

PATRIMONIO Y CLIMA

MITIGAR ICU EN SITIOS HISTÓRICOS

Estudio de caso: Tarija, Bolivia

MARÍA EUGENIA MARTÍNEZ MANSILLA

Orientadora: Prof. Dra. Marta Adriana Bustos Romero

UNIVERSIDAD DE BRASILIA
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo

MARÍA EUGENIA MARTÍNEZ MANSILLA

PATRIMONIO Y CLIMA: MITIGAR ICU EN SITIOS HISTÓRICOS

Estudio de caso: Tarija, Bolivia

BRASILIA
2024

UNIVERSIDAD DE BRASILIA
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo

PATRIMONIO Y CLIMA: MITIGAR ICU EN SITIOS HISTÓRICOS

Estudio de caso: Tarija, Bolivia

MARÍA EUGENIA MARTÍNEZ MANSILLA

Tesis presentada al Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Brasilia para fines de evaluación y calificación como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Doctora en Arquitectura y Urbanismo.

Orientadora: Prof. Dra. Marta Adriana Bustos Romero

BRASILIA
2024

TÉRMINO DE APROBACIÓN

PATRIMONIO Y CLIMA: MITIGAR ICU EN SITIOS HISTÓRICOS.

Estudio de caso: Tarija, Bolivia

Tesis presentada al Programa de Posgrado en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Brasilia para fines de evaluación y calificación como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Doctora en Arquitectura y Urbanismo.

Aprobada en ____/____/____.

Prof^a. Dra. Marta Adriana Bustos Romero – Presidente
Universidad de Brasilia

Prof. Dr. Caio Frederico e Silva - Miembro Titular
Universidad de Brasilia – PPG-FAU

Prof^a. Dra. Alessandra Prata Shimomura – Miembro Titular
Universidad de Sao Paulo - USP

Prof. Dr. José Marcelo Martins Medeiros – Miembro Titular
Universidad Federal de Tocantis - UFT

Prof. Dr. Andrey Rosenthal Schlee – Miembro Suplente
Universidad de Brasilia - UNB

DEDICATORIA

A la ciudad de Tarija, propios y ajenos, principalmente a estudiantes, colegas
y servidores públicos para considerar y repensar el pasado y futuro de
nuestra tierra.

Con especial cariño a quienes hubieran elegido esta formación académica y
priorizaron su familia.

AGRADECIMIENTOS

Al programa OEA y CAPES por la concesión de la beca de estudios en Brasil.
A la UnB y el Programa de Posgrado PPG-FAU por la oferta académica en las diferentes disciplinas y Brasilia por ser en este par de años mi segunda casa.

Al personal administrativo de la FAU en particular a Valmor por su soporte.

A LaSUS por la acogida y participación en los proyectos de investigación.

A mi querida orientadora Profesora Dra. Marta Adriana Bustos Romero, a quien expreso mi gratitud y enorme admiración por el incansable trabajo desarrollado en su carrera profesional y contribución científica, por su apoyo, orientación y por aquellas tardes de café en su casa, muchas gracias profesora.

A todos los profesores por su cálida formación y de quienes aprendí algo en particular a "*seu jeito*".

A colegas, compañeros de estudio por compartir experiencias, horas de trabajo y aprendizajes.

A amistades en general que cultivé en esta ciudad moderna, fue de gran valía para acompañar mi "*caminhada*".

A mis padres y hermanos por el incondicional apoyo y cariño.

A quien hizo todo esto posible y lo sustenta con abundante

bendición,

Dios.

RESUMEN

MARTÍNEZ, M.E. (2024). **Título.** 187f. **Tesis** (Doctorado en Arquitectura y Urbanismo) – Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Brasilia, Brasilia, 2024.

Revalorizar el corazón urbano de la ciudad, involucra múltiples acciones que inciden en la infraestructura física como en el ejercicio democrático de uso y reconocimiento del espacio público abierto (EPA) para promover la sostenibilidad y resiliencia climática. El objetivo de esta investigación es analizar el desempeño ambiental del verde urbano como estrategia de mitigación al efecto negativo de Isla de Calor Urbana (ICU) a escala microclimática en el sitio histórico de la ciudad de Tarija de Bolivia, emplazada en el área monumental patrimonial. El estudio se basa en el análisis integrado escalar según la clasificación de los campos de percepción de Romero (2011): grande estructura, sector/sitio, lugar y edificio, aplicando geoprocésamiento y simulación computacional. El proceso metodológico comprende tres procedimientos: 1) Análisis temporal de ICU (2001-2021) con el indicador *Land Surface Temperature (LST)*, y *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* por teledetección y sintaxis espacial con el indicador Integración (Inthh) en escala de grande estructura, 2) Elaboración de la Ficha Patrimonial Bioclimática (FPB) para el inventario y catalogación del EPA, 3) Comparación de escenarios con vegetación: *Base scenario* (actual) y *Deep green scenario* (propuesta) que incluye la arborización en vías, patios y corredores verdes que articulan tres plazas del centro, a través de variables climáticas e indicadores de confort térmico *PET* y *PMV* con simulación ENVI-met V5.5.1 a escala lugar/edificio. Los resultados corroboran la hipótesis, el desempeño del verde urbano incrementa si se articulan áreas verdes centrales existentes, preservando elementos patrimoniales para integrar el paisaje cultural. Se recomienda la implementación de esta estrategia micro climática en barrios/distritos para impulsar una política de adaptación al cambio climático y mitigación al calentamiento urbano, tan necesario en nuestros días.

Palabras clave:

Patrimonio, Bioclimatismo, Microclima, Vegetación Urbana, Simulación ENVI-met.

PATRIMÔNIO E CLIMA. MITIGAR ICU EM SÍTIOS HISTÓRICOS. ESTUDO DE CASO: TARIJA, BOLÍVIA

RESUMO

A revalorização do coração urbano da cidade envolve múltiplas ações que afetam a infraestrutura física, bem como o exercício democrático de uso e reconhecimento do espaço aberto público (EPA) para promover a sustentabilidade e a resiliência climática. O objetivo desta pesquisa é analisar o desempenho ambiental do verde urbano como uma estratégia para mitigar o efeito negativo da Ilha de Calor Urbana (ICU) em uma escala microclimática no sítio histórico da cidade de Tarija, localizado na área do patrimônio monumental. O estudo baseia-se na análise escalar integrada de acordo com a classificação dos campos de percepção de Romero (2011): grande estrutura, setor/local, lugar e edifício, aplicando geoprocessamento e simulação computacional. O processo metodológico compreende três procedimentos: 1) Análise temporal do ICU (2001-2021) com o indicador Land Surface Temperature (LST) e Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) por sensoriamento remoto e sintaxe espacial com o indicador Integration (Inthh) na escala de grande estrutura; 2) Elaboração da Ficha Patrimonial Bioclimática (FPB) para o inventário e catalogação do EPA, 3) Comparação de cenários com vegetação: Base scenario (atual) e Deep green scenario (proposta) que inclui plantio de árvores em vias, pátios e corredores verdes que articulam três praças no centro, por meio de variáveis climáticas e indicadores de conforto térmico PET e PMV com simulação ENVI-met V5.5.1 em escala de local/edifício. Os resultados corroboram a hipótese de que o desempenho da vegetação urbana aumenta se as áreas verdes centrais existentes forem articuladas, preservando elementos patrimoniais para integrar a paisagem cultural. A implementação dessa estratégia de microclima em bairros/distritos é recomendada para promover uma política de adaptação às mudanças climáticas e mitigação do aquecimento urbano, tão necessária nos dias de hoje.

Palavras chave:

Patrimônio, Bioclimatismo, Microclima, Vegetação Urbana, Simulação ENVI-met.

HERITAGE AND CLIMATE: MITIGATING UHI AT HISTORIC SITES.

Case study: Tarija, Bolivia

ABSTRACT

Revaluing the urban heart of the city involves multiple actions that affect the physical infrastructure as well as the democratic exercise of use and recognition of open public space (OPS) to promote sustainability and climate resilience. The objective of this research is to analyze the environmental performance of urban greenery as a strategy to mitigate the negative effect of Urban Heat Island (UHI) at a microclimatic scale in the historic site of the city of Tarija, located in the monumental heritage area. The study is based on integrated scalar analysis according to the classification of the fields of perception by Romero (2011): large structure, sector/site, place and building, applying geoprocessing and computational simulation. The methodological process comprises three procedures: 1) Temporal analysis of ICU (2001-2021) with the Land Surface Temperature (LST) indicator, and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) by remote sensing and space syntax with the Integration (Inthh) indicator at the scale of large structure, 2) Elaboration of the Bioclimatic Heritage Sheet (BHS) for the inventory and cataloguing of the EPA, 3) Comparison of scenarios with vegetation: Base scenario (current) and Deep green scenario (proposal) that includes tree planting in roads, courtyards and green corridors that articulate three squares in the center, through climatic variables and thermal comfort indicators PET and PMV with ENVI-met V5.5.1 simulation at site/building scale. The results corroborate the hypothesis, the performance of urban greenery increases if existing central green areas are articulated, preserving heritage elements to integrate the cultural landscape. The implementation of this micro-climate strategy in neighborhoods/districts is recommended to promote a policy of climate change adaptation and urban warming mitigation, so necessary nowadays.

Keywords:

Heritage, Bioclimatism, Microclimate, Greening, ENVI-met Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del <i>UCMap</i>	16
Figura 2. Escalas climáticas horizontales y verticales.....	18
Figura 3. Subdivisión vertical de la atmósfera.....	19
Figura 4. Estratificación vertical de la atmósfera urbana y escalas de análisis (dosel urbano).....	20
Figura 5. Zonas Climáticas Locales (<i>LCZ</i>).....	21
Figura 6. <i>LCZ</i> en Brasilia y Quito.....	21
Figura 7. Piel del ambiente construido.....	23
Figura 8. Domo de polvo urbano.....	24
Figura 9. Factores que influyen en la formación de <i>ICU</i>	26
Figura 10. Ejemplos de medición de <i>ICU</i> en Louisville y Brasilia.....	27
Figura 11. Albedo de materiales urbanos.....	29
Figura 12. Estrategia de mitigación con vegetación.....	30
Figura 13. Sistemas de verde urbano según Olmsted, Howard, McHarg (respectivamente):.....	36
Figura 14. Disposición de vegetación en Supercuadras de Brasilia.....	38
Figura 15. Efecto regulador de la vegetación.....	41
Figura 16. Temperaturas de superficies urbanas.....	42
Figura 17. Atributos morfológicos de la copa y raíz.....	44
Figura 18. Composición de individuos arbóreos.....	45
Figura 19. Áreas verdes en la ciudad.....	46
Figura 20. Mapeamiento de árboles en el sistema vial.....	46
Figura 21. Fotograma de la medición de arborización urbana en trama vial.....	47
Figura 22. Espacio libre, espacio verde y área verde.....	49
Figura 23. Efecto de enfriamiento de los espacios verdes.....	50
Figura 24. Soluciones Basadas en la Naturaleza (<i>SBN</i>).....	52
Figura 25. <i>SBN</i> para aplicación urbana.....	53
Figura 26. Plano de Tarija y área de estudio: centro histórico.....	58
Figura 27. Polígonos de estudio en Tarija.....	58
Figura 28. Subcuencas hidrográficas en Tarija.....	59
Figura 29. Organización territorial de la Tarija colonial y republicana.....	68

Figura 30. Esquema del damero	69
Figura 31. Centro histórico patrimonial de Tarija.....	70
Figura 32. Predios catalogados con valor patrimonial en el centro histórico	71
Figura 33. Configuración de damero del centro histórico de Tarija	75
Figura 34. Vista panorámica del centro histórico de la ciudad de Tarija	75
Figura 35. Elementos constitutivos del EPA.....	78
Figura 36. Planta urbana según las Leyes de Indias.....	79
Figura 37. Vegetación en Plaza Principal.....	82
Figura 38. Categorías de interrelación en el espacio público	83
Figura 39. Conexión del patio con vías peatonales.....	85
Figura 40. Geometría de un cañón urbano asimétrico	88
Figura 41. Cañón (3 planos) y cavidad urbana (1 plano)	88
Figura 42. Mejoras en vías: material natural y vegetación	89
Figura 43. Elección de especie en cañón urbano.....	90
Figura 44. Ficha Patrimonial Bioclimática	97
Figura 45. FPB - Identificación y descripción general del patio	98
Figura 46. FPB - Valoración patrimonial.....	98
Figura 47. FPB - Valoración bioclimática	99
Figura 48. Clasificación climática de Bolivia según Koppen-geiger (1980-2016)	102
Figura 49 Diagrama Bioclimático a escala de Lugar/Edificio.....	104
Figura 50. Área verde y población.....	105
Figura 51. Áreas verdes en recorte de simulación	105
Figura 52. Recorte simulación.....	110
Figura 53. Modelo 3D y mapa de Temperatura del aire (Parque Trianon)	112
Figura 54. Modelo 2D (AUTOCAD) a 3D (SKETCHUP) y 3D (ENVI-met)	113
Figura 55. Componentes del software ENVI-met V5.5.1	114
Figura 56. Carpeta de los datos de salida de ENVI-met	114
Figura 57. Valores climáticos en Forcing Manager de ENVI-met V5.5.1 según EPW	116
Figura 58. EPWview Tarija.....	116
Figura 59. EPW en Climate Consultant 6.0	117
Figura 61. Material teja, adobe en database de ENVI-met V5.5.1	121
Figura 62. Casas con adobe en modelo Spaces de ENVI-met V5.5.1	121
Figura 63. Arquetipo de la planta en Albero de ENVI-met V5.5.1	124

Figura 64. 3D de la planta en <i>Albero</i>	125
Figura 65. Morfología de los árboles para modelo	125
Figura 66. Vegetación en modelo <i>Spaces</i> de ENVI-met V5.5.1	125
Figura 67. Modelo Escenario 1 (Planta y 3D en ENVI-met V5.5.1)	127
Figura 68. Propuesta de verde urbano: <i>Deep green scenario</i> en recorte para simulación computacional	128
Figura 69. Modelo Escenario 2 (Planta y 3D en ENVI-met V5.5.1)	130
Figura 70. Lineamientos de <i>micro-urban design</i>	131
Figura 71. Fachada patrimonial + verde.....	132
Figura 72. EPA + ambiental	132
Figura 73. ICU en centro histórico.....	134
Figura 74. NDVI en el área monumental del centro histórico	137
Figura 75. NDVI para 1985, 2001, 2021.....	140
Figura 76. Fisiología de los edificios	161
Figura 77. Modelo de patios con vegetación en <i>Spaces</i> de ENVI-met V5.5.1	166

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estructura de la tesis para la revisión de literatura y proceso metodológico	10
Tabla 2. Escalas climáticas y dimensiones típicas	19
Tabla 3. Isla de Calor de superficie y atmosférica	25
Tabla 4. Influencia de la variable vegetación en un asentamiento	39
Tabla 5. Tipologías de árboles en Cochabamba y AMNI	43
Tabla 6. Características de Imágenes LANDSAT	60
Tabla 7. Selección de imágenes LANDSAT	62
Tabla 8. Ejemplos de inmuebles con patrimonio arquitectónico.....	73
Tabla 9. Plaza Principal en el EPA.....	78
Tabla 10. Fotos antiguas y actuales de la Plaza Principal de Tarija.....	80
Tabla 11. Patio central en el EPA.....	84
Tabla 12. La calle en el EPA	86
Tabla 13. Condicionamiento del medio físico y ambiental.....	91
Tabla 14. Elementos que conforman el espacio.....	92
Tabla 15. Revisión de condicionantes y valores de identidad	93
Tabla 16. Valoración patrimonial y bioclimática.....	94
Tabla 17. Plaza, patio, calle	100
Tabla 18. áreas verdes e identificación arbórea.....	106
Tabla 19. Individuos arbóreos	106
Tabla 20. Especies arbóreas identificadas	108
Tabla 21. Parámetros para simulación con ENVI-met.....	112
Tabla 22. Propiedades térmicas del adobe	119
Tabla 23. Propiedades térmicas de materiales	120
Tabla 24. Cantidad de individuos arbóreos por área verde.....	122
Tabla 25. Datos de LAI y LAD según fichas de levantamiento arbóreo	123
Tabla 26. Propiedades fisiológicas de la planta según <i>Albero</i> de ENVI-met V5.5.1	123
Tabla 27. Datos de entrada en ENVI-met V5.5.1	126
Tabla 28. Tabla comparativa de mapas de LST (2001 - 2021)	135
Tabla 29. Tabla comparativa de mapas de NDVI (2001 - 2021)	138
Tabla 30. Mapa axial (Inthh) - Análisis diacrónico Tarija	141

Tabla 31. Temperatura de superficie.....	145
Tabla 32. Temperatura del aire	148
Tabla 33. Cortes (x) en Escenario 2: <i>Deep green scenario</i>	149
Tabla 34. Cortes (y) en Escenario 2: <i>Deep green scenario</i>	150
Tabla 35. Humedad relativa	153
Tabla 36. Velocidad del viento	154
Tabla 37. Temperatura radiante media	155
Tabla 38. PMV.....	158
Tabla 39. PET	159
Tabla 40. Temperatura de las hojas.....	162
Tabla 41. Temperatura de edificios	163
Tabla 42. Resultados de simulación de ENVI-met comparado por escenarios.....	164
Tabla 43. Parámetros para simulación con ENVI-met.....	167
Tabla 44. Temperatura del aire en Patios	168

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

AT	<i>Active Travel</i>
AMNI	Altura mínima requerida para la no interferencia de líneas eléctricas
BGI	<i>Blue-Green Infraestructure</i>
CC	Cambio Climático
CDU	Capa Doseil Urbano
CED	Centro Eclesial de Documentación
CLP	Capa Límite Planetaria
CLR	Capa Límite Rural
CLU	Capa Límite Urbana
COP26	Conferencia de las Naciones Unidad sobre el Cambio Climático
Cwb	<i>Oceanic Subtropical Highland Climate</i>
ICU	Isla de Calor Urbana
DAF	Densidad de Área Foliar
EPA	Espacio Público Abierto
EPW	Energy Plus Weather Format
EU	<i>European Union</i>
FPB	Ficha Patrimonial Bioclimática
FVC	Factor de Visión de Cielo
GAMT	Gobierno Autónomo Municipal de Tarija
GI	<i>Green Infraestructure</i>
IAV	Índice de Área Verde
ICV	Índice de Cobertura Vegetal
INTH	Integración
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LST	<i>Land Surface Temperature</i>
MDE	Modelo Digital de Elevación
NBS	<i>Natured Based Solution</i>
NCS	<i>Natural Climate Solution</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OCPM	Organización de las ciudades del Patrimonio Mundial

OMN	Organización Mundial de Meteorología
OPS	<i>Open Public Space</i>
PET	<i>Physiological Equivalent Temperature</i>
PMOT	Plan Municipal de Ordenamiento Territorial
PMV	<i>Predict Mean Vote</i>
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
RA	Región Administrativa
SC	Santa Catarina
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SUHI	<i>Superficial Urban Heat Island</i>
SVF	<i>Sky View Factor</i>
TMY	Typical Meteorological Year
TSP	<i>Total Suspense Particles</i>
UCI	<i>Urban Cool Island</i>
UFORE	<i>Urban Forest Effects</i>
UGI	<i>Urban Green Infraestructure</i>
UGS	<i>Urban Green Space</i>
UHI	<i>Urban Heat Island</i>
WUDAPT	<i>World Urban Database and Access Portal Tool project</i>

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. JUSTIFICACIÓN	5
II. HIPÓTESIS.....	6
III. OBJETIVOS.....	6
A. OBJETIVO GENERAL	6
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
IV. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	7
V. ESTRUCTURA DE LA TESIS	9
FASE I. REVISIÓN TEÓRICA.....	13
1. CLIMA URBANO.....	14
1.1 <i>Escalas climáticas</i>	16
1.1.1 Microclima urbano	19
1.1.2 Zonas Climáticas Locales (ZCL).....	21
1.2 <i>Isla de Calor Urbana (ICU)</i>	22
1.2.1 Clasificar las ICU	25
1.2.2 Medir las ICU.....	26
1.2.3 Mitigar las ICU	28
1.3 <i>Confort térmico</i>	31
1.4 Resumen del capítulo	34
2. VERDE URBANO EN EL ESPACIO PÚBLICO ABIERTO.....	35
2.1 <i>Vegetación urbana</i>	37
2.1.1 Fisiología de los árboles	40
2.1.2 Arborización.....	44
2.2 <i>Área verde/Espacio Público Abierto (EPA)</i>	48
2.2.1 Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)	51
2.2 Resumen del capítulo.....	54
FASE II. MEDODOLOGÍA	56
3. PROCESO METODOLÓGICO	57
3.1 <i>Definición de polígonos de estudio</i>	57
3.2 <i>Grande estructura</i>	59
3.2.1 Temperatura Superficial del Suelo (<i>Land Surface Temperature – LST</i>).....	62
3.2.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (<i>NDVI</i>)	63
3.2.3 Integración global y centralidad	65
3.3 <i>Sector</i>	66
3.3.1 Sitio histórico – Estudio de caso: Tarija, Bolivia.....	67
a) Plaza.....	78
b) Patio	83
c) Calle.....	86
3.3.2 Valoración Patrimonial Bioclimática.....	90
a) Ficha Patrimonial Bioclimática	94
3.3.3 Clasificación climática.....	102
3.3.4 Clasificación arbórea	104
3.4 <i>Lugar/Edificio</i>	109
3.4.1 Simulación con ENVI-met V5.5.1.....	110
3.4.2 Base de Datos: Archivo climático, edificaciones, vegetación (<i>Input</i>).....	115

3.4.3	Escenario 1 (ES1) - Sin vegetación: <i>Base scenario</i>	126
3.4.4	Escenario 2 (ES2) – Con vegetación: <i>Deep green scenario</i> (estrategia de mitigación: vegetación + diseño urbano).....	127
3.5	<i>Resumen del capítulo</i>	133
4.	DISCUSIÓN Y RESULTADOS	134
4.1	<i>Islas de Calor Urbano (ICU) de superficie</i>	134
4.2	<i>NDVI</i>	137
4.3	<i>Integración y centralidad</i>	140
4.4	<i>Simulación microclimática y confort térmico</i>	142
4.4.1	Simulación del Patio Central.....	165
4.5	<i>Resumen del capítulo</i>	169
5.	CONCLUSIONES	171
5.1	<i>Recomendaciones</i>	174
5.2	<i>Trabajos futuros</i>	177
5.3	<i>Limitaciones del estudio</i>	177
6.	REFERENCIAS.....	178
ANEXO 1	187



INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El proceso de urbanización, en muchos casos exige sustituir áreas vegetadas por superficies construidas, este fenómeno incrementa la temperatura superficial del suelo urbano. Así también la deforestación que excede el 40 % de área forestal en la región amazónica, genera el aumento de temperatura entre 3 a 4°C (LENTON *et al.*, 2008). El sobrecalentamiento y radiación de calor, principalmente en los centros urbanos de las ciudades, evidencian externalidades negativas que inciden en la salud humana y merman el confort térmico (KNIGHT *et al.*, 2016). El estudio de *Climate Central*¹ (2023) estima que más de 3.800 millones de personas ya experimentaron un calor extremo durante los pasados meses. Los efectos asociados a las ondas de calor, repercuten en todas las dimensiones de la vida humana en el ámbito social y económico.

Múltiples entidades² y organismos internacionales han concentrado esfuerzos en advertir, estudiar y proponer acciones frente a los efectos del cambio climático, entre las más relevantes se encuentran los informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (*IPCC*), sigla en inglés. El Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2023)³ advierte que las generaciones nacidas en 2020 (a diferencia de las nacidas en 1960) experimentarán 7 veces más episodios de calor extremo.

La Isla de Calor Urbana (ICU) o *Urban Heat Island (UHI)*, en inglés, se define cuando la temperatura del aire y la superficie se calientan en relación al área rural. Según (OKE, 1981; OKE *et al.*, 1991) las causas que contribuyen a la formación de ICU, se deben a aspectos antropogénicos (calentamiento y enfriamiento de edificios), polución del aire (influye directamente en la radiación de calor), áreas impermeables o asfaltadas que evitan la evaporación, propiedades térmicas del tejido urbano

¹ Climate Central: Grupo independiente de científicos y comunicadores que investigan sobre el cambio climático y sus efectos en la población. Carbon pollution boosted heat for billions during Earth's hottest summer. Disponible en: <https://www.climatecentral.org/climate-matters/global-review-June-August-2023> EPCA, 2023. Alianza de Energía y Clima de las Américas.

² Encíclica LAUDATO SI (2015), Exhortación Apostólica LAUDATE DEUM (2023). El cambio climático es un problema global con graves dimensiones ambientales, sociales, económicas, distributivas y políticas, y plantea uno de los principales desafíos actuales para la humanidad (FRANCISCO, 2015, p. 22).

³ Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/summary-for-policymakers/figure-spm-1/>

(absorción y retención de la radiación solar, vegetación) y morfología urbana (geometría del entorno construido para los vientos y radiación). También, Romero et al. (2019), sostiene que este fenómeno se presenta a causa de la densidad urbana caracterizada por geometrías que no consideran los vientos y que en consecuencia aumentan la tasa de absorción de calor, el albedo (por la impermeabilización del suelo) reduciendo la evapotranspiración y humedad relativa del aire, efectos ocasionados por la acción antrópica de remoción de vegetación.

Otro aspecto asociado al calor, se encuentra en la relación entre las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero con el incremento de temperaturas y consecuente sobrecalentamiento, siendo ésta la mayor crisis climática global a enfrentar (KENWARD et al., 2014).

Si bien en muchos países se ha puesto en vigencia diferentes planes de adaptación al cambio climático, según Boeri et al. (2017) la ciudad de Bolonia en Italia cuenta con el primer plan piloto de Adaptación: *Bologna Local Urban Environment Adaptation Plan for a Resilient City*, documento que apuesta por las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) o *Nature Based Solutions (NBS)* en inglés.

En el contexto boliviano, lejos de alinear este propósito a las políticas urbanas, durante la COP26, se anunció que más de cien países se comprometerían en acabar con la deforestación, Bolivia no asumió el compromiso⁴. Pese al informe de *Global Forest Watch (2018)*, que sitúa a Bolivia entre los diez países con más bosque primario perdido, durante el 2019, instrumentos jurídicos nacionales autorizaron el “desmonte y quema controlada” del bosque seco de la Chiquitanía, perteneciente al gran ecosistema del bosque de la Amazonia, compartido con Brasil. Este criterio legal en todos los niveles de gobierno, agrava y desatiende la problemática global y posibles alternativas de solución respecto al cambio climático. De forma y fondo similar a lo acontecido con la participación de Bolivia en la COP 28⁵.

⁴ Entrevista a Diego Pacheco, jefe de la delegación de Bolivia en la COP26. “Bolivia no se adhirió por varios motivos... Los bosques no son instrumentos para la mitigación climática-instrumentos para capturar carbono- los bosques son medio de vida de poblaciones locales... Nuestra visión es que los bosques no son una fábrica para absorber carbono... No podemos pensar solo con una visión conservacionista, olvidándonos del desarrollo integral de los medios de vida para la población local... Considero que es un tema global, en Bolivia no es el caso”. (Diego Pacheco, 2021, entrevista BBC Mundo). Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59241453>

⁵ “Aún se identifica que 2.974.000 millones de hectáreas de bosque están siendo afectas por incendios forestales, siendo la principal fuente de emisiones de efecto invernadero del país” (INFORSE, 2023) Disponible en: <https://www.inforse.com.bo/2023/12/04/jovenes-de-bolivia-están-presentes-en-la-cop28-exigiendo-sus-derechos-a-un-medio-ambiente-limpio-saludable-y-sostenible/>

Enfrentamos una emergencia climática y existe la necesidad de actuar, el cambio de temperatura anual de la superficie global nos interpela al Desarrollo resiliente al clima, con medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. Por otro lado, el patrimonio cultural y natural presenta un interés excepcional de preservación y actualmente se encuentra amenazado de destrucción, esta problemática también nos interpela para revalorizar lo más activamente posible e identificar, proteger, conservar y revalorizar el patrimonio (UNESCO, 1972).

El problema de raíz para la gobernanza ambiental, radica en no visibilizar los efectos e impactos negativos del cambio climático, como las ICU en las ciudades y entornos urbanos. En consecuencia, se percibe la inacción en medidas de adaptación a escala microclimática en los municipios bolivianos. Surge una pregunta que nortea esta investigación, ¿Qué acción concreta pueden realizar las ciudades de medio porte para mitigar los efectos del cambio climático?

En ese sentido, a través de la presente investigación, se discute ampliamente estrategias de adaptación y mitigación de ICU. Gartland (2010), se focaliza en tres principales al referir sobre: coberturas, pavimentos frescos y árboles/vegetación, todas estas impactan directamente a propietarios y usuarios de los espacios y aplicados a gran escala tendrán mayor efecto. Una forma de reducir este impacto, es a través del incremento de áreas verdes (parques, pequeñas áreas verdes en torno a los edificios y árboles en las calles) (CAVAN; KAZMIERCZAK, 2011). El incremento del área verde representa una mejora en la calidad ambiental, en la calidad del aire (por emisiones y por el ruido), una mejora en todo el ámbito público (más caminable, con bicicletas, transporte público).

Por tanto, si el problema se origina en la ciudad, es también en la ciudad que se encuentra la solución. Según el Plan de Revitalización de Áreas Centrales Urbanas⁶ en Bolivia, se recomienda el mejoramiento de las funciones urbanas a través de la revitalización de centros históricos considerando aspectos ambientales en el diseño urbano, por tratarse de acciones fundamentales para el “corazón urbano de la ciudad”. Por tanto, el presente estudio interrelaciona los componentes asociados al clima y patrimonio y considera la vegetación urbana como estrategia de mitigación microclimática.

⁶ Promovido por el Ministerio de Vivienda y Servicios Básicos como parte del Programa de apoyo a la aplicación de políticas en Asentamientos Humanos y Viceministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos – Banco Mundial. Realizado por Consultoría (GUARDIA; GISBERT; CALVIMONTES, 1998)

Macedo (1995), interesado por la producción paisajista brasilera en el siglo XX, en su libro *Quadro do Paisagismo no Brasil – QUAPÁ*, (término citado por primera vez en 1982), trata sobre el espacio urbano libre de edificaciones. A su vez distingue el carácter público, que cumple tres funciones: circulación y acceso; ocio y recreación y conservación y el carácter privado: jardines, patios, quintas, parques, huertas, recreación infantil. Su trabajo, “se articula dentro de la realidad urbana y social nacional” (MACEDO & BAROZZI, 2019 p.240), con el objetivo de atender y proponer acciones de proyecto en el diseño formal (dominio paisajístico) e informal (decorativo) para una estructura morfológica conservadora o contemporánea del espacio libre.

Así, los espacios públicos pueden y deben volver a representar el alma de la vida cívica, social y cultural de nuestras ciudades (DE LOS RÍOS; LONGÁS; RISOM, 2017). La calidad del ambiente urbano depende mucho de la calidad de los espacios verdes, por tanto, se hace necesaria una estrategia de adaptación al cambio climático en todo el contexto urbano (PELOROSSO; GOBATTONI; LEONE, 2016).

Para el estudio de caso, se optó por el centro urbano histórico de la ciudad de Tarija – Bolivia, que se caracteriza por su trazado en damero (legado colonial español), con presencia de arquitectura colonial, republicana y contemporánea, sin embargo, actualmente sufre de un detrimento en los valores patrimoniales arquitectónicos y una total ausencia de reconocimiento del valor patrimonial natural y ambiental. Si el centro urbano tiene una influencia directa sobre el calentamiento de las áreas centrales y la aparición de la isla térmica de calor, como atribuye Castillo & Castillo (2014), es un asunto de relevancia la implementación de soluciones urbanas que no apunten solo al calentamiento urbano sino a la salvaguarda de ese patrimonio.

Finalmente, el presente estudio, se alinea a estrategias de diseño microclimático a escala del peatón con intervenciones eficientes para abrir espacios a la ciudad, que contribuyen a mejorar la calidad del ambiente, su funcionalidad y estética. Trabajar con escasos recursos creando un ecosistema de actores (ciudadanía activa) para la implementación y mantenimiento como un modelo replicable a escala de barrio para la regeneración de la ciudad a partir del espacio público abierto (EPA), se trata de “fortalecer la transición urbana del centro histórico (transformaciones no disruptivas) para mejorar el bienestar y confort de los usuarios” (BOERI et al., 2017 p.3).

A partir de ello, se propone estudiar el desempeño ambiental del verde urbano en el centro histórico de la ciudad de Tarija, apoyado en la aplicación de métodos de

teledetección, geoprocésamiento y simulación computacional con ENVI-met V5.5.1, aplicado en investigaciones relativas a la interacción entre variables climáticas y del medio natural (radiación solar, vegetación, viento, humedad de aire, etc.) y medio urbano (red vial, espacios libres, morfología, tipología de edificios, etc.).

En suma, se pretende contribuir con el estudio de la ciudad a partir de soluciones aplicadas al verde urbano para la mitigación de efectos de ICU en un contexto específico histórico y patrimonial, es decir, mitigar el calor y preservar el patrimonio, fundamentos de vital importancia en el debate y agenda urbana para nuestras ciudades.

I. Justificación

A continuación, se indican las principales justificativas para el estudio:

- a) Aborda una temática relevante en la agenda global y local (climática) en áreas de interés histórico y patrimonial, con enfoque multidisciplinar involucrando indicadores y herramientas digitales (softwares).
- b) Estudio inédito para la ciudad de Tarija, ciudad colonial de medio porte y de clima subtropical, por plantear una evaluación y propuesta integrada escalár.
- c) Complementa y establece estrategias de mitigación aplicables en el espacio urbano de Tarija, toda vez que instrumentos de planificación territorial y adaptación al cambio climático existentes en la ciudad, no lo especifican, según la revisión de los siguientes planes:

El Plan de Adaptación al Cambio Climático, índice de vulnerabilidad (LAIF, 2020), estudio sobre distritos urbanos, rurales y cuencas hidrográficas, que busca identificar y priorizar medidas de adaptación para cinco tipos de amenazas: escasez de recursos hídricos, inundación, incendios forestales, olas de calor y heladas.

El Plan Municipal de Adaptación al Cambio Climático en Tarija, (CHÁVEZ et al., 2015), propone un método para evidenciar las tendencias del clima con la variabilidad climática, es decir, identificar las amenazas (frecuencia, duración, probabilidad y consecuencia), factores de vulnerabilidad (exposición, fragilidad, resiliencia) e inventariar las acciones de todos los actores de una determinada zona biogeográfica.

En ese marco, el presente estudio propone una continuidad argumentativa a las investigaciones y estudios realizados en el Laboratorio de Sustentabilidad (LaSUS), de la Universidad de Brasilia (UnB), que cuenta con innúmeras y significativas contribuciones académicas: libros, disertaciones y tesis de doctorado en relación al cambio climático e islas de calor urbano principalmente en Brasilia, con énfasis en la configuración urbana y evaluación de sustentabilidad y desempeño ambiental según Romero (2011, 2013, 2015), Romero *et al* (2019), Andrade (2022), Werneck (2022, 2018), Maigua (2020), Sorte (2016), Silva (2013), Da Silva (2011) y otros. Asimismo, el estudio se focaliza en la escala microclimática (a nivel de la atmósfera o vertical) y escala sensorial lugar/edificio (a nivel de superficie u horizontal) en un contexto patrimonial (centro histórico de la ciudad), previa revisión y análisis del estado de arte a escala de superficie de grande estructura (desarrollado en siguientes capítulos).

II. Hipótesis

El incremento escalar de vegetación en ciudades de medio porte y la preservación de la configuración morfológica patrimonial del centro histórico, ameniza el calentamiento urbano en la ciudad.

III. Objetivos

a. Objetivo general

Contribuir al estudio del desempeño ambiental del verde urbano en sitios históricos y de paisaje patrimonial de la ciudad, para establecer una estrategia de mitigación de Islas de Calor Urbano (ICU), basado en un método de análisis escalar.

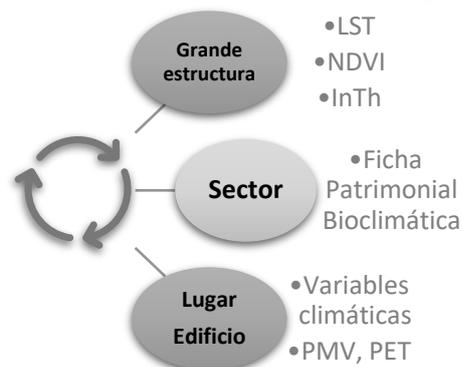
b. Objetivos específicos

- a) Aplicar teledetección y geoprocésamiento para los indicadores de *Land Surface Temperature* (LST), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) para identificar áreas potenciales de ICU y centralidad INTH (accesibilidad topológica).
- b) Poner en relevancia el Espacio Público Abierto (EPA) y sus elementos constitutivos en el sitio histórico patrimonial a través de una Ficha Patrimonial Bioclimática (FPB).
- c) Verificar la contribución del verde urbano propuesto (escenario con vegetación) para amenizar el microclima, a través de simulación microclimática computacional.

IV. Procedimiento metodológico

Se propone un análisis integrado escalar del contexto urbano principalmente a nivel de superficie y de naturaleza deductiva, que consiste en la revisión del estado de arte de mayor a menor escala territorial. Para ello se considera el análisis fundamentado en la clasificación según los campos de percepción, propuesta por Romero (2011): escala de grande estructura urbana, escala de sector/área/sitio, escala de lugar y escala de edificio.

Gráfico 1. Procedimiento metodológico



Fuente: Autora, 2022

Se establecen tres procedimientos para el desarrollo de la tesis, previa revisión teórica y bibliográfica sobre los tópicos de clima y verde urbano en el EPA (Gráfico 1).

a) Escala de grande estructura:

Identificación y análisis de áreas potenciales de ICU de superficie en el ecosistema natural de Tarija, a través de la cuantificación y comparación temporal de 20 años (2001 – 2021) para las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano del indicador *Land Surface Temperature (LST)* y *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, a través de teledetección y geoprocésamiento de imágenes satélite LANDSAT (LANDSAT4-5TM C2L2 Y LANDSAT8-9 OLI-TIRS C2L2, con resolución espectral de 30m en ambos casos). Para obtener el valor numérico para cada estación del año y correlacionar los resultados a través de gráfico de líneas identificando la mayor incidencia de los valores comparados y a través de mapas temáticos.

Identificación de centralidad a través del indicador Integración (Inthh) por medio de geoprocésamiento y análisis diacrónico con sintaxis espacial, para la obtención de mapa axial a escala de grande estructura. Escala de análisis, grande estructura, con la definición del polígono del ecosistema urbano. Ambos procedimientos, cumplen con el objetivo específico a).

b) Escala de sector:

Caracterización del Estudio de Caso como “sitio histórico” en el centro patrimonial de la ciudad de Tarija, para el análisis configuracional y valoración bioclimática patrimonial de los elementos constitutivos del EPA: calle, patio y plaza, a través de una Ficha Patrimonial Bioclimática. Escala de análisis: lugar/edificio. Cumple el objetivo específico b) y c).

c) Escala de lugar/edificio:

Comparación de dos escenarios de verde urbano en el recorte de estudio (450m*350m) en el área monumental del centro histórico: 1) *Base scenario*, situación actual y 2) *Deep green scenario*, situación propuesta que involucra tres *layouts* de verde urbano: arborización en el sistema vial, red de patios y corredores verdes que articulan tres plazas del centro, a través de variables climáticas en superficie, atmosfera, vegetación y edificio, por ejemplo: Temperatura Superficial (*T Surface*), Temperatura del Aire (*Air T*), Temperatura Radiante Media (*Tr media*), Humedad Relativa (*Relative humidity*), Velocidad del viento (*Wind speed*), Temperatura de las hojas (*Leaf temperature*), Temperatura del edificio (*Temperature of facade – outside/inside*) e indicadores de confort térmico: *Physiological Equivalent*

Temperature (PET) y *Predict Mean Vote (PMV)*, a través de simulación microclimática con el software ENVI-met V5.5.1. Escala de análisis: lugar/edificio. Cumple con el objetivo específico c).

