.1662	209.7775	-34.5347	0.0630	0.0287	-0.0810	-0.0576	-0.1428	0.0330	0.1045	-0.0068	0.0150	-0.0571	90.3085	-0.3835	-1.4449	-0.0308
SVF_2016	0.0022	5.0958	1.3242	0.0009	0.0003	0.0001	-0.0007	0.0007	-0.0008	0.0001	-0.0016	0.0003	-0.0003	-0.3835	0.0286	0.0866	-0.0007
TS_2016	0.0882	99.7648	-189.0390	0.0609	0.0310	0.0556	-0.0254	0.0160	-0.0207	0.0449	-0.0532	0.0030	-0.0107	-1.4449	0.0866	16.7804	-0.0146
Windspeed_2016	0.0002	-9.3973	-0.0902	-0.0001	0.0001	0.0004	0.0001	-0.0020	0.0000	0.0002	-0.0003	-0.0004	-0.0002	-0.0308	-0.0007	-0.0146	0.0014
T-MODE COR. MATRIX	**Albsup_2016**	**Altitud**	**Aspect**	**BI_2016**	**EBBI_2016**	**IU_2016**	**LWCI_2016**	**MNDWI_2016**	**NDBal_2016**	**NDBuI_2016**	**NDVI_2016**	**PvWreal_2016**	**SAVI_2016**	**Slope**	**SVF_2016**	**TS_2016**	**Windspeed_2016**
Albsup_2016	**1**	-0.083	0.023	0.151	0.213	-0.019	-0.022	-0.039	-0.883	-0.082	-0.316	-0.041	0.015	-0.257	0.193	0.316	0.083
Altitud	-0.083	**1**	0.021	0.048	-0.064	-0.063	-0.056	0.297	0.017	-0.086	0.086	0.661	0.088	0.087	0.119	0.096	-1.000
Aspect	0.023	0.021	**1**	0.028	0.007	-0.062	-0.036	-0.005	-0.124	-0.005	-0.035	0.031	-0.017	-0.032	0.069	-0.407	-0.021
BI_2016	0.151	0.048	0.028	**1**	0.898	0.332	-0.402	-0.284	-0.494	0.893	-0.445	-0.147	-0.421	0.144	0.114	0.323	-0.048
EBBI_2016	0.213	-0.064	0.007	0.898	**1**	0.402	-0.166	-0.165	-0.560	0.931	-0.237	-0.262	-0.200	0.121	0.072	0.303	0.064
IU_2016	-0.019	-0.063	-0.062	0.332	0.402	**1**	-0.019	-0.211	-0.086	0.440	-0.174	-0.178	-0.202	-0.050	0.005	0.080	0.063
LWCI_2016	-0.022	-0.056	-0.036	-0.402	-0.166	-0.019	**1**	0.600	0.147	-0.193	0.675	-0.050	0.722	-0.088	-0.056	-0.089	0.056
MNDWI_2016	-0.039	0.297	-0.005	-0.284	-0.165	-0.211	0.600	**1**	0.015	-0.238	0.861	0.085	0.916	-0.084	0.022	0.022	-0.297
NDBal_2016	-0.883	0.017	-0.124	-0.494	-0.560	-0.086	0.147	0.015	**1**	-0.291	0.301	0.109	0.014	0.151	-0.195	-0.219	-0.017
NDBuI_2016	-0.082	-0.086	-0.005	0.893	0.931	0.440	-0.193	-0.238	-0.291	**1**	-0.210	-0.289	-0.277	0.199	0.007	0.199	0.086
NDVI_2016	-0.316	0.086	-0.035	-0.445	-0.237	-0.174	0.675	0.861	0.301	-0.210	**1**	-0.056	0.930	-0.009	-0.116	-0.157	-0.086
PvWreal_2016	-0.041	0.661	0.031	-0.147	-0.262	-0.178	-0.050	0.085	0.109	-0.289	-0.056	**1**	-0.036	0.091	0.111	0.043	-0.661
SAVI_2016	0.015	0.088	-0.017	-0.421	-0.200	-0.202	0.722	0.916	0.014	-0.277	0.930	-0.036	**1**	-0.113	-0.032	-0.049	-0.088
Slope	-0.257	0.087	-0.032	0.144	0.121	-0.050	-0.088	-0.084	0.151	0.199	-0.009	0.091	-0.113	**1**	-0.239	-0.037	-0.087
SVF_2016	0.193	0.119	0.069	0.114	0.072	0.005	-0.056	0.022	-0.195	0.007	-0.116	0.111	-0.032	-0.239	**1**	0.125	-0.119
TS_2016	0.316	0.096	-0.407	0.323	0.303	0.080	-0.089	0.022	-0.219	0.199	-0.157	0.043	-0.049	-0.037	0.125	**1**	-0.096
Windspeed_2016	0.083	-1.000	-0.021	-0.048	0.064	0.063	0.056	-0.297	-0.017	0.086	-0.086	-0.661	-0.088	-0.087	-0.119	-0.096	**1**

Se ha determinado que las variables físicas sobredimensionan la varianza total explicada, por ello han sido descartados del análisis. En consecuencia, para identificar la importancia de las variables ambientales y parámetros urbanos que caracterizan o inciden en el fenómeno de la isla de calor urbana, se analizan la estructura de correlación entre un grupo de variables y de los pesos de aporte.

El orden en la cual inciden se valoran del 1 al 5 (Tabla 4.3), ordenadas en forma decreciente por su aporte en la formación de los variables latentes (factores) que explican la asociación entre las variables manifiestas, que nos permita explicar de la mejor manera la formación del fenómeno ICU en la ciudad de Ayacucho.

Tabla 4.3: Orden de incidencia de variables seleccionadas en la formación del fenómeno ICU.

Variables	**Código**	**1986**	**1996**	**2006**	**2016**
Albedo de superficie terrestre	Albsup	3	4	3	3
Índice de suelo desnudo	BI	2	2	1	1
Índice mejorado de edificaciones y áreas desnudas	EBBI	2	2	1	1
Índice de suelo urbanizado	IU	1	3	1	4
Índice modificado de contenido de agua de diferencia normalizada	MNDWI	4	5	4	5
Índice de suelo desnudo de diferencia normalizada	NDBal	3	4	3	3
Índice de edificaciones de diferencia normalizada	NDBuI	2	2	1	1
Presión real de vapor de agua	PvWreal	1	1	2	2
Índice de vegetación ajustada al suelo	SAVI	4	5	4	5
Factor visión del cielo	SVF	1	3	1	4
Temperatura de superficie terrestre	TS	5	2	5	3
Velocidad del viento	Windspeed	1	1	2	2

En los 4 periodos estudiados, el orden de incidencia de las variables queda de siguiente manera: 1) BI, EBBI, NDBuI, PvWreal y Windspeed; 2) IU y SVF; 3) Albsup

y NDBal; 4) Ts; y, 5) MNDWI y el SAVI. La formación del dendrograma de incidencia de las variables analizadas se muestra en el siguiente gráfico.

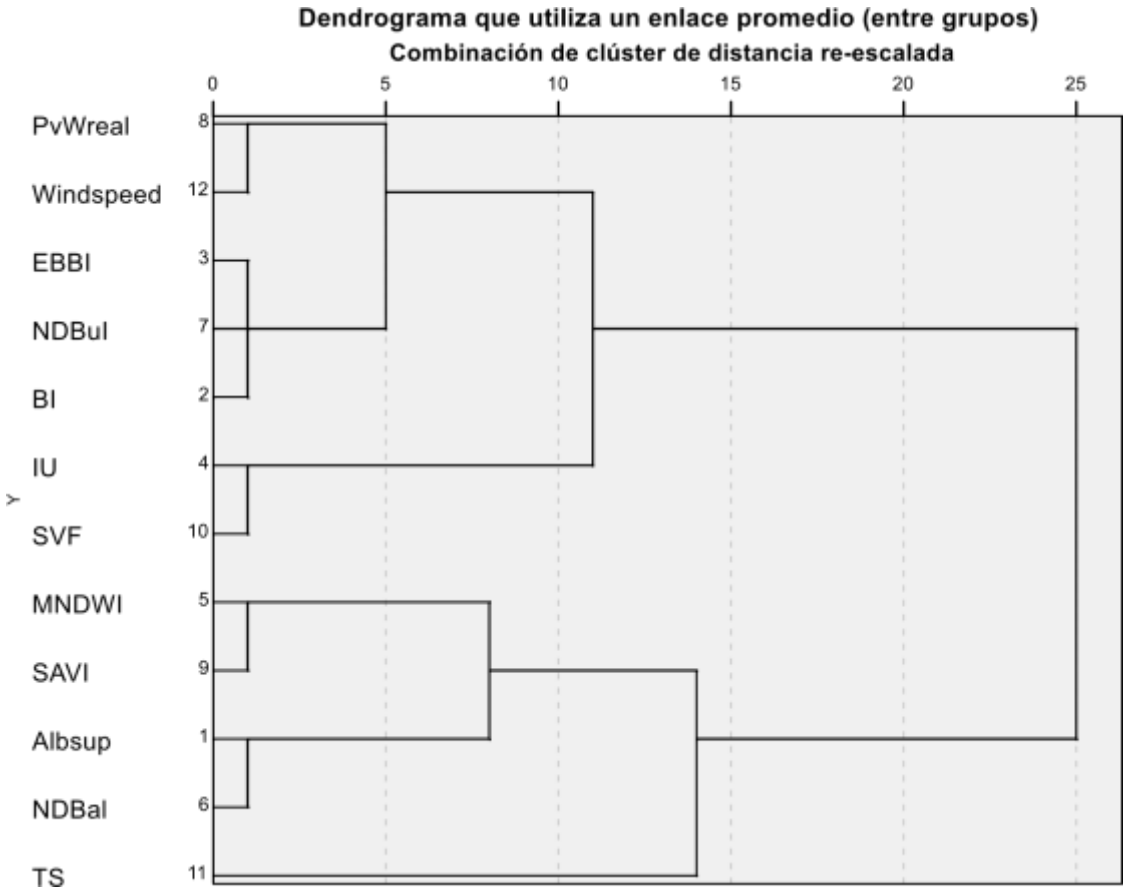


Ilustración 4.1: Formación de grupo de variables según el orden de incidencia en el fenómeno ICU durante el periodo 1986 y 2016.

3.3.2. Estimación del índice de islas de calor urbana

3.3.2.1. Obtención de factores sintéticos a través del ACP

Mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP) se resumen un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto (más pequeño) sin perder una parte significativa de la información original (Chuvieco, 1996). En teledetección, el objetivo del ACP es construir una o varias imágenes que incrementen su capacidad de diferenciar distintas cualidades de las imágenes, incrementando la eficiencia computacional de la clasificación porque reduce la dimensionalidad de los datos. Por otra parte, desde el punto de vista estadístico facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen,

lo que permite identificar aquellos rasgos que aparecen en la mayoría de los índices temáticos y aquellos otros que son específicos de algún grupo de ellas (Chuvieco, opcit).

El ACP es usado para detectar cambios temporales, donde los primeros componentes resultantes recogen información común a las distintas fechas (la estable), mientras los últimos componentes ofrecen la información no común (el cambio) que es lo que interesa en estudios multitemporales. Algebraicamente, el ACP genera nuevas variables (componentes), mediante una combinación lineal de las variables originales (índices temáticos). Aunque se requieren los componentes principales para reproducir la variabilidad total, muchas veces la mayor parte de ella está contenida en un número menor de componentes. En ese caso, reemplazando los índices por los componentes, se reduce la dimensionalidad del problema conservando casi la totalidad de la información.

El resultado de un ACP realizado en este trabajo incluye: 1) El valor propio (eigenvalue) de cada componente, que indica la varianza absorbida por el mismo; 2) Una matriz de vectores propios (eigenvectors) que permiten calcular los valores de cada componente a partir de las variables originales. Estos valores y vectores propios se obtienen a partir de la matriz de covarianzas porque se trabajan con valores de reflectividad.

Los módulos de ACP con el programa TerrSet han proporcionado: 1) Mapas de valores de los componentes; 2) Los valores propios para determinar el porcentaje de varianza explicada por componente; 3) La matriz de vectores propios que permite determinar el peso de las variables en cada componente. Aunque el ACP es una técnica estadística sin significado físico, ha permitido establecer hipótesis de tipo físico analizando la matriz de vectores propios, tanto el signo como la magnitud de las correlaciones.

Tabla 4.4: Resultados del análisis de componentes principales para el año 1986.

T-MODE VAR/COVAR	ALBsup_1986	BI_1986	EBBI_1986	IU_fin_1986	MNDWI_1986	NDBal_1986	NDBuI_1986	PvWreal_gcm2_1986	SAVI_1986	SVF_rtv_x_1986	TS_ºC_1986	WindSpeed_1986
ALBsup_1986	20098.64894	9872.993197	4779.200629	5080.16204	-5890.927911	-11389.58574	7378.390842	1021.148899	872.548401	391.456531	4223.194555	-3390.745438
BI_1986	9872.993197	25349.96506	14466.67156	30263.88595	-3992.036936	-10819.46746	25096.34337	-992.606652	-1332.692028	6781.663918	5837.626208	3295.916195
EBBI_1986	4779.200629	14466.67156	9584.800515	18012.68152	-2482.855624	-6136.01733	15952.7237	-46.247487	-785.808045	50.526228	2095.422882	153.500436
IU_fin_1986	5080.16204	30263.88595	18012.68152	83325.98766	-7203.665652	-8966.92178	31037.62671	-7888.424457	-5782.928259	36871.03546	16904.00288	26193.92576
MNDWI_1986	-5890.927911	-3992.036936	-2482.855624	-7203.665652	15632.69561	1105.433029	-4106.330889	-1539.699379	8794.120304	7986.376862	1955.368905	5112.778675
NDBal_1986	-11389.58574	-10819.46746	-6136.01733	-8966.92178	1105.433029	9103.991893	-10092.72102	-96.272162	-2026.153844	-2442.48324	-1227.673099	319.682512
NDBuI_1986	7378.390842	25096.34337	15952.7237	31037.62671	-4106.330889	-10092.72102	27722.20568	-125.644405	-1500.18346	345.566735	3108.337585	417.086919
PvWreal_gcm2_1986	1021.148899	-992.606652	-46.247487	-7888.424457	-1539.699379	-96.272162	-125.644405	2437.194125	-449.87596	-11808.25929	-3949.314686	-8092.84979
SAVI_1986	872.548401	-1332.692028	-785.808045	-5782.928259	8794.120304	-2026.153844	-1500.18346	-449.87596	6775.532155	3545.938581	1307.897597	1493.926466
SVF_rtv_x_1986	391.456531	6781.663918	50.526228	36871.03546	7986.376862	-2442.48324	345.566735	-11808.25929	3545.938581	83322.79846	21182.80742	39210.07392
TS_ºC_1986	4223.194555	5837.626208	2095.422882	16904.00288	1955.368905	-1227.673099	3108.337585	-3949.314686	1307.897597	21182.80742	20500.57354	13113.98725
WindSpeed_1986	-3390.745438	3295.916195	153.500436	26193.92576	5112.778675	319.682512	417.086919	-8092.84979	1493.926466	39210.07392	13113.98725	26872.7969
T-MODE COR. MATRIX	ALBsup_1986	BI_1986	EBBI_1986	IU_fin_1986	MNDWI_1986	NDBal_1986	NDBuI_1986	PvWreal_gcm2_1986	SAVI_1986	SVF_rtv_x_1986	TS_ºC_1986	WindSpeed_1986
ALBsup_1986	1	0.437398	0.344334	0.124138	-0.332341	-0.841993	0.312582	0.145902	0.074771	0.009566	0.208053	-0.1459
BI_1986	0.437398	1	0.928086	0.658485	-0.200534	-0.712199	0.94669	-0.126283	-0.101688	0.147559	0.256073	0.126279
EBBI_1986	0.344334	0.928086	1	0.637377	-0.202835	-0.65687	0.978655	-0.009569	-0.097511	0.001788	0.149485	0.009564
IU_fin_1986	0.124138	0.658485	0.637377	1	-0.199593	-0.325565	0.64578	-0.553548	-0.243381	0.4425	0.408993	0.553546
MNDWI_1986	-0.332341	-0.200534	-0.202835	-0.199593	1	0.092662	-0.197253	-0.249445	0.854484	0.221284	0.109227	0.24945
NDBal_1986	-0.841993	-0.712199	-0.65687	-0.325565	0.092662	1	-0.635299	-0.020438	-0.257979	-0.088682	-0.089864	0.020438
NDBuI_1986	0.312582	0.94669	0.978655	0.64578	-0.197253	-0.635299	1	-0.015286	-0.109461	0.00719	0.130386	0.015281
PvWreal_gcm2_1986	0.145902	-0.126283	-0.009569	-0.553548	-0.249445	-0.020438	-0.015286	1	-0.110707	-0.828627	-0.558719	-1
SAVI_1986	0.074771	-0.101688	-0.097511	-0.243381	0.854484	-0.257979	-0.109461	-0.110707	1	0.149237	0.110973	0.110714
SVF_rtv_x_1986	0.009566	0.147559	0.001788	0.4425	0.221284	-0.088682	0.00719	-0.828627	0.149237	1	0.512529	0.828627
TS_ºC_1986	0.208053	0.256073	0.149485	0.408993	0.109227	-0.089864	0.130386	-0.558719	0.110973	0.512529	1	0.558721
WindSpeed_1986	-0.1459	0.126279	0.009564	0.553546	0.24945	0.020438	0.015281	-1	0.110714	0.828627	0.558721	1
T-MODE COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
% VAR.	49.198455	26.51481	9.083098	6.171889	4.346381	2.78239	1.336309	0.332917	0.116844	0.082456	0.034453	5.15E-08
T-MODE EIGENVEC. 12	0.311159	0.288379	-0.115501	-0.058197	0.132215	0.116867	-0.819776	-0.082203	-0.035132	0.054763	0.077303	0.288362
T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
ALBsup_1986	0.180307	-0.39189	0.743091	0.424733	0.110727	0.257538	-0.011738	0.009837	-0.029228	0.029063	0.028436	-9.21E-10
BI_1986	0.638835	-0.658997	0.251971	-0.158237	-0.078342	-0.188109	-0.078713	0.140699	0.033617	-0.01876	0.009419	-3.11E-10
EBBI_1986	0.543249	-0.7496	0.136247	-0.233849	-0.078383	-0.153609	-0.014052	-0.143536	-0.077673	-0.108395	0.03754	-1.56E-09
IU_fin_1986	0.894039	-0.302507	-0.285655	0.036863	0.051813	0.139827	0.062715	0.007199	0.002084	-0.000831	-0.00003	-9.10E-11
MNDWI_1986	-0.020703	0.472416	0.17552	-0.812674	0.165506	0.196401	0.087681	0.07653	-0.073258	0.01644	0.00075	-4.06E-10
NDBal_1986	-0.378541	0.513534	-0.692028	0.007251	0.096638	-0.29146	0.093475	0.026042	0.003516	0.05055	0.088111	-2.41E-09
NDBuI_1986	0.550599	-0.751612	0.112937	-0.256685	-0.108604	-0.175648	-0.02072	-0.080323	-0.003249	0.060758	-0.006922	6.86E-10
PvWreal_gcm2_1986	-0.765661	-0.520935	0.122121	0.05072	-0.096694	-0.068382	0.332456	0.016641	0.004212	-0.005519	-0.005028	0.000253
SAVI_1986	-0.049924	0.307841	0.508449	-0.656128	0.189828	0.353894	0.079918	-0.124714	0.170737	-0.02068	0.03039	-8.15E-10
SVF_rtv_x_1986	0.761451	0.594807	0.163179	0.046051	-0.173017	-0.060236	0.063777	-0.004173	-0.000361	0.000105	0.000026	-3.29E-12
TS_ºC_1986	0.58667	0.216303	0.191649	0.097222	0.692719	-0.279114	0.068719	-0.013853	0.001989	-0.005027	-0.011937	2.78E-10
WindSpeed_1986	0.76566	0.520939	-0.122119	-0.050721	0.096699	0.068388	-0.332451	-0.016639	-0.004213	0.005517	0.005034	0.000023

Tabla 4.5: Resultados del análisis de componentes principales para el año 1996.

ALBsup_1996	11203.05693	7335.879285	601.694507	3711.430689	-1896.287325	-7767.297103	1118.355179	3779.415337	-631.184737	-2467.942727	5356.350415	-3247.638257
BI_1996	7335.879285	7935.148867	735.051831	4997.686362	-2284.378951	-5773.448968	1925.235035	1884.577508	-2021.399617	-3427.978966	5327.809008	-931.269284
EBBI_1996	601.694507	735.051831	174.721866	1265.897492	-132.020565	-591.757596	238.960988	259.630704	-100.48718	-865.478809	594.728397	-139.347683
IU_1996	3711.430689	4997.686362	1265.897492	17999.64454	-2055.80655	-3353.992246	1787.090316	3539.808153	-2185.576153	-11958.14225	3719.280637	-2975.311751
MNDWI_1996	-1896.287325	-2284.378951	-132.020565	-2055.80655	2370.511374	940.762331	-646.627242	-3876.996827	2517.79955	1464.531813	-931.031071	3499.10255
NDBaI_1996	-7767.297103	-5773.448968	-591.757596	-3353.992246	940.762331	6185.096264	-1139.637618	-1399.871339	65.039675	2250.741044	-1847.364474	877.979242
NDBuI_1996	1118.355179	1925.235035	238.960988	1787.090316	-646.627242	-1139.637618	649.994532	805.928208	-714.025867	-1251.114821	936.772198	-422.814944
Pwreal_1996	3779.415337	1884.577508	259.630704	3539.808153	-3876.996827	-1399.871339	805.928208	40614.24872	-3596.578212	-2707.694852	-430.599995	-36838.16617
SAVI_1996	-631.184737	-2021.399617	-100.48718	-2185.576153	2517.79955	65.039675	-714.025867	-3596.578212	3133.762111	1571.929134	-802.50777	3157.732161
SVF_rtv_1996	-2467.942727	-3427.978966	-865.478809	-11958.14225	1464.531813	2250.741044	-1251.114821	-2707.694852	1571.929134	8268.610569	-2638.008945	2241.970863
TS_1996	5356.350415	5327.809008	594.728397	3719.280637	-931.031071	-1847.364474	936.772198	-430.599995	-802.50777	-2638.008945	30362.72924	1154.026065
WindSpeed_1996	-3247.638257	-931.269284	-139.347683	-2975.311751	3499.10255	877.979242	-422.814944	-36838.16617	3157.732161	2241.970863	1154.026065	35367.56906

T-MODE COR. MATRIX	ALBsup_1996	BI_1996	EBBI_1996	IU_1996	MNDWI_1996	NDBaI_1996	NDBuI_1996	Pwreal_1996	SAVI_1996	SVF_rtv_1996	TS_1996	WindSpeed_1996
ALBsup_1996	1	0.778048	0.430065	0.261361	-0.367972	-0.9331	0.414435	0.177181	-0.106526	-0.256419	0.290423	-0.163154
BI_1996	0.778048	1	0.624262	0.418176	-0.526708	-0.824109	0.847718	0.104978	-0.405361	-0.423199	0.343242	-0.05559
EBBI_1996	0.430065	0.624262	1	0.713827	-0.205138	-0.569242	0.709085	0.097464	-0.135801	-0.720056	0.258211	-0.056056
IU_1996	0.261361	0.418176	0.713827	1	-0.314724	-0.317875	0.522468	0.130921	-0.291005	-0.980202	0.159095	-0.117923
MNDWI_1996	-0.367972	-0.526708	-0.205138	-0.314724	1	0.245689	-0.520929	-0.395126	0.923777	0.330797	-0.109742	0.382149
NDBaI_1996	-0.9331	-0.824109	-0.569242	-0.317875	0.245689	1	-0.56838	-0.088323	0.014773	0.314728	-0.134806	0.059362
NDBuI_1996	0.414435	0.847718	0.709085	0.522468	-0.520929	-0.56838	1	0.156856	-0.500295	-0.539667	0.210867	-0.088185
Pwreal_1996	0.177181	0.104978	0.097464	0.130921	-0.395126	-0.088323	0.156856	1	-0.318799	-0.147756	-0.012262	-0.971977
SAVI_1996	-0.106526	-0.405361	-0.135801	-0.291005	0.923777	0.014773	-0.500295	-0.318799	1	0.308805	-0.082271	0.299944
SVF_rtv_1996	-0.256419	-0.423199	-0.720056	-0.980202	0.330797	0.314728	-0.539667	-0.147756	0.308805	1	-0.166491	0.131103
TS_1996	0.290423	0.343242	0.258211	0.159095	-0.109742	-0.134806	0.210867	-0.012262	-0.082271	-0.166491	1	0.035216
WindSpeed_1996	-0.163154	-0.05559	-0.056056	-0.117923	0.382149	0.059362	-0.088185	-0.971977	0.299944	0.131103	0.035216	1

T-MODE COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
% VAR.	47.041879	24.439776	14.348384	9.369814	2.954459	1.003676	0.529953	0.137571	0.089285	0.054373	0.021953	0.008877
T-MODE EIGENVAL.	0.077273	0.040146	0.023569	0.015391	0.004853	0.001649	0.000871	0.000226	0.000147	0.000089	0.000036	0.000015
T-MODE EIGENVEC. 1	0.100116	0.325363	0.080725	0.591558	0.206675	-0.476081	0.226988	0.066882	0.258827	0.015999	0.121076	0.346968

T-MODE EIGENVEC. 2	0.061792	0.323644	0.125128	0.351606	-0.340614	0.533051	-0.337108	0.156818	0.419731	-0.097943	0.061837	-0.155459
T-MODE EIGENVEC. 3	0.008548	0.042991	0.035611	-0.002463	0.019602	0.096158	-0.036351	-0.099856	-0.287236	-0.034322	0.944559	0.00267
T-MODE EIGENVEC. 4	0.113976	0.412962	0.555536	-0.419287	0.139634	-0.064836	0.013323	0.535845	-0.14272	-0.007354	-0.024661	-0.00326
T-MODE EIGENVEC. 5	-0.080611	-0.074747	-0.055533	-0.047237	0.514612	0.33344	-0.134267	0.075298	0.21396	0.702927	0.054311	0.200146
T-MODE EIGENVEC. 6	-0.048117	-0.223173	-0.155484	-0.45195	-0.200563	-0.124485	0.026873	0.199647	0.611907	-0.198701	0.231995	0.394218
T-MODE EIGENVEC. 7	0.02048	0.074019	0.056279	0.033898	-0.144548	0.305434	-0.126814	-0.119925	-0.373956	-0.137121	-0.172232	0.81045
T-MODE EIGENVEC. 8	0.715126	-0.101086	-0.087934	-0.013543	0.010824	0.345461	0.590029	0.038999	0.03151	-0.004495	0.002316	-0.018064
T-MODE EIGENVEC. 9	-0.073727	-0.060507	-0.056726	0.03653	0.694416	0.225444	-0.084713	0.009736	0.084126	-0.660368	-0.032229	-0.042885
T-MODE EIGENVEC. 10	-0.082009	-0.279191	-0.368401	0.284672	-0.067998	0.004772	-0.034692	0.781647	-0.284628	-0.00979	0.023368	0.009532
T-MODE EIGENVEC. 11	0.014487	0.669801	-0.69586	-0.243944	0.035338	-0.010683	-0.002609	-0.01747	-0.064247	0.011817	-0.025638	-0.028773
T-MODE EIGENVEC. 12	-0.663389	0.125204	0.081364	0.030347	-0.085071	0.292369	0.664819	0.032094	0.02641	-0.013637	0.005852	-0.00705
T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
ALBsup_1996	0.262936	0.615916	0.117088	0.693374	0.136029	-0.182634	0.063274	0.009499	0.029615	0.001429	0.006869	0.012518
BI_1996	0.192828	0.727966	0.215651	0.489685	-0.266377	0.242974	-0.111656	0.026464	0.057063	-0.010391	0.004169	-0.006664
EBBI_1996	0.179772	0.651673	0.413608	-0.023119	0.103307	0.295379	-0.08114	-0.113563	-0.263165	-0.024539	0.429114	0.000771
IU_1996	0.236155	0.616735	0.635704	-0.387719	0.072505	-0.019622	0.00293	0.06004	-0.012883	-0.000518	-0.001104	-0.000093
MNDWI_1996	-0.460244	-0.307603	-0.175106	-0.120365	0.736327	0.278078	-0.081365	0.023249	0.05322	0.136443	0.006699	0.015697
NDBaI_1996	-0.170075	-0.568578	-0.30352	-0.712943	-0.17766	-0.064271	0.010082	0.038161	0.094227	-0.023878	0.017714	0.019141
NDBuI_1996	0.223304	0.581713	0.338893	0.164951	-0.394976	0.486443	-0.146758	-0.070712	-0.177635	-0.050829	-0.040567	0.121387
Pwreal_1996	0.986413	-0.100502	-0.066987	-0.008337	0.003742	0.069603	0.086382	0.002909	0.001894	-0.000211	0.000069	-0.000342
SAVI_1996	-0.36611	-0.216566	-0.155569	0.080957	0.864168	0.163522	-0.044649	0.002614	0.018199	-0.111485	-0.003457	-0.002925
SVF_rtv_1996	-0.250702	-0.615187	-0.621984	0.388389	-0.052095	0.002131	-0.011257	0.12922	-0.037907	-0.001017	0.001543	0.0004
TS_1996	0.023111	0.770187	-0.613092	-0.173684	0.014128	-0.002489	-0.000442	-0.001507	-0.004465	0.000641	-0.000884	-0.000631
WindSpeed_1996	-0.980575	0.133394	0.066421	0.020019	-0.031513	0.063124	0.104302	0.002565	0.001701	-0.000685	0.000187	-0.000143

Tabla 4.6: Resultados del análisis de componentes principales para el año 2006.

AlbSupr_2006	17504.78802	10268.47629	5549.638836	1712.939265	-6250.069863	-15851.40199	-987.363765	3393.29062	-946.945493	-3580.371444	4527.078553	-3260.910742
BI_2006	10268.47629	44674.89695	35990.51224	21700.80254	-9054.960554	-18560.53037	40125.29483	-5853.79828	-3293.811739	25318.93127	7727.692281	1344.284283
EBBI_2006	5549.638836	35990.51224	35525.13555	22168.21224	-6861.078327	-13946.07078	40837.27831	1944.722338	-2310.965456	27805.96533	4756.929317	-5783.070863
IU_2006	1712.939265	21700.80254	22168.21224	24447.08689	-10780.76306	-4379.453647	29062.62136	6891.055468	-3872.999668	31623.7964	2075.5775	-8747.753723
MNDWI_2006	-6250.069863	-9054.960554	-6861.078327	-10780.76306	17779.08558	3546.221416	-8831.74824	-8905.411647	5599.14676	-15547.49099	-1414.412421	6389.79832
NDBaI_2006	-15851.40199	-18560.53037	-13946.07078	-4379.453647	3546.221416	19735.26521	-9266.917326	698.844798	145.506093	-435.887623	-1298.384401	992.980803
NDBuI_2006	-987.363765	40125.29483	40837.27831	29062.62136	-8831.74824	-9266.917326	53026.33491	2970.339374	-3557.793609	41072.52383	2956.971699	-7648.297454
Pvwreal_2006	3393.29062	-5853.79828	1944.722338	6891.055468	-8905.411647	698.844798	2970.339374	83422.48802	-1705.477795	10979.42528	-4751.108504	-75408.8184
SAVI_2006	-946.945493	-3293.811739	-2310.965456	-3872.999668	5599.14676	145.506093	-3557.793609	-1705.477795	2040.203335	-5881.240733	-510.02433	942.466692
SkyView_2006	-3580.371444	25318.93127	27805.96533	31623.7964	-15547.49099	-435.887623	41072.52383	10979.42528	-5881.240733	53479.36179	-1344.74602	-13542.57764
TS_2006	4527.078553	7727.692281	4756.929317	2075.5775	-1414.412421	-1298.384401	2956.971699	-4751.108504	-510.02433	-1344.74602	15839.0318	3732.946848
Windspeed_2006	-3260.910742	1344.284283	-5783.070863	-8747.753723	6389.79832	992.980803	-7648.297454	-75408.8184	942.466692	-13542.57764	3732.946848	83312.51077

T-MODE COR. MATRIX	AlbSupr_2006	BI_2006	EBBI_2006	IU_2006	MNDWI_2006	NDBaI_2006	NDBuI_2006	Pvwreal_2006	SAVI_2006	SkyView_2006	TS_2006	Windspeed_2006
AlbSupr_2006	1	0.367194	0.222545	0.082804	-0.354284	-0.85284	-0.032408	0.088798	-0.158456	-0.117019	0.271879	-0.08539
BI_2006	0.367194	1	0.903417	0.656645	-0.321292	-0.625082	0.824405	-0.095888	-0.345009	0.517989	0.290505	0.022035
EBBI_2006	0.222545	0.903417	1	0.752228	-0.273004	-0.526699	0.940899	0.035723	-0.271449	0.637936	0.200537	-0.106301
IU_2006	0.082804	0.656645	0.752228	1	-0.517108	-0.199382	0.807189	0.152592	-0.5484	0.874596	0.105478	-0.193833
MNDWI_2006	-0.354284	-0.321292	-0.273004	-0.517108	1	0.189317	-0.287638	-0.231237	0.929673	-0.504211	-0.084286	0.166026
NDBaI_2006	-0.85284	-0.625082	-0.526699	-0.199382	0.189317	1	-0.286463	0.017223	0.022931	-0.013417	-0.073437	0.024489
NDBuI_2006	-0.032408	0.824405	0.940899	0.807189	-0.287638	-0.286463	1	0.04466	-0.342057	0.771281	0.102032	-0.11507
Pvwreal_2006	0.088798	-0.095888	0.035723	0.152592	-0.231237	0.017223	0.04466	1	-0.130728	0.164378	-0.130704	-0.904535
SAVI_2006	-0.158456	-0.345009	-0.271449	-0.5484	0.929673	0.022931	-0.342057	-0.130728	1	-0.56304	-0.08972	0.072289
SkyView_2006	-0.117019	0.517989	0.637936	0.874596	-0.504211	-0.013417	0.771281	0.164378	-0.56304	1	-0.046204	-0.202886
TS_2006	0.271879	0.290505	0.200537	0.105478	-0.084286	-0.073437	0.102032	-0.130704	-0.08972	-0.046204	1	0.102762
Windspeed_2006	-0.08539	0.022035	-0.106301	-0.193833	0.166026	0.024489	-0.11507	-0.904535	0.072289	-0.202886	0.102762	1

T-MODE COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
% VAR.	42.115611	33.681858	10.599285	5.365976	3.447844	1.831697	1.329753	0.728271	0.646514	0.149493	0.077335	0.026363
T-MODE EIGENVAL.	0.189851	0.151833	0.04778	0.024189	0.015542	0.008257	0.005994	0.003283	0.002914	0.000674	0.000349	0.000119
T-MODE EIGENVEC. 1	0.053225	-0.0139	-0.511834	0.374685	-0.068249	-0.211173	0.239323	0.070165	0.122668	-0.239065	0.63717	0.070534
T-MODE EIGENVEC. 2	0.338112	-0.312736	-0.336266	-0.117817	0.066956	0.126303	-0.269555	-0.594429	-0.447134	0.027885	0.065605	0.097307
T-MODE EIGENVEC. 3	0.351932	-0.234667	-0.153939	-0.249424	-0.012424	0.115237	0.066742	0.32563	0.237092	0.719602	0.191411	-0.023767

T-MODE EIGENVEC. 4	0.298076	-0.13071	0.156292	0.19575	0.052056	-0.174827	0.265811	0.473289	-0.701159	-0.039227	-0.101087	-0.002528
T-MODE EIGENVEC. 5	-0.148864	0.016731	-0.003194	-0.670964	-0.070412	-0.29906	0.520385	-0.195145	-0.136589	-0.073256	0.153587	-0.276529
T-MODE EIGENVEC. 6	-0.107522	0.09481	0.528268	-0.093859	0.363291	0.141419	-0.17073	-0.019167	-0.158311	0.050824	0.673266	0.170719
T-MODE EIGENVEC. 7	0.440367	-0.278318	0.113016	-0.333721	-0.013483	0.208307	-0.108251	0.253967	0.279597	-0.636777	0.031926	-0.001938
T-MODE EIGENVEC. 8	0.345416	0.612248	-0.054388	0.038858	0.021712	0.566743	0.399282	-0.132954	-0.042356	-0.014494	-0.024011	-0.004374
T-MODE EIGENVEC. 9	-0.047774	0.017167	-0.035656	-0.202601	-0.046374	-0.114561	0.204691	0.010904	0.038524	-0.00046	-0.137439	0.936717
T-MODE EIGENVEC. 10	0.419636	-0.159376	0.49166	0.3136	-0.091926	-0.320717	0.266929	-0.430987	0.286552	0.08739	-0.019225	-0.000784
T-MODE EIGENVEC. 11	0.018384	-0.071392	-0.180095	0.03162	0.915391	-0.11551	0.177205	-0.020284	0.172771	-0.034656	-0.21238	-0.043349
T-MODE EIGENVEC. 12	-0.380092	-0.58093	0.08114	0.181457	-0.043146	0.540609	0.42345	-0.069193	-0.007308	-0.014896	-0.004124	0.005539

T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
AlbSupr_2006	0.175284	-0.040936	-0.845619	0.440451	-0.06431	-0.145034	0.140048	0.030386	0.050053	-0.046906	0.089919	0.005812
BI_2006	0.697005	-0.57654	-0.347756	-0.086693	0.039492	0.054299	-0.098738	-0.161139	-0.114204	0.003425	0.005795	0.005019
EBBI_2006	0.813576	-0.485141	-0.178527	-0.205817	-0.008218	0.055557	0.027416	0.098989	0.067908	0.09911	0.018961	-0.001375
IU_2006	0.830655	-0.325747	0.218498	0.194714	0.041506	-0.101603	0.131623	0.173438	-0.24209	-0.006513	-0.012071	-0.000176
MNDWI_2006	-0.486456	0.048893	-0.005236	-0.782626	-0.065834	-0.203805	0.302163	-0.083856	-0.055301	-0.014262	0.021507	-0.022608
NDBaI_2006	-0.33349	0.262975	0.821971	-0.103912	0.322398	0.091474	-0.094093	-0.007818	-0.060836	0.009392	0.089482	0.013248
NDBuI_2006	0.83325	-0.470954	0.107279	-0.225397	-0.007299	0.0822	-0.036396	0.063192	0.065548	-0.071786	0.002589	-0.000092
Pvwreal_2006	0.521084	0.825979	-0.041161	0.020924	0.009372	0.178302	0.107031	-0.026375	-0.007917	-0.001303	-0.001552	-0.000165
SAVI_2006	-0.460848	0.148097	-0.17255	-0.697612	-0.127997	-0.230468	0.350859	0.013832	0.046044	-0.000264	-0.056813	0.226077
SkyView_2006	0.790655	-0.268543	0.464724	0.210908	-0.049557	-0.12602	0.089366	-0.106783	0.066894	0.00981	-0.001552	-0.000037
TS_2006	0.063646	-0.221038	-0.312796	0.039075	0.906779	-0.0834	0.109014	-0.009235	0.074111	-0.007148	-0.031508	-0.003755
Windspeed_2006	-0.573774	-0.784246	0.061448	0.097775	-0.018636	0.170192	0.113584	-0.013735	-0.001367	-0.00134	-0.000267	0.000209

Tabla 4.7: Resultados del análisis de componentes principales para el año 2016.

Albsup_2016	40483.38275	5199.018124	1077.968176	-636.463729	-1398.821822	-41072.04309	-4477.96016	2041.161148	216.712066	1449.393696	27043.67737	-3533.450064
BI_2016	5199.018124	28535.73372	3436.93535	8172.919174	-12224.13942	-6323.150299	42774.35776	-3349.59038	-9041.89755	-8323.687021	6964.134831	1169.183779
EBBI_2016	1077.968176	3436.93535	622.675398	1708.762233	-734.191038	-1253.10292	7157.724724	519.202245	-486.543921	-1679.105096	1209.081964	-321.706745
IU_2016	-636.463729	8172.919174	1708.762233	29058.78352	-6414.833604	285.891682	20029.10052	3519.290304	-3386.417166	-26558.52974	661.489876	-2075.437168
MNDWI_2016	-1398.821822	-12224.13942	-734.191038	-6414.833604	31864.77661	1002.492684	-13411.64903	-11821.63139	16015.63448	6837.682657	-937.206294	10276.96589
NDBal_2016	-41072.04309	-6323.150299	-1253.10292	285.891682	1002.492684	41877.81313	2780.936714	-1671.883146	-335.524323	-1128.755255	-27169.53034	3240.564317
NDBuI_2016	-4477.96016	42774.35776	7157.724724	20029.10052	-13411.64903	2780.936714	95451.1576	9523.980824	-8583.505977	-20968.3205	2732.889708	-5169.624113
PvWreal_2016	2041.161148	-3349.59038	519.202245	3519.290304	-11821.63139	-1671.883146	9523.980824	83331.18647	-1052.259781	-4051.178602	-1151.011071	-46894.76788
SAVI_2016	216.712066	-9041.89755	-486.543921	-3386.417166	16015.63448	-335.524323	-8583.505977	-1052.259781	9442.598068	3544.946063	-434.201751	2148.476656
SVF_2016	1449.393696	-8323.687021	-1679.105096	-26558.52974	6837.682657	-1128.755255	-20968.3205	-4051.178602	3544.946063	27262.20095	-101.327069	2404.353544
TS_2016	27043.67737	6964.134831	1209.081964	661.489876	-937.206294	-27169.53034	2732.889708	-1151.011071	-434.201751	-101.327069	23740.2875	-1042.561144
Windspeed_2016	-3533.450064	1169.183779	-321.706745	-2075.437168	10276.96589	3240.564317	-5169.624113	-46894.76788	2148.476656	2404.353544	-1042.561144	32196.63634

T-MODE COR. MATRIX	Albsup_2016	BI_2016	EBBI_2016	IU_2016	MNDWI_2016	NDBal_2016	NDBuI_2016	PvWreal_2016	SAVI_2016	SVF_2016	TS_2016	Windspeed_2016
Albsup_2016	1	0.152964	0.214702	-0.018557	-0.038947	-0.997507	-0.072036	0.035143	0.011084	0.043628	0.872337	-0.097871
BI_2016	0.152964	1	0.815354	0.283821	-0.405386	-0.182914	0.819593	-0.06869	-0.550832	-0.298429	0.267565	0.038573
EBBI_2016	0.214702	0.815354	1	0.401709	-0.164825	-0.245394	0.928439	0.072078	-0.200653	-0.407537	0.314472	-0.07185
IU_2016	-0.018557	0.283821	0.401709	1	-0.21081	0.008195	0.380305	0.071518	-0.204435	-0.943593	0.025185	-0.067852
MNDWI_2016	-0.038947	-0.405386	-0.164825	-0.21081	1	0.027443	-0.243185	-0.229413	0.9233	0.231992	-0.034075	0.320852
NDBal_2016	-0.997507	-0.182914	-0.245394	0.008195	0.027443	1	0.043985	-0.028302	-0.016873	-0.033406	-0.861682	0.088252
NDBuI_2016	-0.072036	0.819593	0.928439	0.380305	-0.243185	0.043985	1	0.106788	-0.285909	-0.411048	0.05741	-0.093253
PvWreal_2016	0.035143	-0.06869	0.072078	0.071518	-0.229413	-0.028302	0.106788	1	-0.037512	-0.084996	-0.025878	-0.905348
SAVI_2016	0.011084	-0.550832	-0.200653	-0.204435	0.9233	-0.016873	-0.285909	-0.037512	1	0.220945	-0.029	0.12322
SVF_2016	0.043628	-0.298429	-0.407537	-0.943593	0.231992	-0.033406	-0.411048	-0.084996	0.220945	1	-0.003983	0.081155
TS_2016	0.872337	0.267565	0.314472	0.025185	-0.034075	-0.861682	0.05741	-0.025878	-0.029	-0.003983	1	-0.03771
Windspeed_2016	-0.097871	0.038573	-0.07185	-0.067852	0.320852	0.088252	-0.093253	-0.905348	0.12322	0.081155	-0.03771	1

T-MODE COMPONENT	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
% VAR.	31.96875	24.558254	22.901995	9.416727	7.846527	1.02724	0.990478	0.830622	0.348943	0.094273	0.010802	0.005392
T-MODE EIGENVAL.	0.141899	0.109006	0.101654	0.041798	0.034828	0.00456	0.004396	0.003687	0.001549	0.000418	0.000048	0.000024
T-MODE EIGENVEC. 1	0.030313	0.241522	0.574517	-0.032062	0.024812	-0.263916	0.085548	-0.004691	-0.003108	-0.095712	0.66784	0.27724

T-MODE EIGENVEC. 2	0.337121	-0.199309	0.16658	0.18415	-0.163631	0.437392	0.526768	0.46074	-0.048162	0.264455	0.067529	0.017222
T-MODE EIGENVEC. 3	0.054963	-0.021945	0.024184	0.021967	0.029648	-0.018657	-0.011692	-0.007804	0.027704	0.016168	-0.398114	0.9135
T-MODE EIGENVEC. 4	0.242731	-0.101406	0.00043	-0.656858	0.150038	0.050638	0.051246	0.054535	0.684168	0.005566	0.013795	-0.018806
T-MODE EIGENVEC. 5	-0.231752	-0.055641	0.011704	0.122585	0.807458	0.187049	0.158044	0.244802	-0.027406	-0.394179	-0.003645	-0.002703
T-MODE EIGENVEC. 6	-0.041091	-0.232664	-0.586997	0.023031	-0.04498	0.310425	-0.181046	-0.062222	0.003534	-0.017256	0.617876	0.286297
T-MODE EIGENVEC. 7	0.718619	-0.3593	0.033168	0.357909	0.238139	-0.254003	-0.228205	-0.187752	0.03256	-0.10227	0.019073	-0.06966
T-MODE EIGENVEC. 8	0.355024	0.702688	-0.308131	0.063034	0.146075	0.140511	0.347787	-0.345232	-0.001948	-0.006392	-0.000639	0.001686
T-MODE EIGENVEC. 9	-0.117016	0.031399	-0.008591	0.046465	0.443699	-0.121883	-0.10855	-0.027703	0.004424	0.867857	0.074761	0.005477
T-MODE EIGENVEC. 10	-0.246803	0.102414	0.013041	0.618732	-0.135624	-0.000846	0.004398	-0.001407	0.725924	-0.004306	0.005035	-0.013231
T-MODE EIGENVEC. 11	0.055751	0.117961	0.423009	0.006194	0.037157	0.707387	-0.480005	-0.259406	-0.000441	0.024037	-0.054575	-0.031183
T-MODE EIGENVEC. 12	-0.21892	-0.430922	0.147202	-0.021454	0.022706	0.072528	0.489324	-0.70595	0.002154	0.025761	0.001729	0.000647

T-MODE LOADING	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
Albsup_2016	0.056752	0.396318	0.91039	-0.032578	0.023014	-0.088571	0.028191	-0.001416	-0.000608	-0.009731	0.022983	0.006741
BI_2016	0.751762	-0.389544	0.314407	0.222871	-0.180774	0.174839	0.206764	0.165611	-0.01122	0.032024	0.002768	0.000499
EBBI_2016	0.829712	-0.290352	0.309001	0.179974	0.221732	-0.050487	-0.031067	-0.018989	0.043694	0.013254	-0.110473	0.179086
IU_2016	0.536383	-0.196404	0.000804	-0.787788	0.164259	0.020059	0.019933	0.019425	0.157953	0.000668	0.00056	-0.00054
MNDWI_2016	-0.489055	-0.102911	0.020904	0.140397	0.84417	0.070756	0.058704	0.08327	-0.006042	-0.045171	-0.000141	-0.000074
NDBal_2016	-0.075638	-0.375373	-0.914549	0.023009	-0.04102	0.10243	-0.058661	-0.018462	0.00068	-0.001725	0.020907	0.006844
NDBuI_2016	0.876188	-0.383965	0.034229	0.236842	0.143849	-0.055515	-0.048976	-0.0369	0.004148	-0.006771	0.000427	-0.001103
PvWreal_2016	0.46328	0.803681	-0.340326	0.044643	0.094436	0.032868	0.079884	-0.072616	-0.000266	-0.000453	-0.000015	0.000029
SAVI_2016	-0.453618	0.106681	-0.028187	0.097759	0.852133	-0.084696	-0.074069	-0.01731	0.001792	0.182693	0.005327	0.000276
SVF_2016	-0.563065	0.204788	0.025182	0.766123	-0.153292	-0.000346	0.001766	-0.000517	0.173027	-0.000533	0.000211	-0.000392
TS_2016	0.136302	0.252768	0.875326	0.008219	0.045005	0.310011	-0.206563	-0.102227	-0.000113	0.003191	-0.002453	-0.00099
Windspeed_2016	-0.459589	-0.792901	0.26156	-0.024444	0.023615	0.027294	0.180817	-0.23889	0.000472	0.002937	0.000067	0.000018

El ACP en su primera fase permitió identificar aquellos rasgos que se recogen en la mayor parte de los índices temáticos y aquellos otros que son específicos a algún grupo de ellas. A partir de la matriz de varianza-covarianza de los índices que componen la imagen original se extraen los autovalores que expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y, en última instancia, la proporción de información original que retienen. Este dato resulta de gran interés para decidir que componentes principales son más interesantes, habitualmente los que mayor información original retengan. Tal y como se obtienen los CP, el autovalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis. La varianza original explicada por cada componente se calcula como la proporción de su autovalor frente a la suma de todos los autovalores.

En definitiva, para interpretar el sentido de las nuevas variables se requiere conocer su relación con las originales, su interpretación se basa en teorías y no en especulaciones. Por otra parte, para calcular las ecuaciones y obtener las nuevas imágenes se precisa analizar los coeficientes de la transformación; ambos aspectos se abordan a partir de los autovectores. El autovector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de los índices temáticos originales para obtener el nuevo CP; es decir, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo los índices de la imagen las variables independientes y los CP las dependientes.

A partir de los autovectores se calcula la matriz de correlación entre el CP y las imágenes originales, lo que nos permite conocer el sentido espectral de estos componentes, siendo necesario tener en cuenta que los coeficientes factoriales debe ser próximos a 1, una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor, y los factores no deben tener coeficientes similares.

De todas las combinaciones lineales posibles, los componentes principales son aquellas que no están correlacionadas y tienen máxima varianza. Con respecto a la matriz de correlación en el análisis correspondiente al año 1986, el ALBsup está correlacionada con NDBaI; el BI presenta correlación con el EBBI, NDBuI y NDBuI; el MNDWI con el

SAVI; el PvWreal con el WindSpeed y SVF; por lo tanto se debería excluir del análisis una de estas variables, pero se dejan porque se comportan de manera diferente, además estas variables tienen alta varianzacovarianza como tal son importantes en el análisis.

Los autovalores calculados a partir de la matriz de varianza/covarianza, para el año 1986, son: 0.162713, 0.087692, 0.03004, 0.020412, 0.014375, 0.009202, 0.00442, 0.001101, 0.000386, 0.000273, 0.000114 y 1.70E-10. Mientras la proporción de varianza total explicada por cada componente resultante es 49.20% para el primer componente; 26.51% para el segundo; 9.08% para el tercero, 6.17% para el cuarto; 4.35% para el quinto, 2.78% para el sexto, 1.34% para el séptimo, 0.33% para el octavo, 0.12% para el noveno, 0.08% para el décimo, 0.03% para undécimo y 5.15E-08% para el duodécimo componente.

De acuerdo a estos porcentajes, seleccionando los 5 primeros componentes, retienen o sintetizan el 95.31% de la varianza original de las imágenes; mientras que con el sexto retienen en conjunto el 98.1% de la variabilidad total. Teniendo presente que el objetivo es reducir la dimensionalidad de los datos, se podría pensar que los 5 componentes conservan casi la totalidad de la información. Una vez analizados los componentes, para determinar cuántos de ellos incluir se aplicaron tres criterios, siendo estos:

a) Al graficar los porcentajes de la varianza total explicada por componente, o equivalentemente los autovalores, considerando el punto de inflexión de la curva se debería retener los 6 primeros componentes.

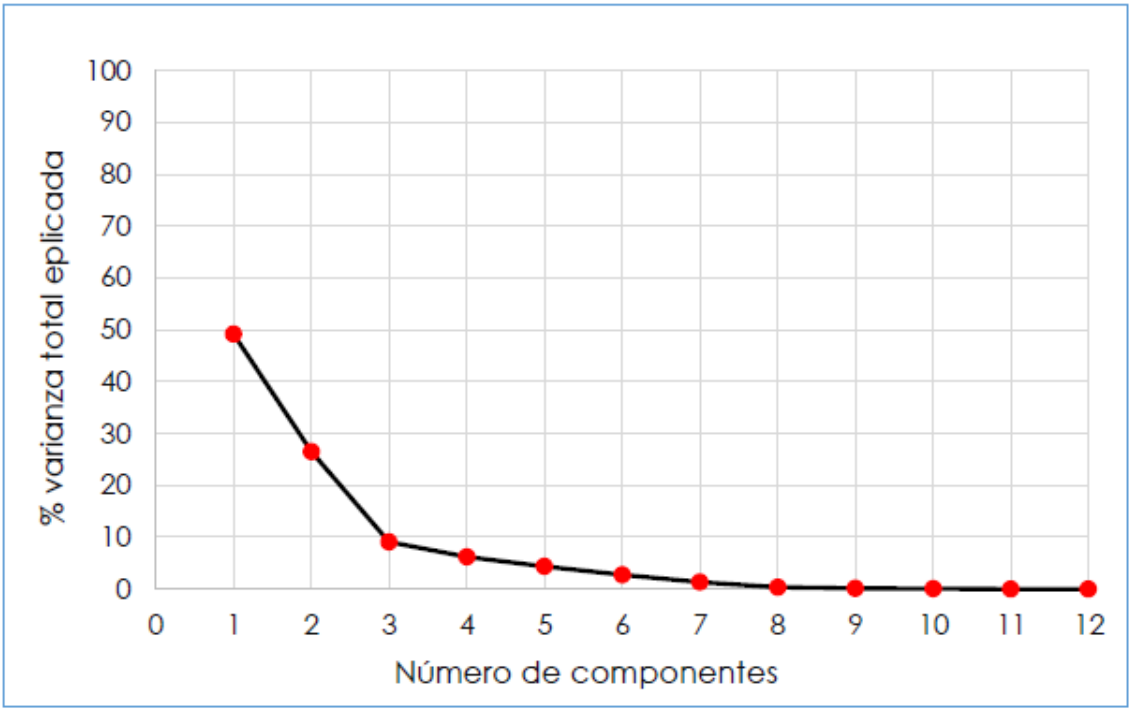


Ilustración 4.2: Porcentaje de la variación total explicada para el año 1986.

a) Considerando componentes cuyos autovalores son mayores al promedio (0.03) solamente se deberían retener los 3 componentes (λ=0.1627, λ=0.0877 y λ=0.03); del cuarto componente en adelante se debería descartar.

b) Para examinar las correlaciones entre imágenes originales y los componentes se analizan los coeficientes de correlación que aparecen en la tabla LOADING. Por ejemplo, el componente 1 con el UI tiene correlación positiva de 0.894, con PvWreal es -0.765, con SVF es 0.761 y con WindSpeed es 0.766; este componente retiene información de morfología urbana asociado a los desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público. De esta tabla se puede concluir que el UI es la que más contribuyen al componente 1 (r=0.89), mientras que el MNDWI tiene el menor aporte (r=0.02). Asimismo, toda la contribución de los índices de vegetación y la humedad están en el componente 4 (r=-0.81 y r=-0.66) que, por otro lado, tiene poca correlación con las restantes

índices temáticos. Los valores pequeños de los coeficientes de correlación del componente 5 en adelante, indicarían que sólo deberían incluirse los componentes 1 al 5.

Finalmente, de acuerdo a los criterios expuestos se eligieron los componentes 1, 2, 3, 4 y 5; de esta manera para el año 1986 se establecen 5 factores, siendo los siguientes:

- Primer factor, Fc1-MuAsDc: Morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociado a los desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público urbano, su aporte al ICU es positivo.
- Segundo factor, Fc2-EuSdi: Edificaciones urbanas y superficies desnudas e impermeables para el almacenamiento de calor en estructuras y aire, como línea de base el factor aporta al ICU en forma negativo debido a la baja densidad de edificaciones y la preponderancia de construcciones de barro y piedra.
- Tercer factor, Fc3-RsCotmRt: Reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico o comportamiento térmico propicio para el almacenamiento y la emisión de calor, aporta al ICU en forma positivo.
- Cuarto factor, Fc4-VDmvHs: Variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, aporta al ICU en forma negativo.
- Quinto factor, Fc5-CetsIsa: Capacidad de emisividad térmica de superficies para el intercambio de energía suelo-aire, aporta al ICU en forma positivo. Los factores para el año 1986 se muestran en la Ilustración 4.3.