V. Estructura de la tesis

La tesis se estructura en dos fases, la primera comprende la revisión del marco teórico y la segunda fase comprende la metodología, en total son cinco capítulos. El primer capítulo introductorio del estudio en el que se expone la problemática, justificación, objetivos, hipótesis y estructura de la tesis; el segundo capítulo comprende la revisión de literatura, el tercero desarrolla el procedimiento metodológico, el cuarto presenta los resultados y verificación de la hipótesis y finalmente el quinto capítulo presenta las conclusiones y consideraciones finales. Adicionalmente se detallan las referencias bibliográficas.

En la **primera fase**, de revisión de literatura, se revisan conceptos y contribuciones autorales con implicancia en la ciudad (causas, efectos, beneficios) de dos temas principales:

- a) Clima urbano, la importancia de definir una escala de estudio y análisis a partir del microclima urbano para establecer diferentes causas y efectos de las islas de calor urbano (ICU).
- b) Verde urbano, conceptos atribuibles al *greening* en la ciudad, *urban green infrastructure (UGI)*, *urban green space (UGS)*, área verde y EPA, soluciones basadas en la naturaleza (SBN) y renaturalización.

En la **segunda fase**, se desarrolla el proceso metodológico que consta de tres procedimientos:

- a) Grande estructura: Identificación de áreas potenciales de ICU, y obtención de indicadores de LST, NDVI, Integración (Inth), a través de teledetección y geoprocésamiento.
- b) Sector: Estudio de caso de la ciudad de Tarija, descripción y caracterización histórico patrimonial, urbana, ambiental, morfológica (plaza, patio, calle) y elaboración de la FPB.

- c) Lugar/Edificio: Definición del recorte para la simulación microclimática de escenarios de verde urbano (real y propuesto) con el software ENVI-met V5.5.1

El **cuarto capítulo**, consiste en la presentación de resultados para el cumplimiento de los objetivos propuestos como para la verificación de la hipótesis.

El **quinto capítulo**, presenta las conclusiones y las consideraciones finales tras el estudio, limitaciones y trabajos futuros.

A continuación, se detalla en Tabla 1 el contenido temático y las principales referencias consultadas.

Tabla 1. Estructura de la tesis para la revisión de literatura y proceso metodológico

	TÓPICO	CONTENIDO	BIBLIOGRAFÍA
REVISIÓN DE LITERATURA	CLIMA URBANO	Clima urbano Microclima urbano Isla de calor urbano de superficie (SUHI) Zonas climáticas locales (LCZ) Confort térmico	Howard (1833) Olgway (1963, 1998) Fanger (1972), Chandler (1976) Monteiro (1976, 2003) Givoni (1976, 1998) Oke (1981, 1984, 1988, 2004) Landsberg (1982) Lombardo (1985) Andrade (2005) Monteiro & Alucci (2007, 2011) Gartland (2010) Alcoforado (2010) Romero (2011) Stewart & Oke (2012) Werneck (2018, 2022) Romero <i>et al</i> (2019)
	VERDE URBANO	Verde urbano/Arquitectura del paisaje Vegetación urbana /Arborización Áreas verdes Espacios libres públicos/EPA Urban green space (UGS) Greening/ Urban greenery (Re)naturalización Infraestructura Verde/ Green Infraestructure (GI/UGI) Nature Based Solutions (NBS)	McHarg (1971) Macedo (1995) Gartland (2010), Mascaró (2005, 2010) Abreu (2008) Labaki <i>et al</i> (2011) Cavan, Kazmierczak (2011) Romero (2011, 2013, 2015) Londe & Mendes (2014) Junior (2015, 2016) Duarte (2016, 2017) Cantuária <i>et al</i> (2020) EU (2020, 2021) Tzortzi & Lux (2022) Andrade (2022) Romero & Silva (2022)
	CENTRO HISTÓRICO	Tarija en sus inicios, el centro Centralidad Patio central, Plaza central Paisaje urbano Imagen urbana Relación geométrica, morfológica del espacio público	Ley de Indias (1573) Trigo (1940) Zucker (1959) Lynch (1960) Cullen (1974) Sitte (1965) Gordon (1983)

PROCESO METODOLÓGICO			<p>Hillier & Hanson (1984) Bartalini (1990) Aguilera (1994) Macedo (1995) VMVU (1998) Calzavarini (2004) Capitel (2005) Medeiros (2006) Viglioco (2008) Berjman (2008) González (2008, 2014) Romero (2011, 2013) López (2013) Sá Carneiro & Silva (2017) Medina (2017)</p>
	LST NDVI	<p>Teledetección Geoprocesamiento SIG</p>	<p>Lombaro (1999) Voog & Oke (2003) Baptista (2003) Mendonca (2003) Jensen (2009) Santos, Silva, Tenedório (2019) Goncalves (2016), Noh <i>et al</i> (2019) Calle (2022)</p>
	SIMULACIÓN ENVI-MET	<p>Modelo numérico pronóstico ENVI-met Simulación y ambiente construido Medición microclimática Análisis morfológico UHI Análisis morfológico UG</p>	<p>Bruse (1999) Silva (2013) Pelorosso <i>et al</i> (2016) Boeri <i>et al</i> (2017) Marrone & Orsini (2018) Shinzato <i>et al</i> (2019) Taher <i>et al</i> (2018) Silva & Romero (2020) Silva, Fernandes, Cintra (2021) Muñoz <i>et al.</i> (2022)</p>

Fuente: Autora, 2022



FASE I

REVISIÓN TEÓRICA

FASE I. REVISIÓN TEÓRICA

Sobre el clima urbano (subtítulo 1), se presentan los primeros abordajes, comenzando por el contexto europeo en el siglo XVII (HOWARD, 1833; CHANDLER; 1976 LANDSBERG, 1981; GIVONI, 1998). Consecutivamente se considera las contribuciones de Monteiro por los años 70 para el contexto brasilero y posteriormente se explora algunos estudios recientes del clima urbano, que proponen metodologías de evaluación climática ambiental (REN, NG, 2011; ALCOFORADO, 2010, ROMERO, 2011, 2019). A continuación, cada subtítulo complementa la revisión teórica, basada en la conceptualización de las escalas climáticas, enfatizando el Microclima Urbano, se identifican las causas, consecuencias y medidas de mitigación del fenómeno climático: Islas de Calor Urbano (ICU) y finalmente se esboza sobre la medición de indicadores de temperatura y confort térmico, basado en las contribuciones de STEWART & OKE, 2012; ANDRADE, 2005; GARTLAND, 2010; MONTEIRO, 1976 y 2003, ROMERO, 2013, SILVA & SILVA, 2020; SILVA, 2021, 2009; WERNECK, 2022.

Sobre el verde urbano (subtítulo 2), se presentan los términos asociados al *greenery*, *urban greening*, *urban green space (UGS)* o infraestructura verde y los fundamentos del paisaje natural serán tratados en el siguiente apartado según las contribuciones de OLMSTED, 1852; MCHARG, 1971; LABAKI *et al*, 2011; CANTUÁRIA *et al*, 2020; ROMERO & SILVA, 2022. Consecutivamente, se aborda las características, funciones y beneficios de la vegetación urbana, arborización, área verde, parques, espacio público abierto (EPA), según MACEDO, 1995; MASCARÓ, 2005; ROMERO, 2011, 2013; JUNIOR, 2016, MEDEIROS & MELO CESAR, 2021, se destacan estudios relevantes de indicadores de cobertura vegetal (ICV), indicador de vegetación urbana (IVU) e índice de área foliar (DAF) según DUARTE, 2016; SHINZATO, 2014; ANDRADE, 2022. Finalmente se aborda las contribuciones de la Comisión Europea (EU, 2021) respecto a Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) o *Natured Base Solutions (NBS)* mayormente reconocida en inglés. Con esta revisión se pretende establecer los principios para la definición de la estrategia de verde urbano propuesta para el centro histórico de la ciudad de Tarija que consiste en la articulación tres *layouts* de verde urbano: vías arborizadas, patios y corredores verdes (como articuladores de plazas), constituyendo un *Deep green scenario*.

1. CLIMA URBANO

Los registros de las primeras observaciones instrumentales datan del siglo XVII realizadas en Italia, posteriormente en París por Loius Morin y en Lisboa por los años 1781-1789. Sin embargo, Howard (1833), es considerado como el pionero en estudios climáticos urbanos, porque estudió por décadas los fenómenos atmosféricos y clima de Londres a través de la observación de registros de temperatura. Esta observación, advierte que la temperatura de la ciudad no debe considerarse como la del clima porque incluye en su estructura un calor artificial, producido por su propia estructura, población y consumo de combustible (incendios). Posteriormente, se consideran los estudios de CHANDLER (1976); LANDSBERG (1982), sobre observaciones nocturnas y la diferencia en la temperatura influenciada en gran parte por la vegetación en diferentes ciudades como Maryland, Viena, London y Montreal.

La conceptualización de “clima urbano” como un sistema que cubre el clima de un determinado espacio terrestre y su urbanización, fue elaborada por el investigador brasilero Carlos Augusto Monteiro⁷, al plantear la teoría del Sistema de Clima Urbano (SCU), que buscaba comprender la organización climática peculiar de cada ciudad concentrada principalmente en la atmósfera, donde la acción del hombre (operador) participa como comunidad social urbana que transforma la energía del sistema, esa entrada de energía en el SCU es de naturaleza térmica y debe ser observada en términos cuantitativos y en relación a su transmisión, es decir en palabras de Monteiro, “esta estructura incluye obligatoriamente lo natural y lo construido por el hombre” (MONTEIRO, 2003). De ese modo, propone cinco acciones dentro del sistema del clima urbano: insumo, transformación, producción, percepción y autorregulación. A su vez identifica tres subsistemas según los canales de percepción: el primero termodinámico (confort térmico), físico-químico (calidad del aire) e hidrométrico (impacto meteórico), para cada uno de ellos establece un flujograma de sus componentes.

Es importante destacar que, a diferencia de la ciencia de la meteorología, la climatología se interrelaciona con la geografía, es decir, incorpora el entendimiento y

⁷ Tesis presentada en 1975, basado en el pensamiento humano de la segunda mitad del siglo XX, según la Teoría General de los Sistemas (TGS) y la cibernética (Monteiro, 2003).

estudio del comportamiento humano en un determinado espacio, su “desempeño y las consecuencias de actividades antropogénicas con el clima” (MONTEIRO, 2003. p.19).

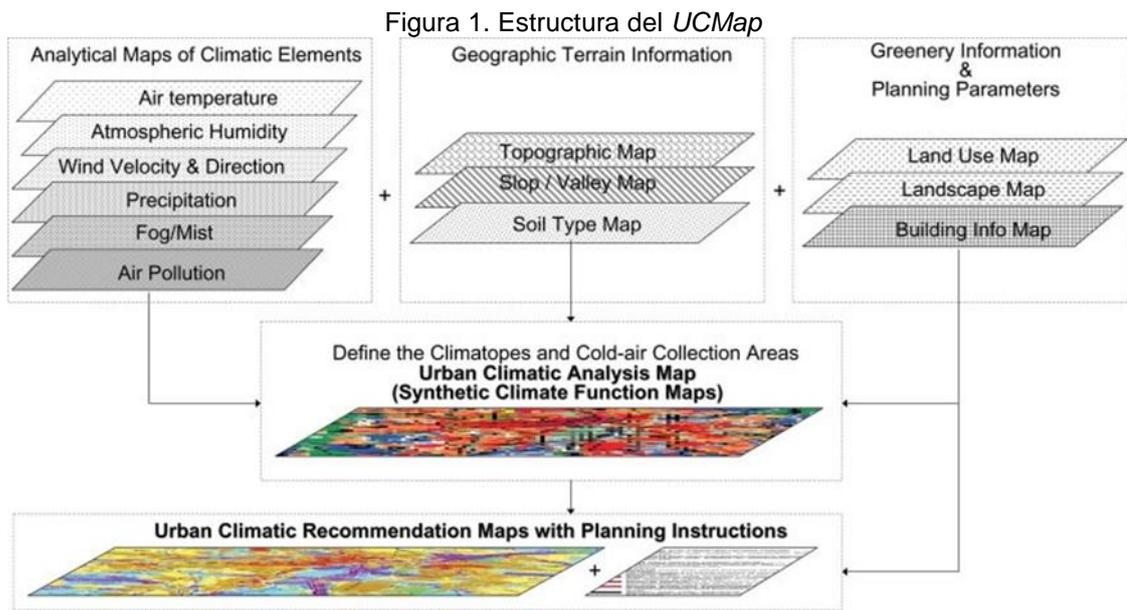
Por su parte, Baruch Givoni⁸, señala los factores morfológicos asociados a la formación del clima urbano, entre ellos la ubicación de la ciudad (en la región), el tamaño, la densidad del área construida, la cobertura del suelo, altura y diseño de los edificios, orientación y largo de las vías, la división de los lotes, la existencia de parques y áreas verdes (GIVONI, 1998). Así argumenta que el clima va a determinarse según la variación de todos estos elementos. Sin embargo, para Alcoforado (2010), el balance energético de la ciudad y sus consecuencias térmicas, como el balance hídrico, el viento y la calidad de aire, se constituyen entre las principales características del clima urbano.

Es posible señalar que el clima urbano puede distinguirse según el ámbito de aplicación y estudio, porque interactúa en la atmósfera y tiene sus implicaciones en el ser humano, siendo importante obtener información climática a la hora de encarar procesos de diseño y planificación urbana.

En ese sentido, los autores Ren; Ng; Katschner (2011), destacan la utilización de mapas climáticos para integrar factores climáticos en la planificación local, esta herramienta de información y evaluación denominada *Urban Climatic Map (UCMap)*, sirve para evaluaciones ambientales climáticas (condición de ventilación de aire y ambiente térmico dentro de la Capa de Doseil Urbano (CDU) o *Urban Canopy Layer (UCL)* en inglés, y determinan posibles medidas de mitigación: incremento de *greenery*, controlar la morfología de los edificios, mejorar la ventilación a nivel del peatón, disminuir la emisión de calor antropogénico, crear trayectorias de aire.

En este tipo de estudios es importante la comprensión del planeamiento de la ciudad a nivel sistémico en el ámbito espacial y de paisaje, según las diferentes escalas de interpretación y análisis (para mejor comprensión, las escalas climáticas se desarrollan en el siguiente subtítulo). Si bien se presenta la estructura del *UCMap* (Figura 1), en esta investigación no se desarrolla la evaluación del conjunto de elementos climáticos, únicamente se considera la temperatura en la superficie de suelo y aire con información del *greenery* como parámetro de planificación urbana y componente asociado al mapa climático urbano.

⁸ Arquitecto israelí, especialista en arquitectura bioclimática que contribuyó en el área del confort, clima y arquitectura. Entre su principal aporte se destaca las cartas bioclimáticas o climogramas de Givoni que representa el diagrama psicrométrico que traza la zona de confort higrotérmico (para invierno y verano) e incorpora estrategias de diseño pasivo.



Fuente: REN, NG, KATZSCHNER (2011 p.5)

1.1 Escalas climáticas

Es importante definir la escala de estudio a los fenómenos del clima, para ello se destacan dos aspectos de evaluación, el tiempo y el espacio. El tiempo puede distinguirse de forma cronológica (un día específico, un mes, un periodo de 30 años) y de forma meteorológica (lo que caracteriza el estado atmosférico: húmedo, con altas temperaturas, condicionantes para la definición del clima). Respecto al espacio podemos distinguirlo entre macro, meso y micro escala (un territorio, un barrio, un manzano). Ambos componentes, tiempo y espacio, aproximan la comprensión de la dinámica del clima urbano.

Podemos adicionalmente revisar el concepto y comprender el término de “escala” como:

El lente individual que aplicamos al representar e interpretar fenómenos espaciales de la realidad concreta en que vivimos, más representada en la ciencia cartográfica, sin embargo, al tratarse del estudio del clima urbano, hay diferentes escalas (CASTELHANO, 2020a p.38).

Varios autores interpretan y definen las escalas climáticas. Entre ellos destaca las contribuciones de Tim Oke⁹, quien sostiene que el clima urbano es multiescalar, es decir, temporal/espacial, eso significa que deben ser definidas escalas temporales horizontales y verticales en un determinado espacio (OKE 1984, 1987). Las escalas horizontales corresponden a: **mesoescala, escala local y microescala** (Figura 2). Las escalas verticales son dos y corresponden a:

- *Urban Boundary Layer (UBL)* o Capa Límite Urbana (CLU) -traducción nuestra-, comprende el límite urbano, es decir, la atmósfera en meso escala (por encima del tope de edificios y copa de los árboles)
- *Urban Canopy Layer (UCL)* o Capa de Dosel Urbano (CDU) -traducción nuestra-, que comprende la cobertura urbana, es decir, las alteraciones en escala micro e intraurbana (por debajo del tope de edificios y copa de los árboles) (Figura 2 y 3).

También se identifican las siguientes capas:

- *Planet Boundary Layer (PBL)* o Capa Límite Planetaria (CLP).
- Rural Boundary Layer (RBL) o Capa Límite Rural
- *Surface Layer (SL)* o Capa Superficial (CS).
- Mixing Layer (ML) o Capa de mezcla
- Inertial Layer (IL) o Subcapa inercial
- *Roughness Sublayer (RS)* o Subcapa de Rugosidad
- *Urban Plume (UP)* o Efecto pluma urbana

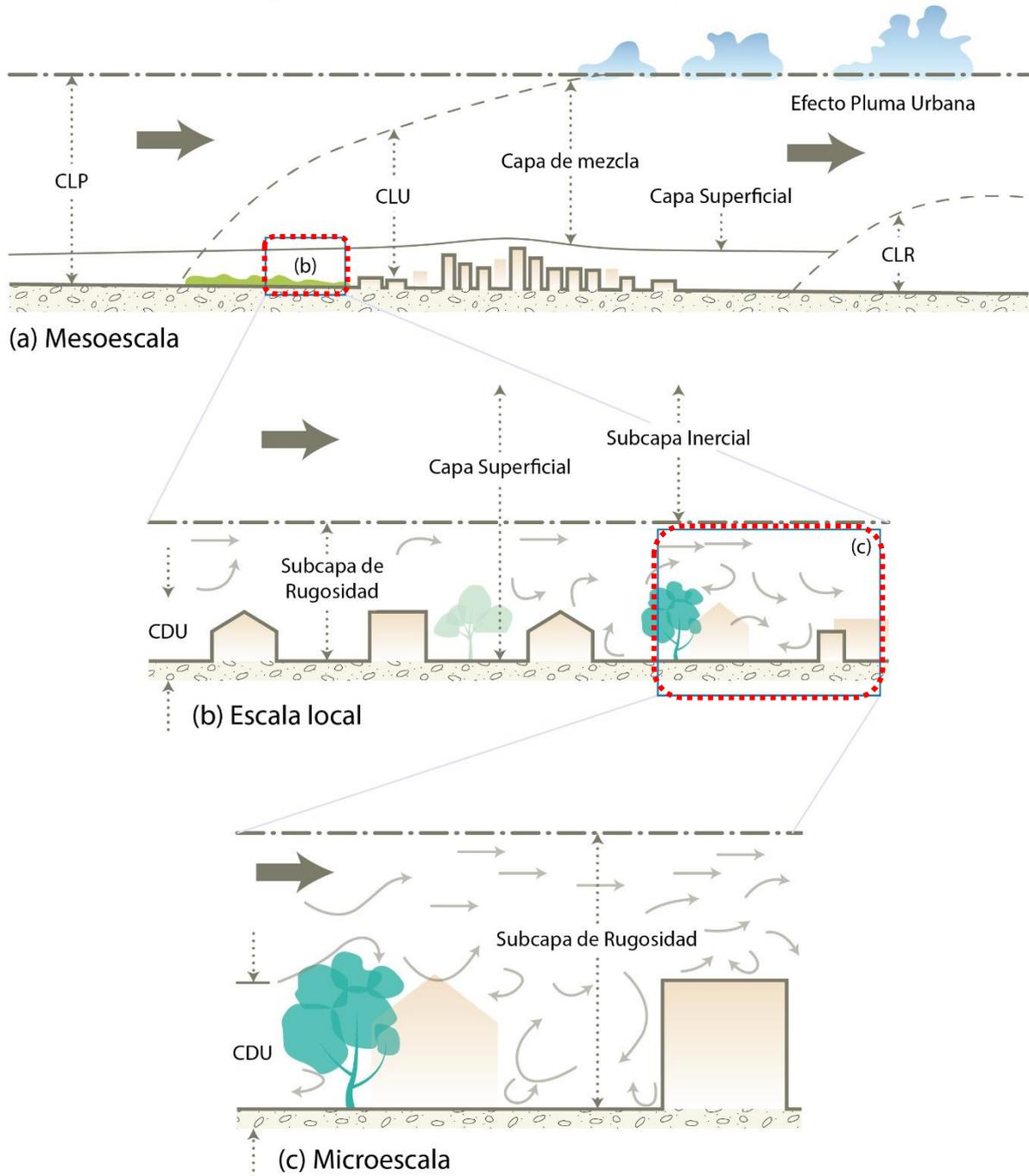
Esta interrelación horizontal y vertical interactúa en el espacio y tiempo y afecta la transmisión de calor en la superficie y atmósfera. Cualquier alteración en cada tipo de escala, puede alterar, influenciar, desequilibrar o degradar el ambiente además de generar impactos en la salud humana y confort ambiental.

Según Monteiro (1976), se concibe una división en tres tipos de escala: el macro clima (que abarca el espacio climático zonal y regional), el meso clima (abarca el subregional, local y meso clima) y el microclima que abarca el topo clima (compartimientos básicos de morfología, vertientes, llanura aluvial, colinas) como

⁹ Timothy R. Oke, profesor emérito en geografía, miembro del Programa de Ciencia Atmosférica de la Universidad de Columbia, investigador en clima urbano, balance energético e hídrico de las ciudades.

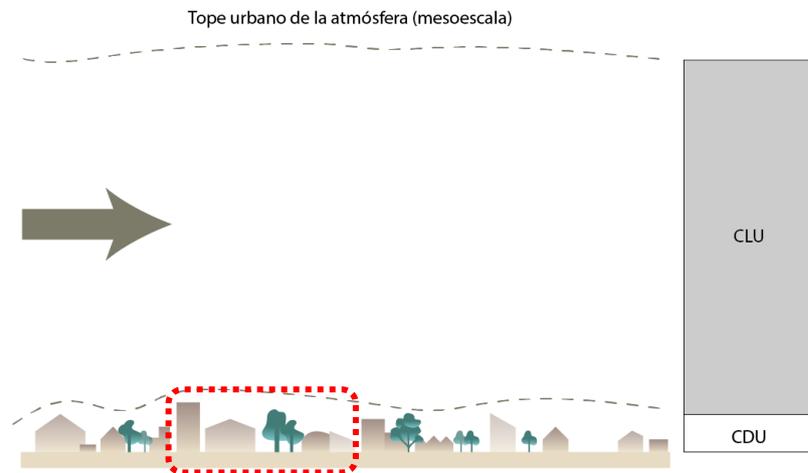
última unidad, es decir entre 10 a <10 metros (sector de vivienda). Años más tarde irá a referir que “el clima local es la unidad básica de observación meteorológica” (MONTEIRO, 2003 p.28).

Figura 2. Escalas climáticas horizontales y verticales



Fuente: Adaptado de OKE (1984, p.766)

Figura 3. Subdivisión vertical de la atmósfera



Fuente: Alcoforado (2010 p. 37)

Por su parte Andrade (2005), detalla de forma más precisa los conceptos referidos a las dimensiones típicas de cada categoría, sin establecer límites rígidos, caracterizadas en Tabla 2:

Tabla 2. Escalas climáticas y dimensiones típicas

Escala climática	Espacio geográfico	Características
Mesoclima	Hasta 10 decenas de kilómetros, se restringe a UBL.	Corresponde a la influencia integrada de la ciudad. Los efectos de meso escala, son efectos externos urbanos, de dimensión aproximada y superior a la ciudad, depende de los fenómenos de escala climática superior (mesoescala y macroescala).
Clima Local	100 mt a algunos kilómetros, corresponde a una unidad climo-topológica.	Corresponde a un tipo de ocupación de suelo diferenciado (barrio, parque urbano), a sus condiciones topográficas (valle, colina). Engloba un mosaico de microclimas que se repiten.
Microclima	Hasta algunas centenas de metros, se restringe a UCL.	Refleja la influencia de elementos urbanos individuales y de sus disposiciones más elementales (edificios y sus partes constitutivas, calles y plazas, pequeños jardines).

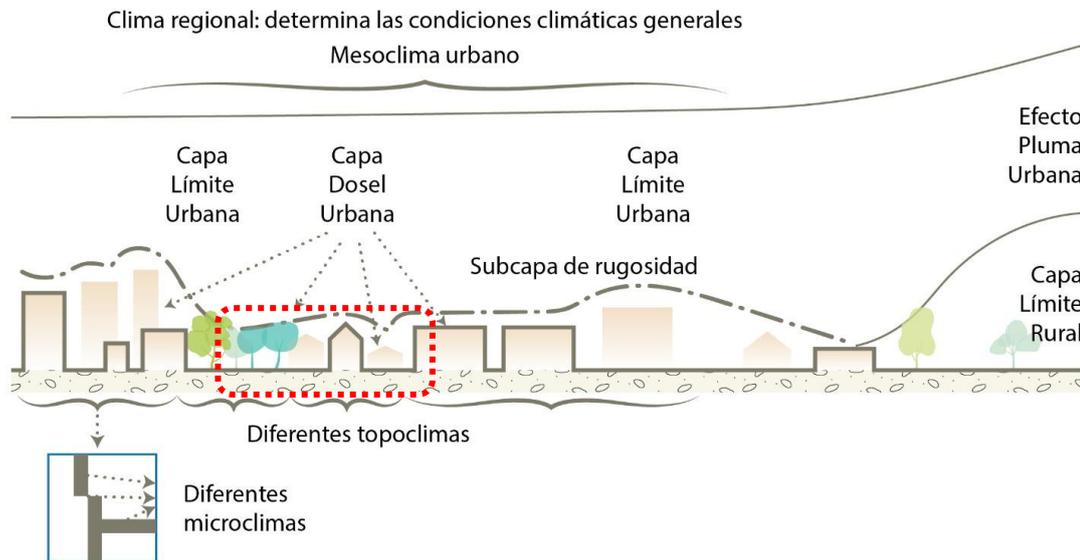
Fuente: Adaptado de (ANDRADE, 2005 p.72-73)

1.1.1 Microclima urbano

Según la estratificación de la atmósfera, se identifica la clasificación del microclima conforme Figura 4. El lugar ideal para medir la temperatura de una ICU, es

en el dosel urbano (definido como el volumen de aire debajo del tope de edificios y árboles), mencionado anteriormente.

Figura 4. Estratificación vertical de la atmósfera urbana y escalas de análisis (dosel urbano)



Fuente: Andrade (2005 p.71) Adaptado de OKE (1984b, 1987, 2004)

Para el estudio en esta escala climática, se consideran las medidas padrón a una altura de 1.5mt encima del nivel de calle (a la altura del tórax de una persona) o 1.2mt de la superficie (en caso de simulación computacional con ENVI-met), para mediciones en la temperatura del aire.

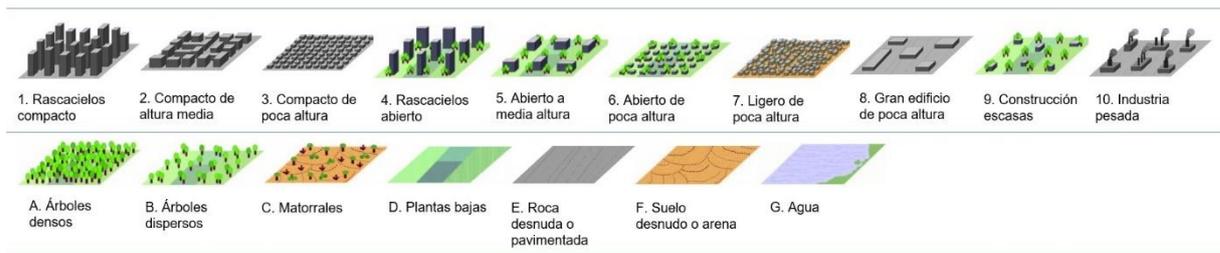
La escala temporal en climatología urbana, se refiere cada vez que el clima urbano varía según un determinado tipo de tiempo (escala sinóptica¹⁰), es decir, los elementos climáticos de un determinado espacio, están condicionados por la variación espacial de un tipo de tiempo, “por regla general se considera la frecuencia estacional y sus interacciones con las estructuras urbanas” (ANDRADE, 2005 p.74). La escala microclimática requiere estudiar también la envolvente del edificio, ámbito de estudio sugerido en la presente investigación, a través de *micro urban design* o micro urbanismo, que prioriza la identidad local, habitabilidad, cultura, paisaje e imagen urbana a escala de detalle (BASURTO; GONZÁLEZ, 2016).

¹⁰ Escala de movimiento que comprende fenómenos cuya dimensión horizontal varía aproximadamente entre 2000 y 10000 km y cuyas escalas de tiempo varían entre días o semanas. Depresiones, anticiclones móviles y depresiones frontales son ejemplos de fenómenos de escala sinóptica (Glosario Climatológico/Meteorológico – IPMA. Disponible en: <https://www.ipma.pt/>)

1.1.2 Zonas Climáticas Locales (ZCL)

Stewart & Oke (2012) identifican las características físicas del ambiente construido relacionadas al microclima urbano en diferentes escalas de la ciudad a partir del método de clasificación de *Local Climate Zones (LCZ)* o Zonas Climáticas Locales (ZCL). Esta clasificación climática local emerge de la división lógica del universo del paisaje, proponiendo las siguientes clases: “Local” en la escala, “Climática” en la naturaleza y “Zonal” en la representación, es decir, estas LCZ, son regiones de cobertura de superficie uniforme en la escala horizontal, en total se identifican diez clases atribuidas según el tipo de construcción y siete clases según el tipo de cobertura de suelo (Figura 5).

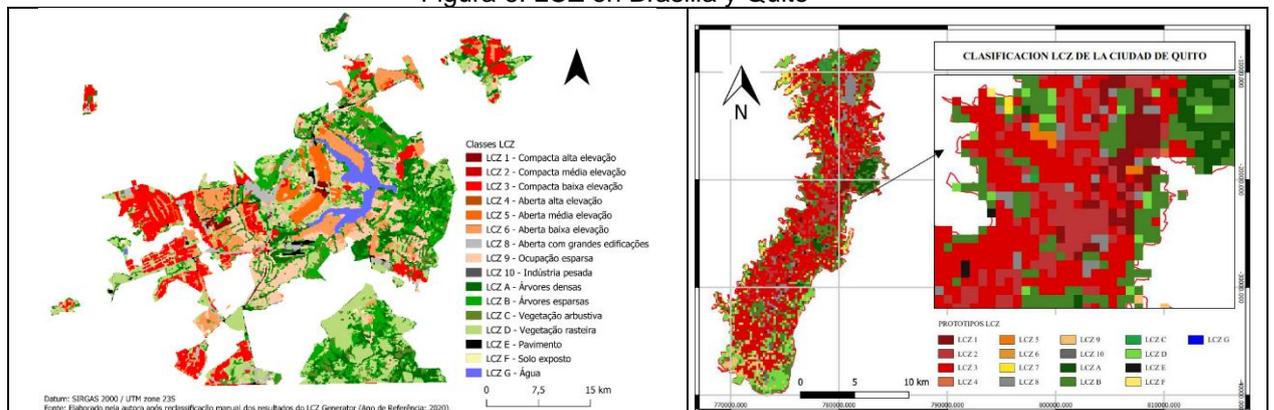
Figura 5. Zonas Climáticas Locales (LCZ)



Fuente: STEWART; OKE (2012 p.1885)

Werneck (2022), obtuvo la clasificación del paisaje urbano de la macrozona urbana del Distrito Federal en Brasilia, en el que observó tres tipos de ocupación más frecuente, las cuales corresponden a LCZ3 (con el 12.75%), LCZ9 (12.42%) y LCZ6 (11.08%), conforme Figura 6 (lado izquierdo).

Figura 6. LCZ en Brasilia y Quito



Fuente: Werneck (2022 p.122) y Maigua (2020 p.113)

Para el caso de la ciudad de Quito, Maigua (2020) identificó también a *LCZ3* como la tipología constructiva más representativa con el 45.78%, seguido por la clasificación *LCZ-B* que corresponde a árboles dispersos y vegetación baja con 17.78% y *LCZ-D* de vegetación baja con 9.80% en tercer lugar, ver Figura 6 (lado derecho). El mapeamiento de este tipo de clasificación se representa a través de la imagen clasificada según el método de *WUDAP* y *LCZ Generator* como clasificador SAGA-GIS, para *LCZ* en Brasilia (78% de precisión) y Quito (clasificación a 200m).

1.2 Isla de Calor Urbana (ICU)

La isla de calor urbana (ICU), puede ser entendida como la diferencia de la temperatura urbana y rural ($\Delta T_u - r$), es decir, la temperatura del suelo y aire tienden a ser más elevadas durante la noche por el acúmulo de calor en la masa construida y su emisividad, generalmente identificadas en los centros urbanos. Según Romero *et al* (2019), la ICU es uno de los principales fenómenos asociados al clima urbano, porque:

...caracteriza una condición microclimática en que la temperatura del aire se incrementa, la humedad relativa del aire baja y se altera la velocidad de los vientos, el régimen de lluvias, entre otros. Las temperaturas del aire en el medio urbano son más elevadas en relación a áreas más alejadas, que, junto con el calentamiento de superficies artificiales, caracterizan la formación de islas de calor urbana (ROMERO *et al.*, 2019 p.13).

Este fenómeno de calentamiento de la temperatura de la superficie y/o del aire, ha sido estudiado por décadas¹¹ y las primeras investigaciones de ICU se le atribuye a Chandler (1976), con la clasificación climática del Gran Londres (en cuatro regiones locales distinguidas por su clima, fisiografía y forma construida). El fenómeno de calor es atribuido a la influencia del uso y ocupación del suelo, la urbanización y consecuente aumento de áreas impermeables y principalmente converge en las áreas centrales de la ciudad. Según (ROMERO, 2015 p.51), “en todas las ciudades existen islas de calor cuyas características morfológicas se parecen a las comunidades de climas templados en sensibilidad, densidad de construcción y uso del terreno”.

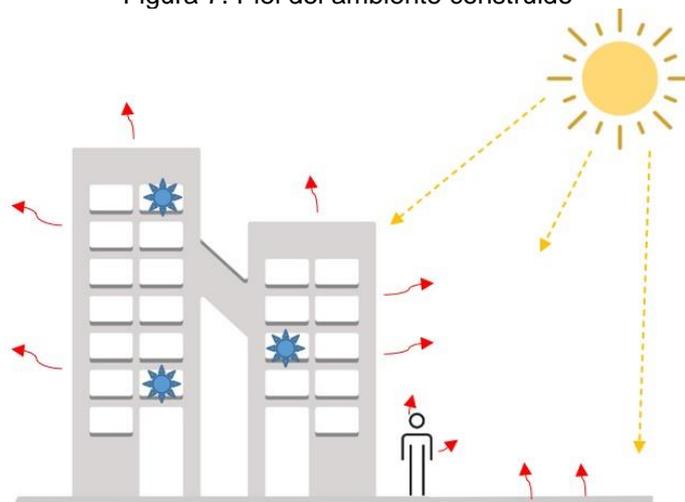
¹¹ Estudio que implica el abordaje de dos grandes problemáticas del siglo XX, el crecimiento demográfico y el cambio climático.

Las principales **causas** del fenómeno de ICU según Stewart & Oke (2012), representan una modificación urbana del balance energético y de la radiación de superficie, resultado de:

- Mayor absorción de la radiación solar debido a múltiples reflejos y atrapamientos de radiación por las paredes del edificio y superficies verticales de la ciudad.
- Mayor retención de radiación infrarroja en los cañones de las calles debido a la vista restringida del hemisferio celeste
- Mayor absorción y liberación retardada de calor por los edificios y superficies pavimentadas de la ciudad
- Radiación solar absorbida en la superficie se convierte en formas de calor sensible en lugar de latente
- Mayor liberación de calor sensible y latente por la combustión de combustibles para transporte urbano, procesamiento industrial y calefacción/refrigeración doméstica. (STEWART; OKE, 2012 p.1881).

Esto quiere decir que, en la medida que la absorción y retención de la radiación solar permanece en la superficie y atmósfera, se incrementa la temperatura, ocasionando alteraciones y disfunciones en los demás factores climáticos. Mientras no se considere los aspectos que provocan este calentamiento en la piel del ambiente construido (antropogénico, materiales de construcción, envolvente del edificio, superficies) incluso el consumo energético (Figura 7), la presencia de este fenómeno permanecerá como calentamiento urbano.

Figura 7. Piel del ambiente construido



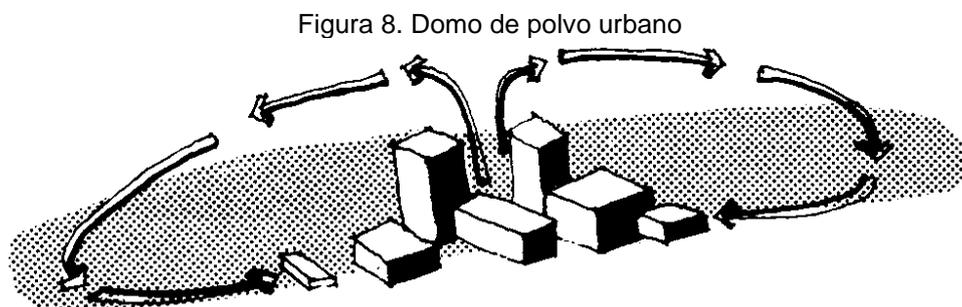
Fuente: Autora, 2021

Por tanto, la ICU es decurrente de la alteración de los fenómenos físicos identificados en los siguientes factores: la absorción de la radiación solar y aumento de la capacidad de almacenamiento de calor; retención de la radiación infrarroja; radiación solar absorbida en la superficie y convertida en calor sensible; por las

fuentes de calor antropogénico (vehículos, industria); reducción de humedad de aire (supresión de vegetación, canalización de ríos, gran concentración de edificios) y por la reducción de la velocidad del viento (barreras que no permiten la dispersión de la concentración de contaminantes).

Entre las **consecuencias**, se identifican efectos negativos en el confort térmico y la salud humana, en particular de ciertos grupos etarios (niños, adultos mayores), y personas con problemas respiratorios o cardiovasculares; además de afectar la biodiversidad, aspecto primordial que garantiza la sostenibilidad de un ecosistema. Estas consecuencias están asociadas a efectos socio ecológicos (GRILO, et al., 2020).