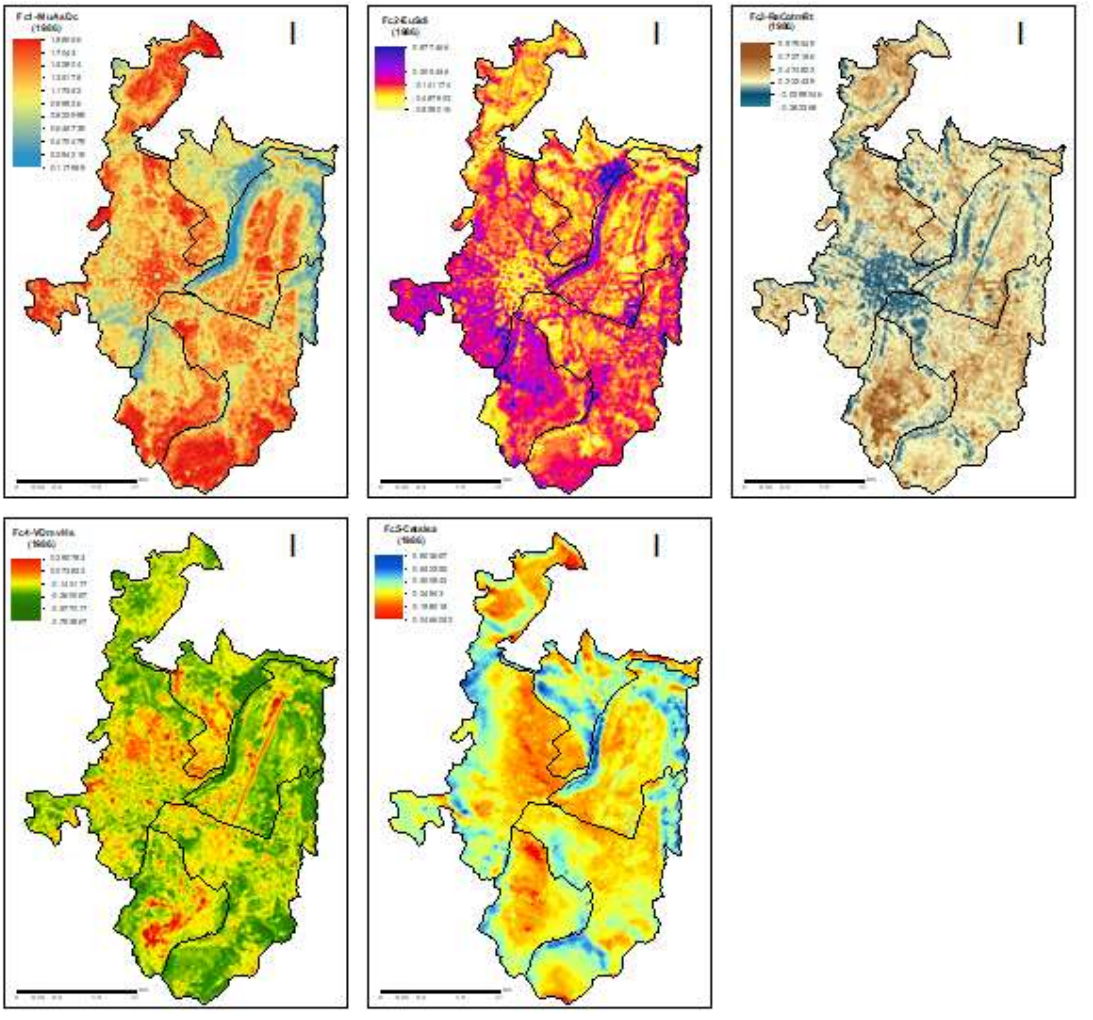


Ilustración 4.3: Factores sintéticos establecidos para el periodo 1986.

Con el mismo procedimiento, para el periodo 1996 también se determinaron 5 componentes, estos factores son los siguientes:

- Fc1-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano. Este factor como tal es nueva porque en el 1986 resulta en combinación con variables urbanas, por ello como línea de base el aporte al ICU se considera positivo en razón al concepto de gradiente vertical de la temperatura, donde localidades de pisos más bajos registran mayor temperatura y mayor presión atmosférica.

- Fc2-CetsEusa, capacidad de emisividad térmica de superficies, edificaciones urbanas y superficies desnudas e impermeables, el aporte es positivo.
- Fc3-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc4-RsCotmRt, reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es negativo.
- Fc5-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo. Los factores para el año 1996 se muestran en la Ilustración 4.4.

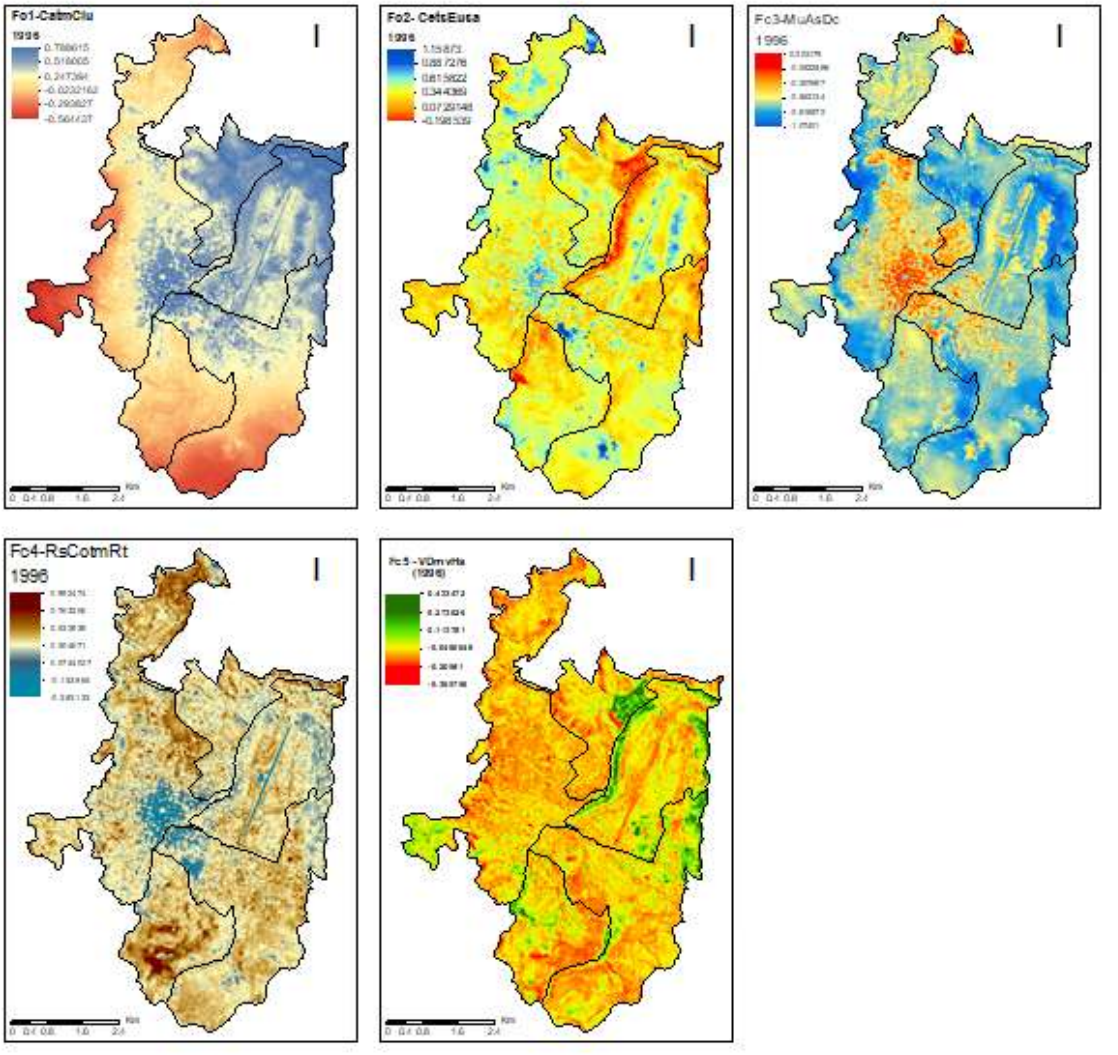


Ilustración 4.4: Factores sintéticos determinados para el periodo 1996.

Para el periodo 2006, los 5 factores determinados han sido los siguientes:

- Fc1-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc2-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano, el aporte es positivo.

- Fc3-RsCotmRt, reflectividad de superficies y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es positivo.
- Fc4-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo.
- Fc5-CetsIsa, capacidad de emisividad térmica de superficies para el intercambio de energía superficie-aire, el aporte es positivo. Los factores sintéticos para el año 2006 se muestran en la Ilustración 4.5.

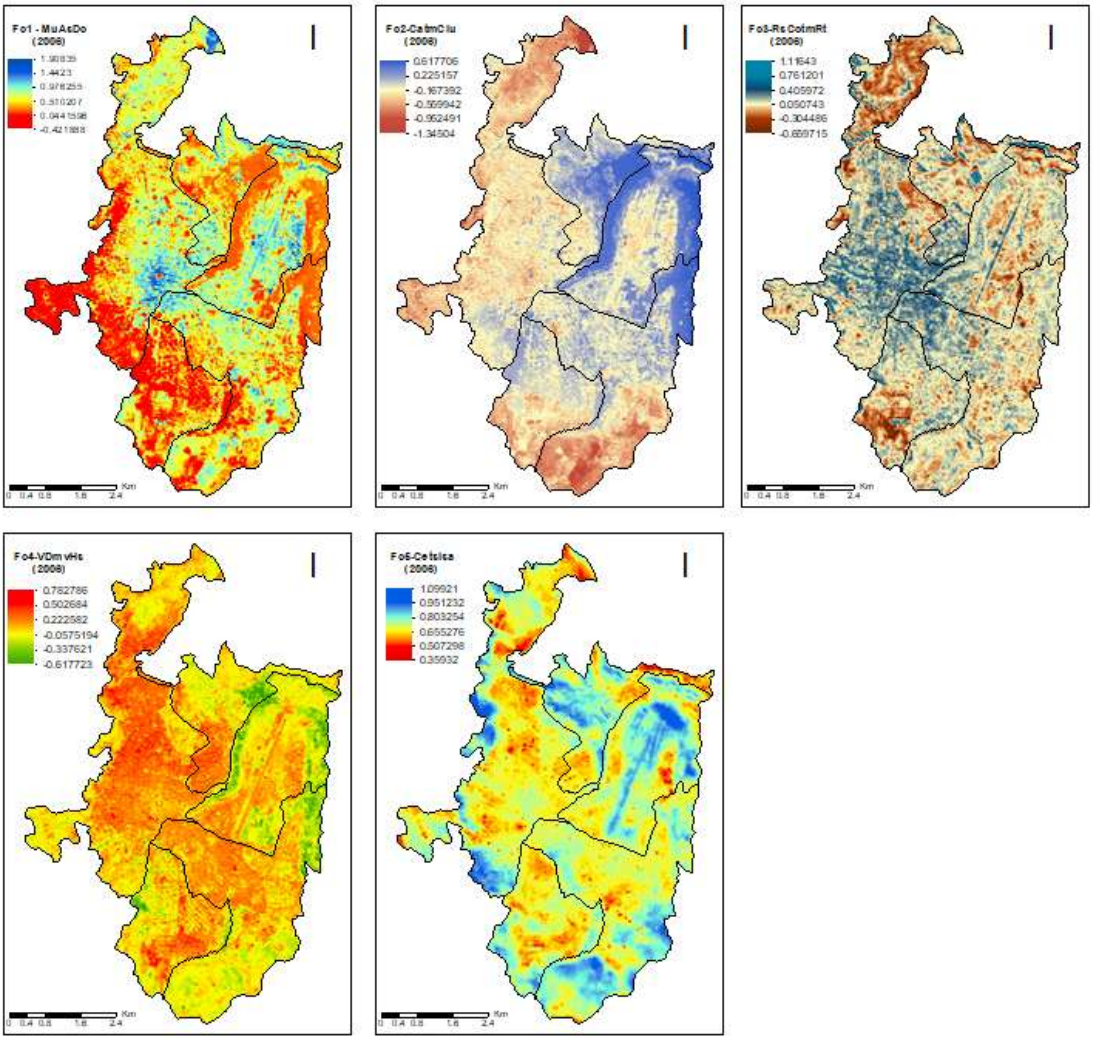


Ilustración 4.5: Factores sintéticos determinados para el periodo 2006.

Para el periodo 2016, los 5 factores establecidos para el análisis de ICU han sido los siguientes:

- Fc1-EuSdiRtm, edificaciones urbanas, superficies desnudas-impermeables y características (ópticas y térmicas) de los materiales para el rendimiento térmico, el aporte es positivo.
- Fc2-CatmClu, condiciones atmosféricas y clima urbano, el aporte es negativo.
- Fc3-CetsResm capacidad de emisividad térmica y reflectividad de superficies, el aporte es positivo.
- Fc4-MuAsDc, morfología urbana (trama y tipologías edificatorias) asociados a desempeños climáticos de almacenamiento térmico y la ventilación del espacio público, el aporte es positivo.
- Fc5-VDmvHs, variaciones-dimensiones de la masa vegetal y contenido de humedad del suelo, el aporte es negativo. Los factores determinados para el año 2016 se muestran en la Ilustración 4.6.

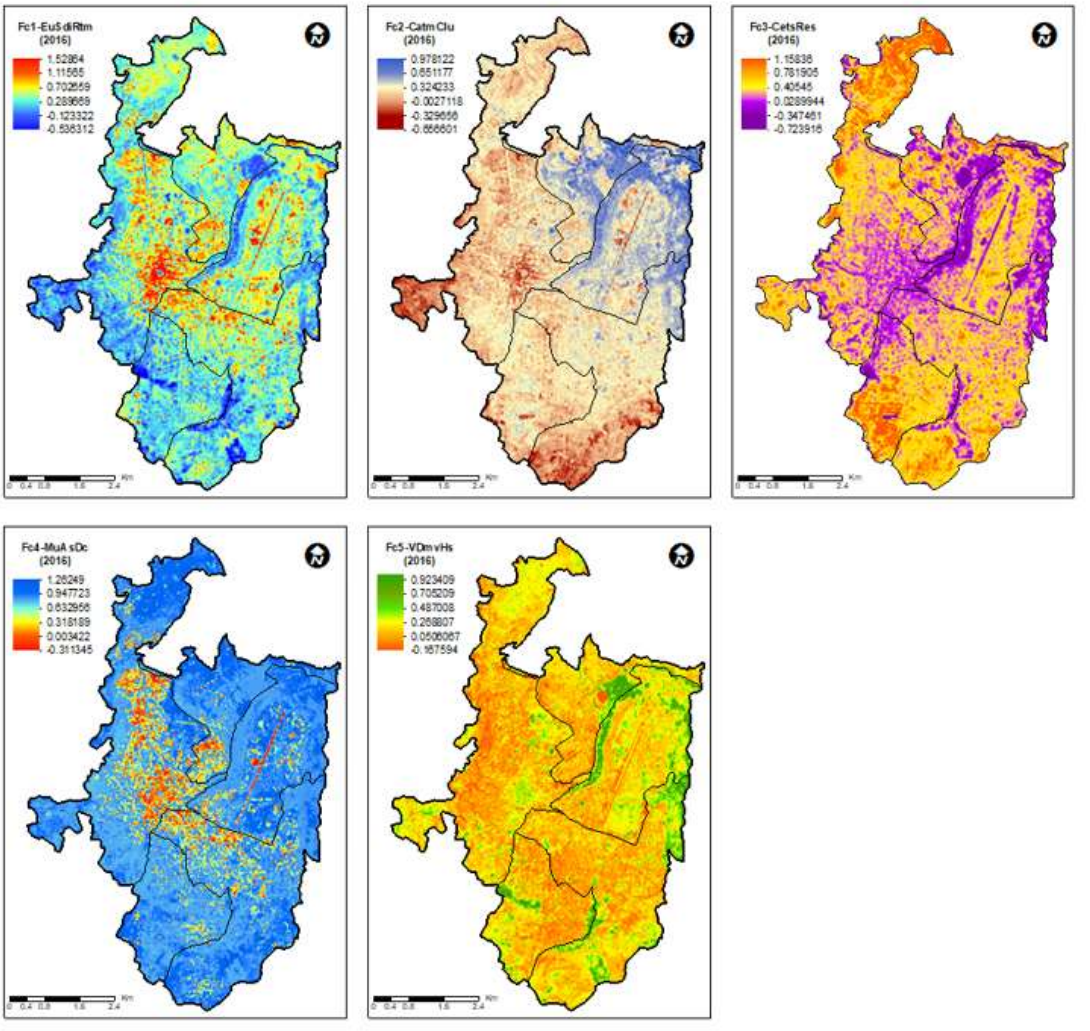


Ilustración 4.6: Factores sintéticos determinados para el periodo 2016.

3.3.2.2. Estimación del índice de islas de calor urbano (IICU)

Dado que los factores del IICU son diferentes y representan a diversos aspectos, es necesario combinar en un índice temático, para lo cual en este trabajo se desarrolló un modelo de IICU para cada periodo de estudio. Para crear los mapas de IICU se realizaron una operación algebraica de imágenes en formato raster, utilizando el porcentaje de varianza de cada factor explicado (ver Tablas 4.3 al 4.6) como peso, y según su contribución positiva

o negativa al IICU en la operación se asigna un signo positivo o negativo, todo dividido entre 100. Las ecuaciones desarrolladas para cada periodo han sido los siguientes:

$$IICU_{1986} = \frac{[(49.198455 * Fc1) - (26.51481 * Fc2) + (9.083098 * Fc3) - (6.171889 * Fc4) + (4.346381 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{1996} = \frac{[(47.041879 * Fc1) + (24.439776 * Fc2) + (14.34838 * Fc3) - (9.369814 * Fc4) - (2.954459 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{2006} = \frac{[(42.115611 * Fc1) + (33.681858 * Fc2) + (10.599285 * Fc3) - (5.365976 * Fc4) + (3.447844 * fc5)]}{100}$$

$$IICU_{2016} = \frac{[(31.96875 * Fc1 - (24.558254 * Fc2) + (22.901995 * Fc3) + (9.416727 * Fc4) - (7.846527 * Fc5)]}{100}$$

En general, las puntuaciones que resultan de la operación han sido normalizadas con la finalidad de reescalar los valores negativos; por ejemplo, para el año 2016 las puntuaciones varían entre -0.18 y 1.18. El índice IICU normalizado varía entre 0 y 1, que representan a nula y alta ocurrencia del fenómeno de islas de calor urbano, respectivamente.

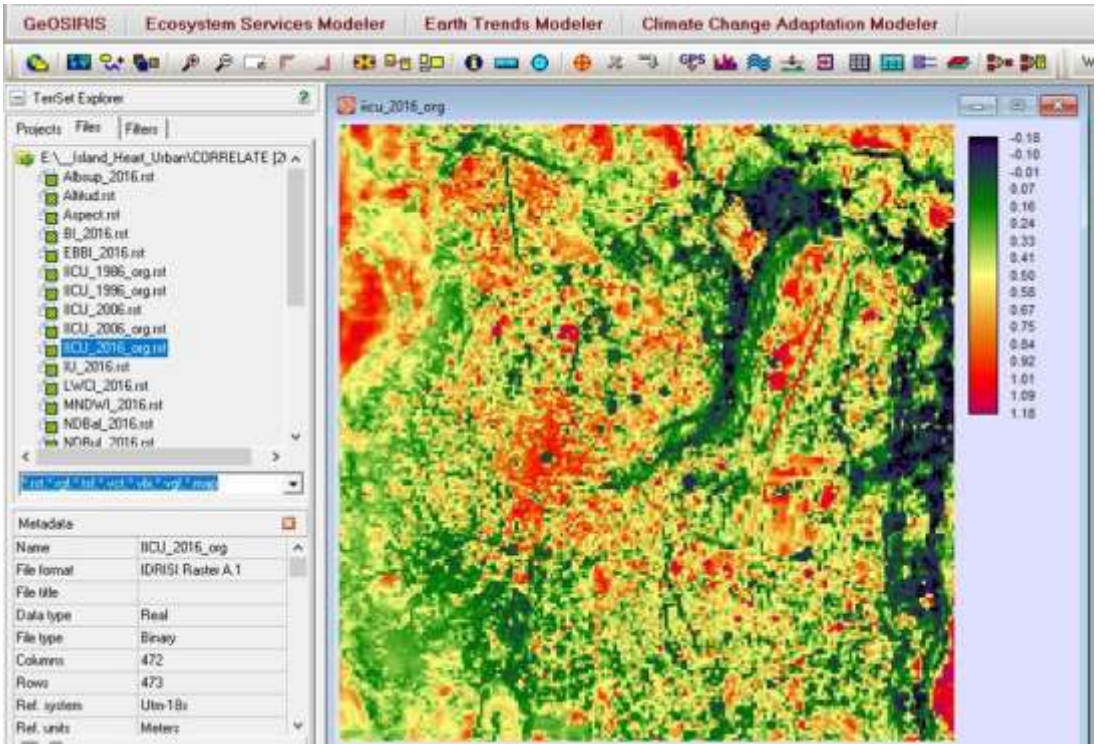


Ilustración 4.7: Puntuaciones de IICU resultante para el año 2016.

En la Ilustración 4.8 se presenta los resultados en mapas, donde el color rojo intenso indica las zonas con presencia del fenómeno de isla de calor, mientras el color azul oscuro indica a las zonas con ausencia de ICU. Mediante un análisis visual de los mapas se observa que el fenómeno del ICU en la ciudad de Ayacucho empieza mostrarse a partir del 2006, la expansión del fenómeno ICU adopta la trama ortogonal del centro histórico de la ciudad con centro en la plaza de armas. Conforme se expande el fenómeno adopta la trama irregular de la ciudad, que contiene calles estrechas y sinuosas, debido a la falta de planificación urbana; donde las manzanas de viviendas son irregulares y compuestas por construcciones altos en los que existe hacinamiento de la población.

Luego de estandarizar el IICU en la escala de 0 a 1, fueron reclasificados en 6 categorías de intensidad del ICU, siendo los siguientes: 1) Nulo, de 0 a 0.25; 2) Muy débil, de 0.25 a 0.35; 3) Débil, de 0.35 a 0.50; 4) Moderada, de 0.50 a 0.65; 5) Fuerte, de 0.65 a 0.75; y, 6) Muy fuerte de 0.75 a 1.

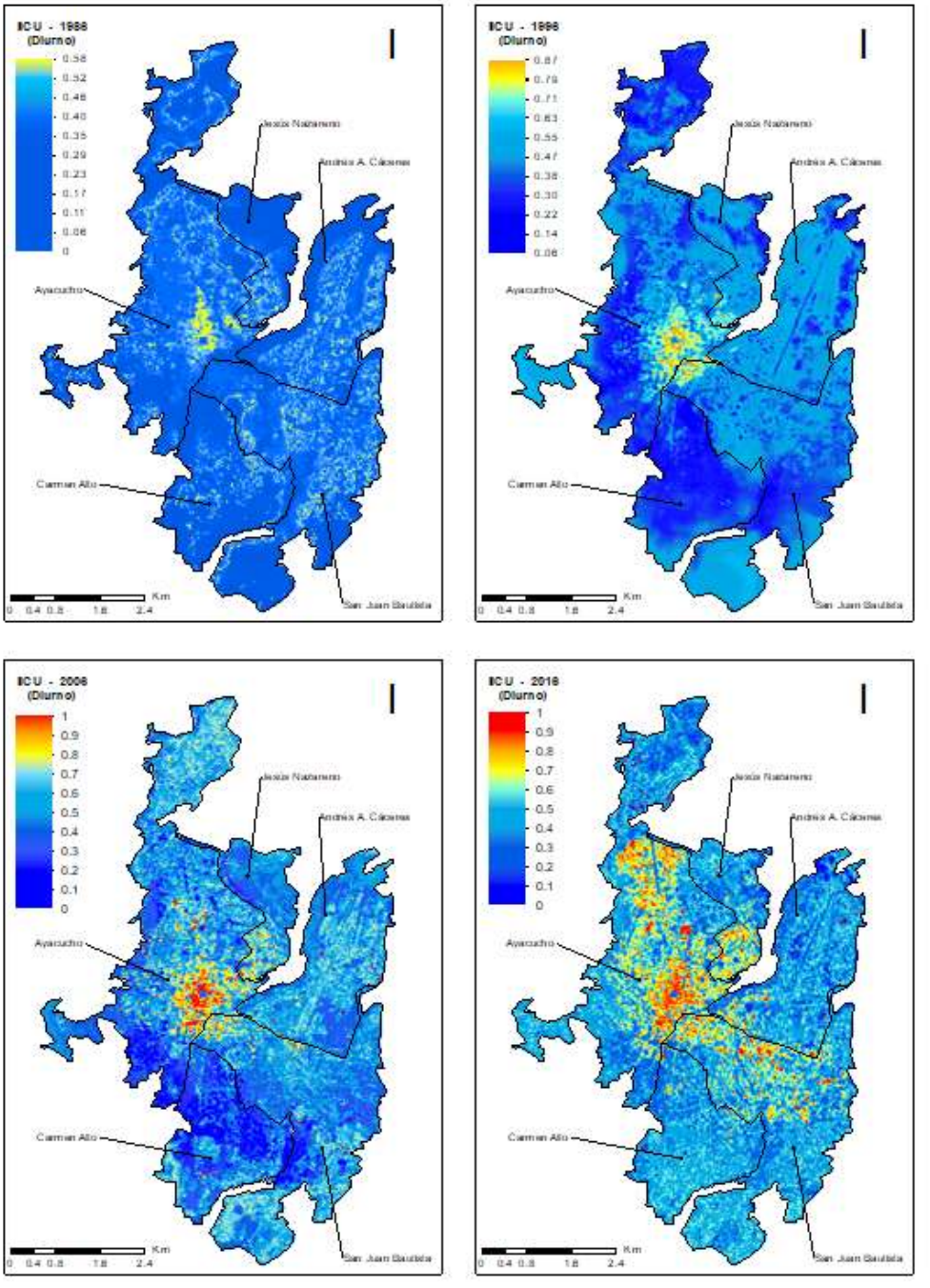


Ilustración 4.8: Índices de islas de calor urbano diurno de la ciudad de Ayacucho.

Para determinar los índices de ICU nocturno el procedimiento seguido ha sido similar, los resultados en mapas se muestran en la ilustraciones 4.9.

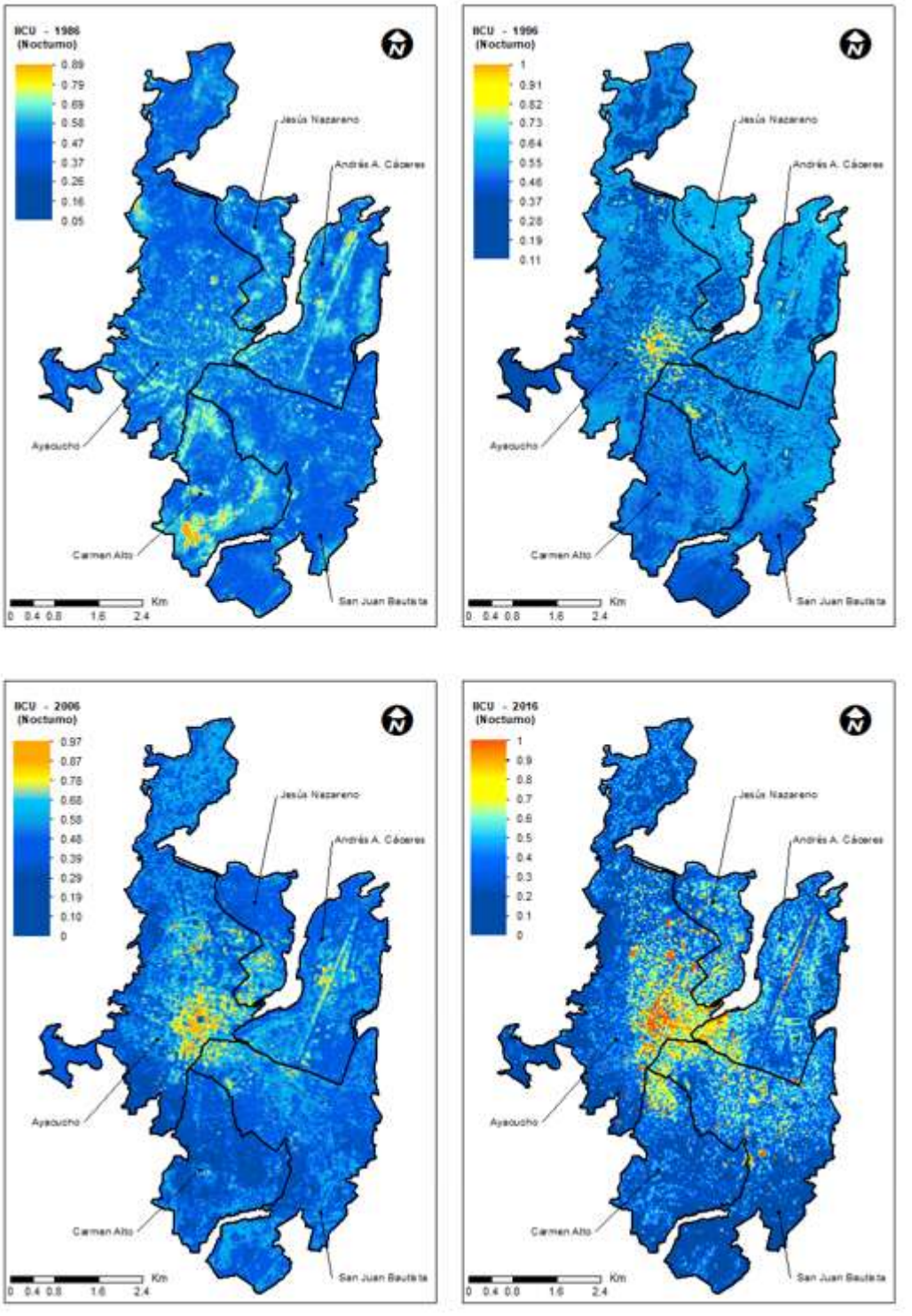


Ilustración 4.9: Índices de islas de calor urbana nocturno de la ciudad Ayacucho.