Otro efecto es la retención de contaminantes, se produce cuando el aire caliente de la masa construida sube y origina corrientes verticales junto a la nebulosidad y mayores índices de condensación. Los contaminantes son transportados por las corrientes verticales y dispersados en el entorno dentro de un proceso continuo formando un “domo” de movimiento de gases (Figura 8).



Fuente: Romero (2013, p.36) Adaptado de Detwyler (1974:63)

Sin embargo, existen algunos factores que impiden la formación de ICU, por ejemplo, al disminuir la radiación solar (como principal factor para el calentamiento), que puede darse por una atmósfera contaminada o por el contrario al favorecer la velocidad de viento y enfriar la ciudad por las brisas del mar, o al sombrear las superficies con los cañones urbanos que disminuyen la radiación incidente en el suelo. Este fenómeno se denomina como “**isla de frescor** o isla de calor negativa” (ALCOFORADO, 2010 p.78). También debido a temperaturas más bajas relacionadas a la presencia de vegetación (parques en particular, porque concentran humedad y oxígeno, pueden generar brisas y aire fresco), cuerpos de agua, menor densidad poblacional y menor cantidad de masa construida.

Otro componente según Andrade (2005), es considerar el nivel intermedio de planificación urbana (*settlement planning*), que abarca los factores locales de los edificios y de su espacio contiguo, lugar donde se encuentra la información climática (de carácter microclimática específicamente). En ese sentido, la presente investigación pretende incidir en el aspecto de planificación y diseño de soluciones urbanas que contribuyan a mitigar los efectos negativos de las ICU, a modo de contribuir en el bienestar y salud humana, según “investigaciones epidemiológicas apuntan a reducir el impacto del ambiente atmosférico en la mortalidad, asunto relevante ante la salud humana” (JENDRITZKY et al., 2000).

1.2.1 Clasificar las ICU

Con esas consideraciones, cabe identificar y diferenciar las ICU, en relación a su forma, intensidad y localización, así se distingue la isla de calor atmosférica e isla de calor de superficie según (ROMERO et al., 2019), es decir, se identifican valores de la temperatura presentes en el aire y en el suelo. A continuación, se exponen las principales diferencias (Tabla 3).

Tabla 3. Isla de Calor de superficie y atmosférica

Características	ICU de superficie	ICU atmosférica
Desarrollo temporal	Presente en todas las horas del día y noche. Mas intensa durante el día en el verano.	Puede ser pequeña o inexistente durante el día. Más intensa durante la noche y el invierno.
Intensidad	Mayor variación espacial y temporal: Día: 10 a 15C Noche: 5 a 10C	Menor variación: Día: -1 a 3C Noche: 7 a 12C
Método de identificación	Medición indirecta: Teledetección	Medición directa: Estación meteorológica fija Transectos en red de estaciones móviles
Representación típica	Imagen termal	Mapa isotérmico Gráfico de temperatura

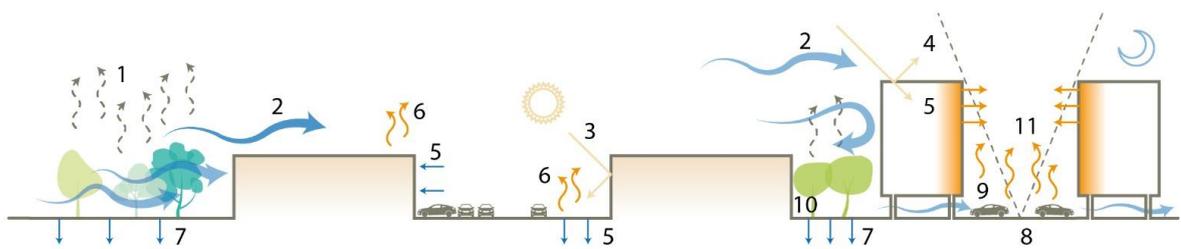
Fuente: ROMERO et al (2019 p.16) Adaptado de EPA (2008 p.2)

Los factores climáticos de ICU, según Alcoforado (2010) son la temperatura del aire, ventilación, disminución de la precipitación, calidad del aire. Para Romero (2013),

son la diferencia media de la radiación, la energía solar en la masa del edificio (concentración de calor), baja evaporación del suelo y vegetación y fuentes de calor estacional.

Según Werneck (2018), se destacan once factores que influyen en la formación de ICU en el microclima urbano (Figura 9), siendo éstos: 1) evotraspiración, 2) acción de ventilación, 3) radiación solar directa, 4) reflexión onda corta, 5) absorción, 6) radiación de onda larga, 7) permeabilidad, 8) factor de visión de cielo (FVS), 9) calor antropogénico, 10) sombreadamiento y 11) cañón urbano. Por su parte, Romero (2011), sostiene que las variables climáticas que más influyen lo construido, son: temperatura del aire exterior, radiación solar y ventilación. En sí, la ICU resulta de la interacción entre cinco aspectos fundamentales: geometría urbana, ventilación urbana, radiación solar, vegetación y calor antropogénico.

Figura 9. Factores que influyen en la formación de ICU



Fuente: Adaptado de Werneck, (2018 p.39)

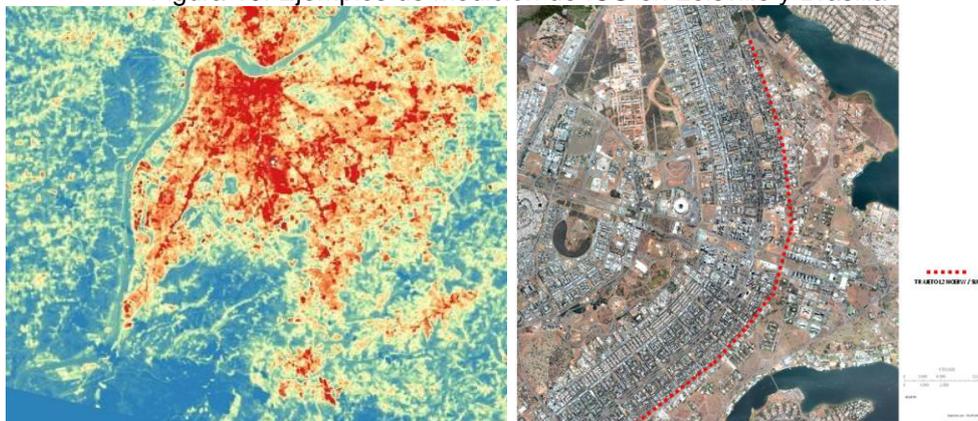
1.2.2 Medir las ICU

Existen diferentes métodos para estudiar y medir las ICU, desde el análisis de registros de temperatura, mediciones *in situ*, procesamiento de información geográfica o simulaciones computacionales. Gartland (2010), identifica seis métodos a través de: estaciones fijas, estaciones meteorológicas urbanas, transectos móviles, teledetección (nivel de superficie hasta dosel urbano), teledetección vertical (nivel de superficie, por encima del dosel urbano hasta 10 km – tropósfera) y balance de energía. Adicionalmente, son considerados los modelos de simulación (de edificio, a través de cañón urbano, o ecosistema a nivel regional).

También, Romero et al. (2019), presentó una aplicación práctica de estos métodos de identificación de ICU, a través de mediciones con estaciones fijas, mediciones con transectos móviles, teledetección y clasificación de LCZ específicamente para ICU de superficie en Brasilia (Figura 10, lado derecho). Importante destacar que durante el análisis de las mediciones se identificó que “la ICU es mayor durante la noche, en situaciones de aire calmó y sin nubes” (ROMERO et al., 2019 p. 77).

Algunos estudios de la identificación y medición de ICU en distintos países, presentan los siguientes resultados, por ejemplo, en Figura 10, se observa el mapa de ICU de superficie de la ciudad de Louisville a través de teledetección (lado izquierdo) y un mapa de ubicación de las áreas de estudio para la medición de puntos fijos (cuadras 412/413, 207/208, 308/309 Norte, Sector comercial sur, 308/309, 206/207 y 412/413 Sur), como estudio de campo térmico realizado en el Plan Piloto de Brasilia (lado derecho).

Figura 10. Ejemplos de medición de ICU en Loisville y Brasilia



Fuente: EPA¹² (2014) (lado izquierdo) y Romero *et al* (2019 p.79) (lado derecho).

Continuando en el contexto brasileiro, por la década de los años 80, Lombardo (1985), realizó un estudio de ICU con fotografías aéreas e imágenes satelitales LANDSAT 3 en la metrópoli de Sao Paulo, como precursora en la identificación de ICU, destacó que el fenómeno se verifica tanto para el día y la noche y la diferencia de temperatura se registra principalmente por la presencia de vegetación y altitud.

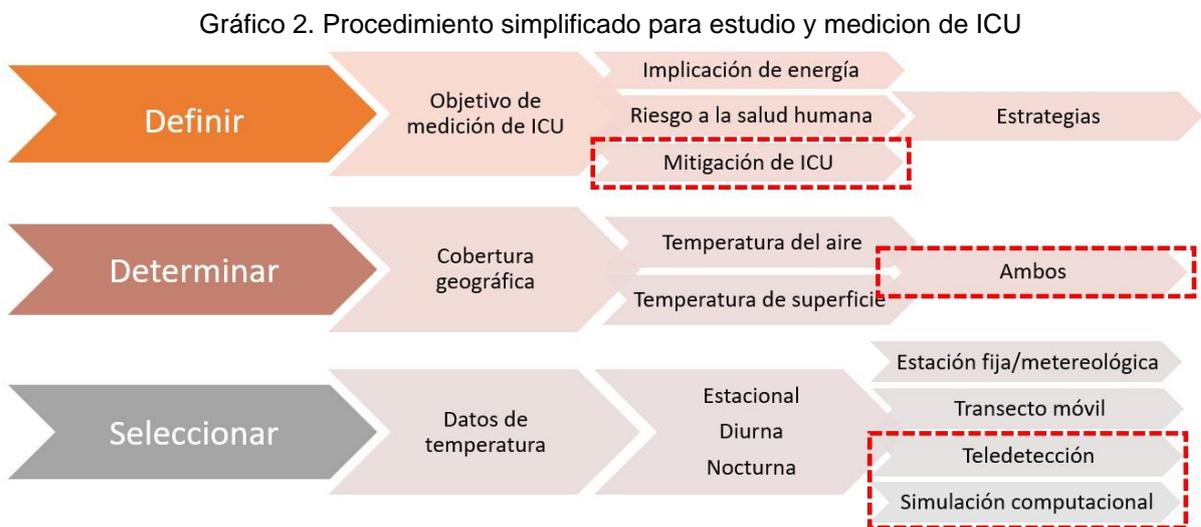
En Bolivia, el estudio de (HINOJOSA; MAILLARD; SAUCEDO, 2021), sobre diferentes escenarios climáticos en municipios metropolitanos de Santa Cruz,

¹² Research report by Climate Central. Hot and getting hotter: Heat Islands Cooking U.S. Cities. Disponible en: <https://www.climatecentral.org/news/urban-heat-islands-threaten-us-health-17919>

encontró registros de *LST*/día entre los años 2010 y 2018, una diferencia de temperatura en áreas de uso de urbano (31.0°C), agrícola/ganadero (29.7°C) y área boscosa (28.6°C), teniendo una diferencia de 8.1°C en relación a *LST*/hoche en bosque, agrícola/ganadero (9.3°C) y urbano (9.7°C), demostrando la incidencia del uso urbano en ambos casos con los mayores registros de temperatura superficial.

Por tanto, en el contexto latinoamericano, según el estudio de Ángeles et al. (2022), el incremento de temperatura en zonas urbanas a zonas rurales, a través de teledetección, identifican ICU superficiales predominantemente en las ciudades de Caracas, Bogotá, Lima, Santiago, Buenos Aires, Rio de Janeiro y Sao Paulo, coincidentemente ciudades capitales con elevados índices de densidad poblacional.

Lo importante en este apartado es comprender que para realizar la identificación de ICU, se puede seguir un procedimiento simplificado presentado en Gráfico 1, que comprende tres pasos básicos: definir el objetivo de medición de ICU, determinar la cobertura geográfica y seleccionar los datos de temperatura, lo remarcado en rojo obedece al estudio en la presente investigación.



Fuente: Autora, 2022

1.2.3 Mitigar las ICU

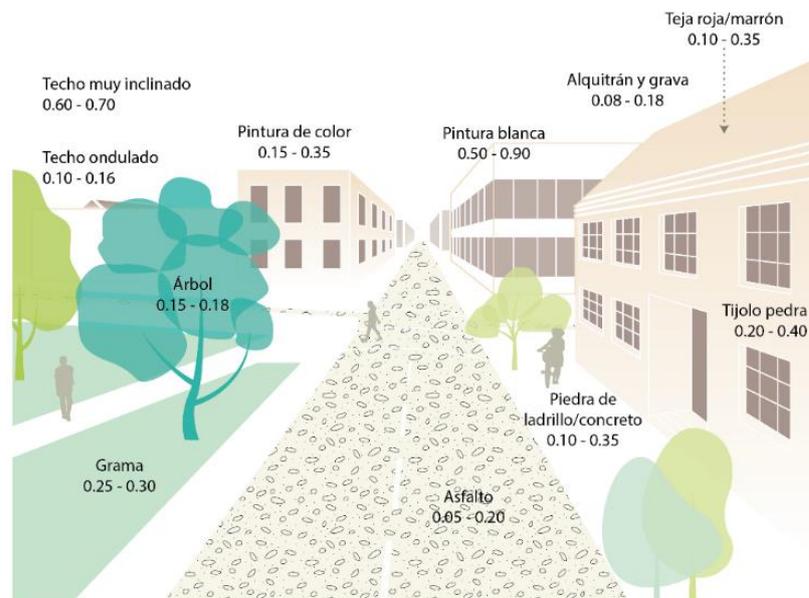
Serán definidos como la acción de mitigar, a la implementación de medidas que contribuyen a atenuar los efectos o externalidades negativas provocadas por las ICU.

Diferentes autores abordan estas acciones, entre las principales estrategias de mitigación de ICU que establece (GARTLAND, 2010) en su libro “Islas de Calor: Como mitigar zonas de calor en áreas urbanas”, refiere a un tratamiento específico que se aplica: 1) sobre las coberturas del ambiente construido, 2) sobre los pavimentos (frescos) a nivel de superficie y 3) sobre los árboles y vegetación, entendiendo que estas estrategias representan la “piel” del medio ambiente urbano.

Por su parte, Romero (2011), enfatiza significativamente que gracias a la acción de la ventilación se consigue “el resfriamiento del espacio público abierto y del envoltorio del edificio” (ROMERO, 2011 p.74). Para Alcoforado (2010), modificar la densidad de construcción, la geometría urbana, modificar el albedo, integrar planos de agua artificiales, regular la circulación del aire en el área urbana y más espacios verdes son acciones que representan una efectiva estrategia de mitigación de ICU.

Respecto al albedo, (BIAS et al., 2003), sostiene que, mayor radiación será absorbida y mayor calor será emitido por la superficie (por el efecto de reflectividad), según los materiales utilizados (concreto, asfalto, algunas tejas) (Figura 11), es decir, cuanto menor sea el albedo, mayor será la capacidad de absorber energía solar y calentar el aire urbano.

Figura 11. Albedo de materiales urbanos



Fuente: Adaptado de Both urban heat island effect and rooftop albedo geoengineering negligible (2001)¹³.

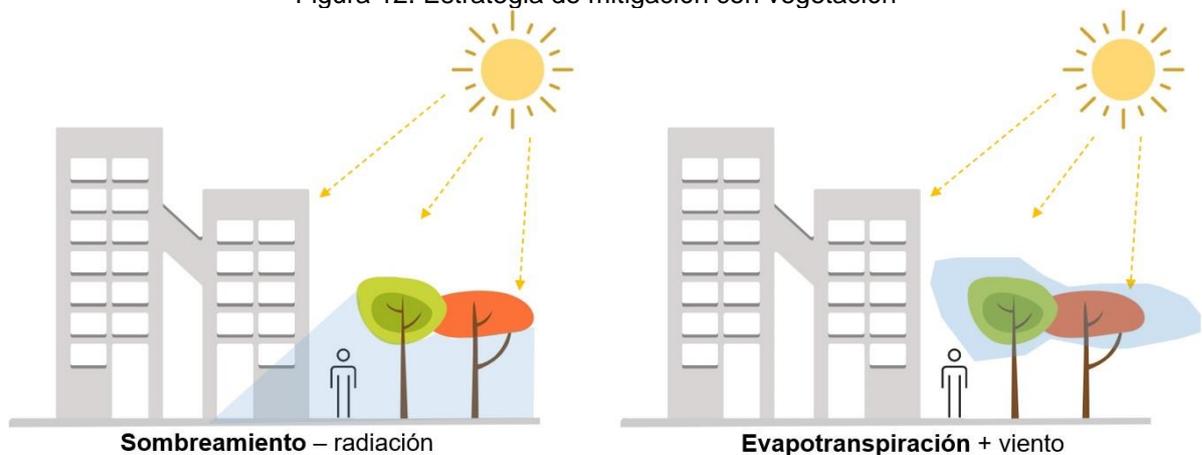
¹³ <http://www.bitsofscience.org/urban-heat-island-rooftop-albedo-geoengineering-3966/>

A diferencia de los árboles (con bajo albedo), usan parte de la energía recibida en su propio metabolismo no elevando la temperatura del aire. Las superficies de mayor albedo tienden a mayor reflexión de la radiación solar, por tanto, menor absorción de calor. En suma, es recomendable el uso de materiales con albedo más alto en las superficies (cubiertas y pisos claros) para obtener superficies que reflejen más la radiación solar y evitar la retención y emisión de calor absorbido.

Para Buyadi et al. (2018), las estrategias de mitigación pasan por acciones de enfriamiento y reverdecimiento con el uso de colores claros y superficies reflectivas en edificaciones, sin embargo, la más estratégica es el plantío de vegetación en áreas urbanas y diseño de infraestructura verde.

En correspondencia, a las causas de ICU, podemos definir cuatro principales campos de aplicación para medidas de mitigación: paredes y materiales del edificio construido (vertical), las superficies de suelo (horizontal), hábitos y calor antropogénico (combustibles y energía), y la vegetación, como un factor a ser incorporado. Según Cantuária et al (2020), la estrategia de diseño micro climático como cuestión esencial en la arquitectura por la falta de vegetación y sombra asociado a las altas temperaturas generan un microclima hostil de desconfort y malestar. También considerar que no se trata solo de estrategias de adaptación y mitigación. Bruse (2003), sostiene que mejorar los climas urbanos, no es solo cuestión estética, sino, se trata de considerar y mitigar los efectos directos e indirectos que inciden en diversas áreas de la vida personal, social, económica de los habitantes de la ciudad.

Figura 12. Estrategia de mitigación con vegetación



Fuente: Autora, 2023

En suma, la estrategia adoptada en el siguiente estudio es sobre la vegetación urbana, verificar su incidencia en dos factores que contribuyen a la reducción de radiación de calor sensible, el sombreado (en superficies y antropogénico) y evapotranspiración (viento y humedad en el aire), Figura 12.

1.3 Confort térmico

Aunque los estudios se aboquen principalmente a ambientes climatizados (espacios cerrados), Monteiro & Alucci (2007) destacan el estado de arte para el confort térmico en espacios abiertos que “traen consigo una mayor complejidad para el análisis termo-fisiológico” (MONTEIRO & ALUCCI, 2007 p.44), identificando veinticuatro modelos predictivos y treinta y tres índices diferentes.

En ese contexto, el índice de confort térmico es una cuestión que involucra varios parámetros físicos y no solo dependiente de la temperatura del aire. Los entornos térmicos son dependientes de la calidad del aire, la luz, el nivel de ruido y otros múltiples factores. Sin embargo, existen indicadores de confort térmico asociados a expresar la satisfacción y estado de ánimo de una persona en torno a un ambiente, encontrando éste confortable, conforme establece Nagashima; Tokizawa; Marui (2002) en su libro *Thermal Comfort*. De este modo, al confort urbano no solo se le atribuye la dimensión física, sino también una sensación psíquica, o lo que representa una percepción subjetiva (REIN, 2013).

En ese sentido, la adaptación de estructuras urbanas a las condiciones locales son estrategias correctoras a alcanzar situaciones de confort. La morfología urbana y su efecto en las condiciones de sombra en ciudades tropicales, son cruciales para reducir las ICU y mejorar el confort térmico exterior, esta misma relación está presente entre las condiciones atmosféricas en la ciudad y su influencia en la salud humana y puede ser evaluada a través del confort térmico.

Medir el confort térmico:

Al medir el clima térmico interior en un ambiente construido (ambiente climatizado), se miden los parámetros que afectan la pérdida de energía de las

personas como ser, la temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad:

- t_a Air Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- t_m Mean Radiant Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- V_a Air Velocity (m/s)
- P_a Humidity (Pa)

Para el caso de espacios abiertos, Monteiro & Alucci (2007), Wolf et al.(2020), en sus estudios identifican múltiples indicadores para mensurar el confort térmico, por citar algunos: el Índice de Temperatura de Thom (1959), el Índice de Temperatura Efectiva (ET) de Minessard (1937), el Índice de Temperatura fisiológicamente equivalente, el índice de Clima Térmico Universal o *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*, índice de estrés térmico (ITS) de Givoni (1969), el Modelo de Múnich de Hoppe (1999) que se basa en la ecuación de balance térmico del cuerpo humano, en los que se encuentra valores de temperatura de superficie externa de la ropa, de la piel y del centro del cuerpo, entre otros.

Los estudios recientes sobre confort térmico de Leonardo Monteiro, desarrolló una investigación en Sao Paulo para comparar resultados obtenidos de diferentes modelos predictivos de confort térmico en exteriores, a través del indicador de Temperatura de Percepción Equivalente (*TEP* en inglés), esta comparación experimental “proporciona el índice de confort térmico predecible en espacios exteriores en clima subtropical” (MONTEIRO & ALUCCI, 2011 p.437).

Prosiguiendo en el contexto brasileiro, Schmitz & Mendonça (2014) a través de una evaluación cuantitativa de la influencia de la tipología edilicia sobre el clima urbano, simularon escenarios futuros de clima urbano y confort térmico, para el año 2061 (según la proyección de IPPUC en Curitiba), identificando un incremento de 1.67°C de la temperatura. Respecto al confort térmico, identificaron estrés térmico para el frío durante el periodo nocturno/madrugada y estrés por calor por encima de los 27°C durante el periodo 9/17hr. Esta evaluación fue realizada con simulación computacional con ENVI-met V3.1 y determinada por el indicador *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*.

En otros estudios se demuestra que al reemplazar una playa de estacionamiento (superficie pavimentada) por un área verde de uso colectivo (superficie semi vegetada) en un patio del centro histórico de Bolonia, las condiciones de confort (velocidad del aire, temperatura, humedad relativa) mejoraron. Esta acción

es considerada como una estrategia para la resiliencia que promueve el plan piloto municipal de Adaptación al Cambio Climático (CC), según Boeri et al. (2017).

En resumen, estudiar el confort térmico en escala local microclimática y su influencia en los espacios envolventes del edificio, materiales de construcción, espacios verdes, contribuye en el diseño urbano con la dimensión y orientación futura de calles y se constituye como una acción de mitigación de ICU. Para la presente investigación y evaluación del verde urbano a escala de sector/edificio, se opta por el modelo predictivo de simulación computacional para medir el indicador: temperatura equivalente fisiológica o índice de confort térmico percibido (*Physiologically Equivalent Temperature -PET*) y el de voto medio presito (*Predict Mean Vote – PET*) a desarrollar en el capítulo de metodología y resultados.

1.4 Resumen del capítulo

El primer capítulo sobre clima urbano, propone una revisión cronológica de estudios relevantes sobre la problemática del calentamiento urbano en diferentes contextos territoriales. Apoyados en la revisión bibliográfica se presenta de manera sucinta las escalas climáticas (verticales y horizontales), los métodos de medición y alternativas de mitigación de ICU.

Realizar mediciones de los indicadores facilita la gestión, evaluación de sus externalidades negativas, visibiliza los efectos y posibilita el raciocinio a posibles medidas de adaptación y mitigación. Además, este insumo debería asegurar la participación activa de los actores involucrados en la toma de decisión.

Por tanto, se hace relevante delimitar y situar geográficamente el estudio en el contexto urbano espacial para su respectiva evaluación. Así, se define la escala climática del microclima urbano, que comprende la superficie del suelo hasta el tope de los edificios como límite del dosel urbano.

La revisión teórica se concentró en la identificación de ICU superficial y atmosférica para aproximar de manera práctica, en el siguiente capítulo, la vegetación urbana como estrategia de mitigación.

Los estudios de confort térmico demuestran la relevancia e implicancia en la salud humana, aspecto de vital importancia en los centros poblados. Los indicadores propuestos son aplicados a escala del peatón en el ambiente exterior.

Estudiar el clima urbano es complejo, requiere un análisis multidisciplinario para encarar una profunda comprensión de la atmosfera, múltiples áreas, componentes y variables que inciden en el fenómeno urbano e que a su vez se encuentra en un determinado contexto territorial. El estudio microclimático es una propuesta sensible frente a ese desafío.

2. VERDE URBANO EN EL ESPACIO PÚBLICO ABIERTO

La primera asociación que se realiza con el término verde urbano en la ciudad, es con las plazas, parques, jardines y áreas verdes como elementos singulares que forman parte de la trama urbana, sin embargo, los beneficios y funciones se multiplican al concebirlos como parte de un sistema que soporta una dimensión ecológica ambiental, social y económica preponderante para alcanzar objetivos de sostenibilidad y mejorar la calidad de la salud de los ecosistemas urbanos (biodiversidad) y de las personas (estimula nuestro sistema sensorial) propiciando espacios de encuentro, permanencia, ocio además de amenizar el microclima urbano.

Estas acepciones, refieren al amplio espectro del papel que juega la vegetación en el medio ambiente urbano y la salud¹⁴ de los habitantes.

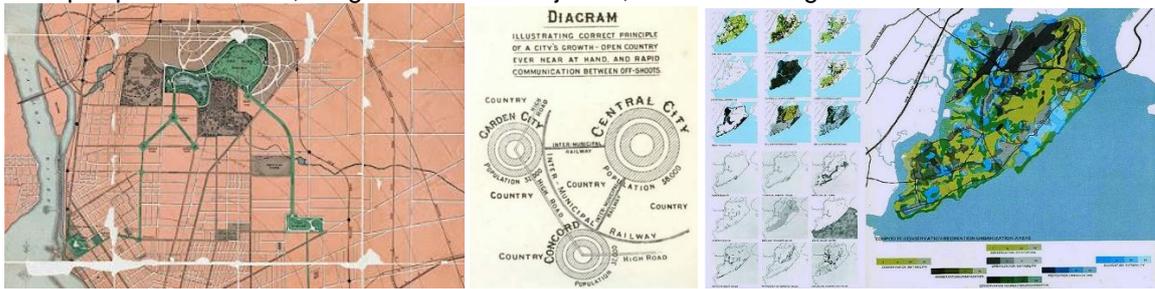
Las primeras consideraciones del paisaje natural en el interior de la ciudad y con enfoque sistémico, se le atribuyen a Frederick Law Olmsted, que proyectó el Central Park en Nueva York junto a Calvert Vaux y el sistema de parques urbanos en Boston como una simbiosis entre ciudad y naturaleza, en torno a 1880, fueron precursores de la implementación del verde urbano en ciudades americanas.

También a principios del siglo XX, el británico Ebenezer Howard desarrolla el modelo de Ciudad Jardín como una teoría urbanística (para proyectar la ciudad-campo) en respuesta a la revolución industrial, expresada en su libro *Garden Cities of To-Morrow* en 1902. Posteriormente, Ian McHarg con su libro *Design with nature*, se considera como el pionero en el movimiento ecológico por defender las características naturales del paisaje (valorización de las características propias del medio físico), acuñando el término “planificación holística del uso de suelo como una alternativa al desarrollo desordenado” (McHARG, 1971). El principio posteriormente atribuido al concepto de infraestructura verde o **Green Infrastructure (GI)**, se trata de una política para reducir las concentraciones de polución y mejorar la calidad del aire especialmente en poblaciones densas.

Gráficamente se distinguen los trazos del sistema de parques de Olmsted, el sistema de jardines de Howard y el sistema de paisajes de McHarg. Figura 13.

¹⁴ Existe un trastorno por déficit de naturaleza (TDN), el término creado por Richard Louv, para definir los síntomas y consecuencias de niños que permanecen en aulas cerradas privadas del contacto con la naturaleza, afecta la salud física y psíquica del ser humano.

Figura 13. Sistemas de verde urbano según Olmsted, Howard, McHarg (respectivamente): Red de parques de Buffalo, Diagrama de ciudad jardín; Análisis Ecológico del territorio de Staten Islan



Fuente: Urban Living Lab <<https://www.urbanlivinglab.net/tag/ecologia/>>

Estudios recientes incorporan los términos de **greenery** para determinar la calidad y cantidad de verde urbano requerida en la planificación arquitectónico, urbano, social y cultural como parte de un proceso de gentrificación sostenible (VILLACAMPA; VILLACAMPA, 2012). El **urban greening**, como concepto atribuido para mitigar las consecuencias del incremento de temperatura en áreas urbanas y enfriarlas con el diseño y planificación del **urban green space (UGS)**, término utilizado en Yogyakarta después de una comparación histórica espacial de cinco tipos de espacios verdes urbanos (patios, terrenos agrícolas, parques, cementerios y bosques urbanos), que representan el 11.49% de UGS para completar el 30% requerido. En otro estudio, según la percepción de los habitantes de Nueva York durante la primavera de 2020 (época de cuarentena por la COVID-19), evidencia un incremento de visitas en el UGS por semana, destacando una extrema importancia y relación entre la accesibilidad a las áreas verdes para mejorar la salud mental y física (BOWLER et al., 2010; WIDIYASTUTI, MUDIANTORO, ANDRIYANI, 2020; LOPEZ, et al., 2021). El estudio de (WANG et al., 2022) apunta al incremento del **urban green space (UGS)**, cuanto mayor sea éste, mejor será el efecto de enfriamiento en todas las zonas climáticas, toda vez que tras la formación de **urban cooling islands (UCI)**, se alcanzó un efecto de enfriamiento de hasta un 53,5% principalmente en zonas tropicales.

Otras acciones asociadas al verde urbano, se le atribuyen al término de **renaturalizar** el centro (96 predios) en Milán, para articularlo a la red ecológica municipal (con previo análisis de uso de suelo público y privado), según Tzortzi & Lux (2022). En el contexto latinoamericano, Brasilia es considerada como **ciudad jardín** y una de las ciudades más verdes del mundo con cerca de 100m² de área verde por

habitante según Cantuária et al. (2020). Para Romero & Silva (2022), Brasilia es concebida como ciudad-parque según la concepción urbana de Lucio Costa en 1987.

La presente investigación procura alcanzar el objetivo de mitigación de ICU con el mejoramiento de la condición de evotranspiración, sombreado y absorción de calor por medio del verde urbano, eso incide en la variación de humedad, acondicionamiento del aire, aumento de oxígeno y control de la temperatura (superficial y del aire), disminuyendo el estrés fisiológico del peatón y revalorizando el ambiente construido de carácter patrimonial, a través de pequeñas áreas verdes de proximidad, corredores verdes y micro urbanismo.

2.1 Vegetación urbana

La vegetación urbana con sus componentes: árboles, arbustos, césped; áreas verdes, cobertura vegetal en la ciudad, son un factor determinante para contrarrestar los efectos de ICU por ser considerado como una estrategia de mitigación climática local. A ejemplo de Curitiba, la intensificación de vegetación urbana favoreció el confort térmico en escenarios futuros asociados a la mitigación según Schmitz (2017). Ciertamente para mitigar, las acciones deben ser aplicadas a nivel macro y micro, con sus respectivas características.

Romero (2013), en su libro “Principios bioclimáticos para el diseño urbano”, establece directrices para el aprovechamiento de la vegetación en espacios abiertos como en el interior de edificios para depurar el aire contaminante y polvo, proporcionar sombra, controlar los vientos dominantes como barrera vegetal, delimitar el espacio y su uso, sustituir cualquier tipo de pavimento y escoger adecuadamente la especie arbórea para proteger del sol en verano y captar sol en invierno. Además, la autora refiere que la vegetación auxilia la disminución de temperatura del aire, reduce la energía, favorece el mantenimiento del ciclo oxígeno-gas carbónico, esencial para la renovación del aire (ROMERO, 2013 p.32).

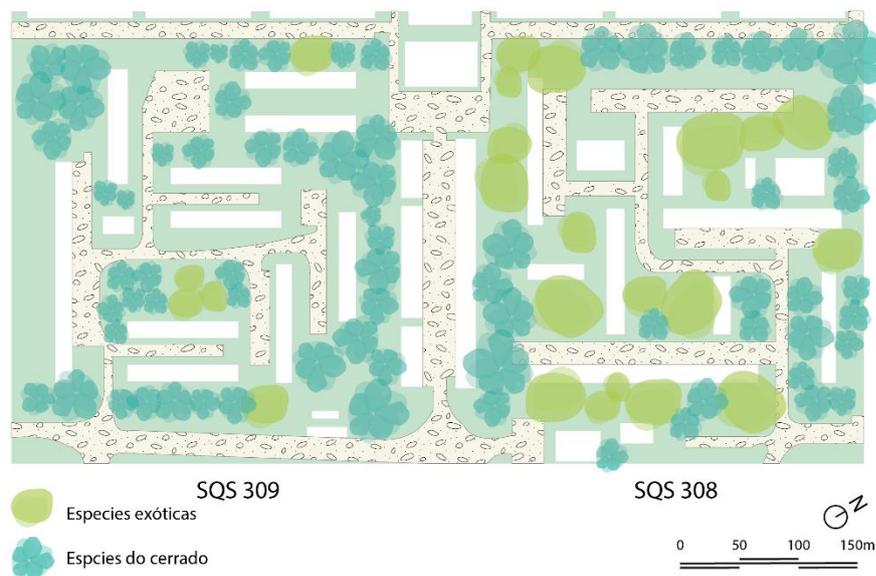
Para alcanzar los beneficios de la vegetación en la función microclimática y a escala de ciudad, es necesario conformar el efecto de masa vegetal dentro (30% de la superficie urbanizada) y respecto al espacio libre es necesario su predominancia y suelo permeable (70% del total) conforme recomienda Romero & Silva (2022). De

igual forma los bosques urbanos y periurbanos pueden ser aliados para enfrentar la crisis climática y mitigar los efectos de sus alteraciones (calor extremo) y restaurar los ecosistemas. Además de reducir la polución (FERREIRA et al., 2021).

Según Izard; Guyot (1980), una hectárea de bosque puede producir por evapotranspiración, cerca de cinco mil toneladas de agua por año y se puede registrar 3.5°C de diferencia en la temperatura del centro de la ciudad y los barrios próximos a una faja de vegetación (entre 50 a 100m de ancho). También incide en la humedad relativa con un incremento entre 5%, según áreas verdes, ríos y lagos presentes.

El estudio de Cantuária et al. (2020) identificó una diferencia de 25°C entre las copas de los árboles en relación a los materiales de construcción, esta observación fue al comparar tres áreas periféricas de Brasilia (RA), que no forman parte del proyecto urbanístico original del Plan Piloto de Lucio Costa, donde la ausencia de vegetación principalmente se le atribuye a la falta de un proyecto urbanístico ligado a su posicionamiento geográfico. Caso opuesto a la proyectada consolidación de las super cuadras residenciales (Figura 14), delimitando con 20mt de perímetro a los bloques de departamentos configurados por 6 pisos de altura con planta libre, esta configuración se extiende por los 12 km de cada “Asa” -ala norte y ala sur- teniendo predominancia de plantas fructíferas, exóticas y nativas en el bioma denominado “Cerrado”. Esta descripción se resume en las siguientes líneas, “la capital brasilera nació arborizada y sigue arborizada” (SILVA et al., 2022 p.120).

Figura 14. Disposición de vegetación en Supercuadras de Brasilia



Fuente: Adaptado de Andrade (2022 p.59)

En ambos casos, área no planificada y planificada, se evidencia la importancia de implementar proyectos de vegetación urbana que acompañen el crecimiento y desarrollo de las regiones, planes de arborización en muchas ciudades aún son escasos o inexistentes, como en el caso de Tarija.

La cobertura vegetal ejerce funciones ecosistémicas específicas y es un elemento importante del paisaje urbano debido a sus funciones ecosistémicas que mejoran la calidad ambiental (DUARTE et al., 2017). Para asegurar el incremento de cobertura vegetal, el aspecto clave para (ROMERO, 2011) consiste en su distribución. La autora sostiene que “pequeñas parcelas de forma uniforme por toda la ciudad son más eficientes para la amenización climática que la concentración de ésta en pocos lugares muy grandes” (ROMERO, 2011 p.84). La vegetación sirve para la selección y localización de especies para mejorar el clima local: la humedad ambiental, radiación, control frente al viento, ruido, contaminación y calidad del aire (HIGUERAS, 2006). La autora establece la influencia de la vegetación en la planificación de un asentamiento.

Tabla 4. Influencia de la variable vegetación en un asentamiento

Factor	Condicionante de diseño	Influencias planificación
Vegetación óptima para:	Mejorar humedad ambiental	Situación de las zonas verdes urbanas para mejorar las condiciones del microclima local. Control de la radiación solar directa verano/invierno. Usos urbanos. Determina las zonas abrigadas y expuestas para usos urbanos y sus crecimientos residenciales
	Especies	
	Densidad	
	Tipo de hojas	
	Radiación solar	
	Especies	Mejora de las condiciones del microclima local y el bienestar de la población
	Densidad	
	Porte	
	Distribución	
	Control frente al viento	
	Especies	Especies perennes con taludes de tierra
	Densidad	
	Porte	
	Distribución	
	Control frente al ruido	
	Especies	Especies resistentes a la contaminación atmosférica y partículas en suspensión
	Densidad	
	Porte	
	Distribución	
	Control frente a la contaminación y calidad del aire	
	Función clorofílica	
	Densidad	
	Tipo hojas	
	Porte	

Fuente: Higuera, 2006 p.103.

Para medir esa calidad ambiental en las ciudades, se cuenta con los indicadores: Índice de Cobertura Vegetal (ICV), su finalidad es mensurar los servicios ecosistémicos de la cobertura vegetal según el mínimo recomendado, índice de árboles /km lineal, por ejemplo: 100 árboles/km, baja atención hasta <10 árboles/km de alta y extrema atención); y el Índice de Área Verde (IAV), que tiene la finalidad de determinar la cantidad de cobertura vegetal disponible como indicador de calidad ambiental.

Otro modelo aplicado en el centro urbano de Milán, según Buffoni, et al. (2013), consiste en el modelo *UFORE – Urban Forest Effects* (vegetación, contaminación del aire y datos meteorológicos), el cual descubrió que la capacidad de la vegetación (árboles principalmente arces y arbustos), disminuyen en promedio, un 30% en PM10 y 20% en TSP – *Total Suspense Particules*, Este estudio es utilizado para evaluar la eliminación de contaminantes en el aire, que, gracias a los árboles, cuantifica la cantidad por hora de contaminación eliminada por el verde urbano a lo largo de un año. Por tanto, la vegetación tiene implicancia en relación a la temperatura, la velocidad del viento, la turbulencia, la humedad del aire y temperatura radiante según (ROMERO, 2015).

2.1.1 Fisiología de los árboles

Los árboles informan, mejoran y actualizan espacios y vidas, por tanto, son elementos esenciales en el diseño del ambiente construido. Según (AYMA-ROMAY, 2021) con cuatro características fundamentales: ámbito geográfico o ecológico (adaptadas al clima del lugar), tipo de hoja (deciduas o perenne), tamaño y color de la flor y estrés hídrico (alto, moderado, bajo). La interacción entre suelo-vegetación-atmósfera genera un impacto en el microclima urbano.

Los principales indicadores para evaluar ese desempeño, según (SHINZATO, 2014) son tres: el Índice de Área Foliar (IAF) o *Leaf Area Index (LAI)* en inglés, que debe ser calculado en cada especie arbórea para obtener adicionalmente la Densidad de Área Foliar (DAF) y su distribución geométrica por la abertura de la copa; segundo, la cobertura del suelo -composición, temperatura y humedad- y tercero, las variables microclimáticas locales: temperatura y humedad del aire, radiación solar, temperatura

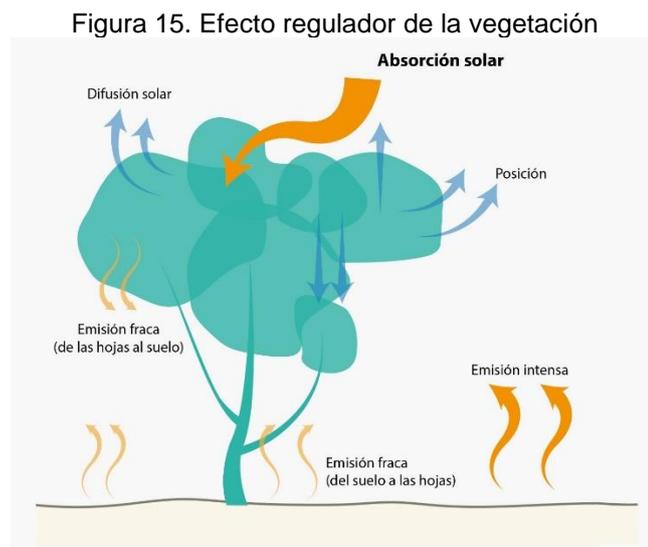
radiante media, superficial y dirección y velocidad de los vientos. Estos datos de entrada ayudan a verificar la interacción entre la atmósfera y la superficie del suelo por medio del intercambio de energía de las hojas de los árboles (ANDRADE, 2022).

Según Shinzato (2014 p. 47), el indicador “Índice de área foliar (IAF) se calcula considerando la mitad del total de área fotosintéticamente activa y su área de proyección en el suelo”, esto sirve para mensurar la densidad foliar en la planta y calcular la evapotranspiración.

Es decir, las hojas de los árboles absorben, reflejan y transmiten la energía incidente según las ondas de radiación en dos aspectos, para la temperatura superficial de la hoja (humidificar el aire por medio de vapor de agua liberado) y fotosíntesis. Entonces, la capacidad de filtraje de la vegetación aumenta cuanto mayor sea el número de hojas de cobertura por unidad de tierra, según (ROMERO, 2015):

La vegetación tiene menor capacidad calorífica y conductibilidad térmica que los materiales de los edificios.
 La radiación solar es en gran parte, absorbida por las hojas y la reflexión es pequeña (bajo albedo).
 La tasa de evaporación es mucho más alta en las áreas verdes que en áreas sin árboles.
 Las hojas pueden filtrar el polvo y contaminación del aire.
 La vegetación reduce la velocidad del viento y las fluctuaciones próximas del suelo. (ROMERO, 2015 p.94).

Se produce un efecto regulador en las radiaciones de onda larga (ROMERO, 2013). Figura 15.



Fuente: Adaptado de Romero (2013 p. 33)

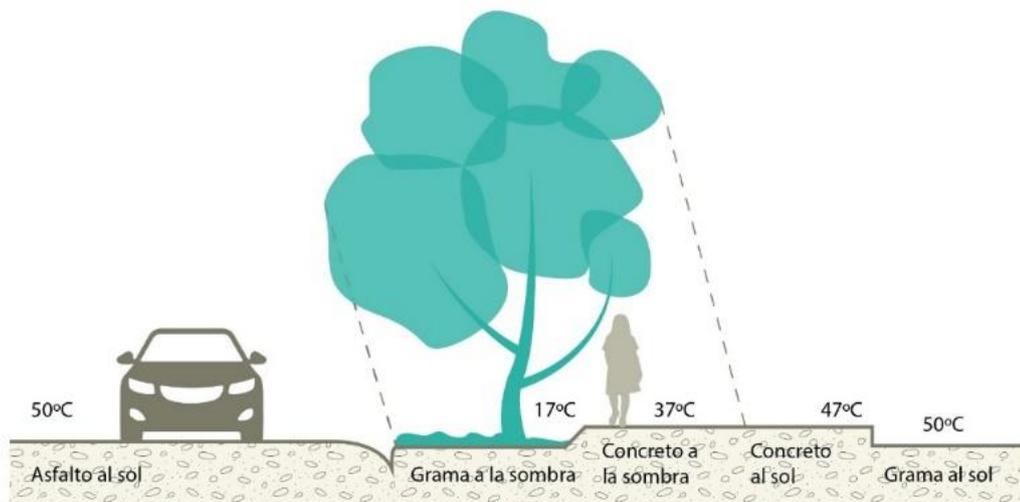
Entonces, las principales contribuciones o beneficios de la vegetación urbana son: el control de humedad y temperatura, sombreado, calidad ambiental -calidad

de aire-control de polvo y ruido, balance hídrico- imagen urbana (valor estético) y mejora en salud física y mental.

La evapotranspiración: se da por la transpiración estomática y cuticular de la planta, según Shinzato (2014 p.22), consiste en la relación entre “la resistencia estomática, la cantidad de estomas en las hojas con una adecuada condición de suelo (agua) y la atmósfera (luz)”, porque a mayor exposición de áreas de follaje, mayor efecto.

El efecto de sombreado de los árboles según el enfriamiento pasivo, depende de la extensión del área sombreada y se puede cuantificar por mediciones de temperatura superficial de los materiales expuestos y protegidos por las copas de los árboles (Figura 16).

Figura 16. Temperaturas de superficies urbanas



Fuente: Adaptado de Andrade (2022, p.29).

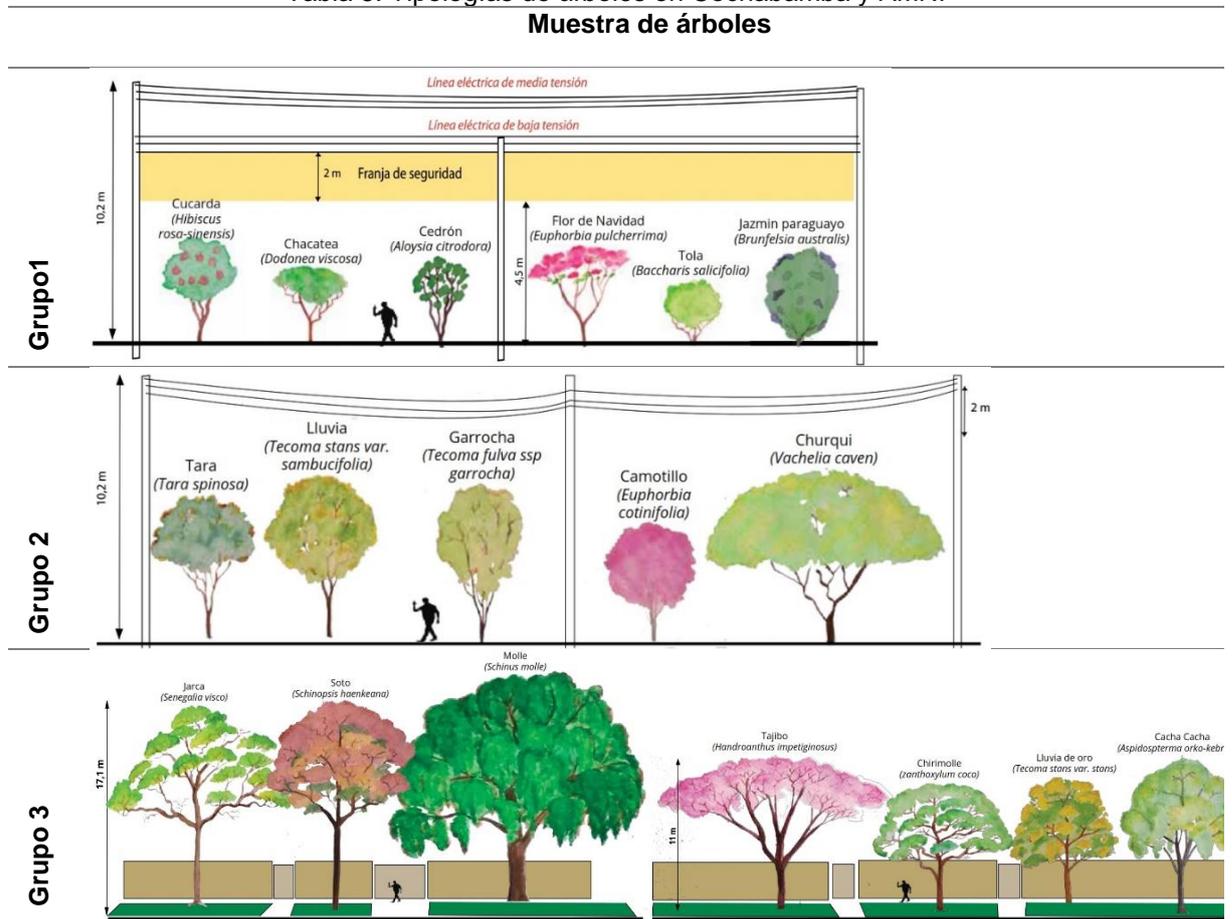
Otro factor incidente en la vegetación es escoger bien la planta para el plantío y su mantenimiento, esto guiará con facilidad el cumplimiento de las funciones de la arborización urbana, que según Mascaró (2005), se resumen en dos: sombreado y alimentación. El mismo autor recomienda los siguientes aspectos para la selección de especies arbóreas:

- Objetivo de la arborización.
- Aspectos geológicos y topográficos del espacio físico
- Ubicación y tipo de infraestructura que será implantada
- Morfología del recinto público
- Forma de ocupación de los lotes
- Clima general de la región
- Disponibilidad de agua para riego (MASCARÓ, 2005 p.188).

Siguiendo ese parámetro, clasificó 72 especies de árboles y arbustos urbanos de la ciudad de Cochabamba en cuatro grupos: arbustos y árboles pequeños, arboles medianos, árboles altos y árboles muy altos para definir la altura mínima requerida para la no interferencia de líneas eléctricas (AMNI) y el ancho mínimo de la jardinera, conforme Tabla 5.

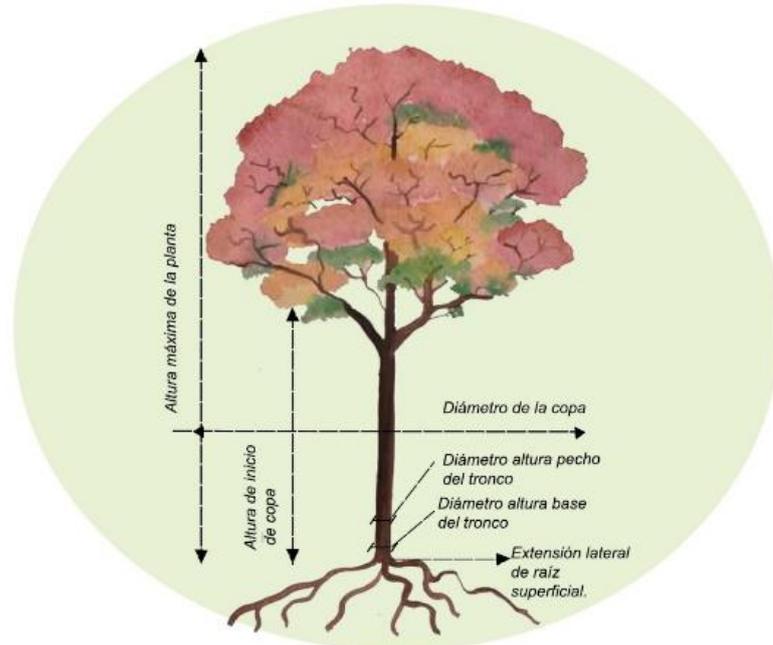
Por su parte, Ayma-romay (2022) recomienda la selección de especies arbóreas para garantizar que las condiciones ambientales, el espacio aéreo y subterráneo, luz, agua y nutrientes consideren las características morfológicas y fisiológicas de los árboles (forma y tamaño de la copa y raíces), Figura 17.

Tabla 5. Tipologías de árboles en Cochabamba y AMNI



Fuente: AYMA-ROMAY, (2022 p.17,23,30,31,33)

Figura 17. Atributos morfológicos de la copa y raíz



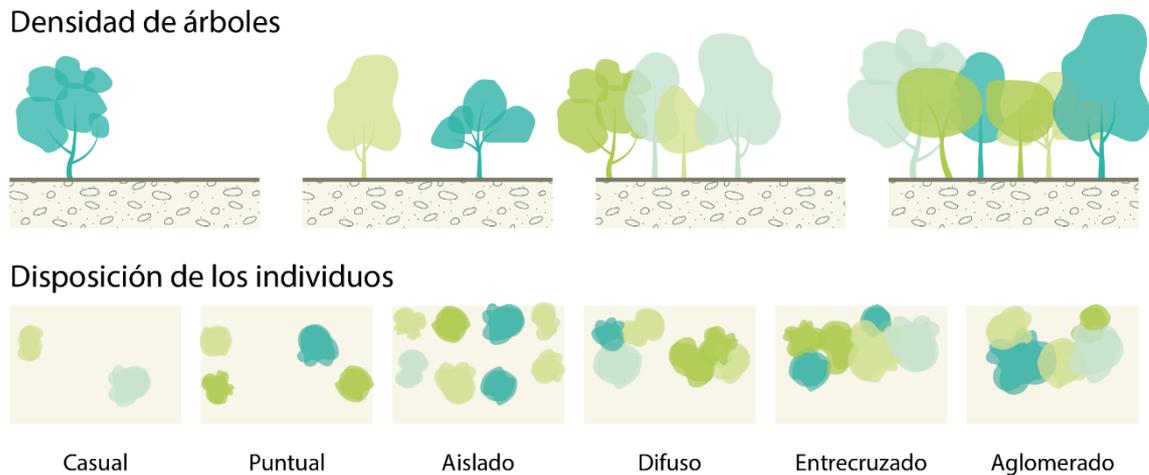
Fuente: AYMA-ROMAY (2021 p. 13)

2.1.2 Arborización

La arborización tiene vital importancia en la cualificación de los espacios libres urbanos y contribuyen a “refrigerar la ciudad”. Abreu (2008), destaca la acción de conservar energía por la protección solar a casas individuales y la acción de evotranspiración para reducir las temperaturas urbanas que reducen la velocidad del aire, filtran contaminantes, absorben agua de lluvia y estabilizan el suelo para impedir la erosión.

Así, podemos distinguir dos tipos de aplicaciones de la arborización pública en la ciudad: en el sistema vial (superficies lineales, siguiendo el eje de vías) o corredores ecológicos y en espacios públicos abiertos (EPA) o parques (superficies compactas). Estos planes de arborización según Peixoto et al. (1995); Labaki et al. (2011), deben considerar el tipo de composición de los individuos arbóreos (puras, mixtas, homogéneas o heterogéneas), la disposición, la densidad y la forma (Figura 18). Shinzato (2014 p.26), también refuerza la efectividad de la densidad foliar del dosel de la planta en los procesos de evaporación y sombreado de la cobertura del suelo, más que la distribución espacial de la vegetación (parque lineal, pequeños grupos, gran masa).

Figura 18. Composición de individuos arbóreos



Fuente: Adaptado de PEIXOTO; LABAKI; SANTOS, (1995 p.634)

Arborización vial

La vegetación existente y propuesta en el sistema vial abarca un componente de revegetación, estrategia a ser adoptada en contextos urbanos integrados al uso, ocupación y función de objetivos paisajísticos. Sin embargo, pensando en un contexto de ciudad informal, Duarte (2016), apunta al incremento de pequeñas áreas verdes que pueden significar: muros verdes, parques biodiversos, jardines comunitarios, huertos urbanos, parques lineales, terrazas, jardines en la azotea y mejorar calles estrechas, callejones o pasillos (Figura 19). Característica predominante en el contexto de ciudades con legado colonial (calles estrechas).

Por su parte, Junior (2016), desarrolló el método ArbVias¹⁵, que ejemplifica una secuencia de diseños de vías arborizadas con árboles dispuestos en distintas maneras: arborización continua en los dos lados de la calle, discontinua, continua en un solo lado, continua solo en la jardinera central (Figura 20). Resultado de este estudio es que el sistema viario de Sao Paulo alcanza el 17% del área total del municipio, confrontando al 2% de área entre plazas y jardines, atribuyendo así a este espacio libre público (sistema vial) en la ciudad, una contribución significativa en la configuración paisajística ambiental, conectividad e interacción con todo el ambiente

¹⁵ Método de evaluación cuantitativa y de visualización de la distribución de la arborización de vías públicas en Sao Paulo a través de SIG y distingue atributos en cuatro valores: vía muy arborizada, medianamente arborizada, poco arborizada y sin o casi sin arborización.

urbano, en suma, una mejora en la calidad del ambiente para los habitantes y mejora de escenarios y paisaje para la ciudad.

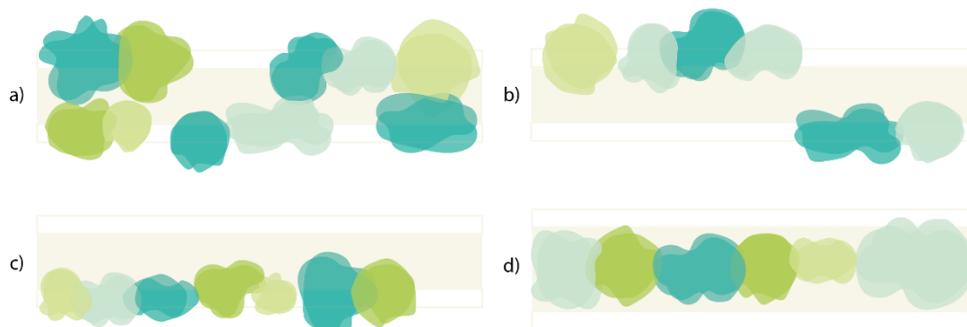
Los árboles estructuran los espacios libres del sistema viario con morfología propia, son elementos articuladores en la organización de espacios libres como en la conformación del paisaje, promueven conexiones que permean toda la ciudad (JUNIOR, 2016 p.65)

Figura 19. Áreas verdes en la ciudad



Fuente: <wikipedia.org> Acceso en septiembre 2023

Figura 20. Mapeamiento de árboles en el sistema vial



Fuente: Adaptado de JUNIOR, (2015 p.105)

Este beneficio no solo contribuye en el aspecto biofísico de la ciudad sino, influye positiva y directamente en los habitantes, tal es el caso en China, donde el estudio de Bai et al. (2022), comprobó (a través de un análisis de imágenes de *street-view*), que enverdecer las áreas urbanas mejora el comportamiento de la movilidad

activa (*active travel- AT*) que realizan los estudiantes en HEMC¹⁶, demostrando que la exposición a las áreas verdes de la calle impacta significativa y positivamente en su disposición, mejora el atractivo de las calles para los peatones y las condiciones de caminabilidad y ciclismo siendo este punto focal en la planificación urbana de las ciudades.

Según el estudio de (SCIARAFFIA, 2019), se propone una narrativa visual sobre la importancia de incorporar inteligencia espacial para planificar el paisaje urbano y mitigar las variaciones climatológicas que enfrentaba Santiago de Chile, con el registro de ondas de calor en 2015. En su estudio, a través de fotogramas de un video educativo (de difusión a diversos públicos), mostró la relación de diferentes escalas entre la temperatura urbana e infraestructuras verdes (Figura 21).

Figura 21. Fotograma de la medición de arborización urbana en trama vial



Fuente: SCIARAFFIA (2019 p. 55)

Corredor ecológico

Según los rasgos morfológicos, fisiológicos y fenológicos de las plantas, se puede incrementar la cantidad y calidad de los espacios verdes usados por los ciudadanos, siendo recomendable articular y conectar con “corredores ecológicos” las diversas áreas de trabajo y residencias. Otros autores refieren esta acepción con términos como *linking street greenery* según Bai et al (2022), corredores verdes o conexiones en el paisaje, según Coelho et al. (2021), articulador de flujos peatonales

¹⁶ Guangzhou Higher Education Mega Centre in China.

y paseos según Padilla (2010) en el caso de la rambla de Barcelona. También Macedo (1995), sostiene que las vías tienen la posibilidad de una diversidad de usos.

La articulación de zonas verdes garantiza la presencia de naturaleza y sus beneficios respecto a la ornamentación, recreación, mejora en las condiciones del microclima local, reducción de contaminación ambiental, filtro y freno a la velocidad del viento, amortiguación de ruidos, desarrollo de vida animal, efecto psicológico benéfico para la población (HIGUERAS, 2006 p. 175).

Este tipo de arborización vial, representa un *layout* de verde urbano para la propuesta en el centro histórico de la ciudad de Tarija, en el presente estudio.

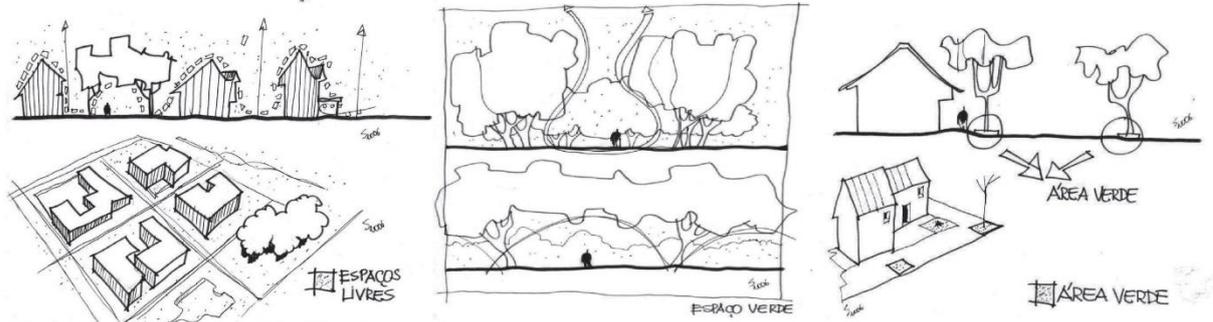
2.2 Área verde/Espacio Público Abierto (EPA)

Silvio Macedo¹⁷ realiza una distinción importante entre el espacio verde y área verde, debido al fuerte vínculo asociado a la dimensión social, es decir, lo que resulta en el “espacio” a partir de la interacción del habitante urbano (no considerando una jardinera de avenida o rotonda como área verde porque no equivale a una plaza). En sus palabras refiere al área verde como “toda y cualquier área plantada, teniendo un significado social expresivo o no” (MACEDO, 1995 p.20). Los espacios verdes (área urbana o porción de territorio con vegetación y con valor social) y el área verde (cualquier área que tenga vegetación ej. plazas, parques, huertas y bosques).

Medeiros (2016), también coincide que el término “área verde” se diferencia de “espacio verde”. El autor, sostiene este criterio apoyado en la relación entre el espacio y sus componentes: espacio libre, espacio verde y área verde según HIJIOKA et al., 2007) (Figura 22), donde el espacio verde predomina la vegetación (avenida arborizada) y el área verde, podría no contar con área permeable, ni área plantada. De este modo, la noción de Sistema de Espacios Libres según (MEDEIROS, 2016 p.38) propone la “creación de una red de espacios con calidad ambiental en el contexto regional y atender a la población urbana de forma más consciente”.

¹⁷ Arquitecto paisajista brasileño destacado en el área de paisajismo y arquitectura urbana. Sus estudios abarcan los procesos urbanos y espacios libres hasta la creación de parques posmodernos.

Figura 22. Espacio libre, espacio verde y área verde



Fuente: HIJIOKA et al. (2007, p.119)

Entre los múltiples beneficios del área verde, Calle (2022), afirma que tan solo con el aumento del 1% de áreas verdes, se incrementa entre el 0.3 a 0.5% promedio en la plusvalía de la vivienda. En el caso de Londres, se incrementó entre 5 a 15% después de la transformación del espacio público, esto representa un impacto directo en la economía local. Otro indicador es el % destinado al espacio público en las ciudades, siendo la mejor proporción de 50%, 35% en ciudades como Manhattan, Bruselas y Barcelona.

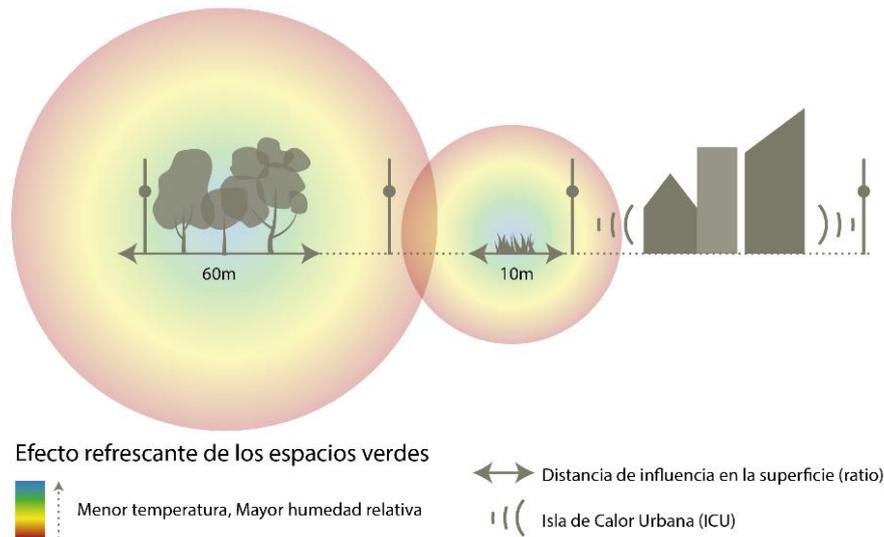
En términos de mercado de suelo, las áreas verdes próximas a los emprendimientos urbanos aportan una plusvalía favoreciendo la dinámica económica local en zonas residenciales. La inversión en espacios verdes (por iniciativa pública y propietarios privados), incrementa el confort humano y su calidad de vida debido a la significativa reducción de días de calor, por el beneficio del enfriamiento (CAVAN; KAZMIERCZAK, 2011).

Por otro lado, Grilo et al., (2020) demuestra que los espacios verdes influyen en la temperatura y humedad relativa en un radio aproximado de 60mt. del límite del parque y una densidad menor de vegetación, influencia hasta en 10mt alrededor (Figura 23). De igual manera se define a las “zonas de influencia” como *ratio* de área de parque para cada barrio a menos de media hora de paseo, por la distribución de pequeños parques interiores conformando una red de paseos verdes, esta concepción, recogida por JIMÉNEZ & DE LAS RIVAS (2018).

En el caso de Tarija, el reglamento de urbanizaciones estipula el 15% de cesión por concepto de área verde que actualmente es compartido con el uso de equipamiento, es decir, corresponde el 10% a área de equipamiento (escuela, mercado, centro de salud, otro) dejando un saldo de solamente 5% para el área verde,

o en su defecto 0% de cesión por la posibilidad de aplicar el pago de justiprecio¹⁸, sin embargo esos recursos financieros, no son reinvertidos en áreas verdes, los fondos no se destinan a la adquisición y/o mantenimiento de áreas verdes, este modelo, acentúa el déficit de área verde por habitante. La ONU recomienda hasta 12m²/hab. de vegetación, la Sociedad Brasileira de Arborización Urbana sugiere 15m²/hab. de áreas verdes.

Figura 23. Efecto de enfriamiento de los espacios verdes



Fuente: GRILO et al. (2020 p.1)

En la ciudad de Lisboa, Santos, Silva, Tenedório (2019) realizaron el cálculo de área verde per cápita anual a través del indicador *NDVI* (utilizado como parte de la metodología y desarrollada en los siguientes capítulos), obteniendo como resultado 2.211 ha. de área verde que representa el 26% del total de la ciudad y 43m²/hab. de área verde dentro de la jurisdicción urbana. Muy por encima del mínimo recomendado, lo importante en esta cuantificación es que garantizar un sistema de áreas verdes, entendido como parte integrante del sistema de espacios libres (MACEDO, 1999; LONDE & MENDES, 2014).

Aumentar la provisión de espacios verdes puede mejorar la temperatura de las áreas urbanas, por lo tanto, reduciendo el estrés por calor. Se ha encontrado que los parques urbanos pueden reducir el ambiente diurno temperatura en un promedio de 0.94°C; con una reducción media nocturna de 1,15°C. Tiempo El modelado encontró que un aumento del 10% en las áreas urbanas densas de áreas verdes de Gran Manchester podría retener las temperaturas máximas de la superficie en o por debajo de la línea base

¹⁸ Media entre el valor catastral y valor comercial del inmueble.

de 1961-1990 hasta la década de 2080 para todos los escenarios de emisiones, mitigando así los efectos del cambio climático (EU, 2020 p.26).

En ese sentido, las políticas públicas para las áreas verdes, traen implicaciones microclimáticas positivas para la ciudad. Para Junior (2016), significa mejores políticas “micro-topoclimáticas”. Higuera (2006), recomienda tres principios para el diseño de nuevas zonas verdes: el factor tiempo (proceso dinámico de la naturaleza); la economía de medios (optimizar los recursos disponibles en cada lugar) y biodiversidad (protección del ecosistema urbano y ambiental).

El término de Espacio Público Abierto (EPA), según Romero (2015), se refiere a las grandes áreas libres de ocio que urbanísticamente hacen la idea de plaza, y que cumplen con dos factores referenciales: la ubicación (espacio) e identificación (función).

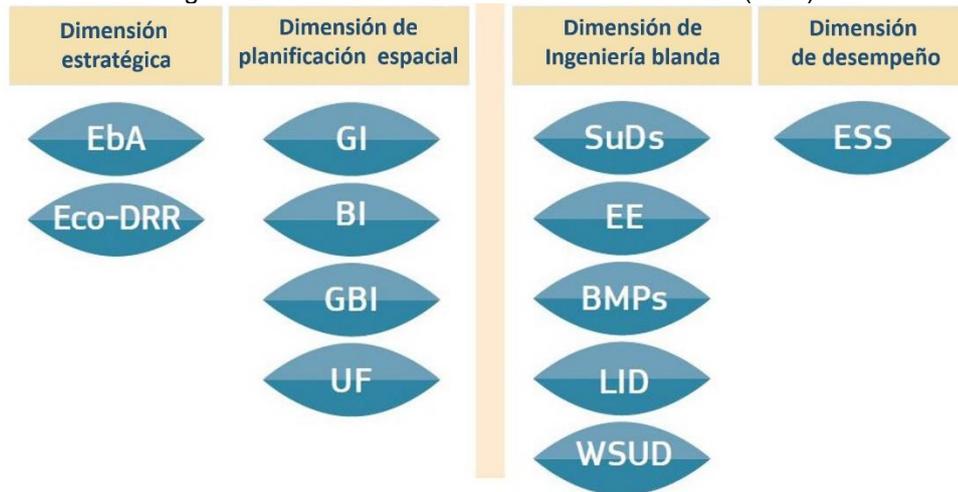
2.2.1 Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)

La estrategia de biodiversidad para el 2030 de la Unión Europea, reconoce el valor y el potencial estratégico de las áreas verdes urbanas, incluso cuando sean de gran extensión (parques) (EU, 2020). La Comisión Europea define las SBN, como soluciones inspiradas y apoyadas por la naturaleza, que son rentables y proporcionan simultáneamente beneficios ambientales, sociales y económicos y contribuyen a aumentar la resiliencia. Tales soluciones “aportan más naturaleza y características naturales en las ciudades, los paisajes terrestres y marinos, a través de intervenciones adaptadas localmente y son eficientes en cuanto a recursos e intervenciones sistémicas” (EU, 2021 p.17).

Según Escobedo et al. (2019), el concepto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) o *Nature Based Solution (NBS)* en inglés, expresa ideas semejantes a silvicultura urbana, infraestructura azul e infraestructura verde (*Blue-green infraestructura*), y a los servicios ecosistémicos.

El mismo reporte (EU, 2021) sostiene que los cuatro servicios ecosistémicos de la naturaleza, provisión, regulación, soporte y cultura están inmersos dentro de las soluciones multifuncionales previstas en cuatro dimensiones: la estratégica, planificación espacial, ingeniería blanda y de rendimiento (Figura 24).

Figura 24. Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN)



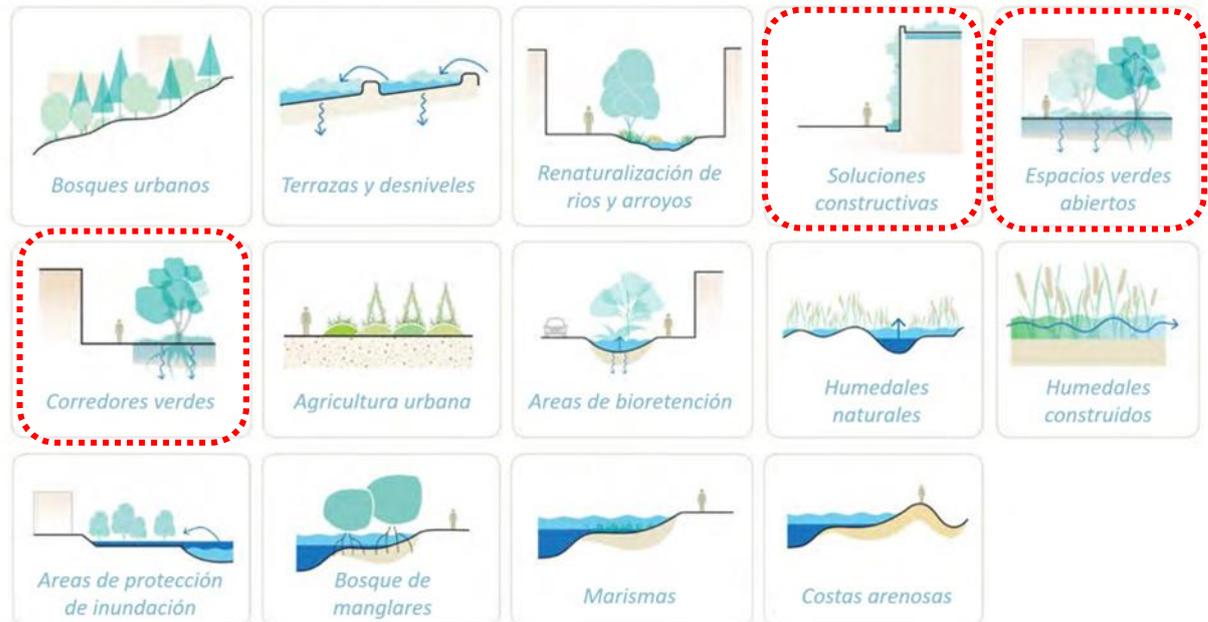
Fuente: Adaptado de EU (2021 p.19). EbA=Ecosistema base de adaptación; Eco-DRR=ecosistema base del desastre y reducción de riesgo; GI=infraestructura verde; BI=infraestructura azul; GBI=infraestructura verde-azul; UF=silvicultura urbana; SuDS=sistemas sostenibles de drenaje urbano; EE=ingeniería ecológica; BMPs=mejores prácticas de gestión; LID=diseño de bajo impacto; WSUD=diseño urbano sensible al agua; ESS=servicios ecosistémicos.

Las SBN, aplicadas para la urbanización sostenible, dependen en gran parte de las características naturales dentro y fuera de las ciudades para realizar los servicios ecosistémicos esenciales. El informe europeo destaca tres principales estrategias de oportunidad: primero, refiere al desarrollo económico de las áreas urbanas dependiente de sus recursos naturales disponibles (agua, para saneamiento); segundo, planificación urbana sostenible con SBN tiene un impacto positivo en el medio ambiente y tercero, contribuir a la dimensión social (salud, felicidad) (EU, 2021).

El Banco Mundial en su reporte del 2021, enfatiza sobre los beneficios que aportan las SBN a la ciudad, desde una dimensión social, como la reducción de riesgo de desastres y aumento de la resiliencia climática, además de restaurar la biodiversidad, mejorar la salud humana, la seguridad hídrica y alimentaria y apoyar el bienestar y medios de vida de la comunidad.

Para la resiliencia urbana, las SBN, pueden aplicarse en todas las escalas espaciales y entornos urbanos, por ejemplo, los espacios verdes abiertos de pequeña escala en edificios, los corredores verdes a lo largo de calles, parques y bosques urbanos en los límites de la ciudad, humedales, etc. (Figura 25). La estrategia SBN utiliza la misma estructura natural para fomentar estructura verde y crear corredores verdes (animales transitan de un a otro sentido, menos polución) (FERREIRA, et al., 2021). En este estudio, se propone soluciones remarcadas en rojo, que corresponden a corredores verdes y espacios verdes abiertos.

Figura 25. SBN para aplicación urbana



Fuente: WORLD BANK, (2021 p.10)

Actualmente se considera el término *Natural Climate Solutions (NCS)*, como una NBS que aborda específicamente el cambio climático, con el mismo objetivo de lograr resiliencia mientras se producen beneficios sociales, ambientales y económicos. Estas terminologías son cada vez utilizadas por organizaciones globales.¹⁹

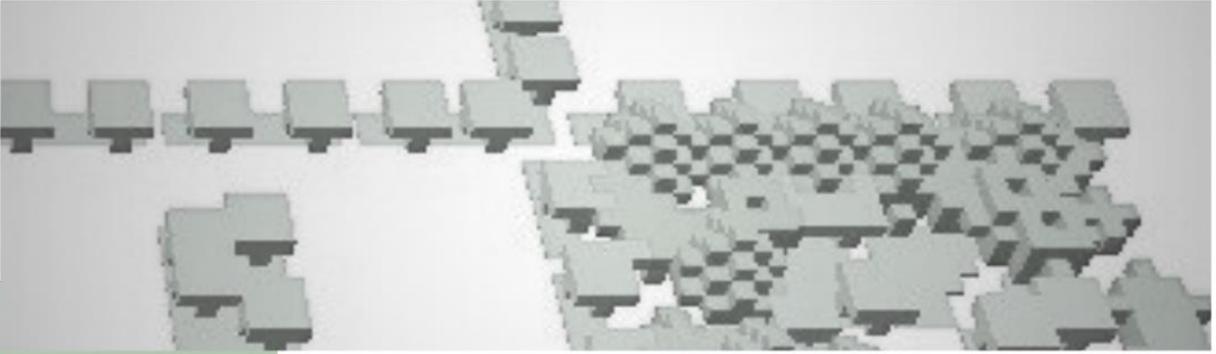
¹⁹ Disponible en: <https://www.nature-basedsolutions.com/>

2.2 Resumen del capítulo

En el capítulo sobre verde urbano se revisaron conceptualmente las aportaciones de diferentes estudios sobre la vegetación urbana predominantemente en el espacio público de la ciudad, es decir, respecto a su uso en arborización vial, caracterización y fisiología de los árboles y como elementos individuales por sus características singulares (individuos arbóreos + tipología). Respecto al término de área verde, se revisó el sistema de esos elementos individuales (áreas de vegetación + uso). Con la revisión se consideraron los múltiples abordajes del rol que desempeña la vegetación como estrategia de mitigación y su amplio alcance de implementación en los centros urbanos. Con esta tesis se espera que la vegetación sea considerada como elemento articulador del componente de biodiversidad, flora y fauna de aves en los árboles; del componente social para activar la vida urbana y ocio y por fin, el componente bioclimático por amenizar el microclima urbano a escala de peatón.