3.3.3. Caracterización espacial y temporal del fenómeno de ICU

3.3.3.1. Variabilidad temporal del ICU

Para identificar la dinámica temporal del ICU se realizó mediante una comparación visual de los mapas elaborados para cada periodo, determinando que entre el año 1986 y el 2016 se aprecia un cambio importante en la configuración del clima urbano. En el mapa correspondiente al año 2016, comparado con el de 1986 y 1996, se distinguen clara formación de focos de calor que en el mapa aparecen representados en color naranja a rojo intenso. Por otra parte, se observa que estos focos irradian calor en forma radiocéntrica.

En el mapa de 1986 se distingue una mancha de color amarillo sobre el área denominado centro histórico de Ayacucho, la plaza de Armas y viviendas coloniales de alrededores, esta mancha de calor se extiende en 1996 siguiendo un patrón similar a la expansión del área zona urbana; sin embargo, pese a tales evidencias se determina la ausencia del fenómeno de isla de calor superficial (ICUs) como un fenómeno que cambian las condiciones climáticas y ambientales al interior de la ciudad, las manchas de calor identificados para estos dos periodos es la denominada isla de calor atmosférica (ICUa).

Por tanto, en el periodo de estudio se identifica la ocurrencia de dos tipos de islas de calor urbana, la primera es la denominada ICUa que se refiere a la diferencia en la temperatura del aire entre la zona urbana y la rural circundante, en el estudio este fenómeno ocurre en los periodos anteriores al 2006; la segunda es la llamada ICUs, que es igual al anterior, pero la diferencia es entre los valores térmicos de los materiales urbanos (pavimento, pistas, techo, etc.) con respecto a superficies naturales con vegetación y demás coberturas naturales.

Para el 2006 se identifica como el inicio de formación del fenómeno ICUs como tal, los focos de calor se ubican en zonas donde en periodos anteriores se identificaron el fenómeno de ICUa. Finalmente, para el 2016 la evolución del fenómeno ICUs es más claro y su tendencia es al aumento, su expansión al parecer se correlaciona con el desarrollo de la morfología y la expansión urbana.

La Isla de Calor se genera por el desarrollo de los centros urbanos y los cambios en las propiedades térmicas e irradiantes de su infraestructura, a diferencia del calentamiento global, la ICUs son cambios climáticos locales y no globales y sus efectos se limitan a una escala mucho menor, pero los efectos de ambos fenómenos son similares ya que pueden inducir a mayor consumo energético, afecta la salud y perjudica los elementos ambientales de un determinado lugar.

Para analizar la evolución temporal del ICUs en forma cuantitativa se comparan la frecuencia de pixeles con datos de promedio, además del límite inferior, medio y superior del índice; observándose que la frecuencia de pixeles que representan al límite alto del índice (0.66 a 1) y medio (0.33 a 0.66) aumenta sustancialmente a partir del 2006, mientras el límite bajo (0 a 0.33) presentan una variación negativa. Es decir, el clima urbano empieza a experimentar un cambio importante a partir del 2006, y su tendencia va en aumento.

Los cambios que registra la ciudad antes de 2006 muestran tendencia negativa a excepción del límite comprendido entre 0 y 0.33, la cual se comporta contraria a los demás rangos del índice, el aumento del índice en este rango refleja la variación del fenómeno ICUa, es decir, en 1986 y 1996 el clima urbano obedece a las variaciones climáticas de la zona y más no se trata de un fenómeno ambiental producto de la aglomeración urbana.

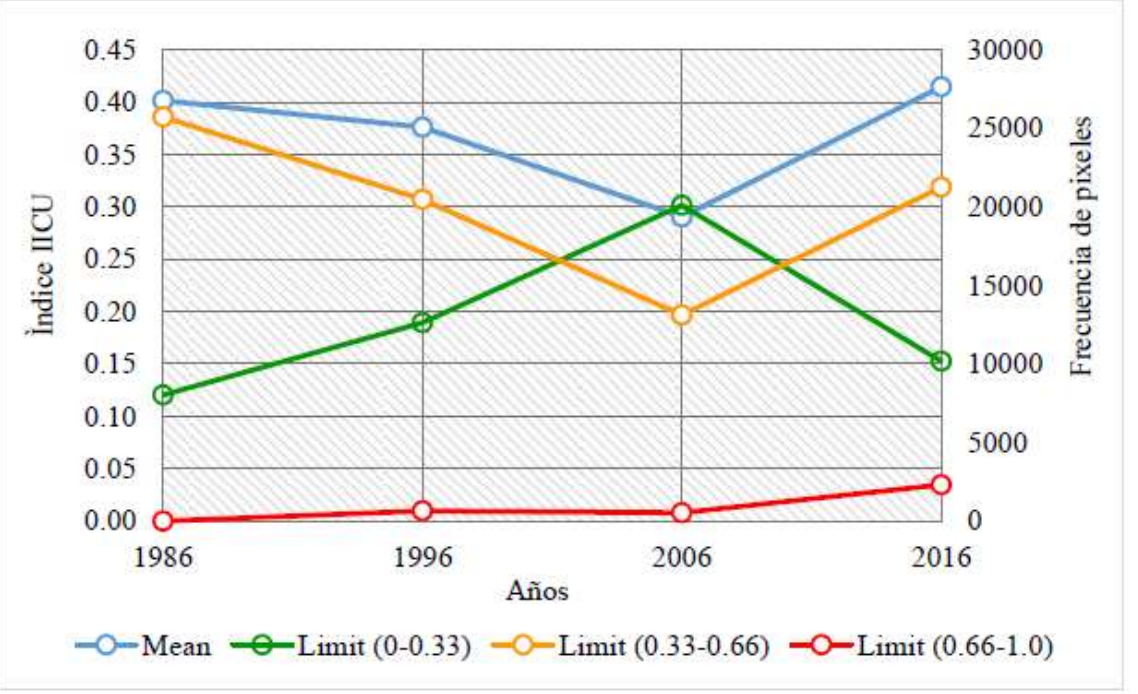


Ilustración 4.10: Variación temporal del IICU diurno promedio y límites de rango.

Con cuanto a la categoría de ICU diurno, las intensidades Muy fuerte, Fuerte y Moderada van en aumento a partir del 2006; las categorías de ICU Nulo y Muy débil, los espacios frescos, no muestran una clara estabilidad y ambas categorías se correlacionan negativamente; es decir, cuando el ICU Nulo aumenta, el ICU Muy débil tiende a disminuir o viceversa, solamente mostrando equilibrio en el 2006.

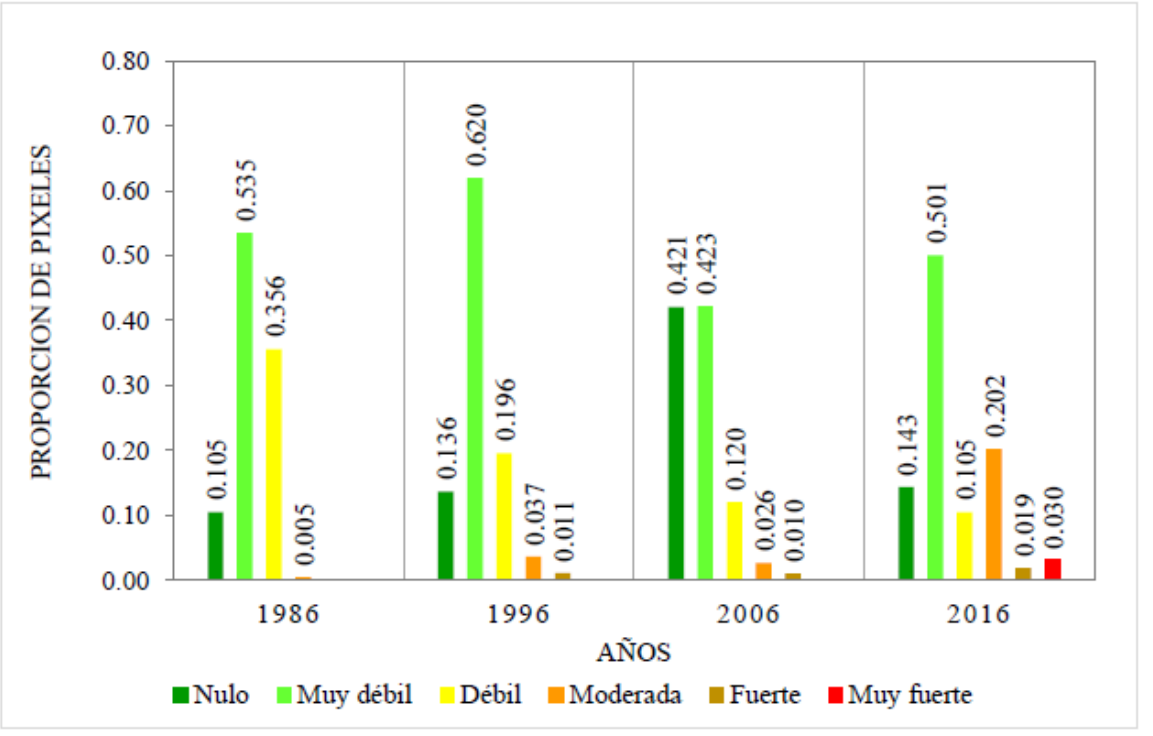


Ilustración 4.11: Variación temporal de categorías de IICU diurno.

También el ICU nocturno va en aumento en el rango bajo, medio y en los promedios, sobre la base de estas tendencias positivas se corrobora la generación del fenómeno ICUs a partir del 2006, puesto que los focos de ICU diurno mantienen gradientes de calor durante la noche a diferencia del ICUa observado en 1986 y 1996, donde las áreas de calor diurno empiezan a difuminarse simultáneamente en toda la zona urbana hasta alcanzar un equilibrio con la temperatura ambiental antes de la media noche. En el análisis correspondiente al 2016 se encontró que los focos de calor permanecen mayor tiempo durante la noche, y en determinadas zonas la tendencia tiende volverse en permanente, contrayéndose solamente hacia el centro del foco generando espacios con gradientes de calor claramente diferenciados.

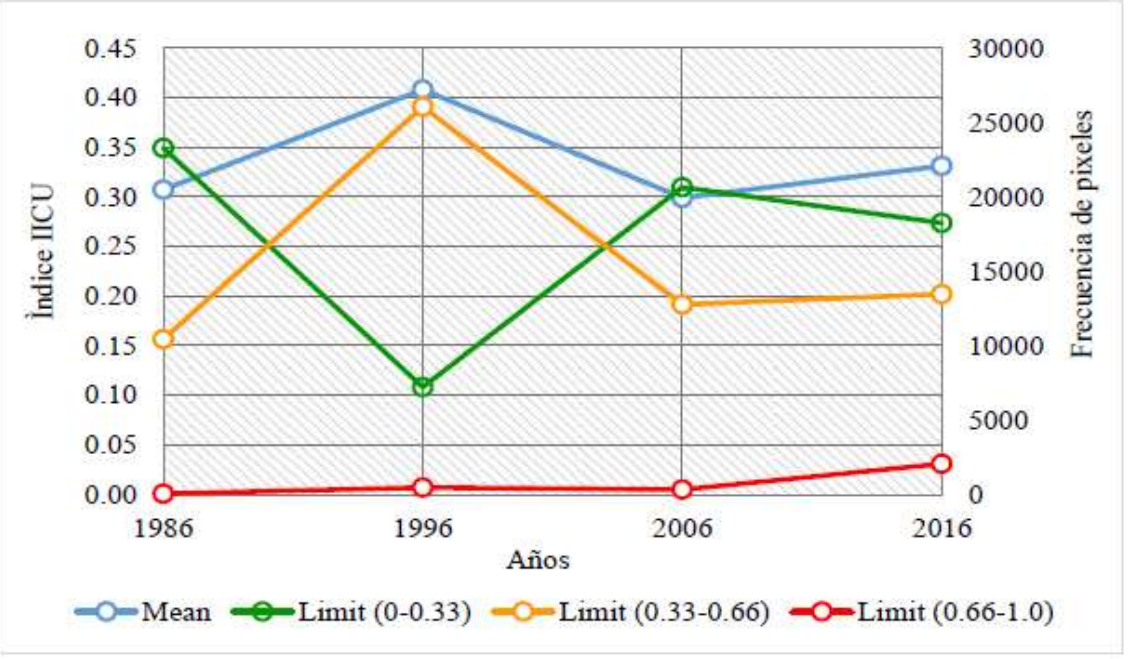


Ilustración 4.12: Variación temporal del IICU nocturno promedio y límites de rango.

Las categorías de ICU nocturno se comportan de manera similar que el ICU diurno, la intensidad Muy fuerte, Fuerte y Moderada muestran aumento a partir del 2006; mientras la categoría Muy débil se reduce favoreciendo el aumento de la categoría Nulo, esta situación se debe a la influencia de la temperatura ambiental que enfría el espacio urbano desde las periferias.

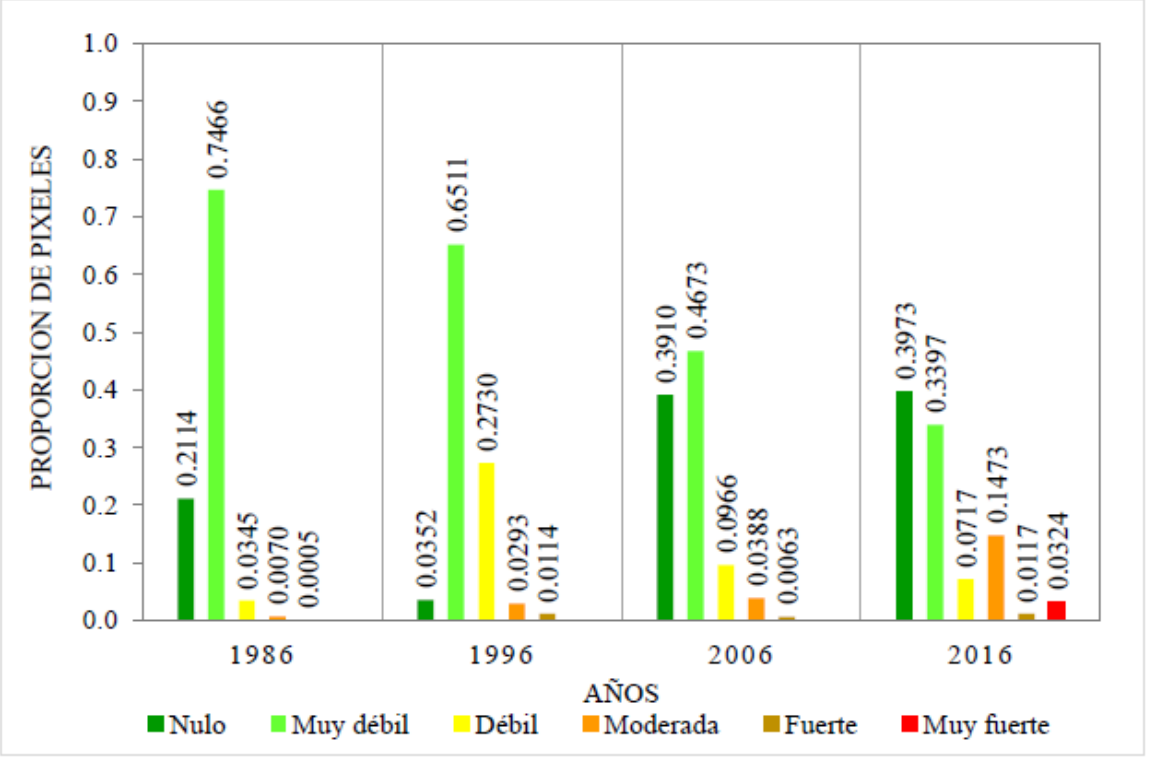


Ilustración 4.13: Variación temporal de categorías de IICU nocturno.

En conclusión, se determina un cambio considerable del clima urbano a partir del 2006 y su tendencia va en aumento, también se observa cambios antes del 2006 pero dichos cambios están más correlacionados a las condiciones ambientales que con las causas que generan el fenómeno de ICU, situación que también se puede observar en la asociación de los factores sintéticos del APC.

En el año 1986 y 1996, la dinámica temporal del ICUa es débil o inexistente durante el día y la máxima intensidad ocurre durante la noche. Mientras, el ICUs sobre todo en el 2016 se mantiene durante el día y la noche, la máxima intensidad ocurre durante el día y se contrae en la noche en dirección del centro del foco de calor creando gradientes de calor claramente diferenciados.

Según Fernández et al (2016), el ICUa es un fenómeno que se presenta al atardecer y su prevalencia importante es la noche, porque el calor acumulado en el asfalto, viviendas

y otras superficies impermeables son devueltos a la atmósfera en forma de radiación de onda larga; en el día la mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos y las sombras producidas por los viviendas mantienen la ciudad más fría que los alrededores. Ello explica que el ICUa diurna, para los años 1986 y 1996 sea menos intensa que en la nocturna.

En el ICUs, la temperatura de la superficie es más sensible a las características del suelo urbano y en consecuencia se produce una mayor variabilidad espacial y temporal entre el día y la noche. La ICUs no está influida directamente por los flujos de aire desde áreas más cálidas a las más frías, que regulan la temperatura del aire de las ciudades, por lo que con la ICUs los gradientes térmicos son más marcados. El fenómeno de ICUs se caracteriza fundamentalmente por tres parámetros que son: su intensidad, su forma y la localización del máximo térmico o focos de calor.

3.3.3.2. Distribución espacial del ICU

Como una ayuda para caracterizar la distribución espacial del fenómeno ICU, se ha aplicado el test no-paramétrico de Mann-Kendall en su versión monotónica y la estimación TSen de tasa de cambio, determinando la tendencia y su significancia espaciotemporal. El test se aplicó a todas las series diurnas y nocturnas, estimando la presencia de tendencia y su significación estadística que se muestra en mapas en la ilustración 4.14.

El mapa de pendiente Theil-Sen, con un nivel de confianza al 90%, permitió rechazar la hipótesis nula (no hay una tendencia en la serie) y se acepta la hipótesis alternativa, es decir queda demostrado la existencia de una tendencia del fenómeno ICU en la serie temporal analizada. En dicha mapa las zonas con tendencia positivas se representan de color naranja a rojo oscuro, mientras las zonas que no muestran tendencia alguna aparecen de color clara, y por último el color azul señala a la zonas con tendencia negativa.

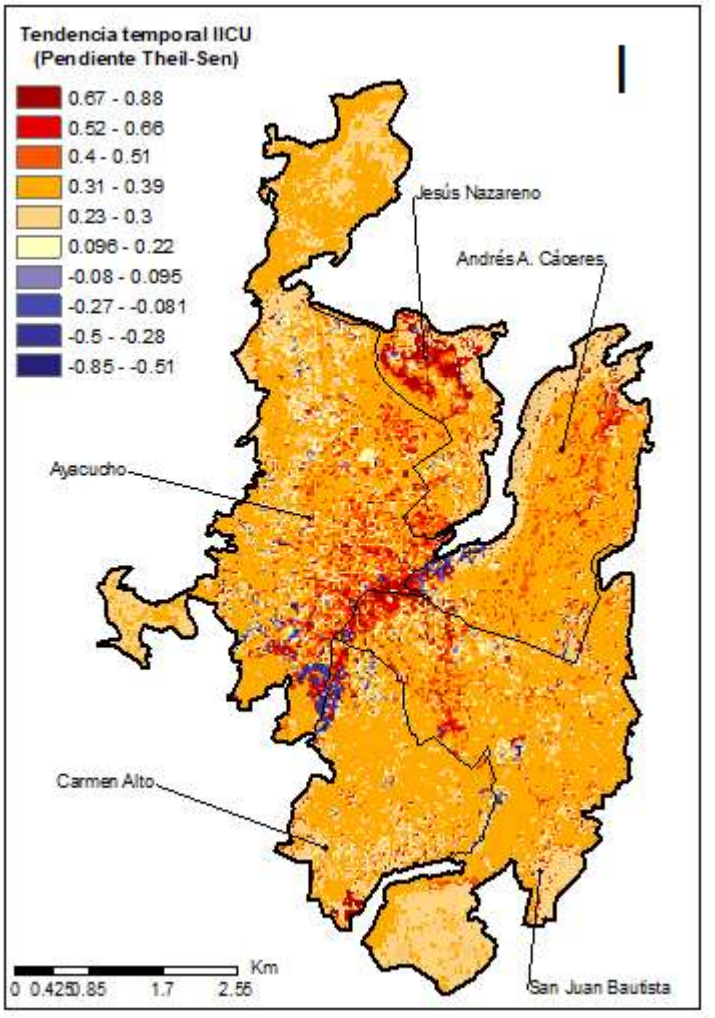


Ilustración 4.14: Mapa de tendencia monótona de IICU, test de Mann-Kendall.

En general, la distribución espacial del ICU es radiocéntrica a su foco de calor y también a la configuración urbana, el ICU se irradia en forma e intensidad desde el centro de la ciudad hacia la periferia, con intensidad baja en el centro histórico de Huamanga y también en las periferias. Para los años 1986 y 1996 el fenómeno de ICUa se distribuye en el centro histórico de Huamanga, irradiándose en 1996 hacia el extremo Oeste del distrito de San Juan Bautista y también al extremo Suroeste del actual distrito de Jesús Nazareno, en forma similar se comporta el IICU nocturna (Ver ilustraciones 4.15 y 4.16).

Para el periodo 2006, el ICU es más notoria y aumenta en las zonas mencionadas para 1999. En el 2006 el ICU es más notoria al rededor del centro histórico y como nueva zona se expande levemente hacia la zona Norte, conocido como el sector de Emadi. En el distrito de San Juan Bautista, se expande levemente hacia la zona Este, adyacentes de la avenida Ramón Castilla y del puente nuevo. En el distrito de Jesús Nazareno, el ICU se expande hacia la zona Norte.

En el 2016, el ICU se hace más evidente como un fenómeno ambiental propiamente dicho, los espacios que muestran este fenómeno en periodos anteriores al parecer inician a consolidarse, expandiéndose hacia la zona Norte del distrito de Ayacucho y de Jesús Nazareno, zona Este y Sureste en el distrito de San Juan, extremo Suroeste del actual distrito Andrés Avelino Cáceres; mientras en el distrito de Carmen Alto, se evidencia en el extremo Norte, límite con el distrito de Ayacucho.

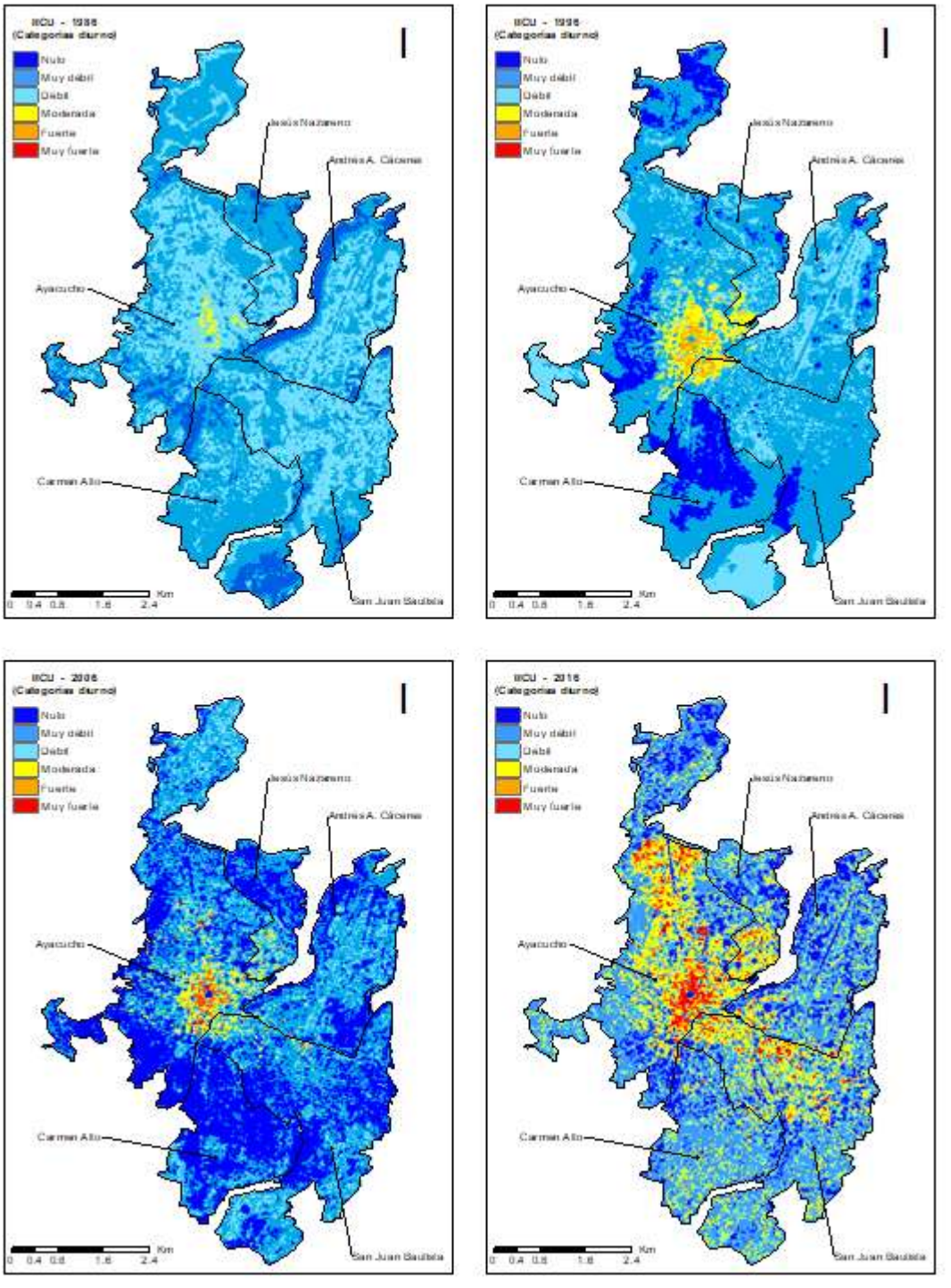


Ilustración 4.15: Índice ICU diurno rescalado en categorías de intensidad.

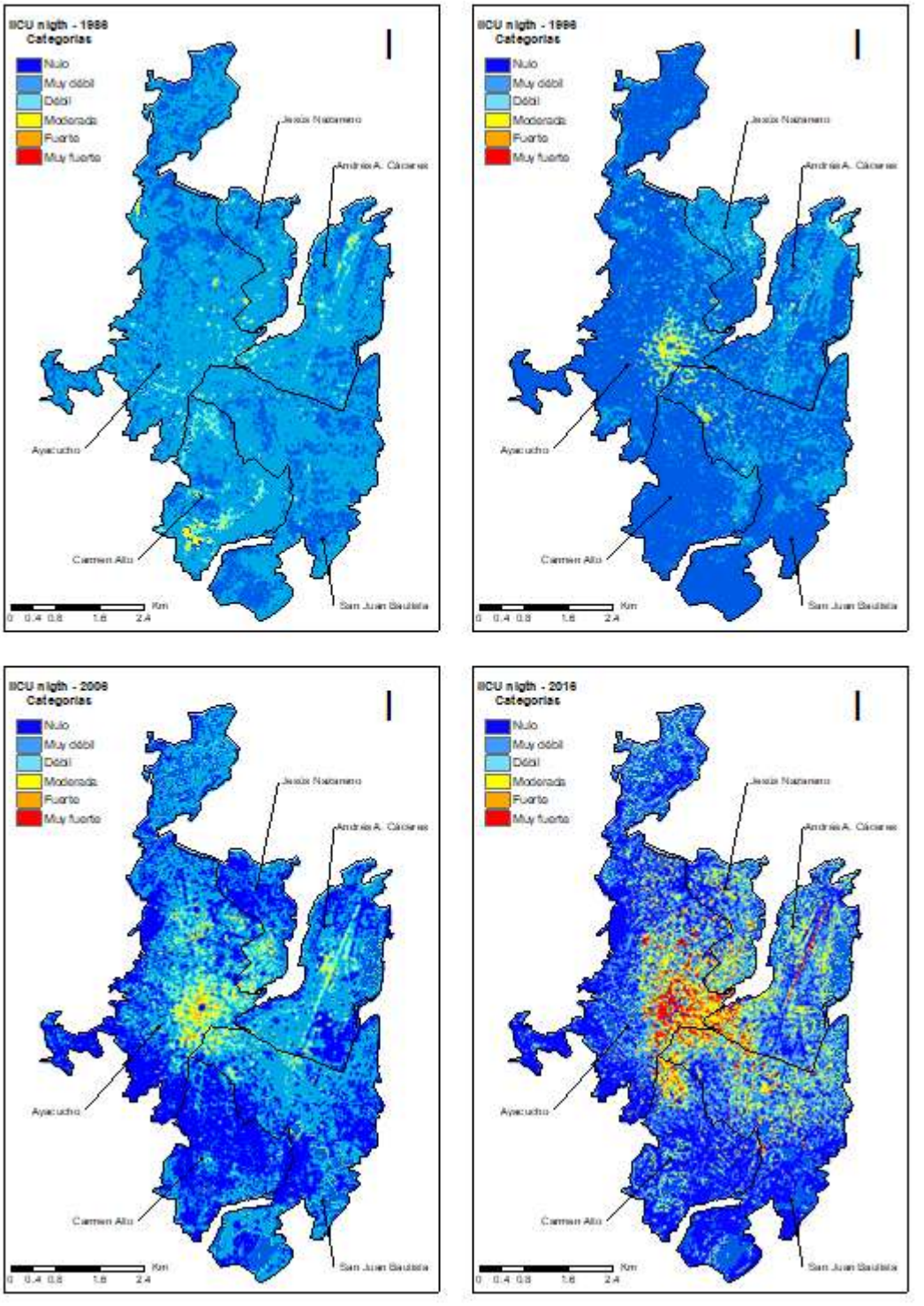


Ilustración 4.16: Índice ICU nocturno rescalado en categorías de intensidad.