Fue importante destacar el rol del EPA y su función dentro de un sistema de espacios libres en la ciudad. Abordar el tópico fue de extrema relevancia porque guarda una estrecha relación con el clima urbano, toda vez que su análisis evalúa factores ambientales del clima con los componentes fisiológicos y constitutivos de la vegetación urbana y sus atributos para el espacio público abierto (EPA) beneficiosos para la ciudad.

Las soluciones basadas en la naturaleza se destacan en el estudio por responder a una práctica aplicación urbana en la construcción, en los espacios verdes abiertos y corredores verdes.



FASE II

METODOLOGÍA

FASE II. MEDODOLOGÍA

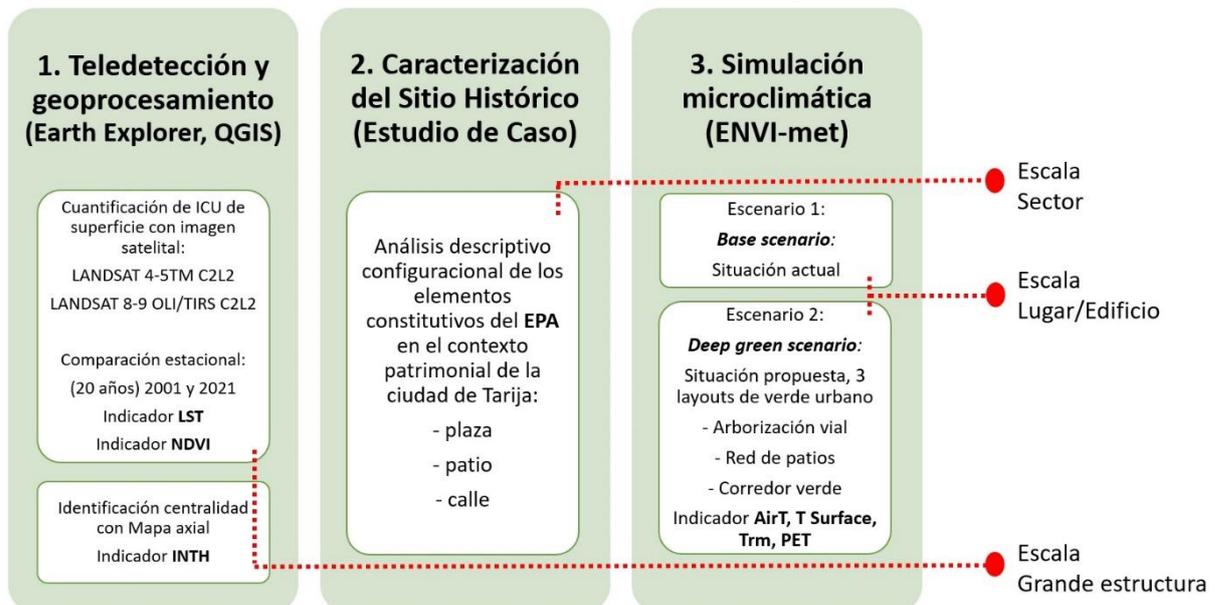
Para el desarrollo del proceso metodológico, se propone dos dimensiones de estudio y análisis dentro del método de investigación-acción, la primera consiste en un estudio de **carácter deductivo** (de mayor a menor escala) y segundo, un **análisis integrado escalar** que consiste en articular diferentes tipos de clasificación de escalas, sean estas de orden climática, espacial o sensorial en un determinado contexto territorial.

Para delimitar el contexto territorial, se define el caso de estudio en el contexto **patrimonial**, el corazón urbano o centro histórico de la ciudad, pudiendo complementarse en trabajos futuros en otros contextos territoriales o usos de suelo, como, el industrial, residencial, etc.

Las escalas identificadas corresponden a:

- Escala espacial: ciudad intermedia (WORLD BANK GROUP, 2017).
- Escala climática: microclima (OKE, 2004).
- Escala sensorial: grande estructura, sector, lugar, edificio (ROMERO, 2011).
- Contexto territorial: centro histórico patrimonial (GAMT, 2010).

Gráfico 3. Procedimiento metodológico



Fuente: Autora, 2022

3. PROCESO METODOLÓGICO

El análisis integrado escalar, se basa en la clasificación de escala sensorial propuesta por ROMERO (2011). Para ilustrar los procedimientos metodológicos se presenta el flujograma metodológico en Gráfico 3.

3.1 Definición de polígonos de estudio

Tarija como ciudad intermedia, ubicada al sur de Bolivia, se consolida de forma dispersa y la extensión de la mancha urbana presenta un “crecimiento caótico..., ocupa en los últimos 30 años un 917%...provocando impactos medioambientales, económicos, sociales muy preocupantes” (GAMT, 2023 p.73). La Figura 26 presenta el plano de Tarija con el límite de la mancha urbana.

En Figura 27, se identifican cuatro polígonos que definen el área de estudio y análisis en este trabajo de investigación. El de mayor superficie (en rojo), corresponde al ecosistema urbano conforme la matriz biofísica y compartimento geo ambiental; el polígono (en amarillo), corresponde al límite de la mancha urbana conforme a la delimitación municipal²⁰; el polígono (en azul), corresponde al área monumental patrimonial del centro histórico, definido también por el municipio y finalmente el polígono (en verde), que corresponde al recorte para la simulación computacional para el análisis comparativo (real y propuesta) de verde urbano en el centro histórico, con la definición de escenarios de simulación detallado en figura 52. Los polígonos del ecosistema urbano (grande estructura) y el de simulación computacional (lugar) son propuestos, los polígonos de límite radio urbano y área patrimonial (sector) son ya definidos.

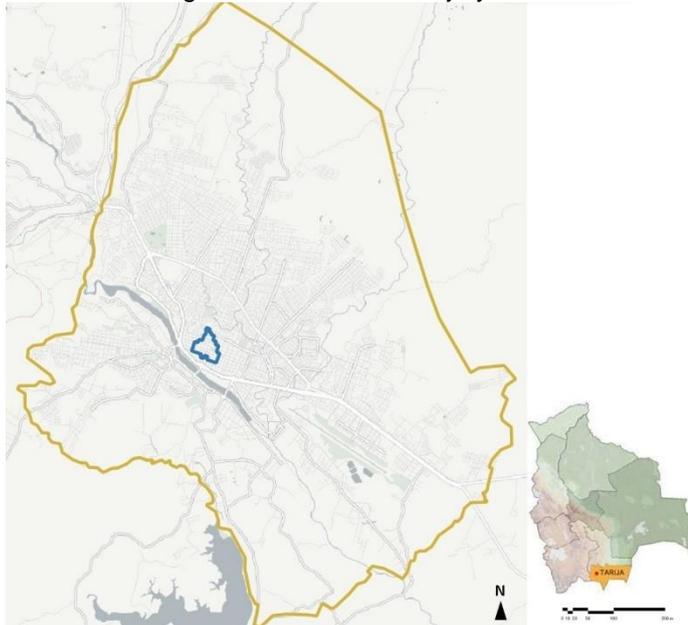
Dentro del polígono de lugar o recorte para la simulación computacional, que considera la estrategia de mitigación de ICU emplazada en el contexto patrimonial del centro histórico de la ciudad, se incorporan **tres layout de verde urbano** denominado

²⁰ Homologado por Ley Municipal N°110, complementaria Ley Municipal N°118 de 2016.

Escenario 2: *Deep green scenario*. Ambas consideraciones se detallan en los siguientes apartados.

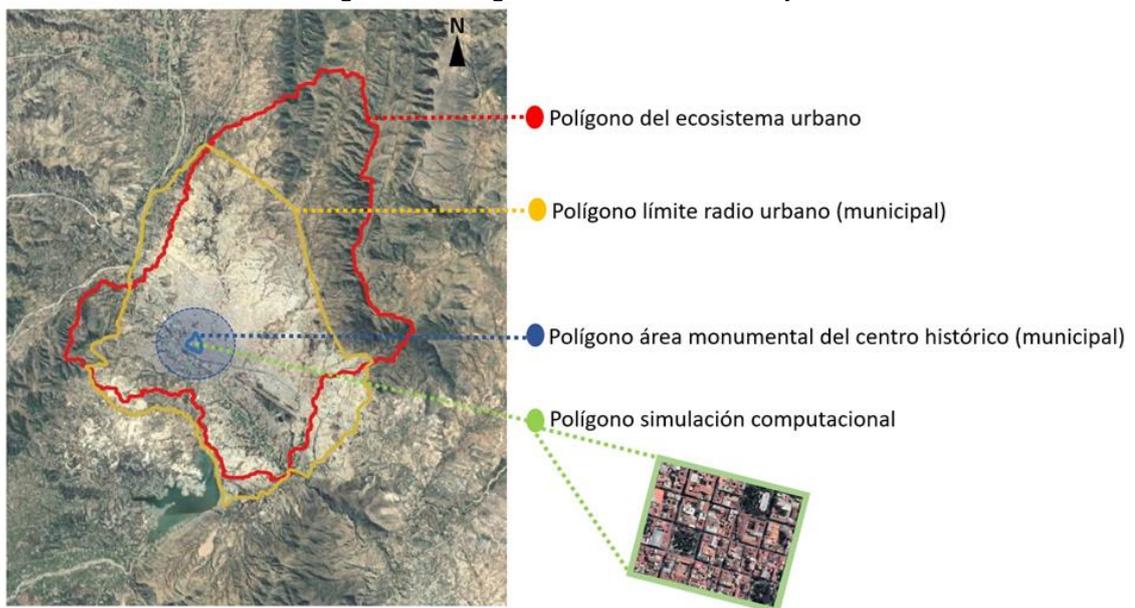
En ese contexto y para el desarrollo de la tesis y cumplimiento de los objetivos trazados, se organiza a través de tres procedimientos metodológicos según la escala de percepción sensorial: grande estructura con teledetección y geoprocесamiento; sector con caracterización patrimonial y lugar/edificio con simulación microclimática.

Figura 26. Plano de Tarija y área de estudio: centro histórico



Fuente: Autora, 2022

Figura 27. Polígonos de estudio en Tarija



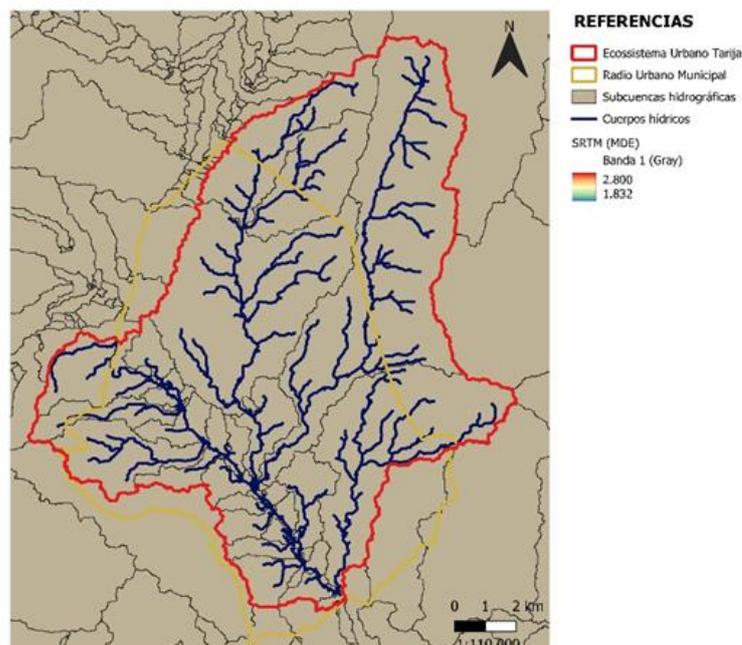
Fuente: Autora sobre imagen satelital. Earth Explorer 2022

3.2 Grande estructura

El estudio parte de una observación general de la ciudad de Tarija, para eso se propone la definición de un primer polígono de análisis basado en la matriz biofísica y definido a partir de las subcuencas hidrográficas, como límite natural que corresponde al desempeño ambiental.

El procedimiento asumido para esta definición de polígono, denominado: Ecosistema Urbano (a escala de grande estructura), consistió en extraer el satélite SRTM (S22W065) de la plataforma Earth Explorer, para obtener el Modelo Digital de Elevación (MDE). A partir del mapa de pendientes, en una primera fase de preprocesamiento; posteriormente generar las cuencas hidrográficas con la herramienta: *watershed* en el software *Quantum GIS* o QGIS²¹ 3.22.10, para la identificación de cuerpos hídricos y subcuencas sobre ese mapa de pendientes, como una segunda fase de procesamiento. Finalmente, de manera manual fueron seleccionadas las subcuencas que forman parte dentro del límite del radio urbano (municipal) y según observación de los cuerpos hídricos, esta composición definió el límite del ecosistema urbano (Figura 28).

Figura 28. Subcuencas hidrográficas en Tarija



Fuente: Autora, 2021

²¹ Programa de código abierto y gratuito para procesar datos geoespaciales, un Sistema de Información Geográfica (SIG).

La definición de este límite no podría considerarse como una alternativa para ampliar el radio urbano municipal, porque actualmente, el área urbana de la ciudad, cuenta con áreas vacantes y bolsones urbanos que debieran ser ocupados, es decir, existen vacíos urbanos, lotes baldíos que mal funcionan en la ciudad con la finalidad de “engorde” para la especulación inmobiliaria y contribuye a la segregación urbana. Por tanto, la definición de este polígono obedece a un criterio ambiental, superior a las directrices o lineamientos políticos de extensión territorial.

Teledetección y selección de imagen satelital.

El uso de imágenes satélite contribuye de manera significativa al estudio más detallado del clima urbano, conduce a la elaboración de documentos con la distribución espacial y sus elementos (flujo de energía del ambiente urbano). Por su parte, el uso de imágenes LANDSAT (Tabla 6) y SPOT en el estudio de las ciudades, es satisfactorio para la identificación y análisis del uso y ocupación del suelo, la distribución de construcciones, biodiversidad, morfología, funcionalidad, polución, etc.(MENDONÇA, 2003).

Tabla 6. Características de Imágenes LANDSAT

Sensor	Bandas espectrales	Resolución espectral	Res. espacial	Res. temporal	Área de la imagen	Resolución radiométrica	
OLI (Operation al Land Imager)	(B1) AZUL COSTERO	0.43– 0.45µm	30 m	16 días	170x183 km	16 bits	
	(B2) AZUL	0.45-0.51 µm					
	(B3) VERDE	0.53-0.59 µm					
	(B4) ROJO	0.64-0.67 µm					
	(B5) INFRAROJO PRÓXIMO	0.85-0.88 µm					
	(B6) INFRAROJO MEDIO	1.27-1.65 µm					
	(B7) INFRAROJO MEDIO	2.11-2.29 µm					
	(B8) PANCROMÁTICA	0.50-0.68 µm					15 m
	(B9) CIRRUS	1.36-1.38 µm					30 m
TIRS (Termal Infrared Sensor)	(B10) INFRAROJO TERMAL	10.6-11.19 µm	100 m				
	(B11) INFRAROJO TERMAL	11.5-12.51 µm	100 m				

Fuente: <engesat.com.br/imagen-de-satelite/landsat-8/>

Según (VOOGT & OKE, 2003), las imágenes de alta resolución espacial obtenidas por teledetección evalúan principalmente el comportamiento térmico de las superficies urbanas en relación a las características de la superficie como el factor visión de cielo (*SVF*, por sus siglas en inglés), materiales superficiales o *NDVI*.

Una aplicación práctica del mapeamiento a través de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección, puede auxiliar la visualización, análisis y síntesis de la arborización, más propiamente de la cobertura arbórea a lo largo del sistema viario urbano, según el método de ArBVías aplicado en el estudio de (JUNIOR, 2015).

Considerando que las primeras observaciones de isla de calor urbano de superficie (*SUHI*), basados en sensores satélites se reportan en la década de 1972 por Rao, en este trabajo se pretende componer los datos geoespaciales relevantes. Para la investigación se prepararon algunos mapas temáticos con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Según Zhou et al. (2019), existen tres principales razones para la utilización de imágenes LANDSAT, primero por ser el programa de mayor duración y observación ininterrumpida de la tierra, segundo, por el acceso libre de las imágenes a partir del año 2008 y tercero, porque las series de LANDSAT 5, 7 y 8 capturan la superficie de la tierra en un ciclo de 16 días con una cobertura de 185km * 185km que prevé procesar en una sola imagen los cambios de *SUHI*, es decir, la cobertura y uso de la tierra para así precisar los estudios del entorno urbano.

Para la selección de imágenes satélite LANDSAT, se optó por la búsqueda de imágenes en plataformas de descarga libre y gratuita: *Land Viewer*²² y *Earth Explorer*²³ y para la selección de imágenes se consideraron los criterios de temporalidad de 20 años (2001 y 2021) y disponibilidad a efectos de ser comparadas entre ambos años por los cambios de estación: otoño, invierno, primavera y verano. En ambos casos fueron seleccionadas las imágenes con resolución espacial de 30m y cobertura de nubosidad del 20%, obteniendo las descargas según especifica la Tabla 7.

En estas fechas se seleccionaron imágenes que pudieran representar las cuatro estaciones del año y el intervalo de tiempo del paso del satélite Landsat8 por el mismo punto (resolución temporal) de 16 días.

²² Disponible en: <https://eos.com/landviewer/>

²³ Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Tabla 7. Selección de imágenes LANDSAT

IMÁGENES LANDSAT						
Año	Satélite (Sensor)	Otoño	Invierno	Primavera	Verano	Plataforma
1985	LANDSAT 5 (MSS) T2	01/04/1985 03/05/1985	-	-	-	Land Viewer
2001	LANDSAT 5 (TM) T1	31/05/2001	03/08/2001	23/11/2001	07/01/2001	Land Viewer Earth Explorer
2021	LANDSAT 8 (OLI/TIRS) T1	20/04/2021	09/07/2021	29/10/2021	30/01/2021	Earth Explorer

Fuente: Autora, 2021

La comparación temporal de los índices de vegetación (NDVI) como de temperatura superficial del suelo (LST) sirven para verificar el grado de alteración o degradación en un periodo de tiempo, ya que la vegetación es el elemento más importante de los espacios verdes, “es un elemento vivo que tiene ritmos estacionales y un ciclo vital (demanda procesos de mantenimiento por pérdida de especies)” (BCN, 2020 p.56).

3.2.1 Temperatura Superficial del Suelo (*Land Surface Temperature – LST*)

El mapa de la temperatura de la superficie terrestre o temperatura superficial del suelo (*LST*), puede elaborarse manualmente siguiendo una secuencia de operaciones en la herramienta "*ráster calculator*" nativa del software QGIS²⁴.

Las ecuaciones y la lógica para producir la información de la temperatura de la superficie del suelo siguen la secuencia: (Reflectancia planetaria en la parte superior de la atmósfera ToA) -> (Temperatura de brillo - BT) -> (Índice de vegetación de diferencia normalizada - NDVI) -> (Proporción de vegetación - Pv) -> (Emisividad superficial - ϵ)-> LST.

La reflectancia planetaria en la parte superior de la atmósfera (Top of Atmosphere - ToA) se obtuvo a partir de los valores de radiancia que, a su vez, se consiguen a través de la conversión directa del Número Digital - DN mediante la siguiente ecuación (1) que se aplicó en el calculador de imágenes rasterizadas.

$$\text{Ecuación (1): } ToA = (M_p * Q_{cal} + A_p) / \sin(\theta E)$$

²⁴ O a través de plugins como el NITK RS&GIS versión 1.17.

Qcal corresponde a la imagen en Número Digital - DN (Banda 10), y Mp y Ap son datos previos al lanzamiento del satélite que tienen los valores que se encuentran en el archivo de metadatos de la imagen. La elevación solar (θE) también se adquirió en valores insertados en los metadatos de la imagen. El valor de reflectancia ToA se da en (Watts). Una vez obtenidos los valores de ToA, éstos se procesaron para generar la Temperatura de Brillo (BT) de la imagen mediante la fórmula (2)

$$\text{Ecuación (2): } BT = ((K2 / (\ln (K1 / "ToA"))) + 1)) - 273)$$

Donde, K1 y K2 son constantes específicas de la imagen que se pueden encontrar en el archivo de metadatos de la imagen.

Por último, el valor de *LST* se obtuvo utilizando la ecuación (3) en la calculadora de trama, que presentará resultados numéricos en °C.

$$\text{Ecuación (3): } LST = (BT / (1 + (0,00115 * BT / 1,4388)) * \ln(\epsilon))$$

Para producir la imagen de la temperatura de la superficie del suelo a través del plugin NITK RS&GIS, es necesario descargar del banco de complementos disponible en el software QGIS, y una vez instalado, sólo es necesario seleccionar las bandas que servirán de base de datos, además del archivo de metadatos, y luego seleccionar el producto deseado, que luego procesa la información y entrega la imagen final procesada con la temperatura final indicada en cada píxel en grados Celsius.

3.2.2 Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*NDVI*)

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o *NDVI*, en inglés, es una medida radiométrica adimensional que se utiliza para evaluar la presencia y la densidad de la cubierta vegetal, especialmente las copas de los árboles, y sus valores indican la abundancia relativa, la actividad de la vegetación verde y la radiación fotosintéticamente activa.

Su valor varía obligatoriamente de -1 a +1, cuanto más se acerque a 1, mayor será la densidad de la cubierta vegetal en la zona. Los valores cercanos a cero, o inferiores a cero, sugieren la presencia de zonas deforestadas o cubiertas por agua (NDOSSI; AVDAN, 2016).

El valor de NDVI se estima según la ecuación (4), que representa la simple relación entre las bandas del infrarrojo próximo (NIR) (Banda 05) y del rojo (Banda 04) (R) (JENSEN, 2009).

Ecuación (4): $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$

Donde:

RED = Banda Roja

NIR= Banda de Infrarrojo próximo

Para el caso de imagen satélite de LANDSAT8, con 30m de resolución, sería:

Banda 4: Rojo (RED)

Banda 5: Infrarrojo próximo (NIR)

Para producir la imagen se utiliza la herramienta "*raster calculator*" nativa de QGIS, donde se pueden seleccionar los archivos TIFF de las bandas deseadas, y operar sus valores numéricos en alguna fórmula específica, llegando al resultado de la operación en una nueva imagen con los valores calculados, que indican en este caso los valores numéricos de cada píxel indicando el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI), que representa la simple relación entre las bandas del infrarrojo próximo (NIR) (Banda 05) y el rojo (Banda 04) (RED) (JENSEN, 2009).

Una vez obtenida la imagen NDVI, era necesario obtener la imagen de la proporción de vegetación (Pv), que se obtiene mediante la ecuación (5).

Ecuación (5): $Pv = [(NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min})]$

La emisividad de la superficie (ϵ) se determina en función de la proporción de vegetación (Pv) (NDOSSI y AVDAN, 2016) y se define mediante la ecuación (6)

Ecuación (6): $\epsilon = 0,004 * Pv + 0,986$

Varios estudios refieren que analizan el estado de la vegetación natural o agrícola en imágenes generadas por sensores remotos. Estos sensores remotos pueden ser imágenes de satélites o de drones equipados con cámaras que capturan imágenes en la faja infrarroja, como cámaras NIR o Multiespectrales. El índice considera los valores de reflectancia en la banda roja e infrarroja. Como se indicó anteriormente, estos valores obtenidos varían entre +1 a -1, donde +1 significa una vegetación saludable y vigorosa, fotosintéticamente activa y -1 significa áreas muertas o donde no existe vegetación (áreas antropizadas)²⁵.

²⁵ Cuyas áreas originales fueron alteradas, por cambio de uso de suelo, relieve, etc.

3.2.3 Integración global y centralidad

Estudiar la configuración del espacio del pasado requiere no solamente una especial atención en su forma, sino una sensibilidad para sustraer las intenciones e interacciones de las relaciones sociales del binomio tiempo-espacio. Estudios históricos desde el punto de vista de la geografía, sostienen que el análisis del espacio y del tiempo, tomados como realidades puras desarticuladas de las relaciones y consecuentes formas de apropiación, no tienen relevancia para un análisis social, según Andrade & Brandão (2019).

Es preciso considerar el espacio y tiempo como productos sociales en su papel integrador y simbólico. El proceso de producción del espacio urbano y su conceptualización considera los postulados de la escuela de Chicago y destaca las contribuciones de los autores Henri Lefebvre analiza el centro urbano a partir de las transformaciones de la sociedad, Manuel Castells a partir de la década de 1970 considera la centralidad como un conjunto de elementos urbanos con contenido social y relaciones dialécticas y el geógrafo brasileño Milton Santos percibe el espacio a partir del sistema de fijos y flujos.

El análisis de la configuración y relación entre las partes, permite visualizar como un conjunto de elementos -vías- con contenido social y relaciones dialécticas interactúan respecto a los nodos dentro de una red urbana (sintaxis espacial).

Tras la elaboración del mapa axial, se puede interpretar la ciudad mediante un análisis diacrónico de la expansión urbana identificado en 8 periodos que marcan el crecimiento poblacional y extensión territorial en el municipio de Tarija, comienza con el núcleo fundacional en el año 1606, 1967, 1977, 1984, 1997, 2002, 2006 y 2020.

El método exploratorio se basa en la sintaxis espacial (HILLIER; HANSON, 1984; MEDEIROS, 2006) e involucra tres etapas: la interpretación morfológica a través del histórico de la ciudad; el análisis diacrónico de la expansión urbana y la correlación de variables configuracionales: geométricas, topológicas y cualitativas.

El análisis diacrónico, a su vez, comprendió cuatro procedimientos:

- Selección de la base cartográfica (imagen satelital) para la elaboración del modelo configuracional,

- Producción de la representación lineal de la red de caminos existente para cada año analizado; para la lectura de la configuración según la sintaxis del espacio,
- Procesamiento georreferenciado (en QGIS 2008 y Depthmap) de la representación lineal para la obtención de mapa axial.
- Obtención de variables configuracionales, geométricas y topológicas.

La representación lineal de la red de caminos que reflejan la expansión urbana de la ciudad, representada en una trama de ejes conectados y posteriormente procesada, se basó en los planos y datos catastrales del PMOT de Tarija en el año 2020. Con software QGIS asociado al programa Dethmap y recursos del complemento *Space Syntax Toolkit*, se calcularon las relaciones de interdependencia de los ejes. Mansilla; Medeiros (2021), desarrollaron este procedimiento con todas las variables mencionadas en el estudio.

3.3 Sector

En este apartado se destacan las características configuracionales del centro urbano como núcleo de formación y expansión de la ciudad, relacionado a los valores asociados al patrimonio arquitectónico, cultural y natural, según aportaciones de LA LEY DE INDIAS (1680), BARTALINI, 1990; AGUILERA, 1994; MEDEIROS, 2006; SANTOS, 2008; ROMERO, 2011; LOPEZ, 2013; MEDINA, 2017. Se esbozan dimensiones del paisaje urbano con los elementos constitutivos del espacio público abierto (EPA): calle, patio y plaza según ZUCKER, 1959; CULLEN, 1974; CAPITEL, 2005; MASCARÓ, 2005; BERJMAN, 2008; ROMERO 2011, 2013. El estudio de caso o sitio histórico, Área Monumental del centro patrimonial de la ciudad de Tarija revisa normativas, inventario según los planes de Ordenamiento Territorial y de Revitalización del centro histórico (PMOT, 2010; VMVU 1998). A colación, se destacan algunos estudios de intervenciones de buenas prácticas realizadas en los centros históricos según BHAKTI *et al*, 2021; MARTINEZ, 2021; DIAZ, 2022; LUX, 2022. Con esta revisión, se estudia el contexto territorial de centro histórico para la propuesta de verde urbano, sus principales limitaciones y potencialidades.

3.3.1 Sitio histórico – Estudio de caso: Tarija, Bolivia

Tarija, ubicada al sur de Bolivia, “tiene un tamaño modesto en comparación con otras capitales departamentales que se desarrollan y modernizan durante la primera mitad del siglo XX” (D’ANDREA; MARTIN, 2007 p.40).

La ciudad de Tarija fue fundada el 4 de julio de 1574 con el nombre de “Villa de San Bernardo de la Frontera de Tarixa” por el capitán Luis de Fuentes y Vargas (hidalgo sevillano) que funda la nueva población en la ribera izquierda del Río Guadalquivir según las órdenes del virrey Álvarez de Toledo (22 enero de 1574) (según documentos de P. Antonio Comajuncosa y Alejandro Corrado).

El tejido inicial de Tarija en 1574 se extendía unas 20 leguas (110km aprox) hacia el lado de los tomatas y unas 30 leguas (165 km aprox), hacia el lado de los chiriguano (indios de guerra). (El País, 2017)²⁶.

En los registros de los documentos Franciscanos, custodiados por el Centro Eclesial Documental (CED), recopilados por el Padre Lorenzo Calzavarini²⁷, figura la historia naciente de la ciudad de Tarija, que se identifica en dos épocas de desarrollo fuertemente marcadas (Figura 29), una la Tarija tradicional, con características coloniales hispanas (1574 año de su fundación a 1831) y la Tarija republicana después de la fundación de Bolivia hasta la revolución Nacional (1831 a 1952).

El núcleo fundacional de la ciudad comprende la Plaza Mayor como el centro de la estructura urbana en la época de la colonia. Para los ciudadanos, este núcleo en la actualidad posibilita la reunión de actividades sociales, políticas, culturales y ocio.

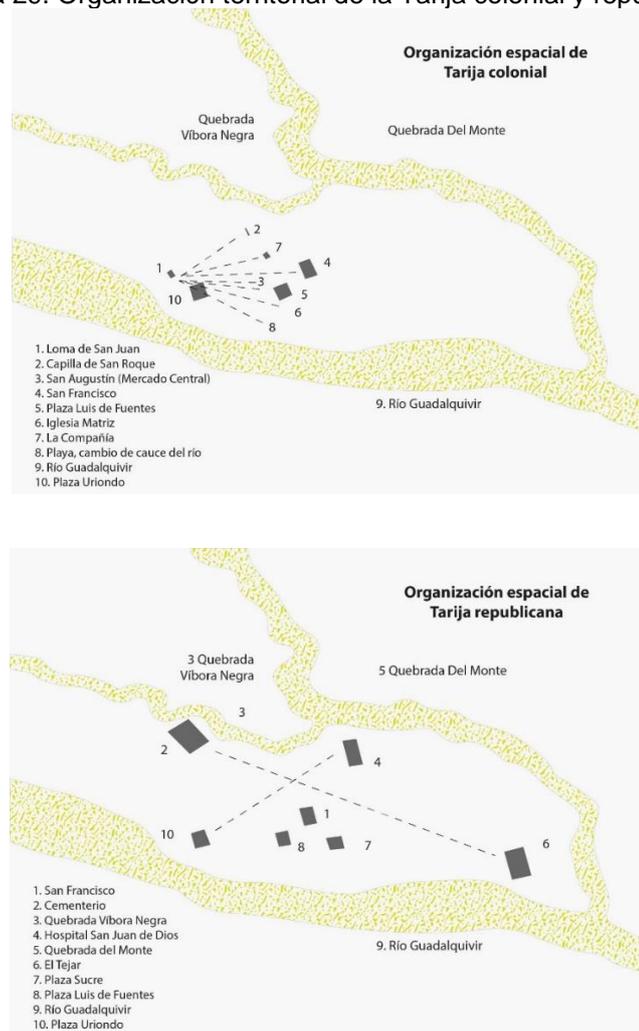
El damero de la Villa de San Bernardo, según las Ordenanzas de descubrimientos, nueva población y pacificación de las Indias del 13 de julio de 1573, Rey Felipe II según Elías Vacaflor Dorakis²⁸ (2010), establece la distribución de solares – cada manzano de 4 solares (Esquema de la Villa con 45 habitantes/fundadores).

²⁶ Disponible en: <https://www.elpaonline.com/index.php/noticiastarija/item/260153-la-fundacion-de-tarija-y-la-desaparicion-del-acta>

²⁷ Natural de Italia, ordenado sacerdote en 1966 y Dr. En Sociología. En 1973 fue destinado a Bolivia y en 1993 radica en Tarija. En 1994 funda el Centro Eclesial de Documentación, con la finalidad de preservar la memoria histórica-misional de los franciscanos en el sur de Bolivia. Permite la comprensión del aporte de la orden franciscana en la construcción socio-político-religiosa de la sociedad colonial y la sociedad boliviana (durante el periodo republicano).

²⁸ Historiador e investigador tarijeño.

Figura 29. Organización territorial de la Tarija colonial y republicana



Fuente: Adaptado de CALZAVARINI (2004) Apud. PMOT (2010, p.14)

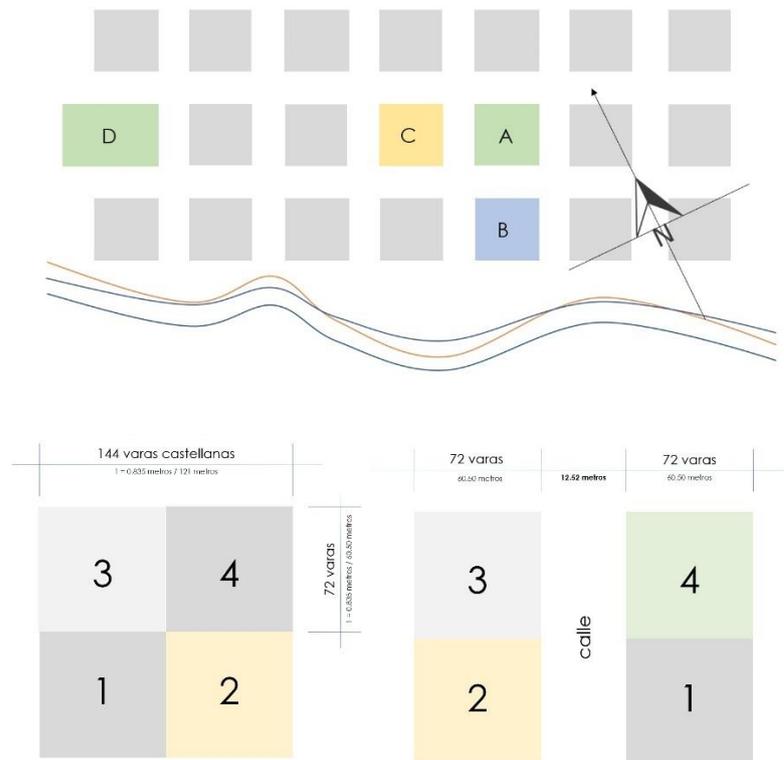
Según el esquema gráfico del damero (Figura 30), el manzano “A” es la Plaza Mayor, en el “B” está el Cabildo Capitular, el manzano “C” la Iglesia La Inmaculada de Nuestra Señora y Convento – Panteón de Santo Domingo extendidos en el eje del Río Guadalquivir rumbo sud oeste. Las dimensiones de los solares en el manzano corresponden en total a 144 varas castellanas (121 metros) y cada solar de 72 varas (60.50 metros).

El damero según los años 1690 a 1787 se constituía por el Palacio Consistorial (1784) – Edificio del Cabildo (1787) en el manzano “B”, en el manzano “C” la vivienda de la Familia Gorriti (1830) – Iglesia Matriz y Panteón. "

“La historia señala que en el siglo XX la ciudad de Tarija registraba edificaciones de una sola planta, con construcciones de adobes caracterizadas por amplios patios y tradicionales huertas con naranjos y parrales”. (Montaño. Ecos de Tarija, 2017)²⁹

²⁹ Disponible en: https://elpais.bo/archivo-ecos-de-tarija/20170209_244738-las-plazas-que-dividieron-a-la-antigua-ciudad-de-tarija.html

Figura 30. Esquema del damero



Fuente: Adaptado de VACAFLOR (2010)³⁰

En las trazas de las ciudades de América, a lo largo del siglo XVI persisten retículas diseñadas a cordel y regla, siendo el modelo más repetido el de la cuadrícula, en damero con manzanas cuadradas (LÓPEZ, 2013).

Contexto Patrimonial

El Reglamento de Conservación de las Áreas Patrimoniales de Tarija, establece las acciones e intervenciones en los inmuebles y ambientes urbanos de las áreas patrimoniales de la ciudad (PMOT, 2010 p.7). Se distinguen en:

- Área patrimonial monumental, estructura central urbana cuyo perímetro alberga la trama urbana en damero. Esta cuadrícula se organiza en función al espacio abierto central – plaza mayor- como núcleo generador por la que la ciudad se extiende hacia los cuatro puntos cardinales. Concentra edificaciones de diferentes épocas.
- Área patrimonial complementaria, aun forma parte de la estructura urbana en damero. Difiere de la anterior zona por

³⁰ Presentación “El Marquesado del Valle de Tojo” en La Paz, Salta, Tarija desde Enero, 2010.

las características de los inmuebles que son de orden notable y popular. Pueden o no tener integridad formal con elementos relevantes que transforman la imagen urbana.

- Área de transición, es el sector que se delimita para proteger las áreas patrimoniales.
- Área de protección paisajística natural, se constituyen en sitios de alto valor paisajístico que identifican a la ciudad, Río Guadalquivir, Sella y Canasmoro.

Según la delimitación patrimonial del centro histórico especificadas en las normas del capítulo II y III del PMOT (2010) en Figura 31 se establece el núcleo fundacional con la plaza mayor (amarillo), área patrimonial monumental (gris oscuro), área patrimonial complementaria (gris medio), área de transición (gris claro) y área de protección paisajística natural por los afluentes del Río Guadalquivir rumbo sur oeste y quebrada El Monte rumbo noreste (amarillo claro), por sus características se constituyen en sitios con alto valor paisajístico que identifican a la ciudad.

Figura 31. Centro histórico patrimonial de Tarija



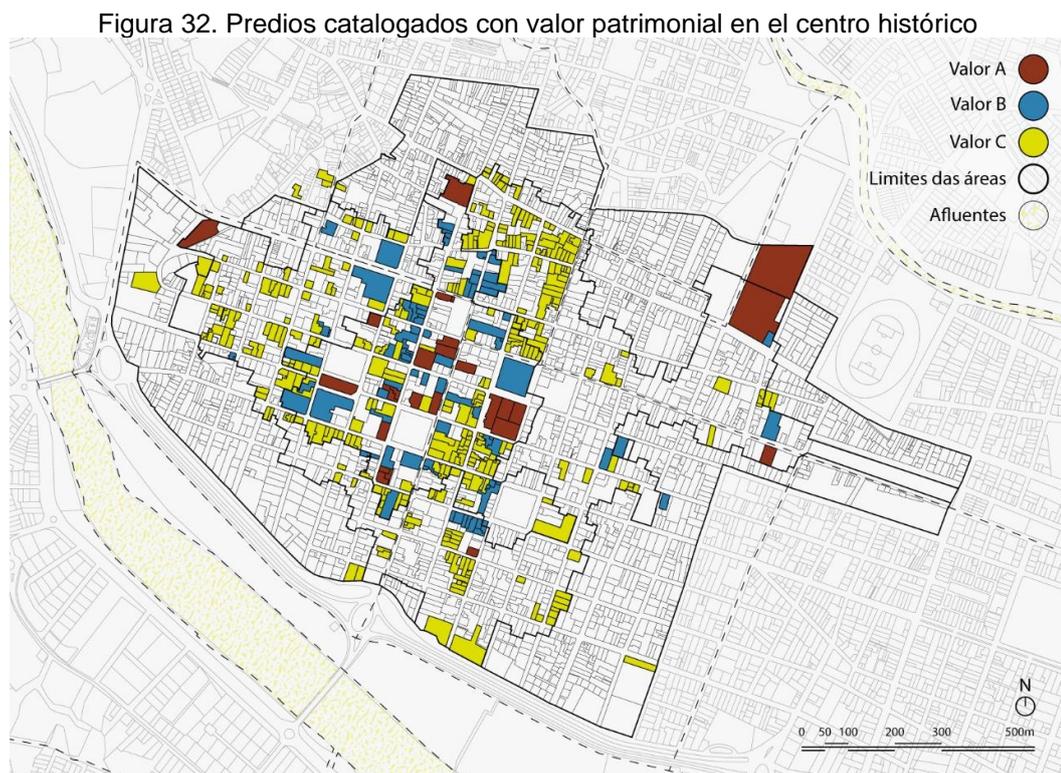
Fuente: Adaptado de PMOT (2010 p.8)

El EPA, plaza, incluso patios/jardines no se encuentran tipificados en ninguna clasificación de valor patrimonial, por este motivo, en este estudio se recomienda el reconocimiento del valor patrimonial natural en estos espacios públicos.

Según Paredes (2022), en la gestión 2007, se llevó adelante el inventario de patrimonio arquitectónico para la ciudad de Tarija, conforme establecía el PMOT. Del levantamiento realizado se obtuvo como resultado, inmuebles con valoración clasificada en cuatro categorías patrimoniales:

- Categoría A (Arquitectura Patrimonial de Excepcional Relevancia Nacional),
- Categoría B (Arquitectura Patrimonial de Relevancia),
- Categoría C (Arquitectura Patrimonial),
- Categoría D (Patrimonio en Ruinas), y adicionalmente las categorías de: Arquitectura Ambiental y Arquitectura Incompatible (Tabla 8).

En el centro histórico, se identifican inmuebles en cuatro categorías patrimoniales según el PMOT (2010 p.11), representan el valor: A, B, C, D (Figura 32 y Tabla 8) y se emplazan en la zona patrimonial y se contabiliza un total de 337 predios catalogados:



Fuente: Adaptado de PMOT (2010)

- Valor “A”. Arquitectura Patrimonial de Excepcional Relevancia Nacional, construcciones y espacios abiertos de cualquier corriente estilística que, por su historia, calidad formal, tecnológica, acontecimiento social y/o históricos, se destacan del conjunto a nivel nacional y merecen declaratoria específica, con 21 predios catalogados.
- Valor “B”. Arquitectura Patrimonial de Relevancia, construcciones y espacios abiertos de cualquier corriente estilística que, por su calidad y época constructiva, son considerados de valor por conservar, con 61 predios catalogados.
- Valor “C”. Arquitectura Patrimonial, construcciones y espacios abiertos de cualquier corriente estilística que por su calidad y época constructiva son un testimonio en la cultura, con 255 predios catalogados.
- Valor “D”. Patrimonio en ruinas, todos aquellos inmuebles en estado de ruina que formaron parte de la arquitectura monumental y que cuentan con significancia histórica.

Por su parte, la UNESCO constituye en 1993, el Grupo de Ciudades Patrimonio de la Humanidad de España para actuar en defensa del patrimonio histórico y cultural de 15 ciudades³¹ que cuentan con el reconocimiento internacional de declaración, lo que obliga el mantenimiento de los cascos históricos, la protección medioambiental y garantizar la protección y conservación de todos los valores del patrimonio edificado de carácter monumental. En América Latina se cuenta con 37 ciudades patrimonio (Brasilia, Cuenca, Potosí, Sucre, La Habana, Puebla, entre otras), reconocidas por la Organización de las ciudades del Patrimonio Mundial (OCPM).

También se destaca la importancia de revitalizar el centro histórico, como una acción que constituye una idea de puesta en valor de la historia urbana, para contribuir a la salvaguarda y resguardo del “patrimonio vivo”, es decir, el simbolismo del paisaje urbano ligado al patrimonio cultural requiere una vitalidad que fortalezca, mejore y reanime las funciones que allí se desenvuelven, a partir de la infraestructura (física) o

³¹ Disponible en: <https://www.ciudadespatrimonio.org/presentaciondelgrupo/index.php>

estrategias (iniciativas) económicas, turísticas, culturales, por ejemplo a través de la regeneración de espacios públicos.

Tabla 8. Ejemplos de inmuebles con patrimonio arquitectónico

INVENTARIO DE BIENES INMUEBLES			
Valor A			
Nombre/Año de construcción	Bernardo Trigo Raña (1879)	Iglesia Catedral de Tarija (1500)	Residencia Navajas (1910)
Valor B			
Nombre/Año de construcción	Sasy Attie Catrán (1900)	Marina Piñeiro Barrenechea (1942)	María Teresa Paz Martínez (1940)
Valor C			
Nombre/Año de construcción	Radio Fides (1942)	Humberto López Vargas (1932)	Segundino Cáceres (1997 refacción)

Fuente: Inventario PMOT (2010, fichas varias)

En Bolivia, el Plan de Revitalización de áreas centrales urbanas (1998), conceptualiza el área central urbana en tres componentes: localización física, área principal de administración pública (función) y como área emblemática de la ciudad (imagen), en ese contexto establece de manera urgente y amplia medidas de renovación urbana a partir del reconocimiento del valor patrimonial histórico de un edificio o conjunto urbano y evitar la degradación ambiental (GUARDIA et al., 1998).

Considerar la acepción de centralidad de forma inherente al centro urbano, va más allá del lugar geográfico, es analizada por su papel integrador y simbólico a través de un enfoque configuracional (sintaxis espacial) que revela atributos de su estructura jerarquizada según los grados de accesibilidad topológica y puede ser estudiada a través de la teoría de la lógica social del espacio propuesta por Hillier & Hanson

(1984). Además de preservar el acervo histórico de los edificios patrimoniales, aplicar una estrategia de mitigación de ICU a través de la vegetación, prevé integralmente la mejora de la calidad ambiental del centro histórico como parte del conjunto urbano.

Configuración Urbana

Una de las características formales de la configuración urbana con trazado en retícula, es su forma geométrica, predominante para la jerarquización de la estructura vial y tipología de vivienda homogénea (casa patio) subordinadas al espacio central. Según Higuera (2006), las ciudades griegas manifestaban su relación entre el medio natural y construido a través del *ágora* como principal espacio público. Las ciudades romanas con su tipología de residencia *domus* (una planta con patio en torno al *atrium* que recogía las aguas lluvia). Estructura en retícula adoptada por los españoles para las ciudades hispanoamericanas, donde se destacan la plaza de armas y manzanas rectangulares.

Para garantizar el reconocimiento de los valores patrimoniales del centro histórico es importante comprender la conformación del ambiente construido según sus elementos constitutivos en el paisaje urbano circundante. Esta consideración nos hará comprender que no se trata de identificar edificios o elementos aislados entre sí, sino conjuntos o unidades de paisaje para proponer a largo plazo, acciones que orienten la sostenibilidad de los centros patrimoniales.

Sin embargo, la lectura de la ciudad según su configuración puede auxiliar la reflexión de espacios urbanos, es decir, interpretarla en un sentido topológico (relación entre sus partes), según sostiene Oliveira (2016). Es decir, el enfoque configuracional revela atributos de la relación entre las partes del todo urbano, según su estructura jerarquizada y los grados de accesibilidad topológica en diferentes espacios abiertos de un asentamiento urbano.

Como se ha visto en el anterior subtítulo, el centro de Tarija se configura por la estructura de damero, actualmente los manzanos cuentan entre 80 a 100m de longitud y se extiende a lo largo del eje del Río Guadalquivir rumbo sud oeste (Figura 33). Esta configuración se constata a través de las imágenes del centro antiguo (Figura 34).

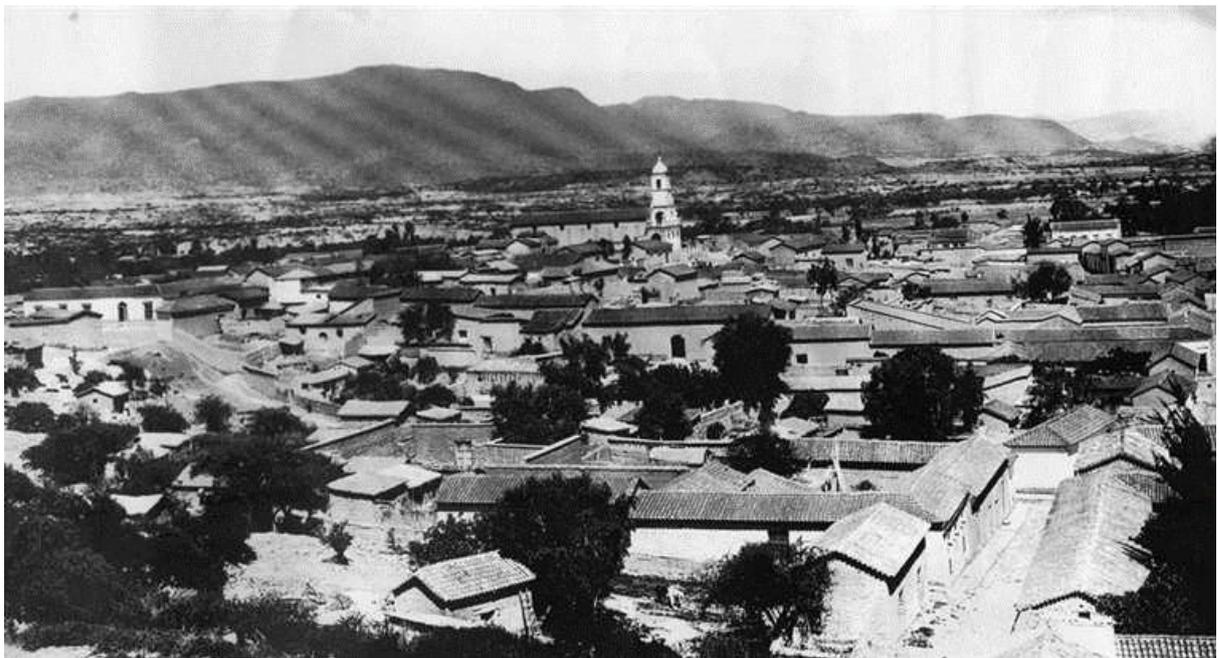
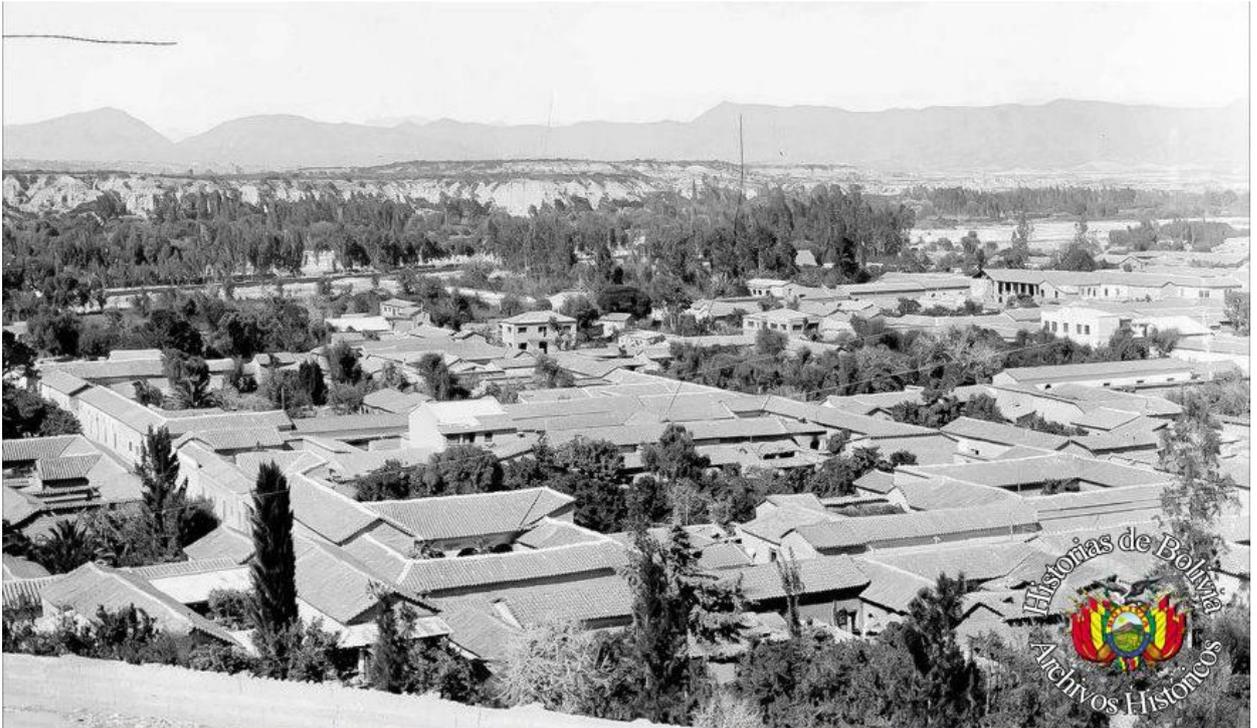
Figura 33. Configuración de damero del centro histórico de Tarija



Fuente: Adaptado de PMOT (2010, p.15).

Figura 34. Vista panorámica del centro histórico de la ciudad de Tarija





Fuente: Imagen Satelital Centro de Tarija (1940 ó 1950). Archivo Histórico de Bolivia (2016)³²

Espacio Público Abierto (EPA)

El paisaje urbano comprende el espacio edificado y no edificado, se relaciona no solamente al ámbito estético de la ciudad, sino a la relación que sostiene el habitante con este medio, la naturaleza y la cultura. Uno de los componentes a

³² Historias de Bolivia. Disponible en:
<https://www.facebook.com/profile/100069084377109/search/?q=tarija>

analizar en este estudio se centra en el ámbito no edificado, es decir, los espacios libres (vacíos urbanos refiere más a un aspecto inoficioso).

Los espacios libres deben ser tratados como sistemas que son y no como espacios residuales (MACEDO, 1995). Según este autor, serían cuatro tipos de espacios libres: espacios verdes, áreas verdes, áreas de ocio o cualquier espacio libre de edificación destinado al ocio, ya sea: activo (juegos), contemplativo (valor escénico/paisajístico) o de uso alternativo (terreno baldío usado para jugar) y finalmente, área de circulación: espacios libres de edificación de propiedad pública y parte del sistema privado del sistema vial para la circulación de vehículos y pedestres.

La vida útil de un determinado espacio libre urbano está directamente vinculada a la posibilidad constante de apropiación que le permite al usuario. Cuanto más y mejor pueda ser apropiado, mayor será su aceptación social y por más tiempo será mantenida su identidad morfológica (MACEDO, 1995 p.24).

Por su parte el Plan Regional de Espacios Libres que Migge plantea en 1928 para la ciudad de Frankfurt, establece el papel mediador del espacio natural en el diseño urbano, con la integración de la ciudad en su entorno natural. Los espacios libres conectados se acercan a lo monumental y contribuyen a fortalecer la identidad local, con el diseño y visión de futuro, se propicia una correcta interpretación de los lugares (no solo flora y clima, también agua, relieve y arquitectura), funciona como “herramienta ordenadora” (Jiménez, 2018 p. 98).

Sobre el sistema de espacios libres, refiere MEDEIROS (2016), que es un sistema complejo pero interrelacionado con otros sistemas (social y natural), a partir de ello se configuran como “palcos de vida ciudadana”.

Esta perspectiva sistémica, se articula para garantizar unidad y sentido. Siendo necesario considerar que estos espacios se articulen en un sistema de espacios libres públicos para proyectar acciones de conservación, mantenimiento, diseño e implementación de nuevas áreas en déficit e integrar objetivos ecológicos, estéticos y de ocio.

Según Romero (2011), el espacio público abierto (EPA) destaca la relación entre la calidad de los espacios y las actividades que en él se desarrollan. Estos espacios públicos abiertos deben apuntar al confort, no solo climático, sino al sentido de comunidad con ambientes permeables, agradables y plenos de vida. Así refuerza el papel de la bioclimatología en la planificación y diseño de los espacios.

Figura 35. Elementos constitutivos del EPA



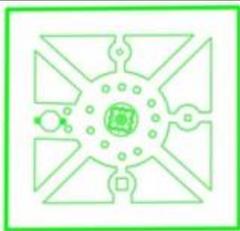
Fuente: Autora, 2023

No se trata solo de caracterizar los elementos de la estructura urbana, sino también comprender sus relaciones entre sí. Desde ese punto de vista se considera tres elementos constitutivos del EPA: plaza, patio, calle, (cada pieza del sistema, necesita un proyecto específico) Figura 35.

a) Plaza

Elemento constitutivo del EPA: la Plaza Principal (Tabla 9):

Tabla 9. Plaza Principal en el EPA

FICHA DE IDENTIFICACIÓN			
PLAZA			
	Ubicación	Planta	Imagen satelital
			
	Vista		
La Plaza Principal Luis de Fuentes y Vargas, núcleo fundacional del centro histórico de la ciudad de Tarija. Emplazada en area monumental patrimonial.			

Fuente: Autora, 2021

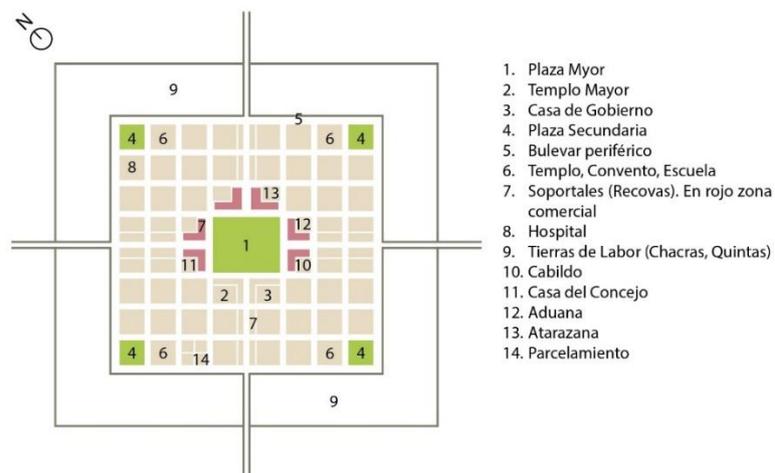
La conformación de la Plaza Mayor en la época de la colonia, según la Recopilación de los Reinos de Indias (Leyes de Indias, 1573), establecen los principios políticos, religiosos, sociales y económicos que inspiraron la acción del gobierno de la monarquía española. En particular el que refiere a las Poblaciones (Libro IV, Título quinto), destaca la formación de la plaza mayor según la estructuración geográfica y urbana, como la orientación para la elección del lugar para fundar las poblaciones.

De la Plaza salgan cuatro calles principales, una por medio de cada costado; y demás de estas dos por cada esquina: las cuatro esquinas miren a los cuatro vientos principales porque saliendo así las calles de la Plaza no estarán expuestas a los cuatro vientos que será de mucho inconveniente (Ordenanza 114).

Toda la plaza a la redonda, y las cuatro calles principales, que de ella han de salir, tengan portales para comodidad de los tratantes, que suelen concurrir; y las ocho calles que saldrán por las cuatro esquinas, salgan libres, sin encontrarse en los portales, de forma que hagan la acera derecha con la plaza y la calle. (Ordenanza 115). En la plaza no se den solares para particulares (Ordenanza 126).

Según Vigliocco (2008), la planta urbana en la traza de las ciudades conforme a las ordenanzas de las Leyes de Indias, establece el sitio, tamaño y disposición de la plaza (como núcleo fundacional), conforme a la Figura 36.

Figura 36. Planta urbana según las Leyes de Indias



Fuente: VIGLIOCCO (2008 p.8)

La formación de la trama urbana a partir de la plaza en el tiempo de la colonia, responde a la estructuración geográfica y urbana sobre la elección de los lugares para fundar poblaciones y para la formación de la Plaza Mayor (que en América se

establecen bajo el dominio español). Para Berjman (2008), este modelo de espacio público se constituye en una tipología de unidad paisajística.

La Plaza Principal Luis de Fuentes y Vargas, se constituye en el núcleo fundacional del centro histórico de la ciudad de Tarija, en el transcurso del tiempo recibió varios nombres (Plaza Mayor, Plaza Andalucía, Plaza del Rey, Plaza de Armas, Plaza Principal, Plaza Luis de Fuentes y Vargas), también contó con el mejoramiento de obras de infraestructura (piso, mobiliario, quiosco, vegetación, iluminación) Tabla 10 y Figura 36. Para Medeiros; Melo Cesar (2021 p.3) “el papel de los monumentos y espacios libres, como hechos urbanos primarios, se relacionan a la estructura de la ciudad con un carácter simbólico - estético y construyen su propia identidad”.

Tabla 10. Fotos antiguas y actuales de la Plaza Principal de Tarija



Fuente: Archivo Rivera (1972) y Autora (2023)

La cronología de datos históricos, infraestructura, arborización (Figura 37) y usos, fue relatada por Edwin Rivera³³ y para cada año, consiste en lo siguiente:

- 1879 Cabildo/Guerra del Pacífico

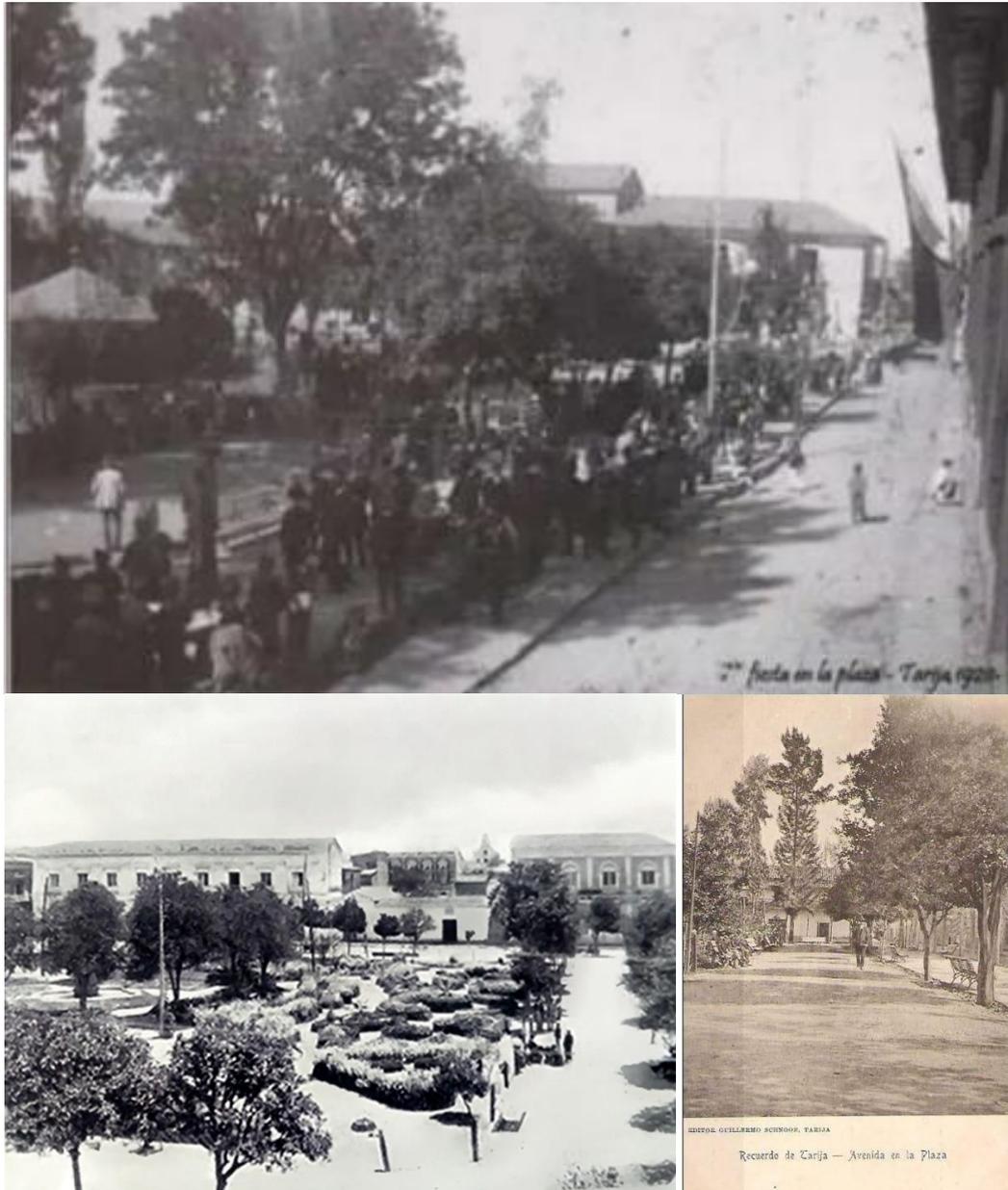
³³ Entrevista del 24/01/23, administrador: Las Raíces de lo Nuestro (*fanpage*).

- 1881 Primera foto de la plaza con la primera fuente de agua (El Marqués, Celedonio Ávila)
- 1884 Arborización en plaza, naranjos yungueños y pinos
- 1888 Inauguración de la plaza con la nueva fuente, por Luis Arze
- 1913 Se instala el busto de Narciso Campero
- 1920 Fiesta en la plaza por el golpe de estado
- 1924 Kiosko (1er Centenario de la Independencia de Bolivia)
- 1942 Llegan las palmeras
- 1972 Fuente de agua en la plaza
- 1976 Se instala el busto de Aniceto Arce
- 1991 Se instala la estatua de Luis de Fuentes

Por otro lado, Zucker (1959), define 5 arquetipos de plazas: la plaza cerrada (por edificaciones), la plaza dominada (en función de un elemento), la plaza nuclear (monumento, obelisco, fuente), la plaza agrupada, (compuesta por plazas de diferentes formas y escalas), la plaza amorfa, (destituida de cualidades espaciales). Como refiere Bartalini (1990), espacios libres o carentes de significado formal, no son considerados plazas, por el contrario, son considerados como plazas amorfas.

Posteriormente, Marta Romero en su libro "Arquitectura bioclimática del espacio público", publicado en 2015, estudia exhaustivamente los elementos arquitectónicos y urbanísticos del espacio público, en él destaca el origen del primer gran espacio libre de una ciudad, la plaza. En torno a 1500 a 1800, la autora refiere sobre los tres tipos de plazas en el contexto europeo: plaza de catedral, plaza civil y plaza de mercado, a su vez sistematizadas por Sitte (1965). También destaca que, la primera plaza renacentista en París o la plaza de comercio en Lisboa, con un sistema de arcos (predominante barroco), la plaza medieval de forma orgánica o la plaza inglesa (plaza verde, quieta y silenciosa), no se igualan al concepto de plaza mayor (regular y con arquitectura uniforme), muy recurrentes en ciudades de América Latina.

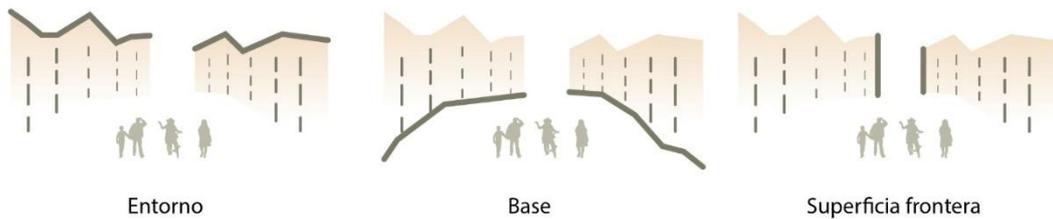
Figura 37. Vegetación en Plaza Principal



Fuente: Archivo Rivera (2020), Blas Castillo. Imágenes de 1920 y 1924

Un método de análisis y evaluación ambiental del espacio público exterior, según Romero (2015), consiste en categorizar el ambiente y espacio por sus interrelaciones en tres partes, según el entorno, base y superficie frontera. Figura 38.

Figura 38. Categorías de interrelación en el espacio público



Fuente: Adaptado de Romero (2015 p.155)

Patrimonio Natural

Actualmente la plaza requiere instrumentos de resguardo, por su calidad paisajística, ambiental, natural y cultural, por tanto, se recomienda elaborar su registro, valorización, catalogación adicionando el componente bioclimático.

El procedimiento de registro y valoración para elaborar la ficha patrimonial y posterior catálogo homologado por instrumento jurídico idóneo en el municipio de Tarija, consiste en el debido reconocimiento de patrimonio natural, asociado al paisaje urbano. El inventario de espacios libres verdes junto con otros elementos naturales y espacios de significado relevante, es una estrategia de planificación verde, acuñada por Migge, autor del Manifiesto Verde de 1919, con el “Archivo Verde”.

Según Sá carneiro; Silva (2017), realizaron el inventario de los jardines de Burle Marx³⁴ en Recife, por lo tanto, recomienda seguir las siguientes actividades:

1. Investigación histórico documental, fuentes iconográficas, fotografías, mapas, registros históricos.
2. Inventario florístico histórico y temporal.
3. Componentes físicos del jardín/área verde, mobiliario, equipamiento, infraestructura.
4. Composición vegetal.

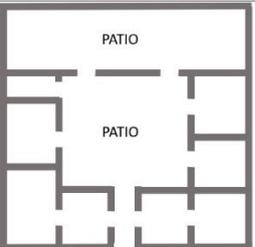
b) Patio

Elemento constitutivo del EPA, el patio central en tipologías de vivienda colonial en el centro histórico de Tarija (Tabla 11): Si bien el inmueble o vivienda tiene derecho

³⁴ Roberto Burle Marx (1909-1994), brasilero reconocido por sus trabajos en arquitectura del paisaje del siglo XX, creador del jardín moderno.

propietario y esta restringido a un uso privado, en este estudio se apela a la función pública del patio como elemento configuracional integrado a un sistema de áreas verdes (parte del *Deep green scenario* como propuesta).

Tabla 11. Patio central en el EPA

FICHA DE IDENTIFICACIÓN			
PATIO			
	Ubicación	Planta	Imagen satelital
	Vista		
El patio del Archivo Histórico de Tarija preserva la tipología constructiva y habilita al público la exposición de muestras fotográficas y piezas de valor. Se utiliza el patio como área de lectura a quien visita el archivo.			

Fuente: Inventario de Bienes Inmuebles. (GAMT, 2007, ficha Código 187)

El patio es un elemento formal integrado en la vivienda desde el origen de la civilización. Según Cleveland & Soleri (1987), el patio fue la principal estrategia de subsistencia del hombre en su búsqueda de asentamientos estables con el desarrollo de la agricultura y ganadería en el Neolítico. Según evidencias arqueológicas, las casas egipcias, mesopotámicas e indias contaban con patios. En la civilización griega y romana, el patio -de forma regular o no- ocupaba entre el 20 a 40% de la superficie total de la planta y era de carácter privado (CAPITEL, 2005).

El patio tiene mucho protagonismo en la cultura islámica. Romero (2013), destaca como las casas tradicionales con patio interno se adecuan al clima caliente seco y su función -protección térmica- se adecúa a la necesidad social de espacio íntimo, aislado y abierto. Por otro lado, en el trazado urbano, se destacan las sinuosas y estrechas calles. Por tanto, “las casas con patio interno están agrupadas en un bloque compacto a fin de exponer menos superficies a la radiación solar directa” (ROMERO, 2013 p.66), eso permite que el patio mantenga fresco el ambiente reduciendo el calor acumulado.

La misma autora refiere que el concepto de patio privado fue desapareciendo (fue cubierto) y en su lugar se fue consolidando la idea de jardín, alrededor de la casa. En lo que respecta a las casas coloniales de América española, las habitaciones se organizan alrededor de un patio, haciendo más exclusivos cada vez y se alejan de la calle: en el primer patio, área social; el segundo patio, área íntima; tercer patio, área

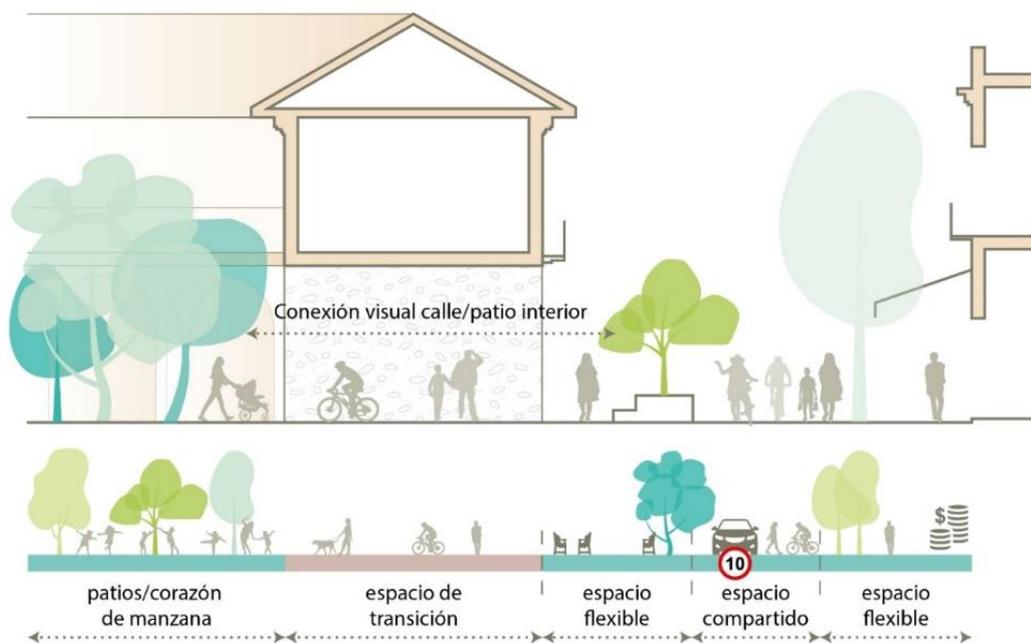
de servicio. En esta configuración también se destaca la secuencia de arcadas, “las galerías en arco apoyadas en columnas, constituyen el elemento-vínculo entre el espacio público y privado” (ROMERO, 2013 p.78).

El patio como arquetipo sistemático y versátil, es capaz de cobijar diferentes usos, formas, tamaños, estilos y características, no solo que responden al clima y la tradición, es la forma eficaz de dar luz, ventilación y orden (CAPITEL, 2005).

Además de su condición morfológica, el patio representa para (CULLEN, 1974), una posibilidad de “visión serial”, esta cualidad se reconoce en el cerebro como una reacción al contraste, por ejemplo, si un transeúnte camina por la vía, aprecia un escenario, al ingresar a un patio, es completamente diferente, y podría finalizar en un monumento con un tercer escenario, y la ausencia de estos contrastes define una ciudad amorfa.

Por tanto, el aprovechamiento e incorporación del patio “privado” al espacio público constituye una contribución para el *Urban Green Infrastructure (UGI)*. Asimismo, partir del rediseño urbano que incorpora el valor ecológico y como estrategia de *Urban Cool Island (UCI)* es tan necesaria en la planificación y programas de regeneración urbana, según Pelorosso, Gobattoni, Leone (2016).

Figura 39. Conexión del patio con vías peatonales



Fuente: Adaptado de Proyecto CUENCA RED³⁵. Acceso: 9/07/2022

³⁵ Disponible en: https://ecosistemaurbano.org/ecosistema-urbano/cuenca-red-presentamos-el-nuevo-plan-de-revitalizacion-del-centro-historico/?utm_medium=website&utm_source=plataformaarquitectura.cl

Esta relación entre el espacio público, los patios y corazones de manzano para cualidades culturales, paisajísticas y naturales se destaca en el proyecto de revitalización del centro histórico de Cuenca, Ecuador, (Figura 39), con el estudio de morfología y potencial urbano arquitectónico se propuso la intervención de seis espacios de prioridad, de 119 analizados.

Patrimonio Natural

El municipio de Tarija cuenta con fichas patrimoniales de predios (valores arquitectónicos), catalogados con valor A, B, C (enunciadas en el apartado de contexto patrimonial - Inventario Patrimonial Arquitectónico), sin embargo, no existe un inventario específico de los patios, por lo que se recomienda el siguiente procedimiento, para ese fin, incorporando el componente bioclimático.

1. Identificación de patios en el área monumental: Revisión de fichas patrimoniales y observación cartográfica con imagen satelital (antigua y reciente).
2. Mapeo general
3. Caracterización morfológica, histórica (a través de fichas existentes).
4. Selección de patios para la caracterización y representación gráfica.

c) Calle

La calle como elemento constitutivo del EPA (Tabla 12):

Tabla 12. La calle en el EPA

FICHA DE IDENTIFICACIÓN			
CALLE			
	Ubicación	Planta	Imagen satelital
			
	Vista		
<p>La calle del centro historico o área monumnetal patrimonial, tiene un perfil de vía entre los 7 a 9 m. Desde el 2014 se realizan obras de mejora en la infraestructura para ensanchar las aceras.</p>			

Fuente: Autora, 2021.

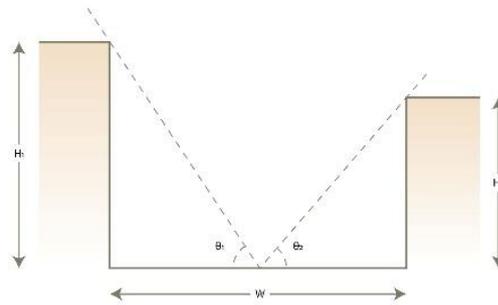
La calle posibilita espacios de encuentro y de vida urbana como premisa directora para la movilidad activa y sostenibilidad. La vitalidad y accesibilidad del centro se mide en la cantidad de peatones en sus calles, mejora de la calidad de aire, disminución del ruido. Abordar el concepto de humanizar las calles, trae múltiples beneficios para la ciudad, como transformar espacios agradables y activos, promocionar el patrimonio e identidad local, mejorar la seguridad y permanencia a través de mobiliario flexible, fuentes de sombra y elementos de identidad.

Por su uso y función, Mascaró (2005), distingue en la ciudad un grupo de calles segregadas para el tráfico y otras con uso residencial, vecinal, plazas, parques, importante para el fomento y apropiación del espacio por parte de los usuarios. Las calles diseñadas con esos criterios permiten espacios urbanos de alta calidad de vida con pavimentos permeables en los patios, paseos, pasajes interiores. Está condicionada por los usos de las aceras, como el principal lugar público de una ciudad Jacobs (2011).

En cuanto a su percepción, Lynch (2008), en la propuesta del “plan visual” destaca los cinco elementos de la imagen de la ciudad y atribuye a la senda como el elemento conductor que el observador sigue normal, ocasional o permanentemente, es decir, la calle, senderos, canales, son elementos preponderantes para observar la ciudad conforme a su organización y conexión existente con otros elementos. Este atributo posibilita una comprensión del EPA a partir de la percepción de los habitantes.

Respecto a la condición de geometría urbana, el término de factor de visión de cielo o *Sky View Factor* (SVF), se refleja según la relación H/W (Figura 40), este indicador en una ponderación de 0 a 1, hace visible la fracción de cielo en un determinado espacio urbano, esta observación contribuye a la cuantificación de radiación solar entre sus obstáculos: edificios y vegetación. Es decir, cuando se obstruye la visión del cielo, se retarda la salida de radiación y el ambiente permanece sobrecalentado a través de la temperatura del aire, fenómeno que incide en la formación de ICU. Este indicador es considerado en grandes ciudades con presencia de rascacielos y poblaciones densas, sin embargo, su estudio auxilia los parámetros de diseño urbano en cualquier escala.