En las series de ICU diurno y el ICU nocturno, para los años 1986 y 1996 el fenómeno ICUa presenta poca variabilidad y se distribuye uniformemente en la zona urbana, no existiendo focos demasiados fríos ni tampoco demasiado calientes, las superficies que se calientan en el día se enfrían paulatinamente durante la noche, alcanzado un equilibrio con la temperatura ambiental al aproximarse a la media noche.

A partir del 2006 los cambios son más visibles y el fenómeno ICUs se genera en zonas próximas al centro de la ciudad, sin embargo, los focos de calor son débiles y poco diferenciado a comparación del 2016, en este último la localización de las zonas de máximo térmico son fáciles de identificar y a su alrededor genera un determinado gradiente térmico. El grado de vecindad y la densidad de estos focos de calor configuran islas térmicas más pronunciadas y permanentes, al parecer estos espacios críticos están iniciando a formarse en la ciudad de Ayacucho y estamos a tiempo de implementar medidas de mitigación encaminada a desarrollar una ciudad sostenible.

En el mapa correspondiente al 2016, los espacios críticos de ICU abarca las zonas límites entre los distritos de Ayacucho, Jesús Nazareno, San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; en segundo lugar, constituye la zona límite del distrito de San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; por último, la zona límite del distrito de San Juan Bautista y Carmen alto.

Al interior de cada distrito la distribución del ICU también es variada en forma, intensidad y localización; los espacios críticos se identifican en la zona Suroeste y Norte del distrito de Ayacucho, la zona centro del distrito de San Juan Bautista, la zona Sur y Norte del distrito de Jesús Nazareno, y la zona Norte del distrito de Carmen Alto.

Asimismo, la distribución de las categorías de ICU en el distrito depende de la localización del punto de máximo térmico, de la trama urbana y del cambio de usos del suelo; otra característica es que la tendencia en los gradientes considerados Moderada, Fuerte y Muy Fuerte van en aumento.

En la ilustración 4.17, se observa que la categoría Nula es mucho mayor (33.2%) en Carmen Alto, distrito caracterizado por muy baja densidad de construcciones, amplios espacios libres, buena vegetación, geomorfología favorable para la circulación del aire y la ventilación de espacios públicos; en los demás distritos la proporción del territorio con esta categoría no presenta diferencia significativa.

Las categorías muy débil y débil se distribuyen en proporciones similares en los 5 distritos, excepto en el distrito de Carmen Alto la categoría débil es mucho menor (8.9%). Por último, la mayor variabilidad se observa a partir de la categoría moderada, siendo Ayacucho, el distrito que presenta mayores áreas: 9.5% en la categoría moderada, 2.1% en la categoría fuerte y 1.6% en la categoría muy fuerte.

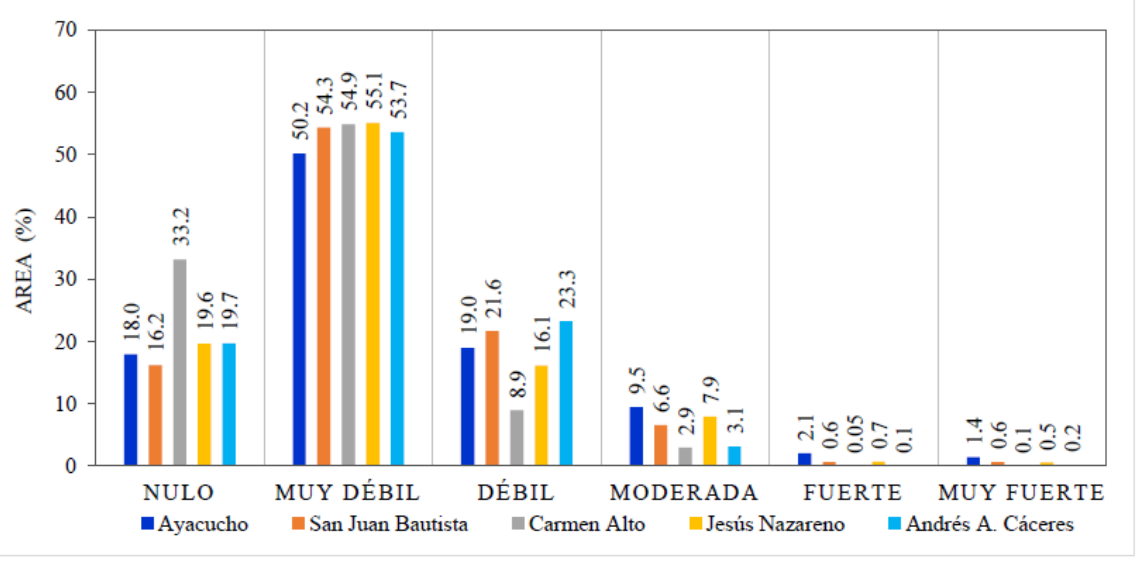
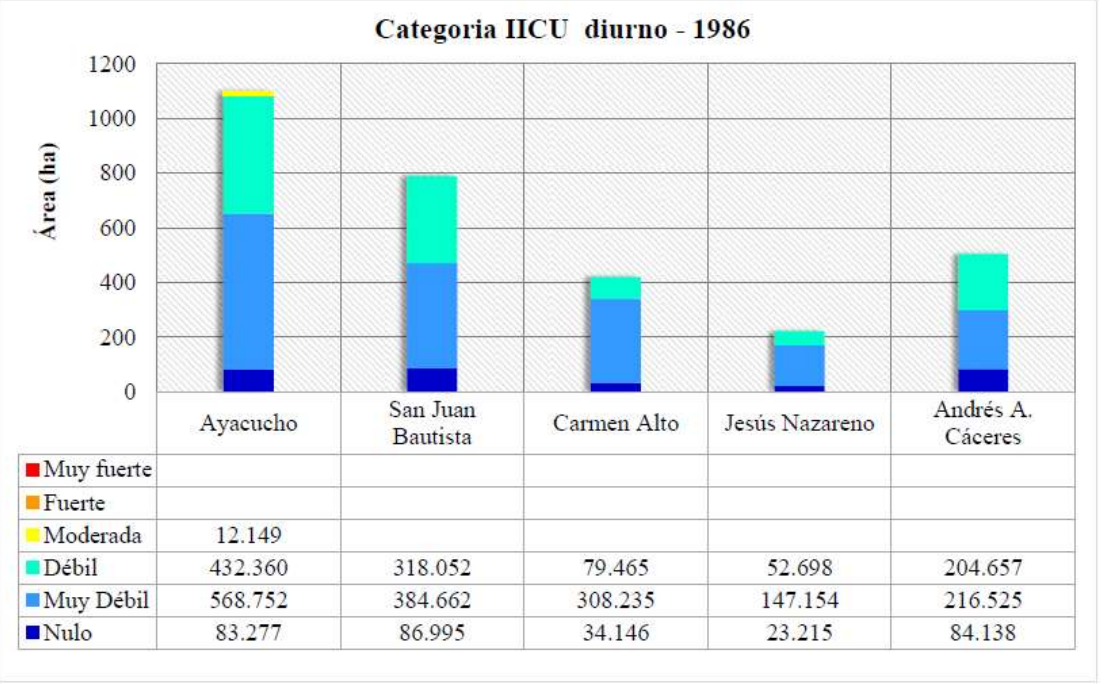


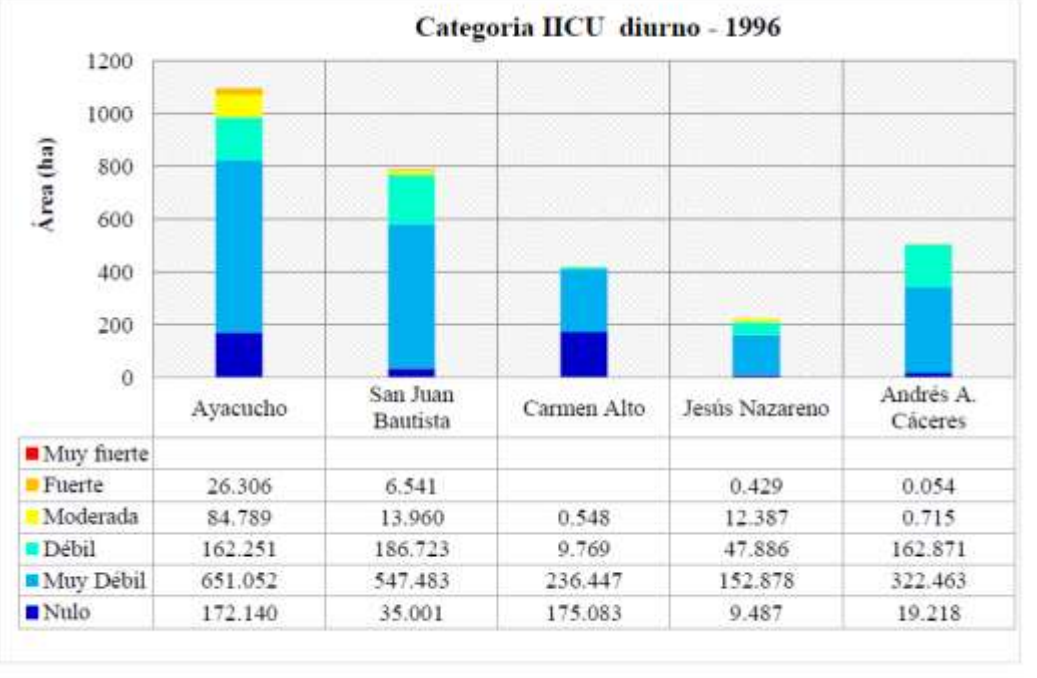
Ilustración 4.17: Distribución espacial de categorías de ICU diurno.

En las Ilustraciones 4.18 al 4.21, se muestra la distribución espacial de ICU diurno para cada periodo del estudio, donde la influencia de una determinada categoría de ICU está expresada en hectáreas del territorio distrital.



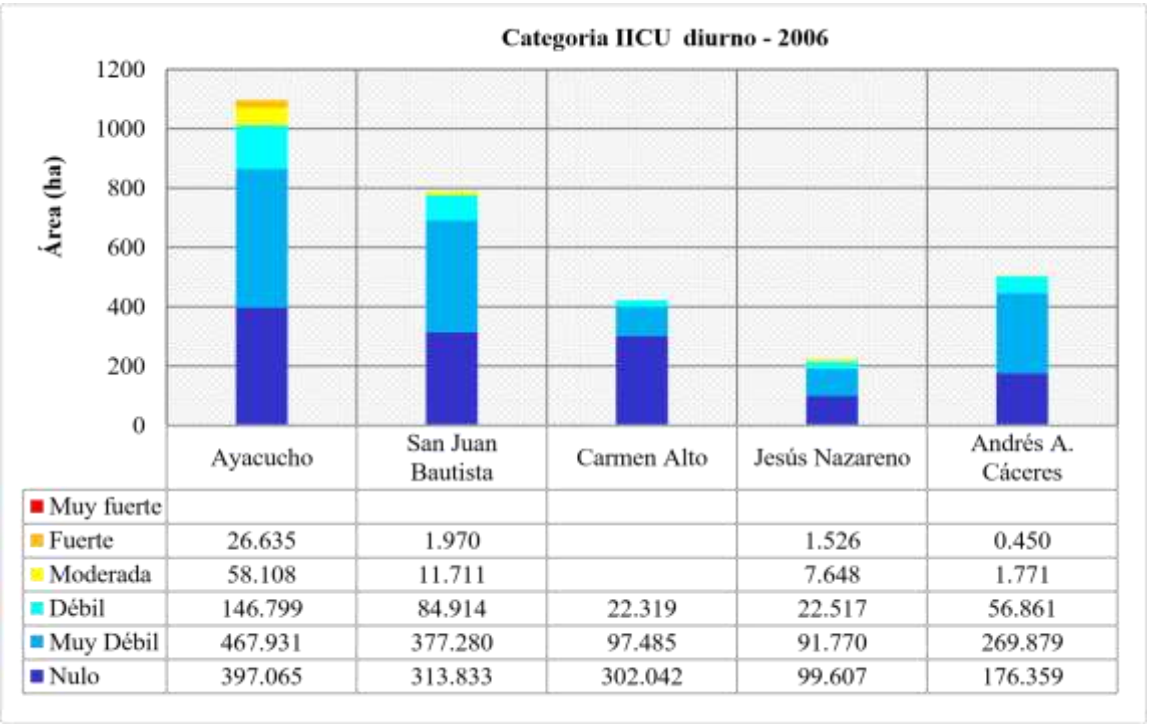
	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte					
Moderada	12.149				
Débil	432.360	318.052	79.465	52.698	204.657
Muy Débil	568.752	384.662	308.235	147.154	216.525
Nulo	83.277	86.995	34.146	23.215	84.138

Ilustración 4.18: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1986.



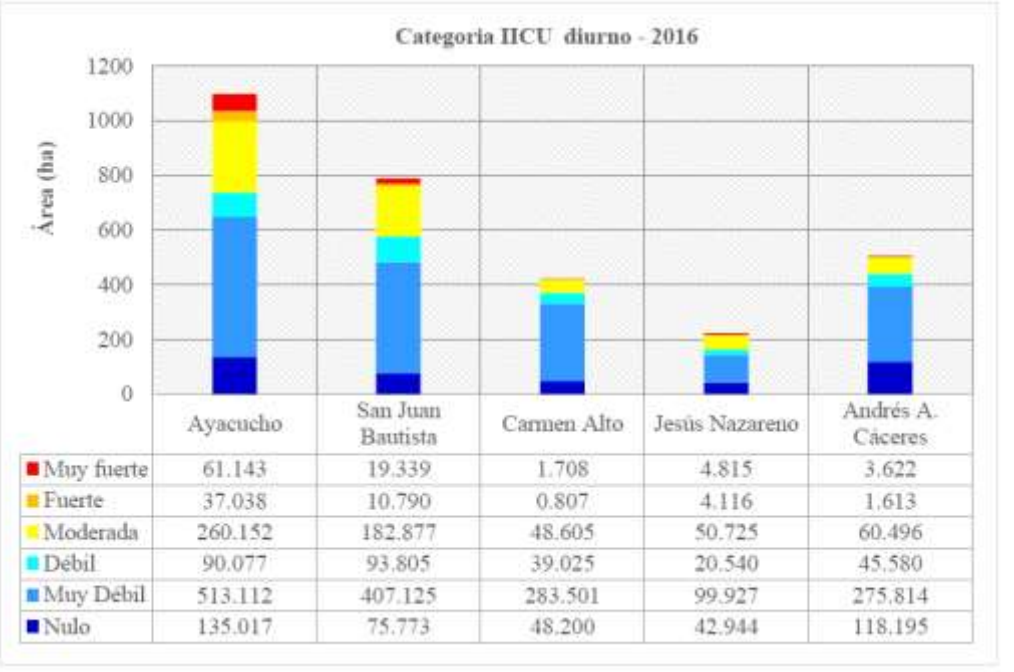
	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte	26.306	6.541		0.429	0.054
Moderada	84.789	13.960	0.548	12.387	0.715
Débil	162.251	186.723	9.769	47.886	162.871
Muy Débil	651.052	547.483	236.447	152.878	322.463
Nulo	172.140	35.001	175.083	9.487	19.218

Ilustración 4.19: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para 1996.



	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte	26.635	1.970		1.526	0.450
Moderada	58.108	11.711		7.648	1.771
Débil	146.799	84.914	22.319	22.517	56.861
Muy Débil	467.931	377.280	97.485	91.770	269.879
Nulo	397.065	313.833	302.042	99.607	176.359

Ilustración 4.20: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2006.



	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte	61.143	19.339	1.708	4.815	3.622
Fuerte	37.038	10.790	0.807	4.116	1.613
Moderada	260.152	182.877	48.605	50.725	60.496
Débil	90.077	93.805	39.025	20.540	45.580
Muy Débil	513.112	407.125	283.501	99.927	275.814
Nulo	135.017	75.773	48.200	42.944	118.195

Ilustración 4.21: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.

La distribución espacial del ICU nocturna (Ilustración 4.22) es similar al observado en el ICU diurno, aunque las áreas ocupadas por las categorías moderada, fuerte y muy fuerte es sustancialmente menor que en el ICU diurno.

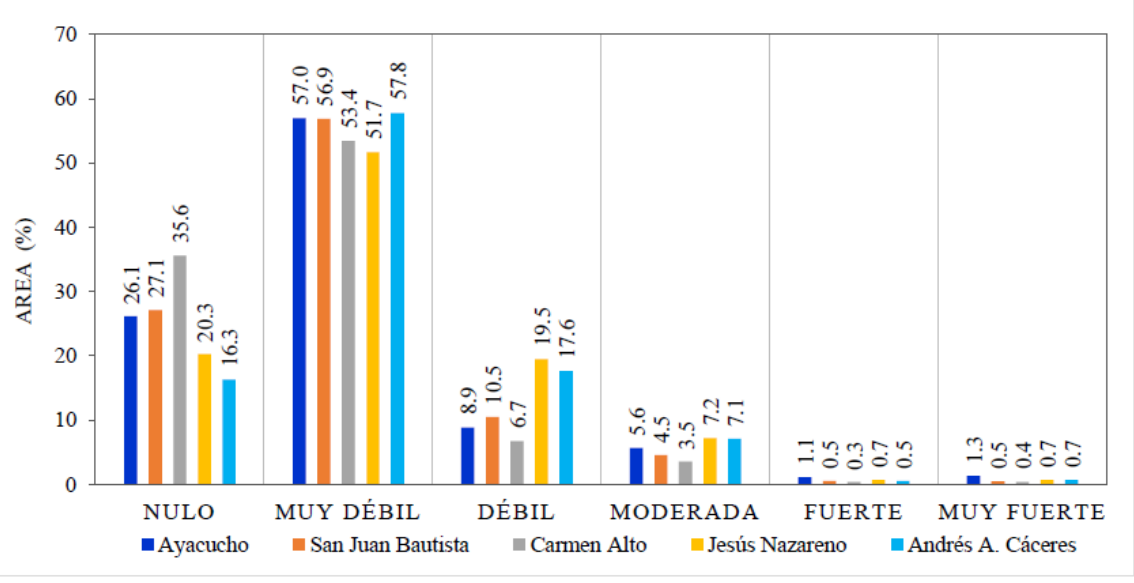
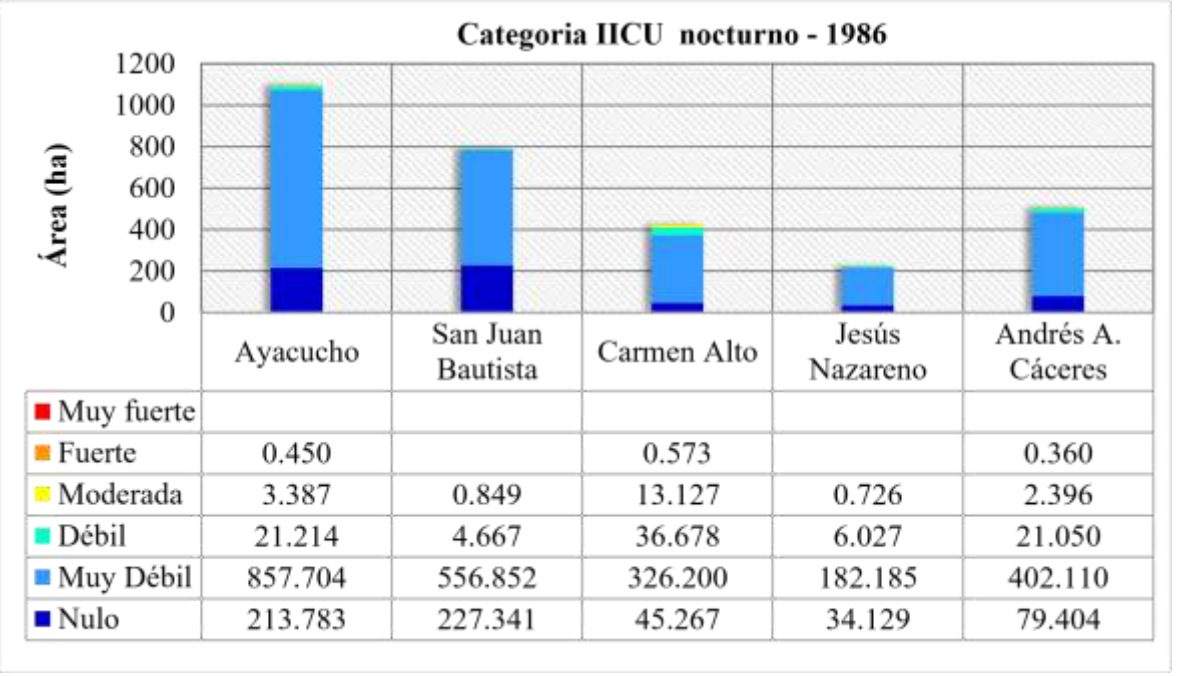


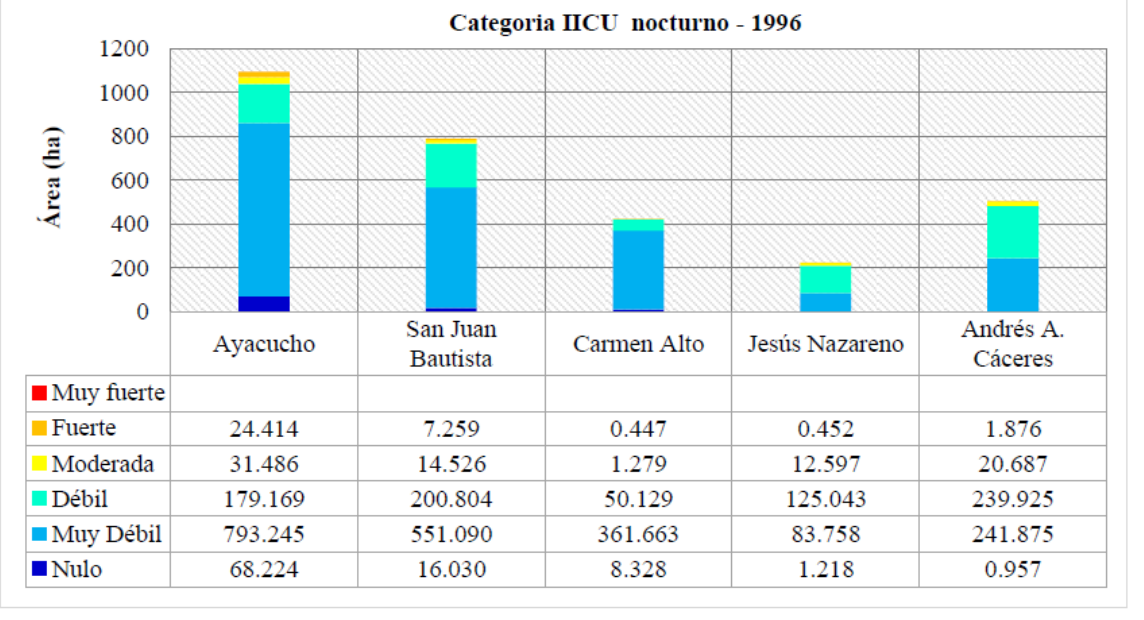
Ilustración 4.22: Distribución espacial de categorías del ICU diurno para el 2016.

La distribución espacial de categorías de ICU nocturno, expresado en hectáreas de territorio distrital, para cada periodo del estudio se muestra en los siguientes gráficos.



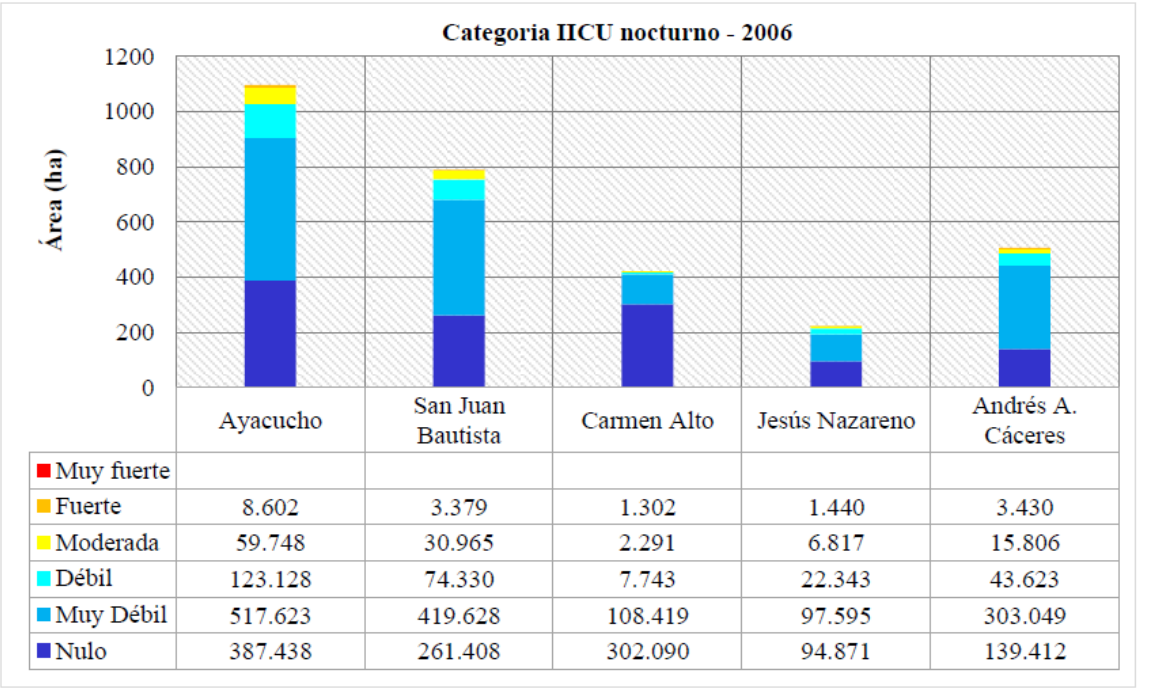
	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte	0.450		0.573		0.360
Moderada	3.387	0.849	13.127	0.726	2.396
Débil	21.214	4.667	36.678	6.027	21.050
Muy Débil	857.704	556.852	326.200	182.185	402.110
Nulo	213.783	227.341	45.267	34.129	79.404

Ilustración 4.23: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1986.