Figura 40. Geometría de un cañón urbano asimétrico

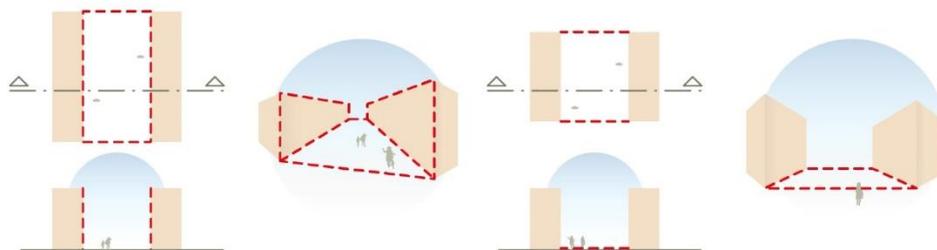


Fuente: OKE (1988 p.108)

Silva (2013), en su estudio sobre cavidades urbanas, considera a ésta como un recinto específico del cañón urbano (Figura 41), es decir, “una fracción de microescala urbana con características propias” (SILVA, 2013 p.29), así el desempeño climático de los materiales superficiales a partir de la relación W/H , define esta cavidad urbana condicionada por la configuración urbana de microescala.

El resultado de su estudio demuestra que los valores de esta relación, entre 1 y 7, son las más confortables y recomendados para el comportamiento térmico de cavidades urbanas en Brasilia.

Figura 41. Cañón (3 planos) y cavidad urbana (1 plano)



Fuente: Adaptado de SILVA (2013 p.28)

La calle comprendida por la calzada -uso exclusivo de motorizados- y la acera -uso exclusivo de peatones- organizados en diferentes perfiles de vía (primaria, secundaria, regional, colectora), así, los elementos formales son los volúmenes edificados en la composición de un mapa -edificios, cuadras, lotes, calles- y los elementos espaciales son los vacíos entre ellos.

En el aspecto ambiental (capítulo del verde urbano en el EPA), habíamos referido sobre la influencia de la arborización en el clima, pues incide en la variación

de la temperatura del aire en áreas sombreadas y es inversamente proporcional a la densidad foliar de las copas de los árboles, por tanto, la finalidad del sombreado en las calles es amenizar el rigor térmico estacional en clima tropical, o subtropical, y disminuir las temperaturas superficiales de las edificaciones y la sensación térmica de calor en los usuarios, peatones o motorizados.

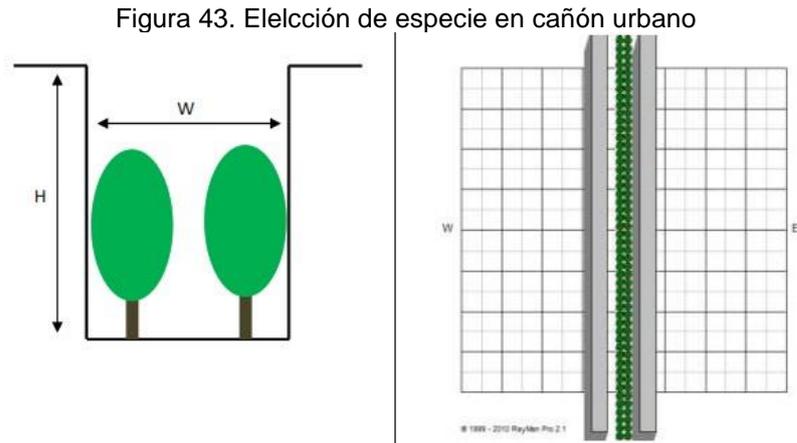
A ejemplo de aquello, intervenciones en las vías, desde la modificación superficial de materiales e incorporación de vegetación, como el estudio realizado en Tarija, por Martínez (2021), identifican una diferencia de 6°C en la temperatura superficial (Figura 42).



Fuente: MARTÍNEZ (2021 p.112)

Desde el punto de vista bioclimático, (HIGUERAS, 2006), sugiere considerar los criterios de soleamiento, viento y humedad ambiental, es decir, garantizar la accesibilidad solar para edificios y espacios abiertos (incidencia de la radiación solar directa e indirecta, iluminación natural). Para el viento, considerar que las calles son corredores que encauzan las corrientes de aire, teniendo calles angostas y edificios altos se produce el efecto de túnel (o cañón urbano) que aumenta la velocidad del viento, por el contrario, si son calles anchas y edificios bajos, las corrientes de aire disminuyen, por eso es importante orientar las calles en dirección a los vientos dominantes según el tipo de clima en la región. Y finalmente la humedad determinada por presencia de agua o vegetación frondosa.

La estrategia de verde urbano como directriz general puede ser considerada, sin embargo, es importante precisar la elección de vegetación (Figura 43).



Fuente: ABREU (2012 p.56)

3.3.2 Valoración Patrimonial Bioclimática

Conforme al objetivo específico: *Poner en relevancia los elementos constitutivos del EPA y sus elementos constitutivos, a través de la Ficha Patrimonial Bioclimática*, y por el carácter histórico del área de estudio, se propone a continuación un método de valoración patrimonial que incorpore variables bioclimáticas en correspondencia al análisis integrado escalar.

Para potenciar el binomio: patrimonio + clima, es imprescindible observar los valores propios del objeto/bien a preservar considerando sus efectos ambientales en el medio, sean estos de orden arquitectónico, urbano o natural, instrumentalizado por una catalogación e indicadores de las variables edilicias y climáticas. El patrimonio cultural comprendido por el valor arquitectónico, histórico, estético, tipológico, socio-cultural, debe ser preservado y puesto en valor (DOMINGUEZ; CZAJKOWSKI; ROSENFELD, [s. d.]).

Para distinguir la valoración bioclimática de la patrimonial, es preciso comenzar con la revisión bibliográfica de las condicionantes y factores del medio físico ambiental, climático, patrimonial y simbólico (HIGUERAS, 2006, ROMERO 2011, 2013, 2015, TEIXEIRA, 2018).

Las variables de los condicionantes locales climáticas para el diagnóstico ambiental se expresan en una matriz de interacción según Higuera (2006) y se clasifican según indica la Tabla 13:

Tabla 13. Condicionamiento del medio físico y ambiental

Relacionados con el medio ambiente	Radiación solar
	Vegetación
	Viento
	Agua y humedad del aire
	Geomorfología
Relacionados con el medio urbano	Red viaria
	Espacios libres
	Morfología de las manzanas
	Morfología de las parcelas
	Tipología edificatoria

Fuente: HIGUERAS (2006 p. 74)

El criterio de diseño del urbanismo bioclimático de Higuera (2006), incluye aportaciones a la eficiencia energética, estrategias bioclimáticas según la región (fría, templada, cálida-húmeda, cálida-árida), estrategias bioclimáticas para el sistema viario y para el sistema de zonas verdes y áreas libres.

Para Romero (2015 p.155), la “concepción bioclimática del espacio público abarca dos categorías temáticas, el ambiente y espacio”. Considera al espacio público como una unidad esencial del paisaje urbano que contiene elementos climáticos, históricos, culturales y tecnológicos en el que se adiciona una concepción arquitectónica del espacio, es decir, homologar las características de los edificios con las características de los espacios urbanos (entorno, base, frontera) Figura 38 y Tabla 41. Según (ROMERO, 2015), el tamaño del EPA puede estar definido según los materiales superficiales, compacidad, sombra, vegetación, ventilación, caminos, presencia de agua, humedad, albedo y luminosidad.

En un contexto patrimonial modernista en edificios de Brasilia, Teixeira (2018 p.91), realiza una evaluación bioclimática cualitativa incorporando “elementos modernistas: planta libre, techo jardín, *pilotis*, fachada libre, ventanas en cinta, formas geométricas definidas, sin ornamentación, separación y estructura de cierre, integración de la arquitectura con el entorno a través del paisajismo”. Este método de evaluación comprende dos fases, la primera consiste en la valoración modernista: valor intencional, histórico, de uso y de arte y la segunda fase comprende: la identidad arquitectónica con 10 elementos arquitectónicos, caracterización ambiental y evaluación cualitativa del edificio (forma, materiales, envoltura) a través de diagramas morfológicos (espacio urbano, edificio, ambiente). Respecto a la ficha bioclimática, el autor considera la propuesta de análisis de entorno, base, frontera según Romero (2015) y los parámetros establecidos en Tabla 14.

Tabla 14. Elementos que conforman el espacio

Características del entorno	Orientación: sol, viento, sonido
	Continuidad de la masa. Grado de adyacencia/compacidad
	Altura del espacio acotado
	Conducción de los vientos del entorno inmediato
Características de la base	Equilibrio de radiación y luz natural
	Naturaleza de los elementos superficiales (propiedades físicas, colores)
	Elementos componentes del espacio público:
	- Coberturas
	- Pisos
	- Vegetación
- Mobiliario	
- Agua	
Características del entorno	Convexidad
	Continuidad de la superficie. Grado de adyacencia. Porosidad.
	Detalles del edificio
	Textura
	Propiedades físicas de los materiales
	Aberturas
	Tensión, regresión, progresión de la fachada
	Tipología arquitectónica
	colores
	Transparencia, opalescencia
	Área total de la envolvente: pérdidas y ganancias de calor
	Cielo
	Número de lados del espacio acotado
Grado de confinamiento	

Fuente: ROMERO (2015, p.142,143,145)

Los criterios de valoración según Gisela Paredes³⁶ (2022), dependen de la historicidad, las características formales, características tecnológicas, relación con el entorno y su valor intangible, para preservar los valores simbólicos y representativos que determinan la identidad y cumple un rol testimonial de los fenómenos culturales, sociales, económicos de una determinada época.

Higueras (2006) por su parte, destaca la contribución de Olgyay³⁷ para la concepción bioclimática según la región climática mundial en tres aspectos: la ordenación del conjunto (emplazamiento, estructura urbana, espacios públicos, paisaje, vegetación); el diseño de la casa (tipología de vivienda, distribución general, planta de distribución, forma y volumen, orientación, color) y los elementos constructivos.

³⁶ Arq. Especialista en Patrimonio Cultural. Presentación de Áreas patrimoniales (SIC).

³⁷ Arquitecto y urbanista húngaro, pionero del bioclimatismo. Contribuciones más destacadas: *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* (2015); *Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* (1998).

Con esta revisión, se identifican en Tabla 15, los componentes más representativos en el factor físico ambiental, climático y patrimonial.

Tabla 15. Revisión de condicionantes y valores de identidad

Factor físico ambiental	Factor climático	Factor patrimonial
Medio ambiente (Higueras, 2006 p.73)	Higueras (2006 p.115) Microclima	Edificio (Romero, 2015 p.148) Forma
Geomorfología	ICU	Piel
Agua	Confort térmico	Interior
Suelo	(carta bioclimática)	Identidad arquitectónica
Vegetación	Estrategias bioclimáticas	(Teixeira, 2018 p.131)
Soleamiento	Condicionamiento por vegetación	Elemento/percepción (pilotis)
Medio urbano (Higueras, 2006 p.74)	(Higueras, 2006 p.103) Humedad ambiental	Planta (libre) Fachada (libre), ritmo
Vías	Radiación solar	Forma geométrica
Espacios libres	Control frente al viento	Integración con el paisaje
Morfología de manzanas	Control frente al ruido	Elementos decorativos
Morfología de parcelas	Control frente a contaminación del aire	Caracterización de la imagen
Tipología edificatoria	Dados climáticos	(Paredes, 2022 p.12)
Atributos Urbanos (Romero, 2015 p.153)	(Romero, 2015 p.131) Viento	Estructura visual Contraste y transición
Forma	Humedad	Jerarquía
Trazado	Insolación	Congruencia
Superficie	Precipitación	Secuencia visual
Entorno	Periodo (caliente-seco)	Proporción y escala
Forma urbana (Teixeira, 2018 p.127)	Eficiencia energética Vías	Identidad Relación de la edificación con el sitio
Uso y ocupación del suelo	Zonas verdes	Articulación del espacio
Conformación espacial		Espacio y movimiento Visión en detalle

Fuente: Autores varios, 2023

En resumen, para la valoración bioclimática y patrimonial, se recomienda el reconocimiento de dos aspectos fundamentales en el EPA, sus condicionantes: morfológicos, climáticos, funcionales y sus valores de identidad: histórico, simbólico, cultural y social.

a) Ficha Patrimonial Bioclimática

La Ficha Patrimonial Bioclimática (FPB) es una herramienta de evaluación de las condiciones de preservación de los valores patrimoniales de un EPA o edificio incorporando valores bioclimáticos, contiene información sobre las características de los componentes de preservación (del patrimonio cultural) y factores que promuevan su renovación en eficiencia energética y confort térmico para los usuarios, como su vida útil.

El objetivo principal del uso de esta herramienta es fomentar la preservación del *patrimonium* (latín que significa “bienes de familia”, herencia) y así reforzar nuestra identidad y memoria como un legado del pasado, pero que simultáneamente se adecúe con resiliencia al clima y a los desafíos futuros. En ese sentido, se establecen parámetros a considerar en la valoración patrimonial y valoración bioclimática del EPA (Tabla 16), esos parámetros posteriormente se exponen en la FPB.

Tabla 16. Valoración patrimonial y bioclimática

VALORACIÓN PATRIMONIAL – BIOCLIMÁTICA		
PATRIMONIAL		
EPA:	Descripción general de uso del EPA:	
Diagramas/Detalles:	Categoría de preservación:	Mapa:
	- Manutención - Conservación - Ampliación - Restauración - Refuncionalización	
Recomendaciones (<i>Mise en valeur</i>):	Identidad morfológica:	Imágenes:
	- Arquitectónica - Urbana	
Valores de identidad:	Arquitectura de integración:	
- Históricos - Simbólico - Cultural - Morfológicos - Social		
BIOCLIMÁTICA		
Ambiental	Climáticos	Carta solar:
Factor suelo	Radiación	
Factor aire	Temperatura (aire, suelo)	
Factor agua	Vientos	Simulaciones:
Factor energía	Humedad	
Composición vegetal		
Estrategias bioclimáticas:		

Así son necesarias acciones previas o preliminares para identificar el “valor” de un bien, inventariar y declarar patrimonio cultural para una posterior intervención (SCHLEE; MEDEIROS; FERREIRA, 2013 p.21). La FPB colabora en la regulación y manejo de sitios históricos, conjuntos patrimoniales, áreas edificadas y paisajísticas, unidades de paisaje y evita distorsiones en la riqueza arquitectónica y del entorno, precautelando la imagen urbana. Estas acciones se establecen para la conservación de Áreas Históricas de Sucre (PEÑARANDA, 2011).

Los criterios de valoración y evaluación bioclimática y patrimonial en los sitios históricos y de carácter patrimonial, se caracterizan por simplificar los aspectos más relevantes del espacio público abierto (EPA) recopilando datos, elementos, informaciones, percepciones, valores sensibles de preservación.

La Ficha Patrimonial Bioclimática (FPB) contiene 4 secciones de contenido:

- Identificación y descripción general del EPA.
- Valoración patrimonial
- Valoración bioclimática
- Estrategias bioclimáticas y de preservación

A continuación, se realiza una breve descripción de cada sección y la FPB completa se encuentra en Figura 44 y Anexo 1.

Identificación y descripción general del EPA

En esta primera parte se identifica puntalmente el EPA que será sujeto a valoración, se describe el uso y ocupación del suelo. En la descripción general se detalla la ubicación, características, condicionantes, se acompaña con plano de planta, imagen satélite y fotografías.

Valoración patrimonial

Comprendida por las Categorías de Preservación: manutención, conservación, ampliación, restauración, refuncionalización. Se detalla el Estado y Recomendación de Conservación del EPA.

Se identifican los Valores de Identidad: en el aspecto histórico, simbólico (apoyado en entrevistas, encuestas de percepción), artístico, cultural, natural y arquitectónico (físico, materialidad, estilo, mobiliario). Recomendable identificar el *genius loci* y registrar la memoria colectiva en el entorno, respecto al uso y ocupación del espacio.

Se apoya gráficamente con esquemas morfológicos, constructivos y de arquitectura de integración (relación inmediata con el entorno, emplazamiento de contexto, armonía, proporción, conexiones), finalmente se analiza el EPA desde la base, frontera y entorno considerando los componentes físicos (patologías) y aspectos de accesibilidad. Puede darse énfasis en el estado de conservación para especificar acciones inmediatas.

Valoración bioclimática

Clasificada en dos componentes: factores ambientales: suelo, aire, agua, energía, vegetación y datos climáticos: radiación solar, temperatura, vientos, humedad con la respectiva clasificación climática. Adicionalmente pueden ser incorporados factores de acústica, luminosidad, confort ambiental, eficiencia energética, residuos.

Gráficamente se apoya en los resultados de simulaciones (si existiera), el diagrama bioclimático, la carta solar y rosa de vientos.

Estrategias bioclimáticas y de preservación

Finalmente se enlistan estrategias bioclimáticas y de preservación del EPA, considerando limitantes existentes en la gestión y administración de los recursos con la finalidad de promover prácticas sostenibles adaptadas al clima local y visando garantizar un ambiente saludable.

Este instrumento pretende ser de fácil manipuleo y comprensión para que entidades de gobierno local alcancen el inventario, registro y catalogación de los EPAs en la ciudad para su preservación tipológica, formal, cultural. Se recomienda que el llenado de la ficha cumpla con dos condicionantes sensibles: capacidad y conocimiento técnico para el adecuado llenado del contenido/información de la ficha y segundo, sensibilización para los usuarios del EPA, es decir, la ciudadanía en general. La ficha puede complementarse con un informe a detalle para organizar y registrar de forma completa la información histórica, técnica y sensible³⁸.

A modo de ejemplo, se aplica la FPB para el elemento constitutivo del EPA – patio por secciones a efectos de visualizar el contenido de la ficha (Figura 45, 46, 47).

³⁸ Valoración cualitativa a través de entrevista. Por ej. Entrevista a Marta Farfán que vivió 50 años en la casa de “Juan de Dios Mealla”.

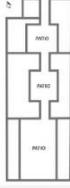
Figura 44. Ficha Patrimonial Bioclimática

FICHA PATRIMONIAL BIOCLIMÁTICA						
ESPACIO PÚBLICO ABIERTO - EPA						
USO DEL EPA						
DESCRIPCIÓN GENERAL						
UBICACIÓN				MAPA	IMAGEN SATÉLITE	FOTOGRAFÍA
VALORACIÓN PATRIMONIAL						
CATEGORÍAS DE PRESERVACIÓN		MORFOLOGÍA	CONSTRUCTIVO		ARQUITECTURA DE INTEGRACIÓN	
MANUTENCIÓN		ESTADO DE CONSERVACIÓN:				
CONSERVACIÓN		RECOMENDACIÓN: (MISE EN VALEUR)				
AMPLIACIÓN						
RESTAURACIÓN						
REFUNCIONALIZACIÓN						
VALORES DE IDENTIDAD						
HISTÓRICO				BASE	FRONTERA	ENTORNO
SIMBÓLICO						
ARTÍSTICO						
CULTURAL						
NATURAL						
ARQUITECTÓNICO						
VALORACIÓN BIOCLIMÁTICA						
AMBIENTAL		SIMULACIONES	DIAGRAMA BIOCLIMÁTICO		CARTA SOLAR ROSA DE VIENTOS	
SUELO						
AIRE						
AGUA						
ENERGÍA						
VEGETACIÓN						
DATOS CLIMÁTICOS		CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA				
RADIACIÓN SOLAR			ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS			
TEMPERATURA						
VIENTOS						
HUMEDAD						

Fuente: Autora, 2023

La Figura 45, identifica el uso y ubicación del EPA – Patio central, cuenta con una descripción general y se apoya gráficamente con la planta, imagen satélite y fotografías.

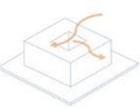
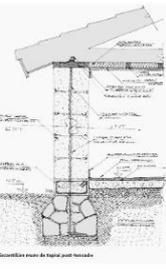
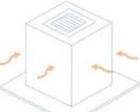
Figura 45. FPB - Identificación y descripción general del patio

FICHA PATRIMONIAL BIOCLIMÁTICA		PATIO CENTRAL		
ESPACIO PÚBLICO ABIERTO - EPA				
USO DEL EPA	VIVIENDA (PRIVADO A PÚBLICO)			
DESCRIPCIÓN GENERAL				
ELEMENTO CONSTITUTIVO CENTRAL DE LA VIVIENDA (JARDÍN, SERVICIO, HUERTA). CONTINUACIÓN DEL ZAGUÁN DE ENTRADA PARA DAR PASO AL PATIO. COMPONE EN PROMEDIO EL % DE ÁREA LIBRE DE LA VIVIENDA.				
UBICACIÓN	ÁREA MONUMENTAL, CENTRO HISTÓRICO	PLANTA	IMAGEN SATÉLITE	FOTOGRAFÍA

Fuente: Autora, 2023

Las características más relevantes de preservación se destacan en esta sección de valoración patrimonial (Figura 46). I

Figura 46. FPB - Valoración patrimonial

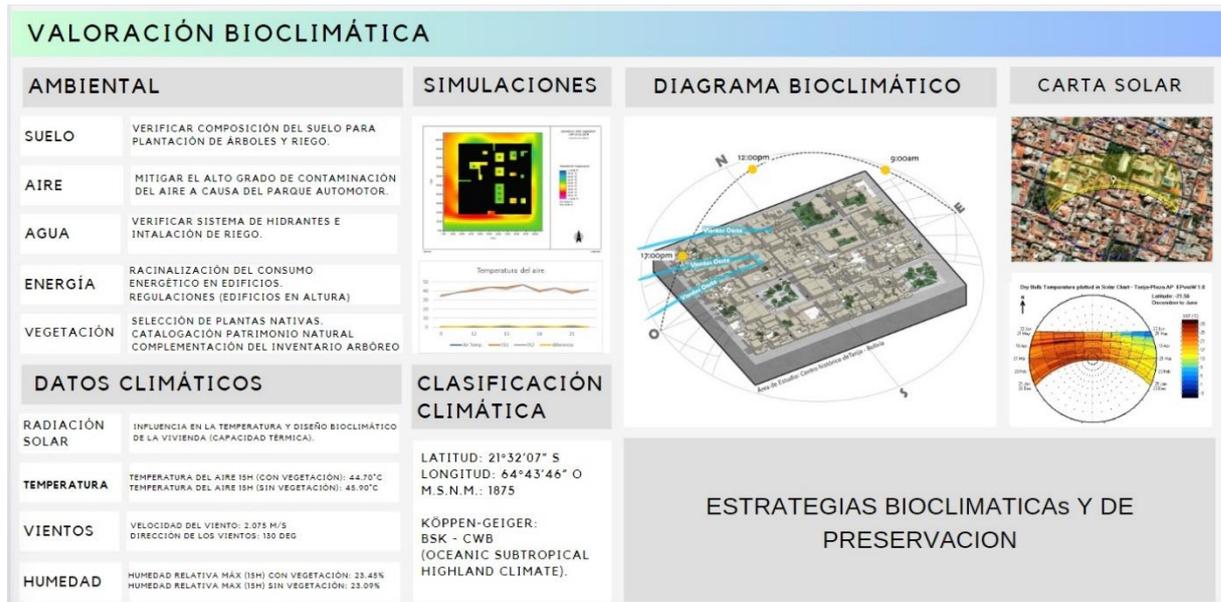
VALORACIÓN PATRIMONIAL					
CATEGORÍAS DE PRESERVACIÓN		MORFOLOGÍA	CONSTRUCTIVO	ARQUITECTURA DE INTEGRACIÓN	
MANUTENCIÓN	ESTADO DE CONSERVACIÓN: BUENA			 <p>CONTINUIDAD VISUAL, ESPACIAL Y AMBIENTAL DE LA CALLE CON EL PATIO CENTRAL. ELEMENTOS URBANOS Y ACCESIBILIDAD EN EL ESPACIO. ACTIVACIÓN DE LA VIDA URBANA. RECALIFICACIÓN DE LOS VALORES ARQUITECTÓNICOS PATRIMONIALES. UNIDAD DE PASAJE.</p>	
CONSERVACIÓN	RECOMENDACIÓN: (MISE EN VALEUR)				
AMPLIACIÓN	MANTENER LOS VALORES IDENTITARIOS DEL PATIO EN VIVIENDAS EXISTENTES Y PROMOVER EL MANTENIMIENTO DE SU INFRAESTRUCTURA				
RESTAURACIÓN					
REFUNCIONALIZACIÓN					
VALORES DE IDENTIDAD			BASE	FRONTERA	ENTORNO
HISTÓRICO	DE LA ÉPOCA COLONIAL, REPUBLICANA, LEGADO ESPAÑOL.				
SIMBÓLICO	EL VERDE FLORES, EL AIRE QUE PROPORCIONA A LOS AMBIENTES DE LA CASA (COMEDOR). LOS HABITANTES PRESERVAN MEMORIAS COLECTIVAS, DISFRUTE DE LOS NIÑOS. AMBIENTE PREFERIDO PARA PERMANENCIA.	LA FORMA DEL PATIO CENTRAL Y LA CONFIGURACIÓN ESPACIAL (ALTURA) CARACTERIZA EL PÉRRIL. CONFIGURACIÓN DEL EDIFICIO Y SU CONJUNTO.			
ARTÍSTICO	ESPACIO QUE INSPIRA OBRAS DE ARTE, PINTURA PARA RETRATAR LA ARQUITECTURA, ESCITOS Y POEMAS INSPIRADOS EN EL ESPACIO. "ABRIR LA PUERTA ERA UN PERFUME" (CAROLINA FARFAN), MUESTRA DE AZULEJOS.	FORTALEZA, ALTURA HOMOGÉNEA, POSIBILITA LA CIRCULACIÓN DE AIRE. INGRESO DE ILUMINACIÓN. CAPTURA DE AGUAS PLUVIALES.	EN LA BASE DEL PATIO, CONSIDERAR PISOS FLEXIBLES, NATURALES. TRADICIONALMENTE SE USA PIEDRA LAJA DE CANTERA NATURAL. JARDINERAS PARA LOS ARBÓLES FRUTALES.	EN LA FRONTERA DEL PATIO (CADA LADO INTERNO). VALORIZAR LA FACIADA CON LOS ELEMENTOS CARACTERÍSTICOS DE LA ARQUITECTURA. DESTACAR EL REMATE. INCORPORAR, ACONDICIONAR ELEMENTOS NATURALES. MURO VERDE.	EN EL ENTORNO DEL PATIO, CONSIDERAR MATERIALES DE CUBIERTA TRADICIONAL. TEJA COLONIAL. CONSERVAR LA TIPOLOGÍA CONSTRUCTIVA.
CULTURAL	PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO. MOBILIARIO ANTIGUÍSIMO. ENCUENTROS SOCIALES.	AMENAZA VERTICALIZACIÓN EDIFICIOS EN ALTURA. PÉRDIDA DE LA TIPOLOGÍA ARQUITECTÓNICA.			
NATURAL	INICIALMENTE CONTABA CON FRUTALES, NARANJO. POSTERIORMENTE MODIFICADO CON FLORALES, CUCARDAS, AZAHARES, AVES.				
ARQUITECTÓNICO	RIESGOS/AMENAZAS. EDIFICIOS EN ALTURA COLINDANTES. AFECTA LA IMAGEN URBANA, SOMERA, VISUALES. RETEJAR LAS CUBIERTAS (MANTENIMIENTO)				

Fuente: Autora, 2023

La valoración bioclimática del patio se desarrolla en la siguiente sección, comprende los factores más relevantes del clima local y su influencia en el EPA.

Describiendo brevemente las características climáticas para orientar posteriormente estrategias bioclimáticas. Por ejemplo, el patio interno coadyuva a la ventilación interna de la casa y a la captación de aguas pluviales (Figura 47).

Figura 47. FPB - Valoración bioclimática



Fuente: Autora, 2023

La última sección de la ficha comprende las Estrategias Bioclimáticas y de Preservación del EPA – Patio Central, son detalladas en torno a los componentes de vegetación, paisaje, espacio público, según criterios de urbanismo bioclimático (HIGUERAS, 2006). Se detalla a continuación:

Vegetación: Orientación Nor-Oeste para barreras vegetales. Árboles con hoja perene son más recomendables para la protección contra el viento y los de hoja caduca para proporcionar sombra. Césped próximo a las edificaciones sirven para la absorción de radiación solar. En orientación Este-Oeste de la vivienda plantar árboles para proporcionar sombra.

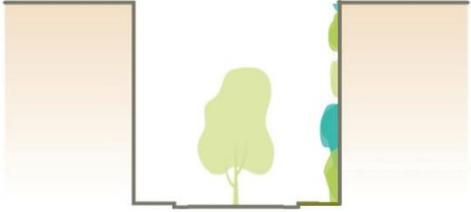
Espacios públicos: Césped con árboles para proporcionar sombra. Disposición de calles rumbo Sur-Oeste para evitar vientos de invierno y canalizar brisas de verano. Trazo libre de peatonales.

Interior: Prever ventilación cruzada. Penetración de rayos solares.

Recomendable para su uso y aplicación en la administración y gestión de los gobiernos locales.

Finalmente, con la implementación de la estrategia de mitigación de ICU (escenario 2, *Deep green scenario*), los beneficios y contribuciones del incremento de vegetación urbana y articulación de masas arbóreas (corredores) en el centro histórico, agrega valor sensible a la conservación morfológica (altura) de la edificación y tipología de construcción favorable en el EPA con la implementación de directrices o lineamientos base para el diseño urbano (Tabla 17).

Tabla 17. Plaza, patio, calle

DIRECTRICES FORMALES DE DISEÑO Y CONFIGURACIÓN URBANA	
<p>Plaza</p> 	
	<p>Configuración actual de las áreas verdes centrales. Masa construida generalmente mantiene altura de 1 ó 2 niveles (hasta 6-9m). La ciudad geométrica propone un control y equilibrio natural en la entrada de vientos y soleamiento de fachadas.</p>
<p>La altura de la edificación tiene una incidencia en la dirección y velocidad de los vientos</p>	
	<p>Modificación de la relación W/H (construcciones nuevas, edificios institucionales o multifamiliares de mayor altura). Afectación, alteración de los fujos de viento.</p>
<p>Patio</p> 	
<p>Continuidad, amenidad vegetal, visual, social.</p>	<p>Conexión de la calle con patios internos y fachadas verdes, revalorizando los elementos arquitectónico patrimoniales y valores culturales.</p>

Los patios centrales cubiertos, influyen en la acumulación de calor y temperatura radiante media (por impedir flujos de ventilación).



Calle (corredor verde)



Articular áreas verdes centrales, amenidad.

Situación actual, plazas separadas por cuadras con edificación, accesibilidad reducida (aceras).



Corredor en calle 15 de Abril y Colón, da continuidad y amenidad a las áreas verdes centrales, favorable para el confort peatonal, ecosistema natural de aves y biodiversidad. Fomenta una continuidad visual y relación entre interior y exterior de la edificación.

Fuente: Autora, 2023

Regulación y normativa

Es recomendable regular los procesos de conservación y valoración patrimonial – bioclimático. A ejemplo de ello, la Ordenanza Ambiental o Bioclimática según (HIGUERAS, 2006 p.183), tiene como objetivo el “garantizar una visión integradora que articule perspectivas sectoriales y las optimice contrastándolas entre sí, a una propuesta de desarrollo urbano equilibrada desde la óptica ambiental”. Este instrumento jurídico se compone de seis aspectos, citados a continuación y contenidos en la Ordenanza Bioclimática de Tres Cantos (Madrid):

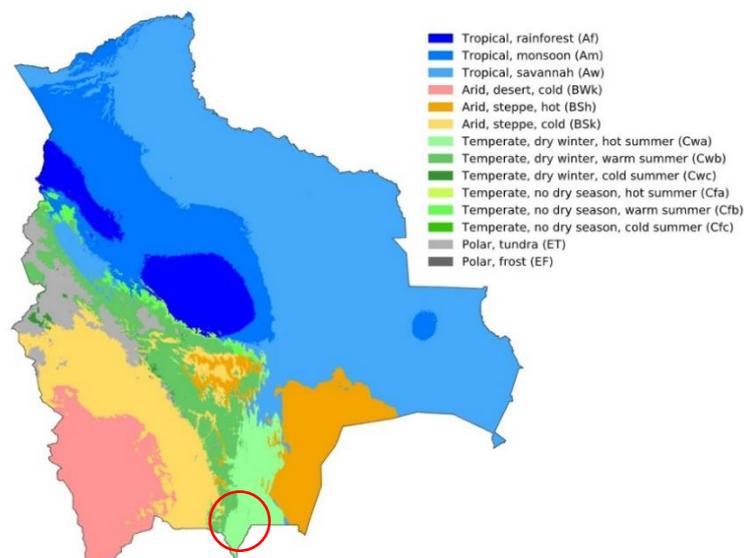
- Análisis del medio
 - conocimiento del clima
 - necesidades para el bienestar de los ciudadanos
 - estrategias bioclimáticas
 - acondicionamiento activo para edificios y espacios urbanos
 - acondicionamiento pasivo para edificios y espacios urbanos.
- (HIGUERAS, 2006 p. 184).

3.3.3 Clasificación climática

Bolivia es un país ubicado en el centro de Sudamérica, dada su ubicación geográfica, posee zonas diversas: comenzando con mesetas altas que alcanzan más de 4.000 metros sobre el nivel del mar, pasando por valles de elevación media y terminando en planicies tropicales rodeadas de parte de la Amazonía y la Chiquitanía y en el sur concluye con la región del Chaco (chaco boreal y parte del pantanal). Como resultado de esta variedad existe una amplia gama de temperaturas y microclimas dentro del país (OLIVERA-VILLARROEL et al., 2021).

Más de la mitad del país se encuentra en la zona amazónica, donde existen altos índices de deforestación (Figura 48), lo que incrementa la vulnerabilidad frente a las inundaciones. El clima boliviano varía mucho debido a la altitud. En las tierras bajas del Amazonas, el clima es ecuatorial húmedo, con fuertes lluvias y altas temperaturas prácticamente todo el año. En las depresiones centrales, el clima es tropical, mientras que gran parte del este del país (Chaco) es semiárido. El frío se apodera de la región de los Andes, en la parte occidental del país, donde se extiende enormemente, ocupando gran parte del territorio.

Figura 48. Clasificación climática de Bolivia según Koppen-geiger (1980-2016)



Fuente: BECK et al.(2018)

La ciudad de Tarija se ubica al sur de Bolivia entre la latitud 21°32'07" S y longitud 64°43'46" O a 1875 m.s.n.m. Según la clasificación de clima de Köppen-Geiger, corresponde BSk - Cwb (*Oceanic Subtropical Highland Climate*).

El perímetro homologado de la mancha urbana en la ciudad de Tarija cuenta con 10.246.18ha. obedece a una delimitación política por la incorporación de nuevas áreas (predios sujetos a descargos impositivos) a la gestión urbana municipal en cumplimiento a disposiciones legales de carácter nacional³⁹, departamental como para la designación de recursos financieros y previsión de programas y proyectos de infraestructura, obras públicas de salud, educación y otros enfocados en el desarrollo humano.

La base de datos meteorológicos de Bolivia está a cargo del Sistema de Procesamiento de Datos Meteorológicos (SISMET), donde se obtienen datos de la Temperatura máxima media en Tarija, 31.8°C correspondiente al mes de noviembre del 2009 según el registro histórico entre los años 1962–2017 (estación meteorológica Tarija Aeropuerto). La temperatura media anual es de 17.7°C, sin embargo, en el mismo mes de noviembre de 2009 alcanzó 24°C, seguido de 23,6°C en el mes de diciembre de 2012. Se registran los cuatros estaciones del año que comprenden, otoño (del 21 de marzo al 21 de junio), invierno (del 21 de junio al 23 de septiembre), primavera (del 23 de septiembre al 21 de diciembre) y verano (del 21 de diciembre al 21 de marzo).

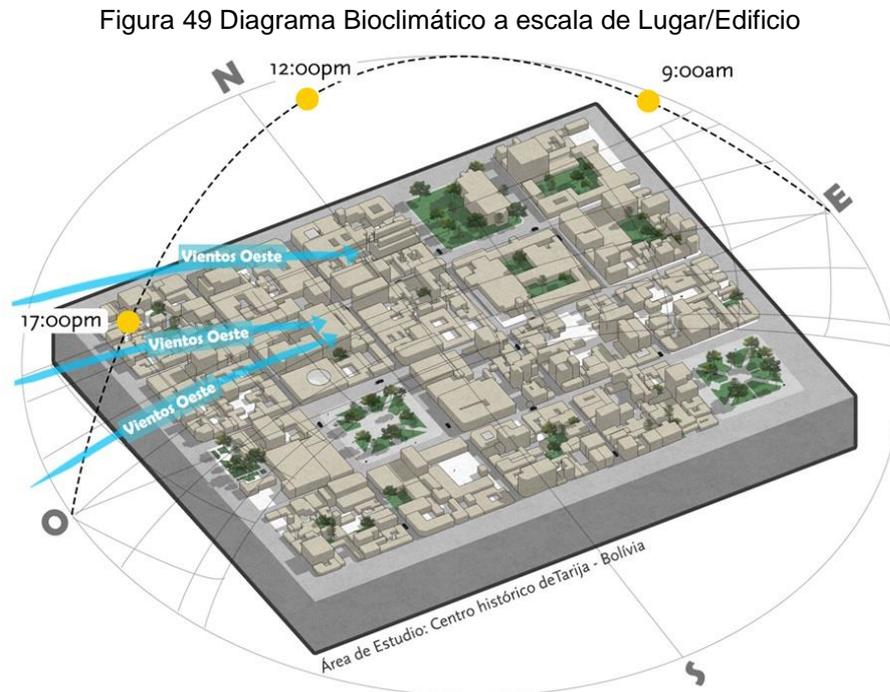
A efectos de enmarcar el estudio fundamentalmente ambiental, se considera un estudio preliminar sobre un recorte de la cuenca hidrográfica, por constituirse en un límite natural (matriz biofísica basado en su geomorfología, pendiente, hidrografía) conforme la definición de unidades de paisaje según Martínez & Meirelles (2019) y como parte de un ecosistema urbano categorizado en escala de grande estructura, según Romero (2011), sobre el que posteriormente se realiza un análisis más específico (centro histórico urbano) como escala de lugar.

En este tipo de escala (Lugar/Edificio), se presenta el Diagrama Bioclimático aplicado con la carta solar para el hemisferio sur Latitud 21°32'07" y Longitud 64°43'46" en el software SOL-AR, se identifican los vientos predominantes del Oeste para los meses de junio/julio y para el Este en los meses noviembre/diciembre⁴⁰, las fachadas

³⁹ Ley 247 (y conexas). Regularización del Derecho Propietario sobre Bienes Inmuebles Urbanos destinados a Vivienda.

⁴⁰ Disponible en: <https://es.weatherspark.com/>

rumbo Este reciben sol de la mañana y las sombras proyectadas en el diagrama en torno a las 9h (Figura 49).