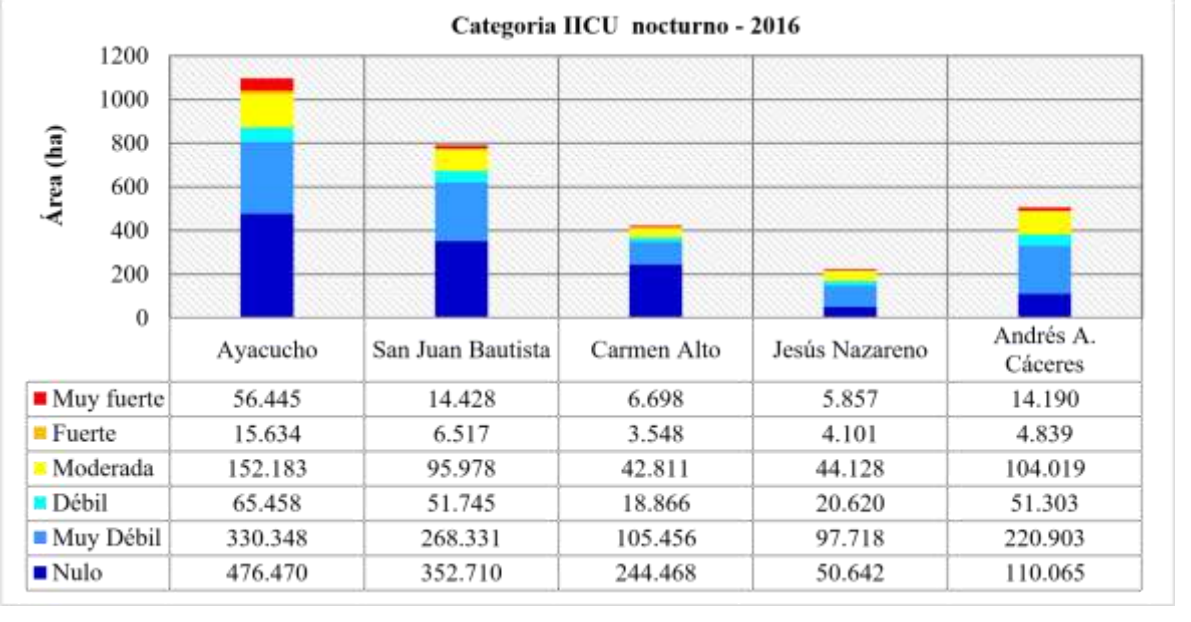
	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte	24.414	7.259	0.447	0.452	1.876
Moderada	31.486	14.526	1.279	12.597	20.687
Débil	179.169	200.804	50.129	125.043	239.925
Muy Débil	793.245	551.090	361.663	83.758	241.875
Nulo	68.224	16.030	8.328	1.218	0.957

Ilustración 4.24: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 1996.



	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte					
Fuerte	8.602	3.379	1.302	1.440	3.430
Moderada	59.748	30.965	2.291	6.817	15.806
Débil	123.128	74.330	7.743	22.343	43.623
Muy Débil	517.623	419.628	108.419	97.595	303.049
Nulo	387.438	261.408	302.090	94.871	139.412

Ilustración 4.25: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2006.



	Ayacucho	San Juan Bautista	Carmen Alto	Jesús Nazareno	Andrés A. Cáceres
Muy fuerte	56.445	14.428	6.698	5.857	14.190
Fuerte	15.634	6.517	3.548	4.101	4.839
Moderada	152.183	95.978	42.811	44.128	104.019
Débil	65.458	51.745	18.866	20.620	51.303
Muy Débil	330.348	268.331	105.456	97.718	220.903
Nulo	476.470	352.710	244.468	50.642	110.065

Ilustración 4.26: Distribución espacial de categorías del ICU nocturno 2016.

3.3.3.3. Jerarquización de distritos según el ICU

La agrupación de los distritos por la intensidad de ICU se realizó mediante el análisis de conglomerados jerárquico, utilizando los valores promedios de ICU diurno y nocturna, los resultados de formación de la estructura jerárquica se muestran mediante un dendrograma. Con esta clasificación los distritos se agrupan en 3 grupos de conglomerados y son: 1) Ayacucho y Jesús Nazareno, con mayores índices de ICU; 2) San Juan Bautista y Andrés Avelino Cáceres; y, 3) Carmen Alto, presenta bajo índice de ICU.

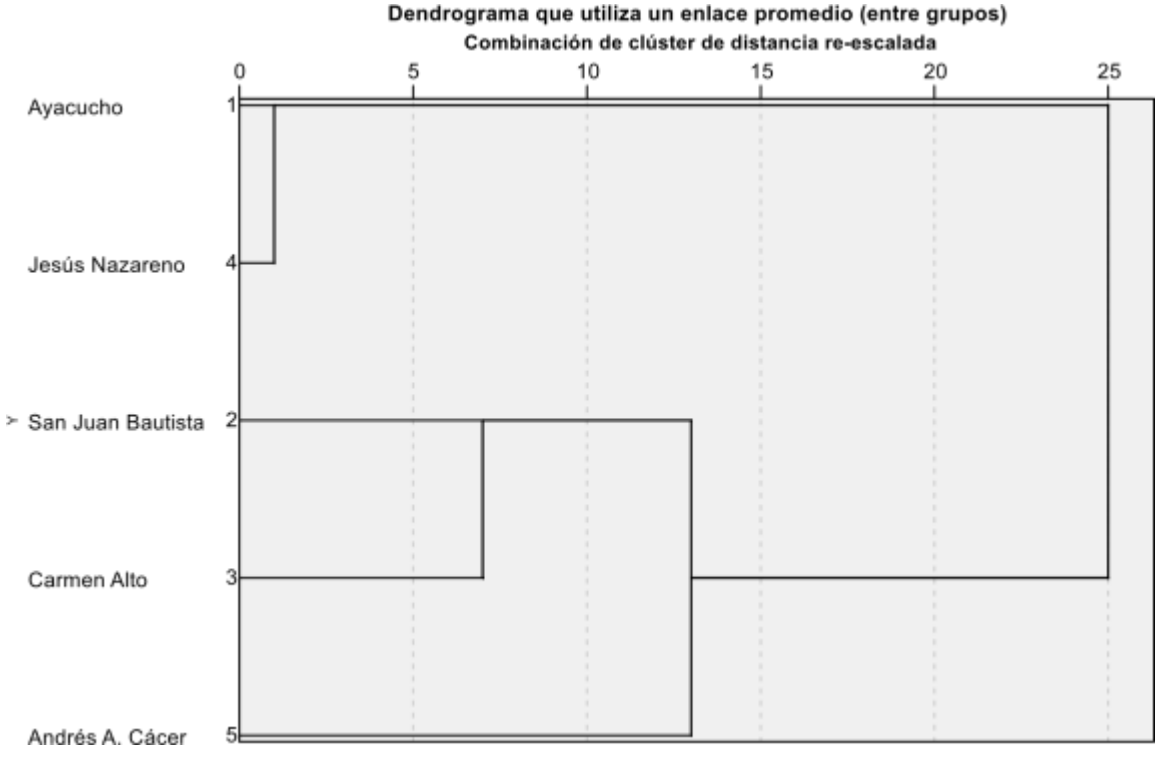


Ilustración 4.27: Dendrograma de la serie temporal de ICU diurno y nocturna.

3.3.3.4. Comportamiento de la temperatura superficial y crecimiento urbano

La isla de calor urbana superficial, tratado en este trabajo, corresponde a las altas temperaturas de emisión que alcanzan las diferentes estructuras y coberturas urbanos, generando la denominada temperatura de emisión superficial (Ts), las cuales después de

obtener para cada periodo de estudio ha sido validado para utilizar en el análisis temporal y espacial.

Para la validación de Ts se ha comparado con datos de temperatura del aire (Ta) provenientes de estaciones meteorológicas y datos de Ts medidos In-situ, estos datos han sido interpolados para la hora de paso del satélite y se ha generado mapas continuos de Ts y Ta. Para los años 1986, 1996 y 2006, la Ts se ha generado utilizando información de temperaturas del aire (media, máxima y mínima), ingresando estos datos en el modelo de Partón junto con valores de biomasa y la radiación solar.

En la validación se obtienen coeficientes de determinación r^2 de la regresión lineal que varían entre 0.88 y 0.96, con este cálculo estadístico se determina que los mapas de temperatura de superficie son aceptables. Asimismo, la diferencia entre Ts y Ta varía entre 10ºC y 18ºC, lo cual es habitual según Sandholt et al. (2002). Las correlaciones entre la Ts medido en terreno y obtenido con imágenes de satélite para 1986 y 2016 se muestran en la Ilustración 4.28 y 4.29.

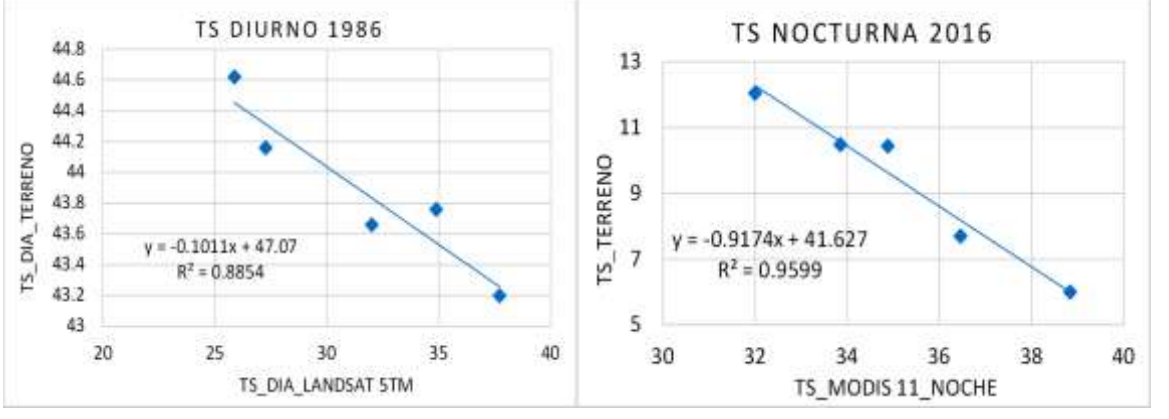


Ilustración 4.28: Coeficientes r^2 en validación de TS para 1986 y 2016.

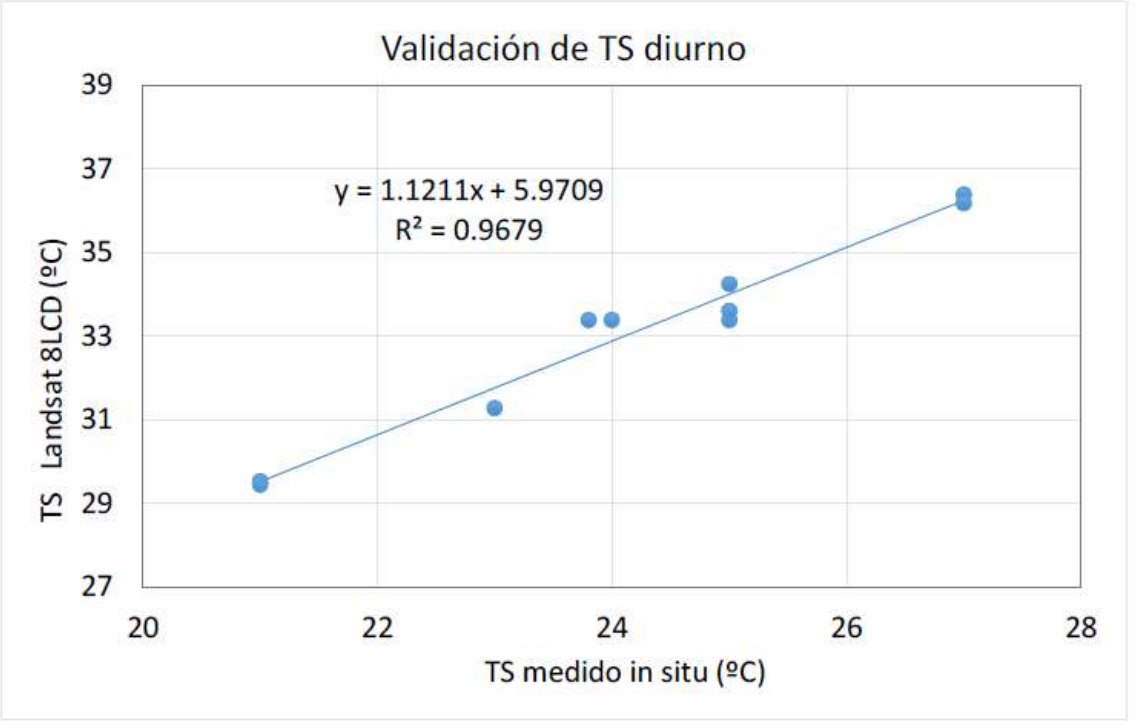


Ilustración 4.29: Coeficiente r^2 en validación de TS $_{\text{medido insitu}}$ versus TS $_{\text{Teledetectado}}$ para el 2016.

3.3.4. Patrones temporal y espacial de la temperatura superficial

3.3.4.1. Comportamiento temporal de la temperatura superficial

En las Ilustraciones 4.30 y 4.31 se muestra la evolución temporal de Ts diurna y nocturna para la ciudad de Ayacucho entre 1986 y el 2016, donde se puede observar que las temperaturas correspondientes a un año de escasa precipitación pluvial (1996), son superiores respecto a un año en donde se registra una buena precipitación (1986).

La variabilidad de Ts es más notoria en superficies desnudas respecto a otros que presentan cobertura vegetal y capa de suelo, por esta razón los espacios periféricos a la ciudad presentan Ts alto incluso mayor a las registradas en la zona céntrica de la ciudad; este comportamiento se observa principalmente en las zonas adyacentes al cerro de la Picota, la ciudad universitaria, cerro Acuchimay, adyacentes al aeropuerto, ciudad de las Américas,

Santa Elena, Vista alegre y Chakihuaycco. En el 2006 y 2016, la Ts se configura dentro del área urbana, distinguiéndose áreas con mayor temperatura que luego originan las llamadas zonas de máximo térmico.

Al comparar los mapas con la línea de base (año 1986), se observa un incremento considerable de Ts máximo en 2006 y 2016, con 4.35°C y 13.43°C respectivamente. Además de su variabilidad temporal se observa un patrón de gradiente, con promedio de temperaturas más bajas para 1986 y medias para 1996, mientras las temperaturas altas se registran en 2016. Cabe resaltar, que al comparar con el SAVI y el MNDWI, en todos los periodos de estudio, las correlaciones resultan negativas y significativas, indicando que la reducción de la cobertura vegetal y la impermeabilización del suelo con el crecimiento urbano, provocan un aumento de Ts.

Según Fernández et al., 2016, la impermeabilización del suelo urbano genera una disminución de la evapotranspiración entre 30 y 40%, la exposición de superficies pavimentadas a la radiación solar directa y difusa corta el intercambio de calor (en sistema suelo-aire) producido en el proceso de evaporación, homogenizando la superficie térmica causada por las islas de calor, traduciéndose en aumento de Ts.

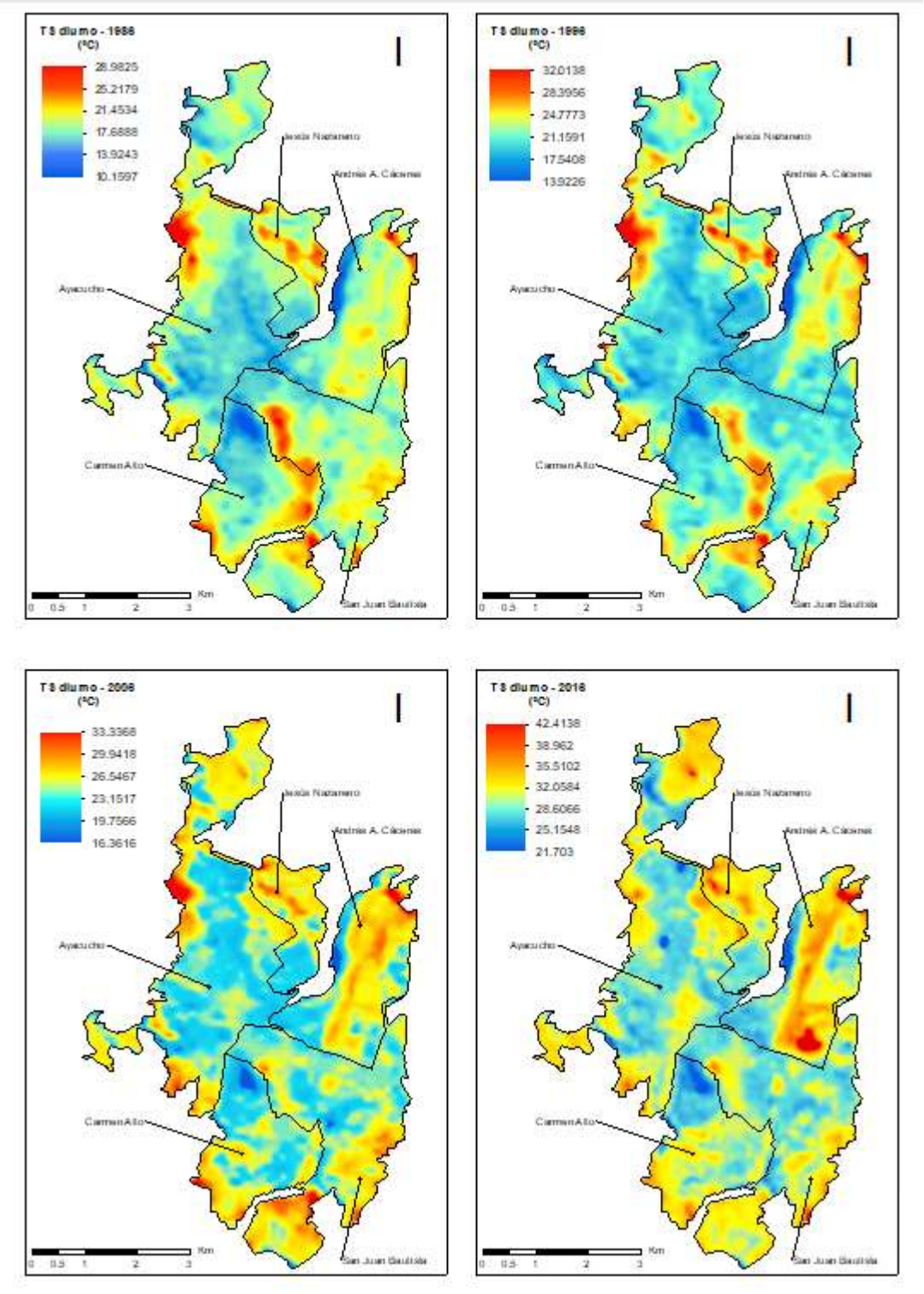


Ilustración 4.30: Serie temporal de TS diurno para el periodo 1986 a 2016.

La Ts nocturna muestra mayores valores en la zona céntrica de la ciudad, mientras en la periferia los valores de Ts son bajos. Asimismo, el aumento de Ts ocurre en zonas con densificación urbana y de construcciones principalmente en altura, provocando cambios importantes de Ts nocturna que es más notoria en el mapa correspondiente al 2016.

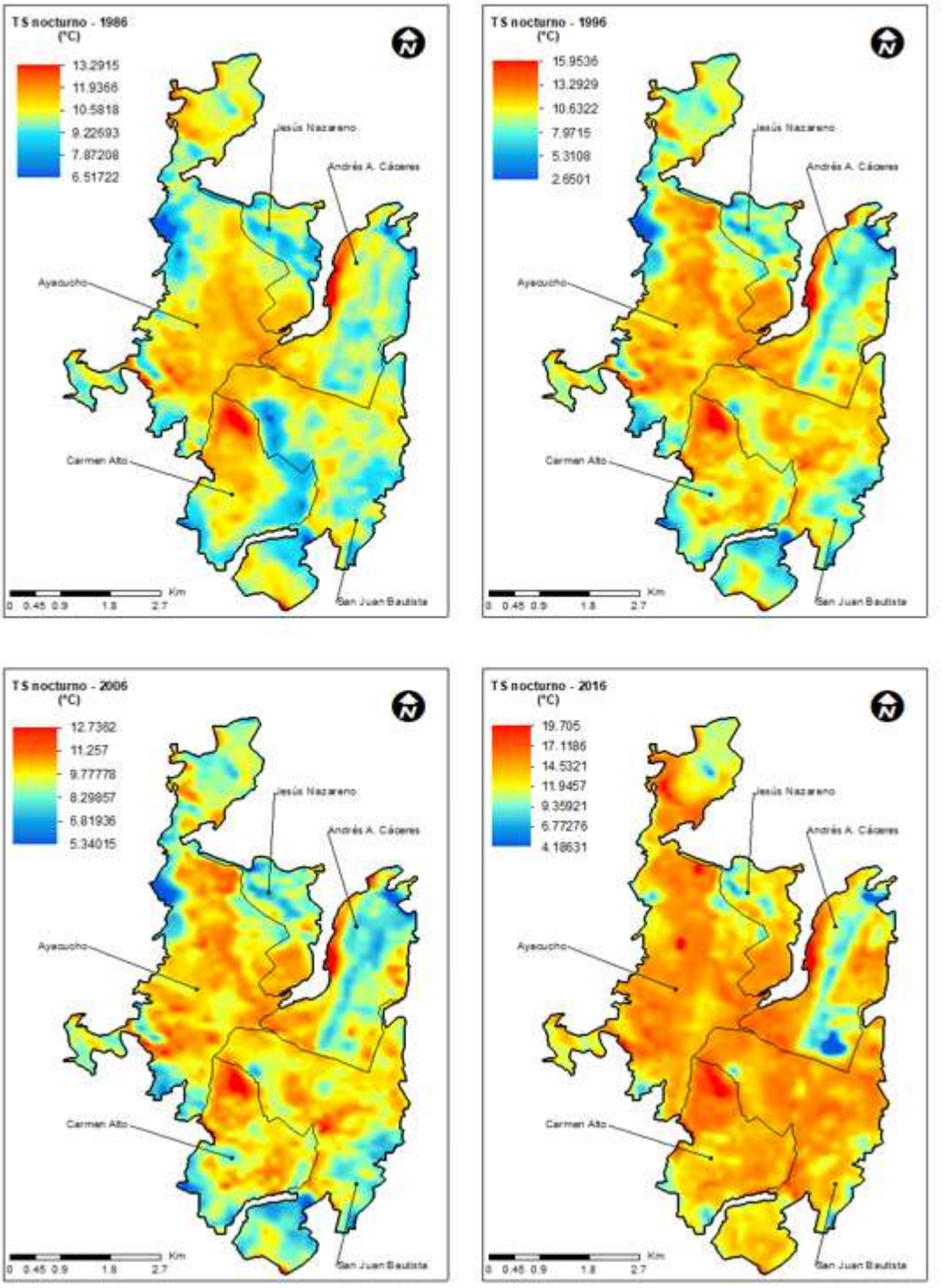


Ilustración 4.31: Serie temporal de TS nocturno para el periodo 1986 a 2016.

Otro factor que contribuye en la modificación de Ts es el grado de contaminación atmosférica, las concentraciones nocturnas de material particulado menor a 10µm y 2.5µm (MP10 y MP2.5) está asociada con la inversión térmica nocturna que se intensifica hacia la madrugada, por el cual el aire contaminado se concentra en estratos cercanos al ras de la superficie, localizándose en las mañanas en zonas bajas y de topografía abrigada; para la ciudad de Ayacucho estas zonas comprende el espacio límite entre los distritos de Ayacucho, San Juan Bautista, Andrés Avelino Cáceres y Jesús Nazareno.

Esta concentración de MP10 afecta los procesos de interacción radiaciónatmósfera: el de la absorción, dispersión, emisión y reflexión. La radiación solar que cae en las zonas mencionadas, una parte es absorbida y la otra es devuelta al espacio a través de la reflexión y la emisión, pero la concentración de contaminantes cerca al ras de la superficie hace que la energía reflejada y emitida sea absorbida y devuelta a la superficie con el consiguiente aumento de Ts.

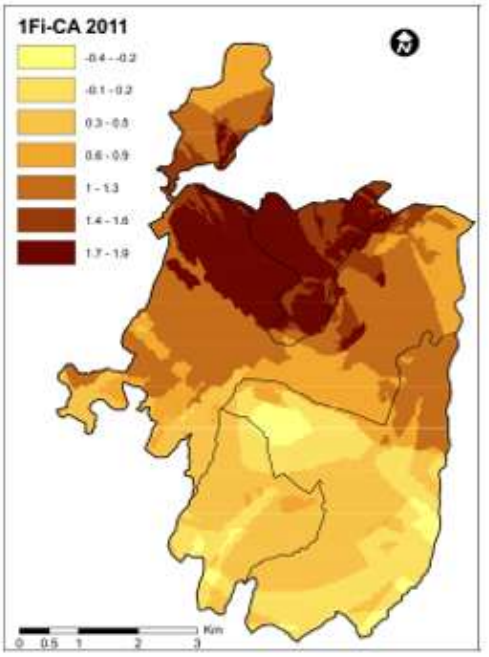


Ilustración 4.32: Distribución de MP10 µm y MP2.5 µm para el año 2011. Fuente: Tesis de Lidia Machaca, 2011.

Comparando los valores de TS diurno y TS nocturno, la TS máximo se registra en el 2016, un aumento de 10.2°C con respecto a TS máximo de 2006; mientras tanto, la TS nocturno en este mismo rango registra un aumento de 3.1°C. En los demás periodos el aumento de TS máximo es mucho menor, 2.6°C y 3.0°C, para los años 1996 y 2006, respectivamente. En el rango de TS media, el aumento es 2.1°C entre 1986 y 1996 y 8.7°C entre 2006 y 2016. El aumento de TS nocturno es menor, 0.6°C entre 1986 y 1996, y 2.3°C entre 2006 y 2016. Estas variaciones se muestran en la Ilustración 4.32.

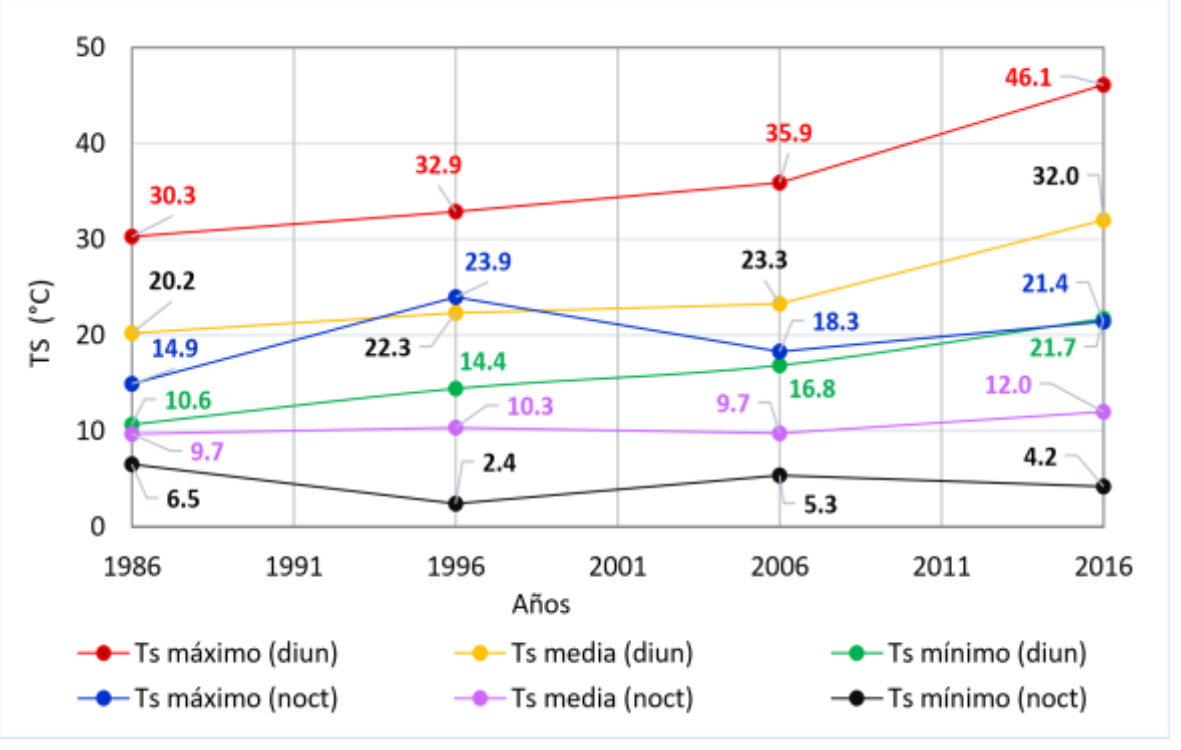


Ilustración 4.33: Evolución temporal de Ts diurno y nocturno entre 1986 y 2016.

En la Tabla 4.8 se muestra la variación de la temperatura de superficie para la zona urbana, periurbana y rural; donde la diferencia de TS diurno de zona urbana frente a la TS de zona rural varía entre 3.23 ºC y 6.2ºC, siendo la mayor diferencia para el 2016 y la menor diferencia para 1996. Asimismo, la diferencia de TS nocturna varía entre 4.78ºC y 7.15ºC, la mayor diferencia ocurre en 1996 y la menor diferencia en el 2006. El promedio total para los 4 periodos de estudio es 4.31ºC para TS diurno y 5.82ºC para TS nocturna.

Para la zona urbana y periurbana, la diferencia varía entre 1.34ºC y 3.84ºC, mientras la TS nocturna varía entre 1.78ºC y 4.64ºC, en ambos casos la mayor diferencia ocurre en el 2016. El promedio total de diferencia termal es 2.31ºC para TS diurno y 3.08ºC para TS nocturna.

Tabla 4.8: Variación de TS diurno y nocturna por tipo de zona, 1986 al 2016.

Zona	**Coordenadas UTM**		**TS diurno (ºC)**				**TS nocturna (ºC)**			
Tipo	X	Y	1986	1996	2006	2016	1986	1996	2006	2016
Rural	584299	8539419	16.9	20.5	19.4	24.3	2.9	1.1	3.1	4.7
	582897	8538830	17.8	19.1	20.9	22.2	5.5	6.6	6.3	7.3
	583075	8539081	19.2	19.6	20.4	24.8	4.0	5.9	5.5	7.4
	583085	8538548	21.0	21.4	21.9	25.7	2.4	2.3	7.3	8.7
Promedio			18.7	20.1	20.6	24.3	3.7	4.0	5.6	7.0
Periurbana	584285	8549090	19.6	21.9	24.6	25.9	6.9	9.5	9.1	9.9
	583259	8542996	20.5	20.1	22.4	25.3	7.6	8.0	8.4	7.0
	586779	8542459	20.3	22.8	22.6	29.7	6.6	6.2	7.4	8.1
	583897	8542139	19.6	22.3	22.5	26.2	5.9	8.8	8.8	6.7
	584219	8540695	19.2	22.8	23.9	26.7	4.0	8.5	8.6	9.3
	585282	8540334	19.6	22.3	23.6	25.8	3.9	9.4	9.1	10.0
Promedio			19.8	22.0	23.3	26.6	5.8	8.4	8.6	8.5
Urbana	583393	8547747	22.4	21.4	24.0	30.3	8.9	11.9	10.7	13.3
	583408	8547011	21.9	25.0	25.3	30.3	9.1	10.6	10.1	13.3
	584881	8546806	23.3	25.9	26.3	31.1	8.6	9.9	9.7	12.7
	583429	8546863	22.8	22.3	23.4	30.1	8.7	11.5	10.5	13.4
	585128	8546154	20.1	19.6	24.4	30.5	9.7	11.9	10.5	13.1
	585215	8546304	21.5	21.9	22.8	31.4	9.2	10.7	9.9	12.5
	585789	8543005	21.0	22.8	23.5	29.4	9.4	12.1	10.9	14.0
	585175	8542857	24.6	28.1	29.9	30.7	8.1	10.5	10.3	12.9
Promedio			22.2	23.4	25.0	30.5	9.0	11.1	10.4	13.1
Diferencia TS (ºC)										
Urbana - Rural			3.48	3.23	4.31	6.20	5.25	7.15	4.78	6.10
Urbana - Periurbana			2.37	1.34	1.70	3.84	3.16	2.74	1.78	4.64

3.3.4.2. Distribución espacial de la temperatura de superficie

La distribución espacial de Ts al interior de la ciudad de Ayacucho presenta clara diferenciación, con altos valores en zonas con alta densidad de construcciones y pavimentos, y con valores bajos en la zona periurbana. La temperatura de la superficie está influida, principalmente por factores locales como el tipo de cobertura, la morfología urbana y tipologías edificatorias, la altitud, orientación de las construcciones y la topografía del terreno.

El paso del satélite Landsat por el área de estudio en horario local se registra alrededor de las 09.30 horas. En relación a esto, las imágenes Landsat utilizadas en esta investigación corresponden a finales de otoño e inicios de invierno, cuando el clima es seco y casi siempre soleado. Por ello, en esta época la temperatura diurna en las zonas periféricas que son suelos desnudos y afloramiento de rocas, como el cerro la Picota y cerro Acuchimay, la TS se eleva sensiblemente razón por la cual presentan mayor TS que el área urbana.

En cambio, la verticalidad solar en esta época no es muy elevada y las horas de luz diurna son deficitarias respecto a las horas de noche, por ello las temperaturas nocturnas se reducen sensiblemente debido a la fuerte irradiación. Pero también existe una limitante que impone la hora de adquisición de las imágenes utilizadas, pues a la hora del paso del satélite la superficie correspondiente a los pisos bajos aún no ha almacenado suficiente energía. Del mismo modo, el ángulo de elevación solar que varía entre 45º a 53º no sólo determina una menor intensidad de la radiación solar que incide en el suelo, sino que impide que las superficies ubicadas al fondo de la cuenca y al pie de las laderas expuestas al Oeste, como la faldería de Conchopata, Acuchimay, Alameda y también las fachadas de las viviendas expuestas al Sur y al Oeste, absorban menos energía, pues quedan ocultas de la luz solar, originando un efecto de anisotropía que se expresa con la atenuación de la Ts en superficies ensombrecidas.

Los mapas de Ts muestran clara relación espacial con los parámetros urbanos, capacidad térmica y de emisión de los materiales, cobertura vegetal y el contenido de

humedad del suelo, en donde las superficies más frías se relacionan con las áreas con espacios libres para la circulación del aire y la ventilación de espacios públicos, áreas vegetadas y húmedas y cercanos al riachuelo Alameda. Mientras las superficies más cálidas están relacionadas con aquellas zonas urbanizadas, pavimentadas, densidad de construcciones y sobre todo en altura, desprovistas de vegetación y superficies con escaso contenido de humedad.

Los valores de Ts alcanzan valores altos en suelos impermeables, escasamente vegetados, siendo posible apreciar grandes contrastes y gradientes térmicos entre las áreas más cálidas y aquellas con Ts moderadas. En efecto, la zona urbana concentra considerable porcentaje de superficies con temperaturas superiores a 29ºC, lo que permite inferir que se trata de superficies con una inercia térmica mucho mayor que la zona periurbana. Para zonas de periferia se asume, que hacia el atardecer, cuando la intensidad de la radiación solar directa disminuye y una vez oculto el sol, la baja inercia térmica que caracteriza a dicha zona incidirá en un rápido descenso de Ts en relación con superficies de zonas urbanas.

En la Ilustración 4.34, los mayores valores de Ts coinciden con las zonas donde ocurren también mayores valores del índice ICU. Al contrastar los valores de Ts en el área urbana consolidada, excluyendo la periferia, se aprecian valores altos en la zona centro y además de los aspectos señalados en párrafos anteriores, las zonas calientes coinciden con el eje vial principal de cada distrito.

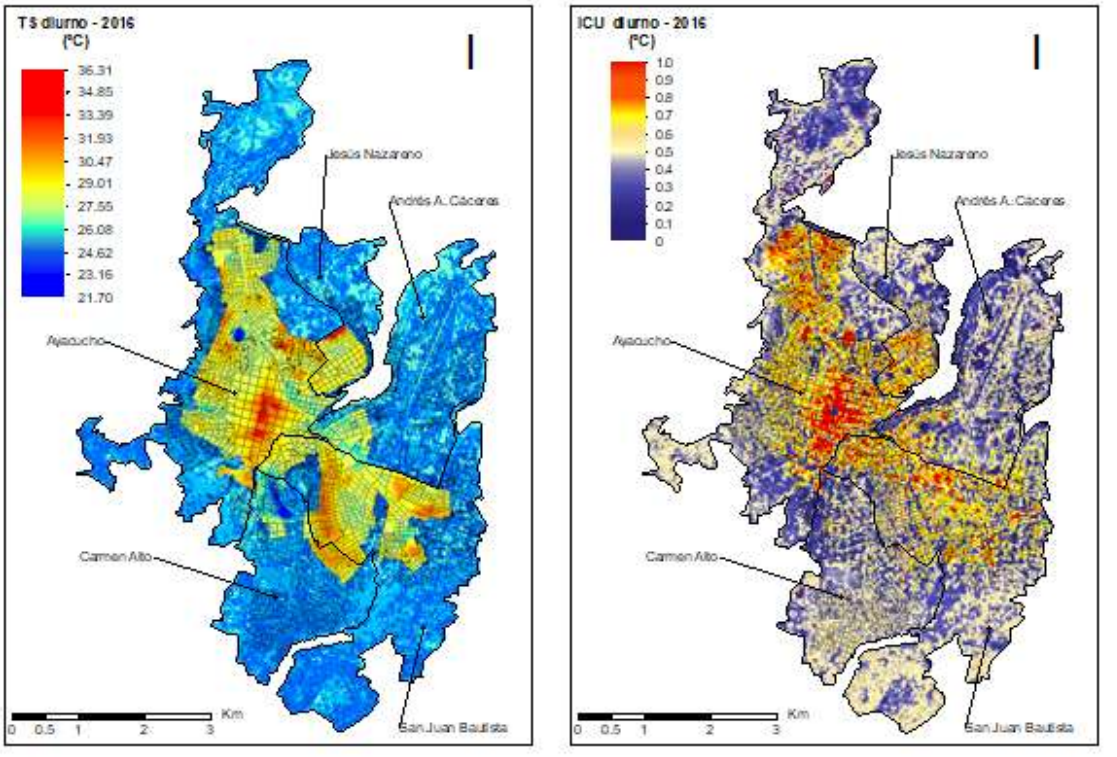


Ilustración 4.34: Distribución espacial de TS versus ICU para el 2016.

Asimismo, las zonas con mayor valor de TS se correlacionan positivamente con los valores del índice ICU, obteniendo en la validación un coeficiente de determinación r^2 de la regresión lineal igual a 0.96, con este cálculo estadístico se determina la correspondencia de la variable con el índice ICU, resultado considerado como aceptable.

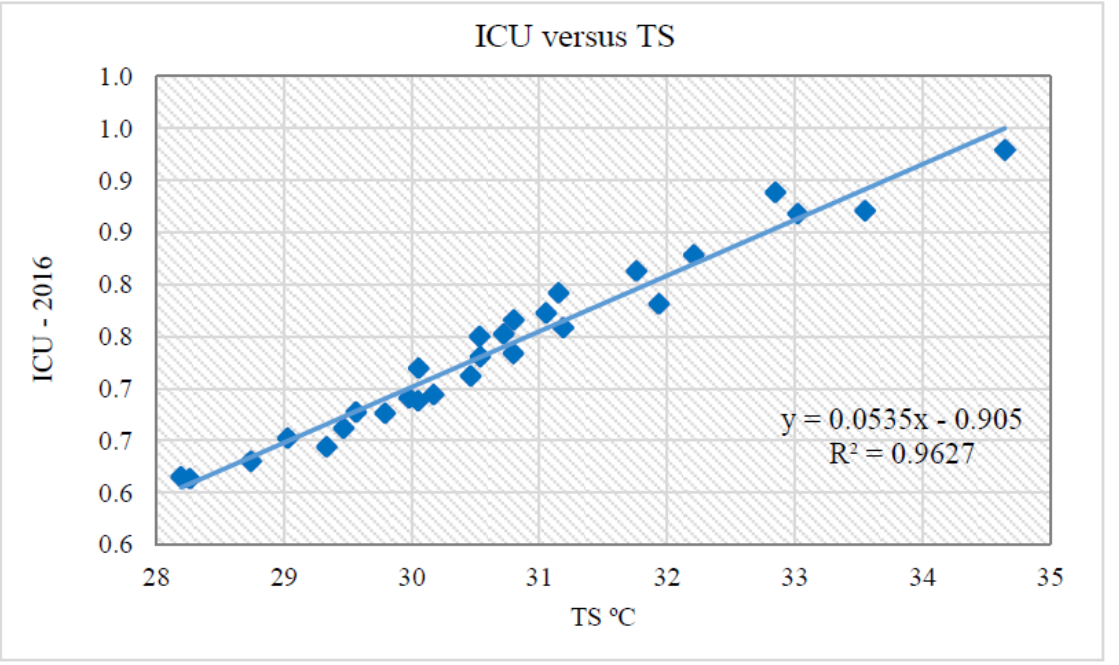


Ilustración 4.35: Coeficientes r^2 en validación de TS versus ICU para el 2016.

3.3.5. Gradiente térmico y su relación con la expansión urbana

3.3.5.1. TS y su relación con el crecimiento urbano

La ciudad de Ayacucho ha experimentado un cambio notorio a partir de mediados de la década de los 80, provocado por la violencia política que se vivió durante 2 décadas, registrándose un crecimiento vertiginoso de la ciudad, ocupando incluso áreas considerado vulnerables como las laderas del cerro la Picota. De acuerdo con los datos obtenidos de la municipalidad provincial de Huamanga, se observó que el área urbana y las construcciones han ido en aumento en la ciudad lo que se puede observar en la Ilustración 4.36.

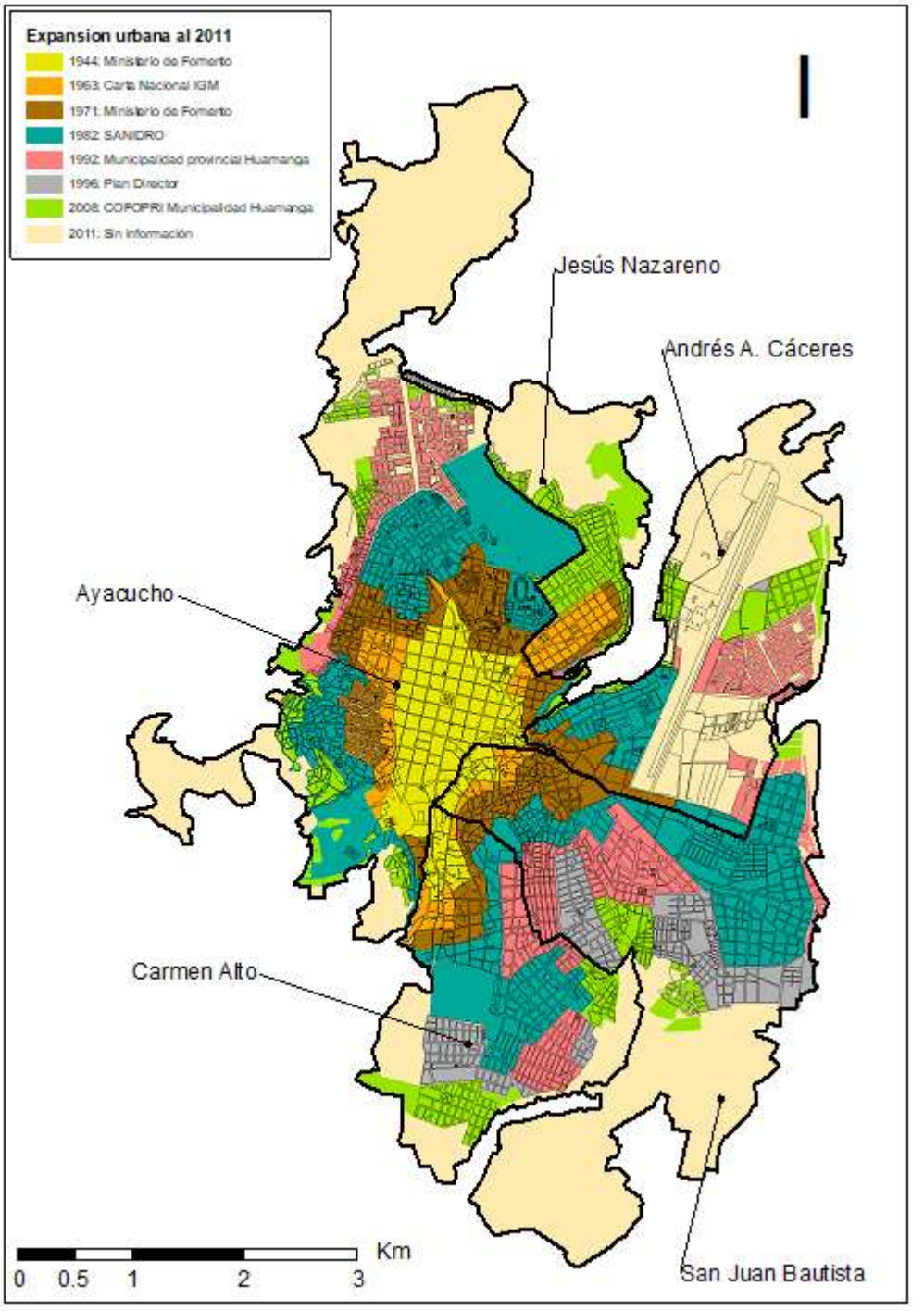


Ilustración 4.36: Mapa de evolución urbana de Huamanga al 2015. Fuente: Municipalidad provincial de Huamanga, 2017.

En el mapa anterior se puede apreciar que la expansión urbana se inicia a partir de 1982 y ocurre en forma radio-céntrica. El inadecuado desarrollo urbano ha provocado que la zona urbanizada de la ciudad de Ayacucho se extienda desordenadamente y con ello creando un impacto ambiental. La migración rural a raíz de la violencia sociopolítica y la concentración de los servicios en la capital del departamento ha ocasionado la llegada de habitantes de otras provincias, con ello la invasión de laderas y de zonas de protección, extendiéndose la mancha urbana en forma multidireccional, provocando la fragmentación urbana o la propagación de la ciudad y sus barrios a zonas rurales en la periferia urbana.

Un efecto de este proceso de urbanización desordenado, conforme se expande la ciudad y al mismo tiempo se densifica las construcciones, ha traído consigo la generación de fenómenos ambientales como la denominada la "Isla de calor urbana", un fenómeno de elevación de la temperatura superficial a raíz de una combinación de factores tales como la edificación, la falta de espacios verdes, los gases contaminantes. El fenómeno ICUs se manifiesta en la dificultad de disipar el calor durante la noche a comparación de áreas no urbanas que se enfrían rápidamente en situaciones de estabilidad por la falta de acumulación de calor, las zonas urbanas, donde las construcciones y el pavimento desprenden por la noche el calor acumulado en el día, provocan cambios del microclima urbano.

Cabe señalar, varias investigaciones han demostrado que el fenómeno de ICUs aumenta con el tamaño de la ciudad y que es directamente proporcional al tamaño de la mancha urbana, es decir al aumento de la población por unidad de tiempo. En efecto, al parecer esta situación también está asociado en la ciudad de Ayacucho, porque al comprobar mediante el test de Mann-Kendall, la estadística de pendiente del Theil-Sen, y el coeficiente r^2 se obtienen buena respuesta.

Con el test de Mann- Kendall, con un 90% de confianza se obtiene un P valor igual a 0.07, mediante el cual se rechaza la hipótesis nula; es decir, la temperatura diurno de la superficie y su inercia nocturna está asociada a la expansión de la mancha urbana. Asimismo, los límites de la estadística de pendiente de Thiel-Sen varía entre 0.43 a 0.84, difiere significativamente de 0 y existe una tendencia positiva (Ilustración 4.37).

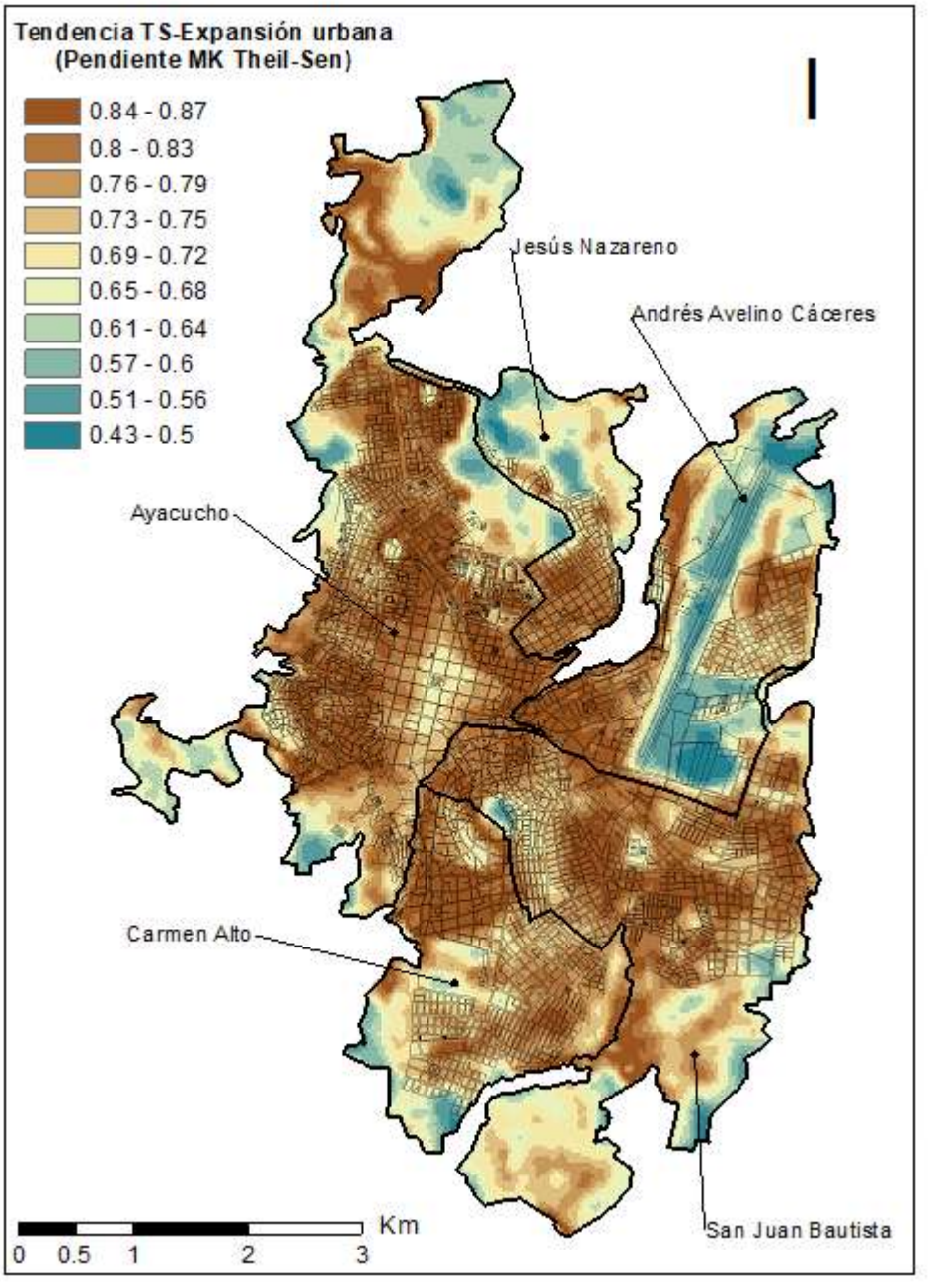


Ilustración 4.37: Mapa de tendencia Theil Sen de Mann-Kendall. Asociación TS y expansión urbana al 2016,

Asimismo, con una prueba de correlación lineal el coeficiente de determinación r^2 resulta significativo con valores entre 0.66 y 0.90, las correlaciones altas (0.840.90) se distribuyen en zonas con mayor densidad de construcciones; el centro histórico de la ciudad presenta una correlación moderada (0.79-0.84), mientras el área periurbana, espacios abiertos y vegetados como parques presenta baja correlación (0.66-0.79) como se puede observar en la Ilustración 4.38.

Mediante el test de Mann-Kendall y el cálculo del coeficiente de determinación r^2 se determina que existe una asociación entre zonas construidas y las temperaturas superficiales diurna y nocturna, identificándose mayor temperatura en zonas más densas, lo que puede explicarse probablemente debido al aumento de la urbanización y el calor antropogénico.

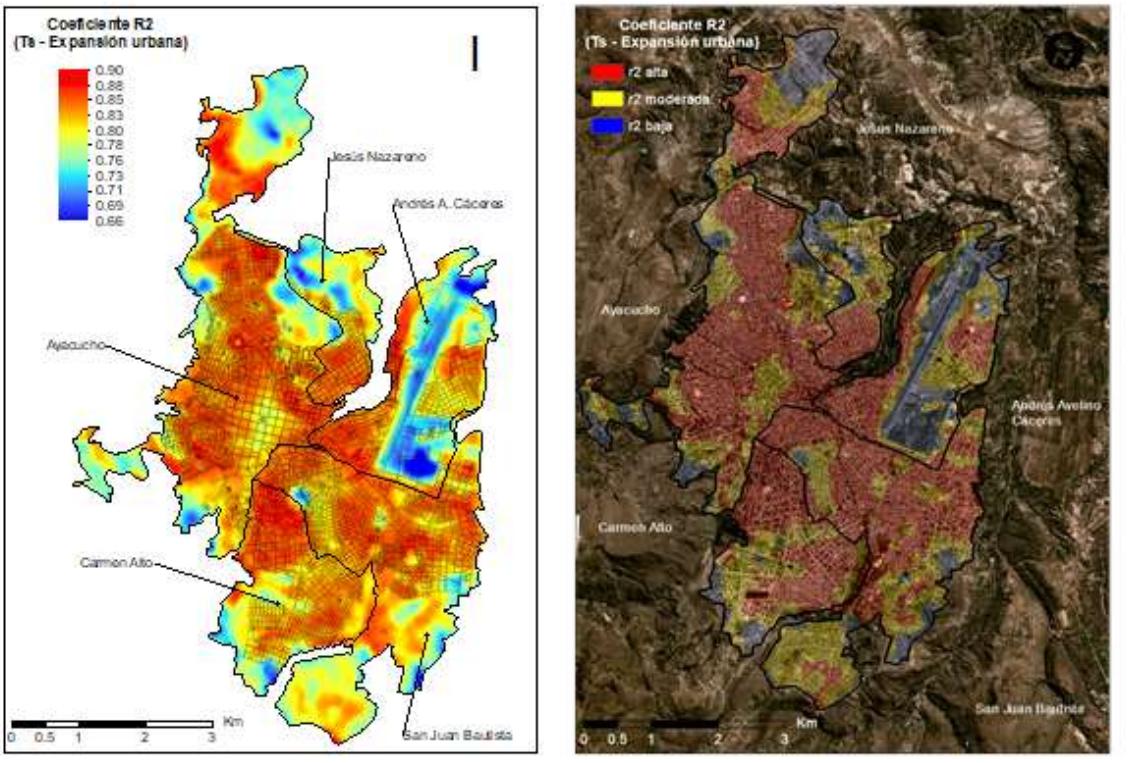


Ilustración 4.38: Coeficiente r^2 en asociación de TS y expansión urbana al 2016.

3.3.5.2. TS y su relación con la morfología urbana

La morfología urbana resulta de la interacción de tres variables: plano de soporte (medio natural, vialidad y traza), usos del suelo y la edificación (forma, altura y tipología de materiales). Para analizar la asociación de Ts con la morfología urbana se utilizó información referente a la trama, forma que genera un conjunto de calles y manzanas, y las tipologías edificatorias. Esta tipificación se realizó aplicando un filtro del tipo paso alto a una imagen satelital de alta resolución espacial, pero también se utilizó un plano catastral obtenido de la municipalidad provincial de Huamanga, las tramas identificadas han sido en base a 3 formas comunes: damero (lados iguales), rectangular e irregular.

Los resultados de tipificación de tramas y densidad de viviendas con mayor representatividad se muestran en la Ilustración 4.39, sobre la base de estas características se escogieron 3 rangos de bloques morfológicas (Alto, medio y bajo). Estos bloques son de uso residencial, pero difieren en cuanto a trama, densidad de viviendas, superficie impermeable expuesta a la radiación solar, ventilación de espacios públicos, masa vegetal y contenido de humedad del suelo; pese a ello los bloques se asemejan en aspectos morfológicos y constructivos (superficie, altura y materiales de construcción), las cuales nos permita comparar las morfologías y su comportamiento térmico.

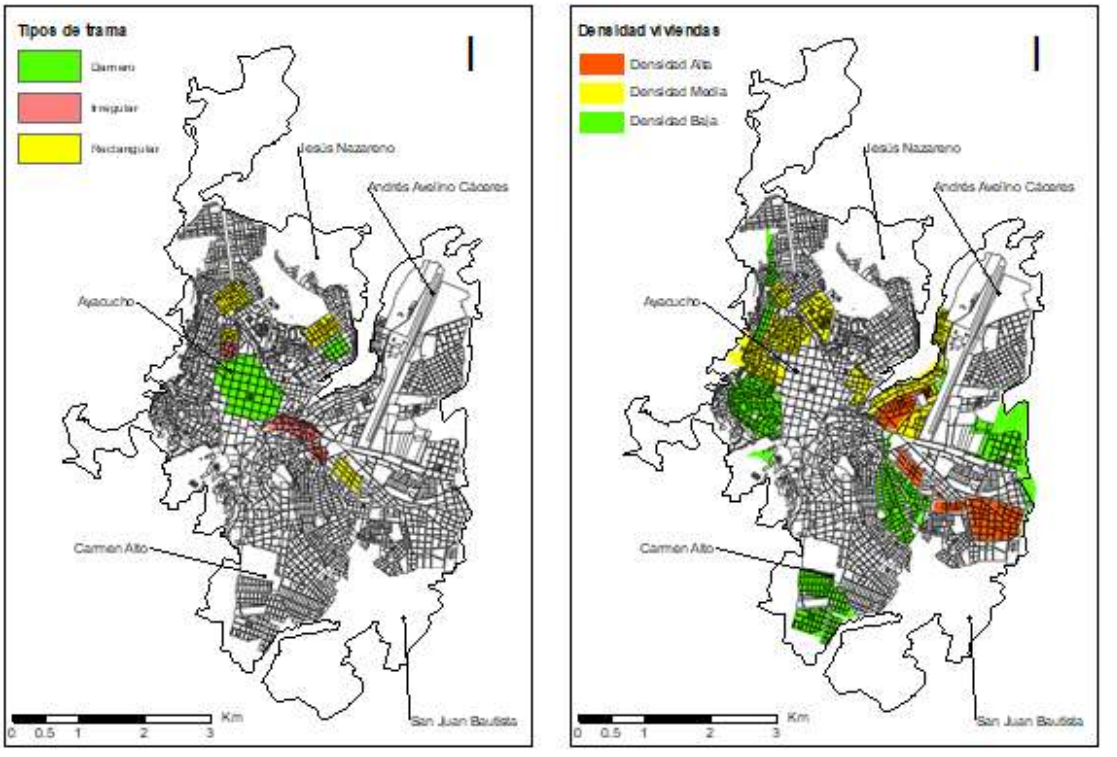


Ilustración 4.39: Tipos de trama urbana y densidad de viviendas.

Con respecto a las tipologías establecidas, el Bloque morfológico Alto tiene trama irregular, alta densidad de viviendas, escaso masa vegetal y bajo contenido de humedad del suelo, mayor superficie pavimentada receptora de radiación solar y canales de ventilación con obstrucciones o sinuosos. En cambio, el Bloque morfológico Bajo tiene trama damero o moderadamente rectangular, baja densidad de viviendas, mayor área con vegetación y contenido de humedad del suelo en los primeros 30cm del perfil.

Previa normalización de los datos con el algoritmo Earth Trends Modeler del programa TerrSet se aplicó el test de Mann-Kendall, obteniendo con un 90% de confianza un buen resultado de p-valor igual a 0.0872, este valor no supera el umbral de 0.1, por ello se rechaza la hipótesis nula, es decir si existe diferencia entre las medias de TS según el tipo de morfología de los bloques urbanos analizados. Luego, se realizaron regresiones lineales

múltiples entre la variable dependiente (y= Ts) y las variables independientes o explicativas (x= Indicadores urbanos).

El grado de relación se ha determinado por el coeficiente de correlación de determinación r^2, estableciendo el modelo con bondad de ajuste de la regresión que varía entre 0.85 y 0.96, siendo estadísticamente significativo. Las ecuaciones de regresión obtenida para cada tipo de bloque urbano han sido los siguientes:

a) Bloque morfológico alto

TS_{diurno}= 44.085684+17.766425*Fc1-11.069836*Fc2-13.649407*Fc3-21.544784*Fc4

$TS_{nocturna}$=2.933596-13.312383*Fc1+8.294628*Fc2+10.227501*Fc3+16.143507*Fc4

R=0.927655, R^2=0.860544

b) Bloque morfológico medio

TS_{diurno}=55.195624+12.413284*Fc1-22.492178*Fc2-17.098716*Fc3-25.247916*Fc4

$TS_{nocturna}$ = -5.391082-9.301274*Fc1+16.853389*Fc2+12.812067*Fc3+18.918263*Fc4

R=0.924460; R^2=0.854626

c) Bloque morfológico bajo

TS_{diurno}=56.841325+12.795160*Fc1-24.887794*Fc2-18.259812*Fc3-26.020840*Fc4

$TS_{nocturna}$=-6.624205-9.587413*Fc1+18.648423*Fc2+13.682077*Fc3+19.497415*Fc4

$R=0.969699$, $R^2=0.940316$

Dónde: Fc1= Canales o calles de ventilación, Fc2= Superficie pavimentada de exposición y acumulación de la radiación solar, Fc3= Trama y densidad de viviendas, Fc4= Vegetación y contenido de humedad del suelo. Los factores fueron obtenidos mediante el APC, a excepción del factor 2 que fue obtenido mediante el análisis de desmezclado espectral (UNIMIXING). Para el factor 3, los datos del APC han sido imágenes segmentados y con realce de paso alto, el índice de urbanización y el índice de Factor de Visión del Cielo.

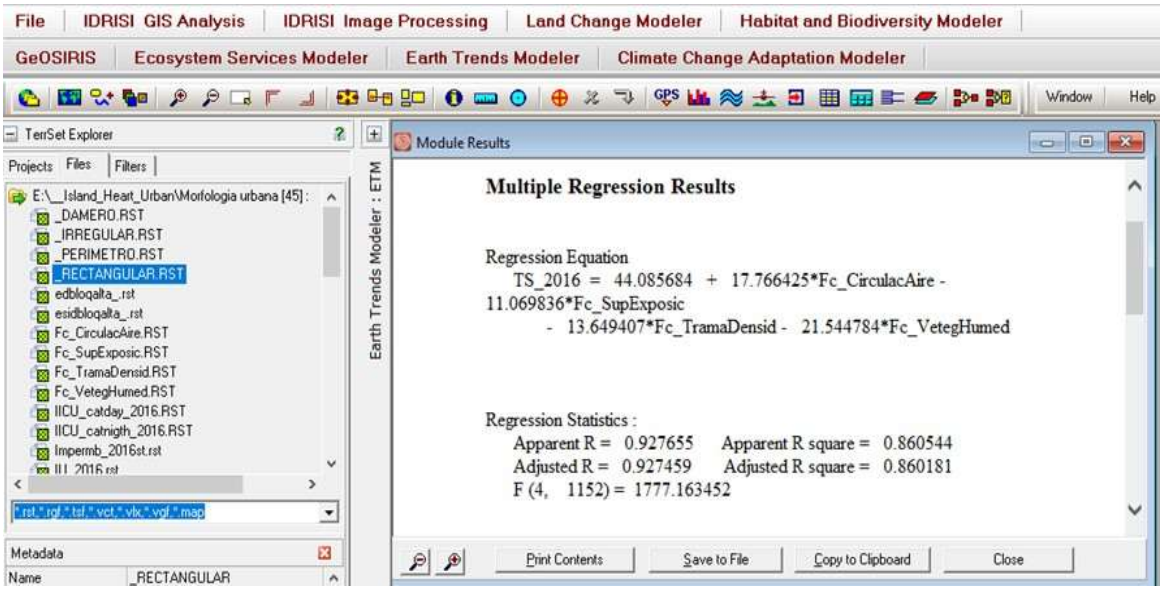


Ilustración 4.40: Resultado de regresión múltiple para tipología bloque alto.

La evaluación de la diferencia térmica para cada tipo de bloque se muestra en la Tabla 4.9. Para los promedios la diferencia térmica no es muy alto, de 1.08°C entre bloque alta y baja; lo que si varía sustancialmente es en los rangos mínimo y máximo, encontrándose una diferencia térmica de TS mínimo diurna entre el Bloque alta y baja de 5.53°C y de 3.53°C para TS nocturna; sobre la base de estas diferencias encontradas es posible afirmar que el comportamiento térmico de TS varía según el tipo de morfología urbana.

Tabla 4.9: Diferencia térmica diurna y nocturna por tipo de bloque morfológico.

Rangos de TS	**TS (°C) / Tipo de bloque**			**Diferencia de TS (°C)/Tipo de bloque**		
	Alta	Media	Baja	Alta-Media	Alta-Baja	Media-Baja
	Temperatura de superficie diurna					
Mínimo	28.55	24.61	23.01	3.93	5.53	1.60
Máximo	44.04	43.42	42.40	0.62	1.65	1.02
Promedio	30.77	30.70	29.69	0.07	1.08	1.01
	Temperatura de superficie nocturna					
Mínimo	11.47	9.42	7.94	2.05	3.53	1.48
Máximo	23.46	23.10	22.72	0.36	0.74	0.38
Promedio	13.02	12.96	12.91	0.06	0.11	0.05

Dentro de los descriptores geométricos del tejido urbano, la morfología del cañón urbano que es la relación entre la altura de las construcciones y la distancia que los separa, orientación y el Factor de Cielo Visible (Sky View Factor, SVF), son factores claves en la modificación del microclima urbano, disminuyen la ventilación y el enfriamiento en la noche, manteniendo temperaturas altas en la noche. Aunque también, el cañón urbano obstruye el paso de la radiación solar y enfría el aire durante el día, porque la radiación solar no llega igual a todas las superficies.

Un menor cielo visible y una menor exposición al viento, tal como ocurre en una zona de mayor densidad edificada, favorecen una mayor acumulación de energía en el espacio urbano que se traduce finalmente en una mayor temperatura, propiciando el fenómeno de isla de calor.

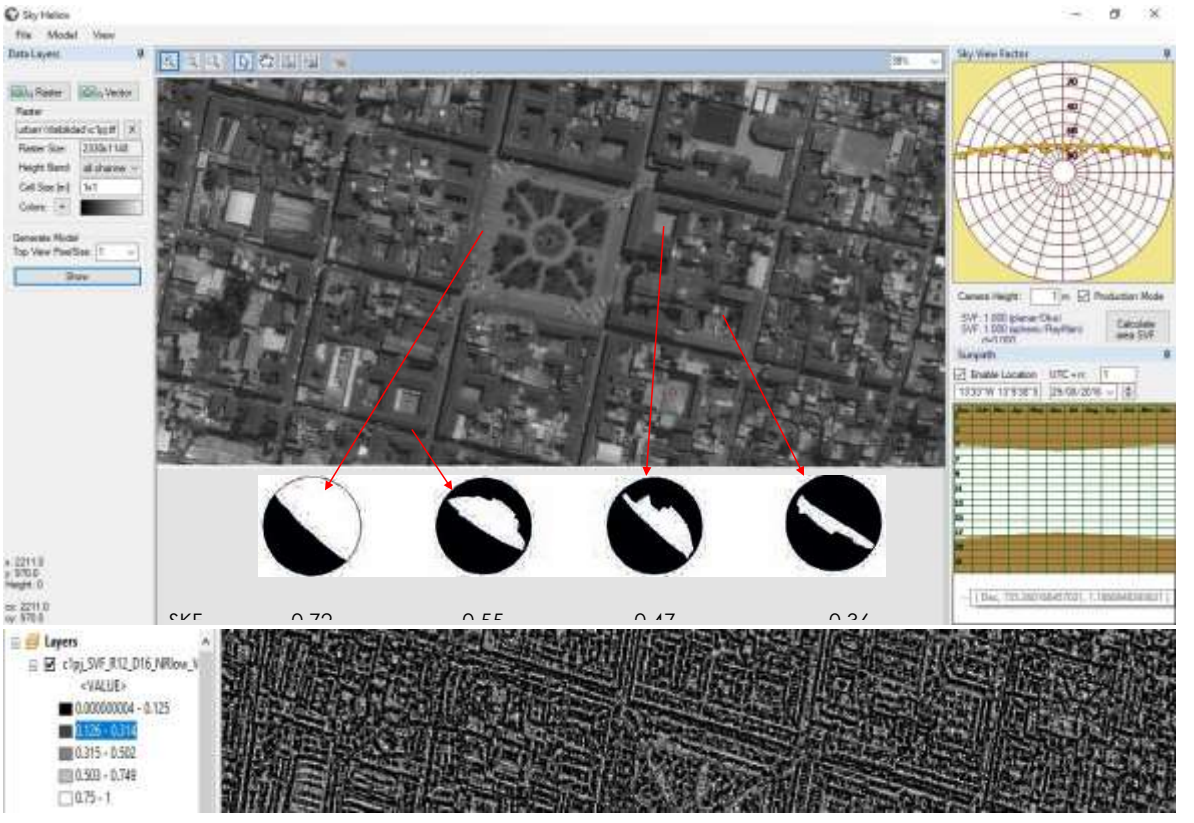


Ilustración 4.41: Captura de pantalla de SkyHelios para el análisis de SVF.

Según Oke (1987), la circulación del aire en un cañón urbano está relacionado con la altura de las viviendas (H), el ancho de la calle (W) y con la longitud de la calle (L), razón por la cual existe tres tipos de flujos: 1) Aislado, 2) Estela interferida, y 3) En vórtice (Ilustración 4.42).

En bloques de vivienda con calles ampliamente espaciados los flujos de aire son aislados, es decir no interactúan entre sí; cuando la calle no es tan ancha se origina un flujo en estela interferida por la obstrucción de las viviendas del frente. Finalmente, cuando el espaciamiento de las viviendas es una calle muy estrecha se origina un flujo en vórtice estable en el cañón urbano que interactúa levemente con el flujo de aire exterior. El flujo en vórtice induce a que el flujo del aire en la calle tenga una dirección contraria a la del viento que circula encima de las viviendas; es por ello, cuando hay baja visibilidad del cielo hay poca ventilación y por ende menor variación diaria de temperatura; contrariamente, cuanto

mayor es el valor de cielo visible, hay mayor variación de temperatura porque favorece una mayor ventilación al interior del cañón urbano.

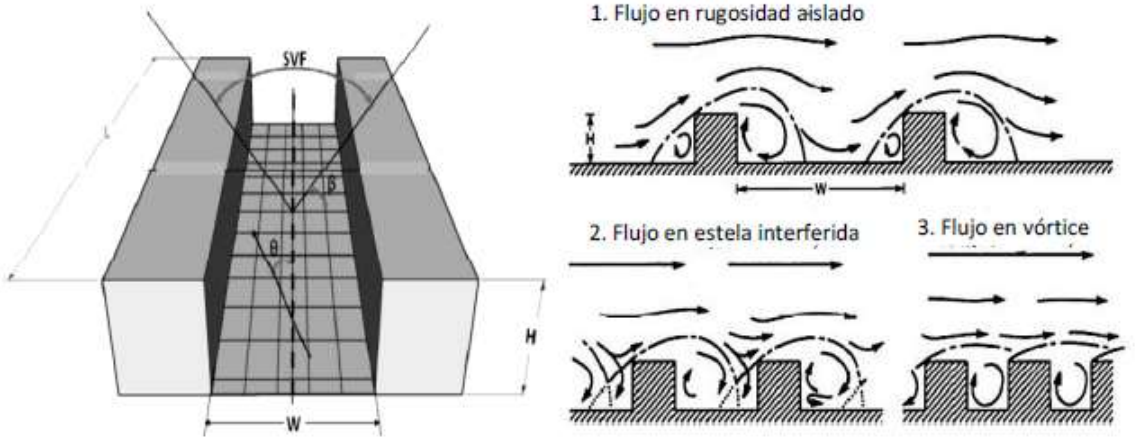


Ilustración 4.42: Esquema de un cañón urbano (izquierda) y flujo del aire sobre el cañón urbano (derecha). Fuente: Oke, 1987.

La ciudad de Ayacucho se encuentra emplazada en una hoyada, como se puede observar en la Ilustración 4.43, donde el principal canal de ventilación natural tiene orientación Sur-Norte, razón por la cual los remolinos de aire o vórtices que se producen en zonas con densas construcciones de viviendas altas, con calles sinuosos y demasiado estrechos; son factores que nos permite explicar del porqué, una ciudad ubicada a 2740 msnm, ya viene presentando indicios de un fenómeno ambiental ampliamente demostrado en las grandes urbes, la isla de calor urbana, demostrado en este estudio con aceptable sustento y metodología. Otro aspecto importante en la generación de la isla de calor urbana es la materialidad de las construcciones y sobre todo el tipo de revestimiento, tema no abordado en este estudio. Alchapar et al., 2012, han demostrado la importancia térmica de los materiales envolventes o de revestimientos, porque absorben la radiación solar e infrarroja y disipan hacia la atmósfera parte del calor acumulado. Es decir, adecuados envolventes urbanos desempeñan un papel clave en la reducción de las ganancias térmicas y el sobrecalentamiento de una ciudad.



Ilustración 4.43: Configuración geográfica de la ciudad de Ayacucho.

El análisis desarrollado en este capítulo permitió trasladar el marco conceptual de la Isla de Calor Urbana y la morfología urbana a un escenario territorial concreto, evidenciando cómo la transformación física de Ayacucho entre 1986 y 2016 se traduce en modificaciones térmicas cuantificables y espacialmente identificables.

La integración de datos *in situ*, procesamiento satelital multitemporal, estimación de indicadores biofísicos, modelamiento de superficie impermeable y análisis multivariado posibilitó construir un índice sintético capaz de representar la dinámica del fenómeno en el tiempo. La consistencia entre la validación empírica y los resultados derivados de teledetección refuerza la solidez metodológica del estudio y otorga confiabilidad a la interpretación espacial.

Los hallazgos muestran una evolución progresiva en la configuración térmica urbana. Mientras que en los primeros periodos las variaciones responden principalmente a condiciones climáticas naturales, a partir de 2006 se observa una consolidación más clara de focos térmicos asociados a expansión urbana, densificación y aumento de superficies

impermeables. La superposición de mapas de crecimiento urbano con los mapas de temperatura superficial e índice ICU confirma una relación directa entre morfología y comportamiento térmico.

Asimismo, el análisis estadístico permitió identificar tendencias significativas en la serie temporal, evidenciando que el fenómeno no es episódico, sino que presenta un patrón evolutivo coherente con el proceso de urbanización. La ciudad muestra un gradiente térmico característico: mayores temperaturas en el núcleo consolidado y disminución progresiva hacia áreas periurbanas, lo cual responde a diferencias en densidad edificatoria, cobertura vegetal y materiales superficiales.

En conjunto, el caso de Ayacucho demuestra que incluso ciudades interandinas de tamaño intermedio pueden desarrollar dinámicas térmicas propias de procesos de urbanización acelerada. El territorio, el clima seco de alta radiación y la transformación morfológica actúan de manera integrada, configurando un sistema urbano con condiciones propicias para la formación y consolidación de la Isla de Calor Urbana.

Este capítulo, por tanto, no solo valida empíricamente el modelo propuesto, sino que establece una base técnica y analítica para la formulación de estrategias de planificación urbana sostenible. La evidencia generada permite comprender la magnitud y evolución del fenómeno, abriendo la posibilidad de incorporar criterios climáticos en la gestión territorial futura.

REFLEXIONES FINALES

El estudio desarrollado a lo largo de este libro permite afirmar, con sustento empírico y metodológico consistente, la existencia del fenómeno de Isla de Calor Urbana en la ciudad de Ayacucho. La integración de análisis multitemporal, estimación de temperatura superficial, modelamiento de superficie impermeable y aplicación del Análisis de Componentes Principales demostró que, especialmente a partir del año 2006, se configuran focos térmicos claramente asociados a la expansión y consolidación urbana. La tendencia observada no responde únicamente a variabilidad climática natural, sino a transformaciones territoriales estructurales que modifican el balance energético local.

La confirmación del fenómeno no se limita a la identificación de diferencias térmicas puntuales, sino que evidencia un patrón espacial coherente: mayores temperaturas en sectores de alta densidad y compacidad urbana, disminuyendo gradualmente hacia áreas periurbanas con mayor cobertura vegetal y menor impermeabilización. Este comportamiento confirma la relación directa entre morfología urbana y temperatura superficial, consolidando la hipótesis central del estudio.

Las implicancias para ciudades andinas son particularmente relevantes. Tradicionalmente, la problemática de la Isla de Calor Urbana ha sido asociada a grandes metrópolis de climas tropicales o templados. Sin embargo, el caso de Ayacucho demuestra que ciudades interandinas, emplazadas a más de 2,700 m s.n.m., también pueden desarrollar dinámicas térmicas diferenciadas cuando confluyen expansión urbana acelerada, reducción de áreas verdes y condiciones atmosféricas secas con alta radiación solar. En contextos de valle interandino, donde la ventilación natural puede estar limitada por la topografía, los efectos térmicos pueden intensificarse y generar impactos en confort urbano, consumo energético y salud pública.

Desde la perspectiva de la planificación urbana sostenible, los resultados evidencian la necesidad de incorporar criterios climáticos en la gestión territorial. El crecimiento radiocéntrico y la expansión periférica no planificada incrementan la proporción de superficies impermeables y reducen la capacidad de regulación térmica del territorio. La preservación de corredores verdes, la promoción de infraestructura vegetal urbana, el uso de materiales de mayor reflectancia y la planificación de densidades equilibradas emergen como estrategias clave para mitigar la acumulación térmica. La planificación urbana en ciudades andinas no puede desligarse de su contexto climático y geomorfológico; por el contrario, debe integrarlo como variable estructural en la toma de decisiones.

En términos metodológicos, la experiencia desarrollada proyecta una línea de investigación futura sólida. La combinación de teledetección, análisis estadístico multivariado y validación en campo demostró ser eficaz para caracterizar la dinámica térmica urbana en ciudades de tamaño intermedio. No obstante, el modelo puede fortalecerse mediante la incorporación de técnicas avanzadas como redes neuronales, modelos híbridos o lógica difusa, así como la ampliación del análisis a series temporales anuales completas que permitan capturar variaciones estacionales con mayor detalle. Asimismo, la integración de datos de alta resolución espacial y sensores térmicos más recientes podría afinar la delimitación de microfocos térmicos intraurbanos.

En síntesis, este trabajo confirma que la Isla de Calor Urbana es un fenómeno presente y dinámico en Ayacucho, y que su evolución está estrechamente vinculada a la transformación morfológica del territorio. Más allá del caso específico, el estudio aporta evidencia para comprender cómo las ciudades andinas enfrentan desafíos climáticos derivados de su propio crecimiento. La articulación entre conocimiento científico, planificación urbana y sostenibilidad territorial se presenta, así, como una condición indispensable para el desarrollo futuro de entornos urbanos resilientes en la sierra peruana y en contextos interandinos similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alchapar, N., Correa, E., & Cantón, M. (2018). Comportamiento térmico de revestimientos verticales, en la mitigación de la isla de calor urbana. Índice de reflectancia solar.

Ali J.M., Marsh S.H., Smith M.J. (2017). A comparison between London and Baghdad surface urban heat islands and possible engineering mitigation solutions Sustainable Cities and Society, 29, pp. 159-168.

Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Kimberly: University of Idaho, Advanced Training and Users Manual, 98p.

As-syakur, A. R., Wayan Sandi Adnyana, I. Arthana, I. W., Nuarsa, I. W. (2012). Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI) for Mapping Built-Up and Bare Land in an Urban Area. Remote Sensing, vol. 4, issue 10, pp. 2957-2970. 4. 29572970. 10.3390/rs4102957.

Bakker, X. (2000). Análisis geoestadístico y de Exposición solar.

Bastiaanssen, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology, 229, 87−100.

Bonafoni, S., Anniballe, R., Gioli, B. & Toscano, P. (2016). Downscaling Landsat Land Surface Temperature over the urban area of Florence, European Journal of Remote Sensing, 49:1, 553-569

Castillo, M. (2008). La interpolación Espacial y los modelos digitales de terreno.

Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41(11), 2674-2677.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment, 113(5), 893-903.

Chávez, P. (1996). Image-based atmospheric corrections revisited and improved. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 62(9), 1025-1036.

Chen, X.; Zhao, H.; Li, P. & Yin, Z. (2006). Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. Remote Sensing of Environment, N° 104, p. 133-146.

Choudhury, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daughtry, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indexes studied by model simulations. Remote Sensing of Environment, 50(1), 1-17.

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España.

Chuvieco, E. (2002). Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. Editorial Ariel, Barcelona-España.

Dalence, S. (2013). Geoestadística.

Eastman, R. J. (2004). IDRISI Kilimanjaro, Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes, Clark Labs Clark University, Worcester, MA 01610-1477, USA.

Fernández García, F., Allende Álvarez, F., & Alcaide Muñoz. J. (2016). Estudio de detalle del clima urbano de Madrid. Departamento de Geografía de la UAM. Universidad de Cantabria.

Giraldo, R. (2002). Introducción a la geoestadística teoría y aplicación Primera edición. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Ciencias.

Gupta, R. P. (1991). Remote Sensing Geology. XVI + 356 pp. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag. Price DM 198.00 (hard covers). ISBN 3540528059.

Hardisky, M. A., V. Klemas, & R. M. Smart (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of Spartina alterniflora canopies, Photogramm. Eng. Remote Sens., 49, 77–83.

Huete, A. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25(3), 295-309.

ITC (2001). ILWIS 3.0 Academic, User´s Guide Primera edición. The Netherlands: The International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

Jiménez-Muñoz, J. C. & Sobrino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data, Journal Geophys. Res., vol. 108, no. D22, doi:10.1029/2003JD003480.

Jiménez-Muñoz, J. C., Cristóbal, J., Sobrino, J. A., Sòria, G., Ninyerola, M., & Pons, X. (2009). Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 1.

Kawamura, M., Jayamana. S., & Tsujiko, Y. (1996). Relation between Social and Environmental Conditions in Colombo Sri Lanka and the Urban Index Estimated By Satellite Remote Sensing Data. International Archieve of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 31 (B7) 321-326.

Ma Y., Kuang Y.Q., & Huang N.S., (2010). Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on

TM/ETM+ imagery, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 12, 110-118.

Martínez Martínez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. Investigaciones Geográficas, [S.l.], n. 62, p. 83-99, dic. 2014. ISSN 1989-9890. Disponible en: https://www.investigacionesgeograficas.com/article/view/2014-n62estudio-de-la-isla-de-calor-de-la-ciudad-de-alicante. Fecha de acceso: 25 abr. 2018 doi: https://doi.org/10.14198/INGEO2014.62.06.

Molina, G, Z. (2005). Propuesta metodológica para estudios de dinámica de uso urbano utilizando la teledetección: Maracay, estado Aragua-Venezuela. En Revista Geográfica Venezolana. Universidad de los Andes, Escuela de Ciencias Forestales y Ambientales. Disponible en: http://www.invenia.es/oai:dialnet.unirioja.es:ART0000064524.

Morán, M., Bryant, R., Thome, K., Ni, W., Nouvellon, Y., Gonzalez Dugo, M., et al. (2001). A refined empirical line approach for reflectance factor retrieval from landsat-5 TM and landsat-7 ETM. Remote Sensing of Environment, 78(1-2), 71-82.

Moreno García, M. C., & Serra Pardo, J. A. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. Biblio 3W. Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales. Universidad de Barcelona, Vol. XXI, nº 1.179. Disponible en: http://www.ub.es/geocrit/b3w-1179.pdf.

Moreno, A., Cañada, R., Cervera, B., Fernández, F., Gómez, N., Martínez, P., Prieto, M., Rodríguez, J. & Vidal, M. (2008). Sistemas y análisis de la información geográfico. Manual de autoaprendizaje con ArcGis Segunda edición. México: Alfa omega Grupo Editor S.A.

Moreno, M. (1993). Estudio del clima urbano de Barcelonala isla de calor. Oikostau, Vilassar de Mar, España, 47,193 p.

Oke, T.R. (1978). Boundary Layer Climates, Methuen, London and New York.

Qi, J., Marsett, R., Moran, M., Goodrich, D., Heilman, P., Kerr, Y., et al. (2000). Spatial and temporal dynamics of vegetation in the san pedro river basin area. Agricultural and Forest Meteorology, 105(1-3), 55-68.

Ramsey, R. D., Wright, J. R., D. L., & McGinty, C. (2004). Evaluating the use of Landsat 30m Enhanced Thematic Mapper to monitor vegetation cover in shrub-steppe environments. Geocarto International, 19, 39-47.

Rikimaru, A. & Miyatake, S., (1997). Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow. In Proceeding of the 18th Asian Conf. Rem. Sens. (ACRS), Kuala Lumpur, Malaysia, 3, 20-25.

Roger, A. & Kearney, M. (2004). Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, N° 12, p. 2317-2335.

Romero, H. et, al. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. EURE, 36(1009), pp. 35-62.

Romero, H., Salgado, M. & Smith, P. (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. Revista INVI, Instituto de la Vivienda, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile 70:151-179.

Rouse, J. W., Haas, R. W., Schell, J. A., Deering, D. H., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Type III Final Report. NASA/GSFCT. Greenbelt, MD. USA.

Salvador Figueras, M. (2000). Introducción al Análisis Multivariante, disponible en http://www.5campus.com/leccion/anamul, consulta 20/04/2018.

Santana, L. M. (2007). Lansdsat ETM+ image aplications to extract information for environmental planning in a Colombian City. En: International Journal Remote sensing. (Colombia). Science Direct. p. 4225-4242. ISSN: 0034-4257

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 TerraMODIS y Análisis de Componentes Principales. Revista de geografía Norte Grande, (57), 123-141. Disponible en: https://dx.doi.org/10.4067/S07183402201400010009.

Wittich, K., & Hansing, O. (1995). Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data. International Journal of Biometeorology, 38(4), 209-215.

Wu, C., & Murray, A. T. (2003). Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis. Remote Sensing of Environment, 84, pp. 493-505.

Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, International Journal of Remote Sensing, 27:14, 3025-3033.

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM imagery. International Journal of Remote Sensing, vol. 24; 583-594.

Zhang, E.-J & Zhang, J.-J & Zhao, X.-Y & Zhang, X.-L. (2008). Study on urban heat island effect in Shenzhen. 17. 19-24.

Zhao, H.M. & Chen, X.L. (2005). Use of Normalized Difference Bareness Index in Quickly Mapping Bare Areas from TM/ETM+. Geoscience and Remote Sensing Symposium. 3 (25-29) 1666-1668.