Fuente: Autora, 2023

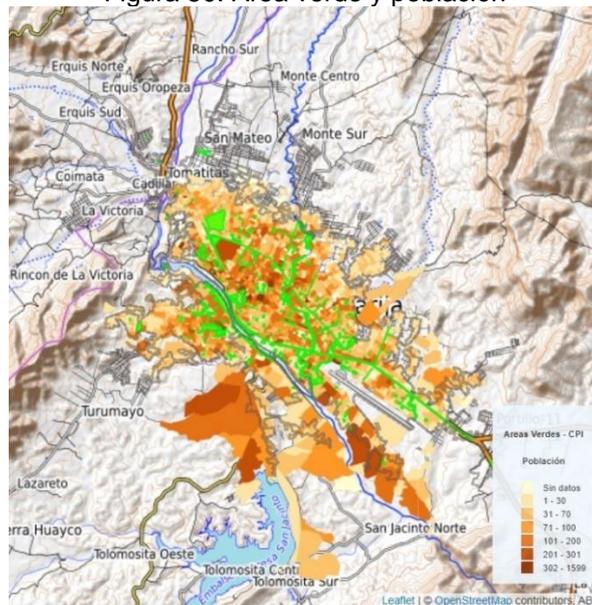
3.3.4 Clasificación arbórea

Según la Guía de Árboles de Bolivia (1993), en la zona de Tarija se identifican valles secos interandinos, o “valles mesotérmicos, semiáridos o montes espinosos, reflejando las diferentes comunidades vegetales relacionadas con la geomorfología local” (KILLEEN; GARCÍA; STEPHAN, 1993 p.22).

Según los indicadores de ONU HABITAT (2022)⁴¹, a través del visualizador de datos urbanos de Bolivia, se observa el grado de urbanización en relación a las áreas verdes con una resolución de 1km² para densidad poblacional y superficie construida (Figura 50).

⁴¹ https://datosurbanosdebolivia.abe.bo/atlas_ciudades

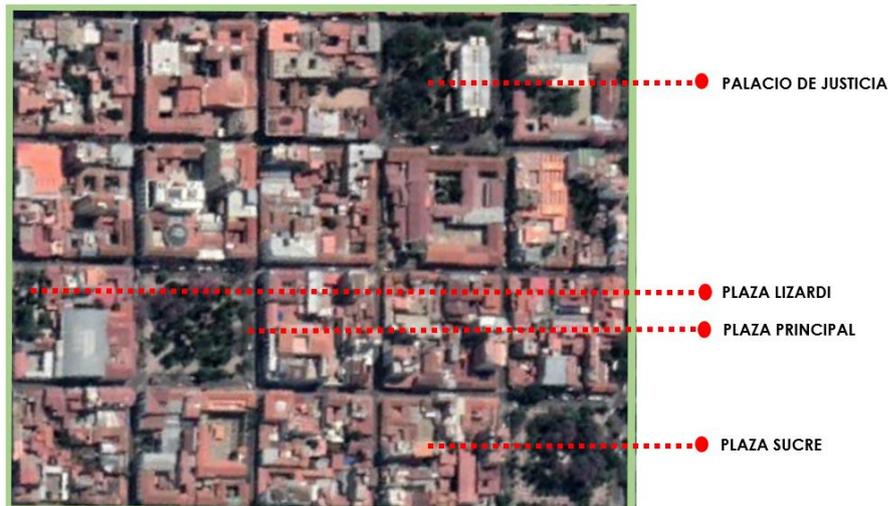
Figura 50. Área verde y población



Fuente: Atlas de Ciudades. Visualizador de Datos Urbanos de Bolivia (ONU HABITAT, 2022)

En el polígono de estudio a escala: Lugar/Edificio o recorte de simulación computacional, se identificaron 4 áreas verdes: Plaza Principal Luis de Fuentes y Vargas, Plazuela Sucre, Patio del Palacio de Justicia y Plaza Lizardi, para cada una de ellas se realizó el inventario arbóreo⁴² (Figura 51).

Figura 51. Áreas verdes en recorte de simulación



Fuente: Autora, 2022

El inventario consistió en georreferenciar cada individuo arbóreo de cada área verde, realizar una ficha de identificación y fotografía de la especie (Tabla 18).

⁴² Inventario realizado por el Ing. Forestal Luis Alberto Arroyo Rengifo en 2021.

Tabla 18. áreas verdes e identificación arbórea



Fuente: Fotos áreas verdes (Autora, 2021), Identificación árboles (Arroyo, 2021)

Este mapa de puntos sirvió como referencia para cuantificar la especie más abundante. En todo el inventario, se identificaron 34 especies arbóreas y un total de 353 individuos, según el siguiente detalle:

- Plaza Principal Luis de Fuentes y Vargas: Se identificaron 12 especies arbóreas de un total de 104 individuos.
- Plazuela Sucre: Se identificaron 21 especies arbóreas de un total de 111 individuos.
- Palacio de Justicia: Se identificaron 25 especies arbóreas en un total de 118 individuos.
- Plaza Lizardi: Se identificaron 7 especies arbóreas de un total de 20 individuos.

Para cada área verde, se realizó la identificación de las especies arbóreas a efectos de filtrar las más recurrentes en cada una de las cuatro áreas verdes del polígono de estudio (Tabla 19).

Tabla 19. Individuos arbóreos

	N°	Nombre común	Nombre científico	Cantidad
PLAZA PRINCIPAL	1	Mispero	Eriobotrya japonica	28
	2	Palmera (1)	Phoenix sp.	22
	3	Tarco	Jacaranda mimosifolia	4
	4	Lapacho rosado	Tabebuia avellanedae	13
	5	Magnolia	Magnolia grandiflora L.	13
	6	Crespón	Lagerstroemia indica L.	9
	7	Palmera (2)	Washingtonia sp.	6
	8	Carnaval	Senna spectabilis	3
	9	Cedro	Cedrela odorata	2
	10	Paraíso	Melia azederach	2

	11	Limón	Citrus limon	1
	12	Naranja	Citrus sinensis	1
	Total			104
PLAZUELA SUCRE	N°	Nombre común	Nombre científico	Cantidad
	1	Magnolia	Magnolia grandiflora L.	14
	2	Naranja	Citrus sinensis	13
	3	Míspero	Eriobotrya japonica	10
	4	Tarco	Jacaranda mimosifolia	9
	5	Paraíso	Melia azederach	9
	6	Crespón	Lagerstroemia indica L.	8
	7	Ligustre	Ligustrum lucidum	8
	8	Palmera (1)	Phoenix canariensis	7
	9	Fresno europeo	Fraxinus excelsior	7
	10	Lapacho rosado	Tabebuia avellanadae	5
	11	Mandarina	Citrus reticulata	5
	12	Brachichito	Brachychiton populneus	3
	13	Timboy	Enterolobium contortisiliquum	2
	14	Lapacho amarillo	Tabebuia chrysotricha	2
	15	Guaranguay	Tecoma stans L.	2
	16	Limón	Citrus limon	2
	17	Casuarina	Casuarina esquisetifolia	1
	18	Pino	Cupressus sempervirens	1
	19	Palmera (2)	Washingtonia Filifera	1
	20	Molle chileno	Schinus terebinthifolius	1
		21	Carnaval	Senna spectabilis
	Total			111
PALACIO DE JUSTICIA	N°	Nombre común	Nombre científico	Cantidad
	1	Lapacho rosado	Tabebuia avellanadae	17
	2	Palmera (1)	Phoenix canariensis	15
	3	Tarco	Jacaranda mimosifolia	10
	4	Paraíso	Melia azederach	10
	5	Grevilla	Grevillea robusta	9
	6	Ceibo	Erythrina falcata	8
	7	Ligustre	Ligustrum lucidum	6
	8	Fresno europeo	Fraxinus excelsior	5
	9	Crespón	Lagerstroemia indica L.	5
	10	Pino	Cupressus sempervirens	4
	11	Míspero	Eriobotrya japonica	4
	12	Naranja	Citrus sinensis	3
	13	Olmo	Ulmus pumila	3
	14	Lapacho amarillo	Tabebuia chrysotricha	3
	15	Palmera (3)	Washingtonia Robusta	2
	16	Cycas	Cycas revoluta	2
	17	Santa Rita	Bougainvillea glabra	2
	18	Roble	Quercus robur	2
	19	Toborochoi	Ceiba speciosa	2
	20	Laurel rosa	Nerium oleander	1
	21	Limón	Citrus limon	1
	22	Brachichito	Brachychiton populneus	1
	23	Timboy	Enterolobium contortisiliquum	1
	24	Carnaval	Senna spectabilis	1
	25	Narciso	Thevetia peruviana	1
	Total			118
PLAZA LIZARDI	N°	Nombre común	Nombre científico	Cantidad
	1	Palmera (3)	Washingtonia Robusta	7
	2	Lapacho rosado	Tabebuia avellanadae	4
	3	Míspero	Eriobotrya japónica	3
	4	Brachichito	Brachychiton populneus	2
	5	Pino del cerro	Podocarpus parlatorei	2
	6	Paraíso	Melia azederach	1
	7	Limón	Citrus limon	1
	Total			20

Fuente: Autora, 2021

El inventario se realizó con el levantamiento del individuo arbóreo a través de un punto georreferenciado, fotografía y llenado de ficha. La sistematización de datos se realiza a través de SIG en el software ArcGIS.

Las cinco especies de mayor presencia en las áreas verdes son el míspero, palmeras, lapacho rosado, magnolia y tarco. En Tabla 20, se presentan las 34 especies arbóreas identificadas:

Tabla 20. Especies arbóreas identificadas

					
Brachichito Brachychiton populneus	Carnaval Senna spectabilis	Casuarina Casuarina equisetifolia	Cedro Cedrela odorata	Ceibos Erythrina falcata	Crespón Lagerstroemia indica L.
					
Cycas Cycas revoluta	Fresno europeo Fraxinus excelsior	Grevilla Grevillea robusta	Guaranguay Tecoma stans L.	Lapacho amarillo Tabebuia chrysantha	Lapacho rosado Tabebuia avellanadae
					
Laurel rosa Nerium oleander	Ligustre Ligustrum lucidum	Limón Citrus limon	Magnolia Magnolia grandiflora L.	Mandarina Citrus reticulata	Míspero Eriobotrya japonica
					
Molle chileno Schinus terebinthifolius	Naranja Citrus sinensis	Narciso Thevetia peruviana	Olmo Ulmus pumila	Palmera 1 Phoenix canariensis	Palmera 2 Phonenix dactilifera

					
Palmera 3 Washingtonia filifera	Palmera 4 Washingtonia robusta	Paraíso Melia azederach	Pino Cupressus sempervirens	Pio del cerro Podocarpus parlatorei	Roble Quercus robur
					
Santa Rita Bougainvillea glabra	Tarco Jacaranda mimosifolia	Timboy Enterolobium contortisiquum	Toborocho Ceiba speciosa		

Fuente: Inventario (Arroyo, 2021)

3.4 Lugar/Edificio

En esta escala de estudio, se define el recorte específico del lugar para la simulación computacional. El área de estudio consta de 20 manzanas del centro histórico entre las que se incluyen las cuatro áreas verdes, edificaciones y calles. Los límites son al norte con la calle Bolívar, al sur con la calle Virginio Lema, al este con la calle Suipacha y oeste con la calle Campero. El recorte mide 450m*350m (15.75 ha) Figura 52.

El *software* (de libre acceso) permite un área de trabajo menor 50m*50m, sin embargo, para este estudio se contó con licencia de manejo de ENVI-met *Student license*⁴³, permite un área de trabajo mayor y procesamiento de otros indicadores.

En el polígono se identifican equipamientos administrativos, institucionales, culturales, religiosos, bancos, comerciales, de educación (universidad y escuela), deportivos, y algunas viviendas propias. Por ser el centro histórico, se tipifica como el distrito 1 de la ciudad.

⁴³ Licencia adquirida por el Laboratorio de Sustentabilidad – LaSUS, UnB.

Figura 52. Recorte simulación



Fuente: Imagen Satelital, 2021

3.4.1 Simulación con ENVI-met V5.5.1

ENVI-met es un *software* de modelado 3D en alta resolución que simula de manera precisa los complejos procesos microclimáticos. ENVI-met proporciona información detallada sobre el impacto de los factores ambientales en el diseño urbano, apoyando la toma de decisiones en planificación urbana, infraestructura verde y estrategias ante el cambio climático (ENVI-met, 2023)⁴⁴.

ENVI-met es un modelo computacional holístico basado en los principios de la termodinámica que evalúa las “interacciones fluidodinámicas y termodinámicas entre la atmósfera, las plantas, superficies y contextos urbanos” (Marrone & Orsini, 2018 p.350), para evaluar el desempeño microclimático. La aplicación de ENVI-met en múltiples investigaciones data desde finales de la década de 1990 (SCHMITZ; MENDONÇA, 2014). Estudios relativos a la interacción entre variables del medio natural: radiación solar, vegetación, viento, humedad de aire, etc. y medio urbano: red vial, espacios libres, morfología, tipología de edificios, etc.

⁴⁴ <https://www.envi-met.com/es/>

De la misma forma, Silva & Romero (2020), sostienen que por la complejidad del *software* se evalúa la interacción entre vegetación, suelo y aire a través de los parámetros de temperatura, humedad, radiación y ventilación. El tipo de cálculo incluye la radiación de onda corta y larga, el flujo de sombreado, la reflexión e irradiación del edificio y la vegetación. Respecto a las superficies construidas, “el programa considera las proyecciones de sombra, las reflexiones e irradiación de sistemas edificados y su relación con la transpiración de la vegetación, evaporación y el flujo de calor sensible” (SILVA & ROMERO, 2020 p.30).

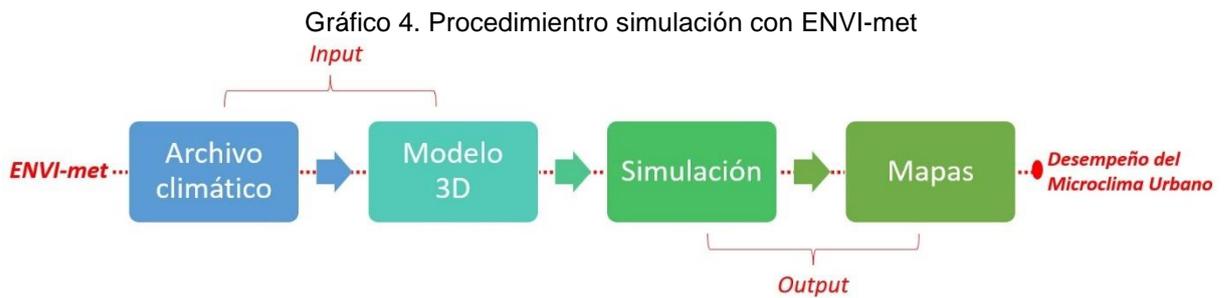
El modelo tridimensional incluye la simulación y evaluación climática en un sector determinado y proporciona una observación crítica para proponer estrategias bioclimáticas que mejoren sus características en diferentes escenarios (escenario real, propuesto, alternativo, hipotético, etc.).

Para Silva (2013), evaluar el impacto del microclima del espacio abierto y comprender la dimensión bioclimática de la configuración del espacio construido permite su aplicación en las áreas de climatología urbana, arquitectura y diseño de lotes o planificación ambiental. También la simulación computacional del microclima contribuye en la toma de decisiones en el proceso de diseño e implantación de proyecto de arquitectura y urbanismo o de análisis de escenarios para un plan de mitigación (SILVA, FERNANDES; CINTRA, 2021)

Helge Simon⁴⁵, argumenta que la simulación de ENVI-met, es un método de investigación (no empírico), que, al ser comparado con el desempeño de otro tipo de estudios, representa ventajas, porque el modelo recrea escenarios (tipos de albedo) que pueden ser medidos por la simulación, otra ventaja es la escala del modelo (una cuadra, un barrio), favorable para adoptar medidas de planificación territorial.

El *software* presenta resultados con precisión de cálculo y posibilita la extracción de datos con desglose de horas durante el día (9h, 12h, 15h, 18h, 21h, etc). Para la simulación computacional a través del *software* ENVI-met V5.5.1, se prevé el procedimiento metodológico en dos fases, primero, la creación del modelo 3D, con todas las informaciones climáticas y configuracionales (*input*) y segundo, la simulación que genera los valores e indicadores a través de plugin Leonardo para generar mapas (*output*) Gráfico 4.

⁴⁵ Dr. Helge Simon, *Head of Software Engineering* de ENVI-met. Expert Lesson: Building Physics. 2023 (www.envi-met.com)



Fuente: Autora, 2022

El *software* requiere calibración para ejecutar el procedimiento de simulación y los parámetros básicos considerados en la primera fase de *input*, se enlistan en Tabla 21.

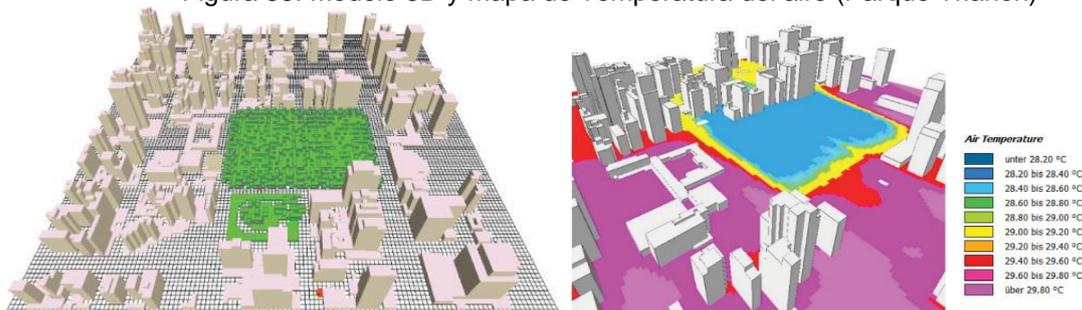
Tabla 21. Parámetros para simulación con ENVI-met

Variable
Tamaño de pixel
Fecha de simulación
Tiempo total de simulación
Hora de inicio
Velocidad del viento (m/s)
Dirección de los vientos (deg)
Rugosidad
Temperatura atmosférica T (°C)
Humedad q (%)

Fuente: Adaptado de ENVI-met (2020)

Una aplicación del uso de simulación microclimática es el estudio de (SHINZATO et al., 2019), que se focaliza en los parámetros microclimáticos de tres tipologías de árboles para mejorar el proceso de calibración de las áreas vegetadas, pretende a partir de las simulaciones evaluar el comportamiento de las plantas (parámetros como el albedo de las hojas, la densidad de área foliar, geometría de la copa) en dos localizaciones específicas (dentro y fuera) del parque Trianon de la ciudad de Sao Paulo (Figura 53).

Figura 53. Modelo 3D y mapa de Temperatura del aire (Parque Trianon)

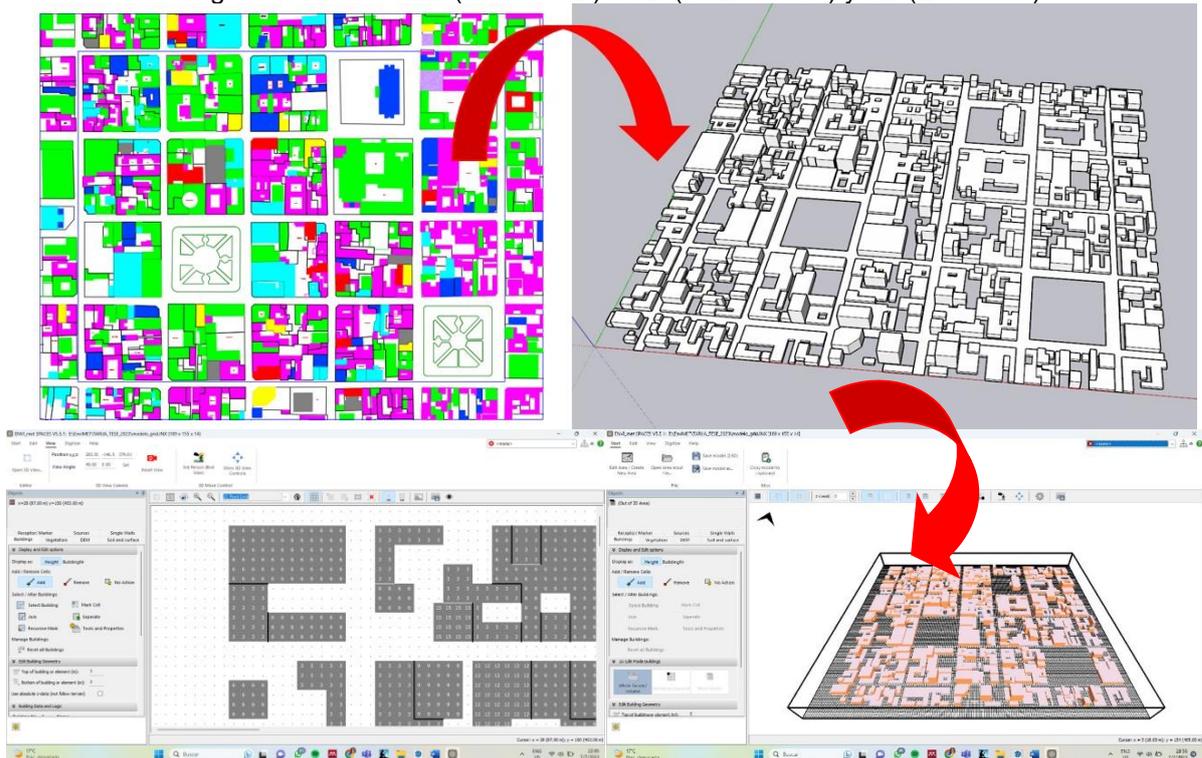


Fuente: SHINZATO et al. (2019 p.117-123)

En el presente estudio, gracias al *software* de ENVI-met V5.5.1 podemos extraer datos de las siguientes variables climáticas:

- a) Temperatura de superficie (*T Surface*)
- b) Temperatura del Aire (*Air Temperature*)
- c) Humedad relativa del aire (*Relative Humidity*)
- d) Velocidad del viento (*Wind Speed*)
- e) Temperatura Radiante Media (*Mean radiant temperature*)
- f) Temperatura de las hojas (*Leaf temperature*)
- g) Temperatura del edificio (*Temperature of building – inside*)
- h) Temperatura del edificio (*Temperature of facade - outside*)
- i) Índice de confort térmico PMV (*Predict Mean Vote*)
- j) Índice de confort termico PET (*Physiological Equivalent Temperature*)

Figura 54. Modelo 2D (AUTOCAD) a 3D (SKETCHUP) y 3D (ENVI-met)



Fuente: Autora, 2023

El procedimiento aplicado para la creación del modelo 3D en ENVI-met consistió en cuatro pasos: delimitación del área de estudio sobre imagen satélite (recorte de simulación); levantamiento y diseño de los edificios en 2D AutoCAD con

alturas de predios⁴⁶; modelo del 3D en Sketchup e importación del modelo para ENVI-met con el *input* de datos del ambiente construido: materiales, alturas, vegetación, superficies (Figura 54) y finalmente el archivo climático (Figura 58).

El flujo de trabajo y los componentes del software ENVI-met V5.5.1, consiste en: Organizar el área de trabajo (*Workspaces*), Edición (*Monde, Spaces*), Base de datos (*DB Manager, Albero, Forcing Manager*), simulación (ENVI-guide, ENVI-core), proceso (*Biomet*), visualización (*Leonardo*) (Figura 55).



Fuente: ENVI-met, 2023 <www.envi-met.com>

Una vez que el área de estudio se encuentra simulada (en diferentes escenarios, hipotéticos, proyectuales o de situación actual), ENVI-met ofrece múltiples datos de salida, “archivos simples y binarios” (Guson, 2019 p.117) comprendidos en 12 carpetas (Figura 56). De las cuales se pretende extraer datos de *Atmosphere, Biomet, Buildings, Surface, Vegetation*.

Figura 56. Carpeta de los datos de salida de ENVI-met

atmosphere	18/08/2023 21:38	Carpeta de archivos
buildings	18/08/2023 21:39	Carpeta de archivos
inflow	18/08/2023 21:39	Carpeta de archivos
inputData	18/08/2023 21:39	Carpeta de archivos
log	18/08/2023 21:39	Carpeta de archivos
radiation	18/08/2023 21:39	Carpeta de archivos
receptors	10/08/2023 13:45	Carpeta de archivos
soil	18/08/2023 21:38	Carpeta de archivos
solaraccess	18/08/2023 21:38	Carpeta de archivos
surface	18/08/2023 21:38	Carpeta de archivos
vegetation	18/08/2023 21:38	Carpeta de archivos

Fuente: Autora, 2023

⁴⁶ Catastro multifinilarario del GAMT

Para resumir, los datos de entrada al *software* son: definición de la base de datos del archivo climático; de los materiales de construcción y vegetación y finalmente la definición de los escenarios de simulación.

3.4.2 Base de Datos: Archivo climático, edificaciones, vegetación (*Input*)

Archivo climático

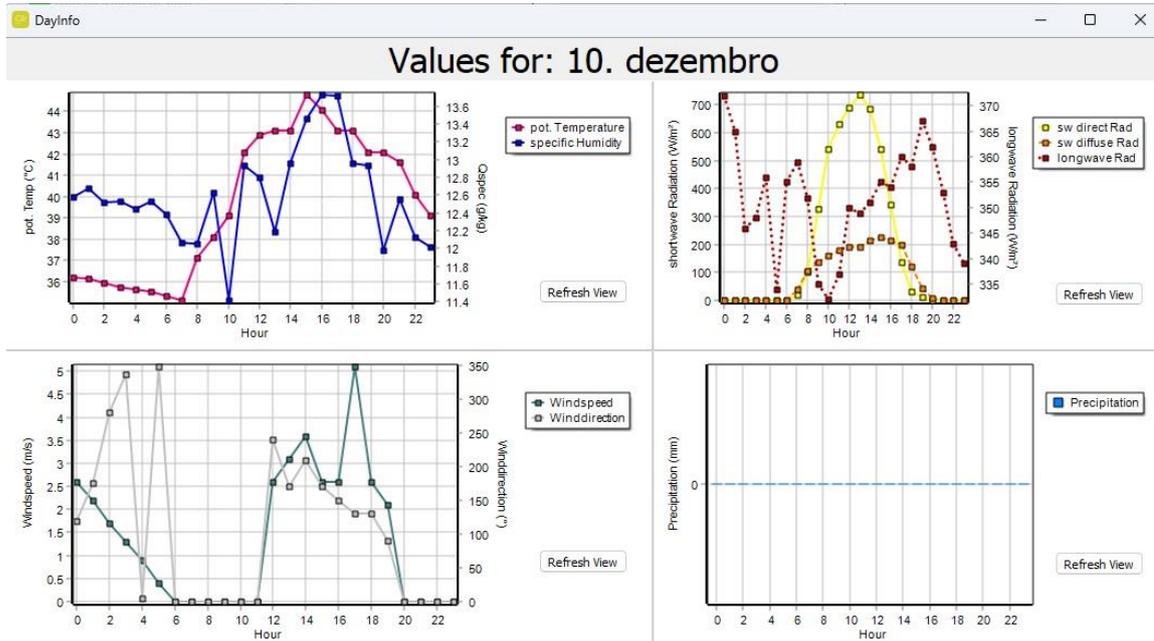
Para el análisis, se optó por el uso del sistema de archivos simulados, *Energy Plus*, basados en estaciones meteorológicas, el *Energy Plus Weather Format (EPW)*. Con este sistema se cuenta con datos anuales de todas las variables climáticas (principalmente los de temperatura). Según *Typical Meteorological Year (TMY)*, se compilan los datos generando un año climático (imaginado), con datos horarios hasta el 2021.

Si bien se recomienda para las condiciones climáticas locales el proceso de calibración del modelo (ajustes de los datos de entrada en las variables microclimáticas) (SHINZATO; DUARTE, 2018), es importante indicar que esta simulación no se encuentra calibrada por no contar con mediciones de campo *in situ* de las variables microclimáticas, el ajuste del modelo se realizará a los datos medidos futuros. Sin embargo, se consultaron fuentes de archivos de EPW (EPWiew, Climate Consult 6.0), para verificar la correspondencia en los valores registrados de temperatura.

Se extrajo el EPW (BOL_TR_Tarija-Plaza.AP.853640_TMYx.2007-2021.zip (413 K), para la ciudad de Tarija en *Climate One Building*⁴⁷ que contiene los datos más actuales (2007-2021). Se identifica *Week Nearest Max Temperature For Period, Extreme*, 12/10, 12/16. Indica también las temperaturas medias de los días más calientes, mínimas y los años seleccionados para determinar ese típico: *Periodo f Record = 2007-2021; Jan=2015; Feb=2009; Mar=2019; Apr=2007; May=2019; Jun=2007; Jul=2015; Aug=2019; Sep=2007; Oct=2011; Nov=2013; Dec=2018*. En este archivo climático se identificó el día extremo de calor (por encima de 40°), correspondiente al 10/12/2018 (Figura 57).

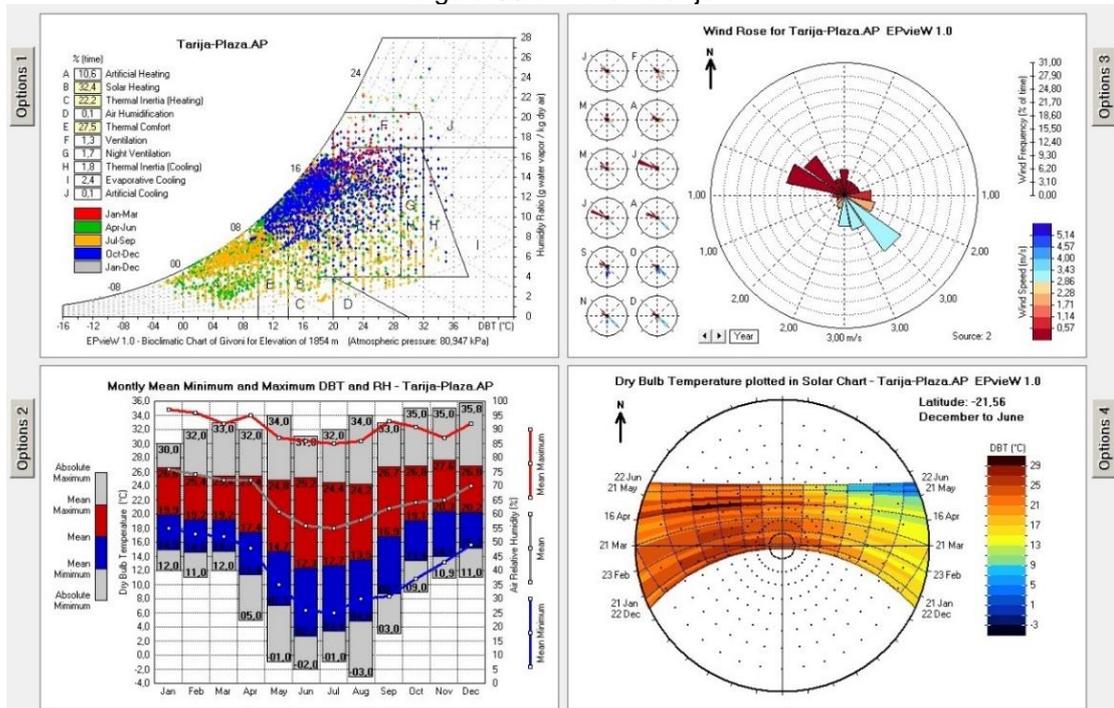
⁴⁷ Disponible en: <https://climate.onebuilding.org/>.

Figura 57. Valores climáticos en Forcing Manager de ENVI-met V5.5.1 según EPW



Fuente: Autora, 2023

Figura 58. EPWiew Tarija



Fuente: Autora, 2023

Utilizando EPWiew⁴⁸, *software* que considera las informaciones contenidas en los archivos climáticos EnergyPlus (EPW), se obtiene la Carta Bioclimática de Givoni, la Rosa de Vientos y Carta Solar, allí se indican los datos máximos de temperatura en

⁴⁸ <https://roriz.eng.br/downloads>

torno a los 35.8°C. El diagrama de Givoni, identifica que el 27.5% se encuentra en confort térmico, el 32.4% requiere calentamiento solar y el 22.2% requiere calentamiento por inercia térmica. (Figura 58).

Consultando otra base de datos: *Climate Consultant 6.0*, para el mismo EPW, se registran datos de temperatura media en el mes de diciembre entre los 16°C (Figura 59).

Figura 59. EPW en Climate Consultant 6.0

WEATHER DATA SUMMARY		LOCATION: Tarija-Plaza.AP, TR, BOL												
		Latitude/Longitude: 21.556° South, 64.701° West, Time Zone from Greenwich -4												
		Data Source: SRC-TMYx 853640 WMO Station Number, Elevation 1854 m												
MONTHLY MEANS		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)		447	454	421	429	419	416	433	493	506	498	490	428	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)		377	389	363	471	550	601	595	645	556	483	445	331	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)		162	159	154	117	93	78	84	88	122	141	151	171	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)		1132	1081	984	900	869	760	812	947	1040	1095	1126	1109	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)		1034	1036	1002	1004	1006	966	963	995	1002	1035	1026	1034	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)		452	454	394	361	301	177	242	323	291	399	376	411	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)		5901	5788	5099	4927	4594	4461	4697	5571	6018	6255	6397	5701	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)		4985	4953	4397	5401	6022	6440	6454	7286	6606	6061	5804	4402	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)		2137	2033	1872	1357	1020	837	920	998	1453	1770	1980	2280	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)		47733	48981	46489	47581	45774	44463	46027	52787	54671	53338	52124	45894	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)		30637	34007	33795	48951	58630	61753	64119	68154	55139	45208	37474	26824	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)		17	17	16	15	12	10	10	11	14	16	16	16	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)		13	14	13	11	6	3	0	2	7	9	10	13	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)		77	82	79	79	66	65	57	59	67	66	69	76	percent
Wind Direction (Monthly Mode)		130	140	130	180	130	130	130	300	170	130	130	130	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)		1	1	1	1	1	0	1	1	2	2	2	1	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 3 Depths)		15	16	16	16	15	14	13	12	12	11	13	13	degrees C

Fuente: Autora, 2023

Ante la revisión de los registros de temperatura, se consultaron los registros de datos medidos de la estación meteorológica del Aeropuerto de Tarija a cargo del SENAMHI. El Resumen Climatológico de la estación, en el periodo 1962-2020 (Latitud S: 21°32'48" y Longitud W: 64°42'39" a una altura de 1.849 m.s.n.m.), registra el valor de temperatura extrema máxima de 39.7°C en el mes de octubre y para el mes de diciembre de 38.8°C. Específicamente para el año 2018, el valor de temperatura máxima de 36°C. La misma estación proporcionó datos actualizados del Resumen Climatológico para el periodo entre 1970 -2022 con el valor de temperatura máxima

extrema anual de 40.5°C, el mayor registro en el mes de octubre y 35.2 °C en el mes de marzo (Figura 60).

Figura 60. Resumen Climatológico de SENAMHI (1962-2020) y (1970-2022)

 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA - TARIJA <i>Pesje Higueras s/n (El Tejar) - Tel: 6642238</i>														
RESUMEN CLIMATOLOGICO Periodo Considerado: 1962 - 2020														
Estación: AEROPUERTO Provincia: CERCADO Departamento: TARIJA										Latitud S.: 21° 32' 48" Longitud W.: 64° 42' 39" Altura: 1.849 m. s. n. m.				
Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	27,2	26,8	26,3	25,7	24,8	24,2	24,0	25,5	26,3	27,7	27,6	27,6	26,1
Temp. Min. Media	°C	14,5	14,1	13,5	11,0	6,2	2,8	2,5	4,8	7,9	11,5	13,1	14,3	9,7
Temp. Media	°C	20,8	20,4	19,9	18,4	15,5	13,5	13,2	15,1	17,1	19,6	20,4	20,9	17,9
Temp.Max.Extr.	°C	36,5	37,4	37,5	37,4	36,2	34,6	36,0	37,4	39,5	39,7	39,0	38,8	39,7
Temp.Min.Extr.	°C	6,0	4,0	5,0	-2,0	-5,2	-7,7	-9,2	-8,0	-4,2	1,0	3,0	5,0	-9,2
Días con Helada		0	0	0	0	1	8	9	4	1	0	0	0	22
Humed. Relativa	%	67	69	69	66	60	55	53	51	51	55	59	63	60
Nubosidad Media	Octas	6	5	5	4	3	3	3	2	3	4	5	5	4
Insolación Media	Hrs	5,7	5,7	5,7	6,3	6,9	7,1	7,7	7,9	7,7	6,7	6,3	5,4	6,6
Presion Barometrica	hPa	813,8	814,2	814,3	814,2	814,4	814,1	814,3	814,3	814,1	813,6	813,4	813,0	814,0
Precipitación	mm	138,1	113,9	82,0	21,1	2,2	0,7	0,8	2,0	7,4	37,4	66,9	126,1	598,5
Pp. Max. Diaria	mm	97,8	75,2	85,0	55,0	25,6	22,0	20,0	34,0	23,0	59,0	125,0	106,0	125,0
Días con Lluvia		13	11	9	4	1	0	0	1	2	6	9	12	68
Días con Granizo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Días Tormenta Eléctrica		8	6	4	1	0	0	0	0	1	3	5	8	37
Velocidad del viento	km/hr	5,6	5,2	5,1	5,4	4,7	4,1	5,0	6,4	8,0	8,2	7,6	6,5	6,0
Dirección del viento		SE	SE	SE	SE	SE								
Viento Máximo	km/hr	64,8	55,5	46,3	55,5	55,5	55,5	83,3	64,8	64,8	55,5	59,2	55,5	83,3
Dirección del viento		W	SE	SE	SSW	SSE	SW	N	SE	SE	N	SE	W	N

 MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y AGUA SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA - TARIJA <i>Pesje Higueras s/n (El Tejar) - Tel: 6642238</i>														
RESUMEN CLIMATOLOGICO Periodo Considerado: 1970 - 2022														
Estación: EL TEJAR Provincia: CERCADO Departamento: TARIJA										Latitud S.: 21° 32' 35" Longitud W.: 64° 43' 16" Altura: 1.859 m. s. n. m.				
Indice	Unidad	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	ANUAL
Temp. Max. Media	°C	27,5	26,9	26,8	26,0	25,0	24,7	24,7	25,9	26,5	27,7	27,6	27,6	26,4
Temp. Min. Media	°C	14,7	14,2	13,7	11,2	6,1	2,8	2,6	4,9	7,9	11,6	13,2	14,4	9,8
Temp. Media	°C	21,1	20,5	20,3	18,6	15,6	13,7	13,7	15,4	17,2	19,6	20,4	21,0	18,1
Temp.Max.Extr.	°C	36,0	36,2	35,2	36,6	36,0	35,8	36,5	38,0	40,0	40,5	40,0	39,0	40,5
Temp.Min.Extr.	°C	6,0	4,5	5,0	-1,5	-4,0	-8,5	-10,0	-9,5	-4,5	-1,0	2,5	3,5	-10,0
Días con Helada		0	0	0	0	2	7	8	4	1	0	0	0	22
Humed. Relativa	%	70	71	72	69	64	60	56	55	56	59	63	67	63
Nubosidad Media	Octas	5	5	5	4	3	2	2	2	3	4	4	5	4
Insolación Media	Hrs	5,6	5,8	5,9	6,5	7,3	7,3	7,5	7,7	7,6	7,2	6,6	6,0	6,7
Evapo. Media	mm/día	4,43	4,33	3,95	3,43	2,90	2,65	3,11	3,98	4,76	5,35	5,06	4,79	4,06
Radiación Solar	cal/cm2/día	448,8	445,6	417,1	388,9	372,0	342,3	349,3	392,0	413,7	446,2	453,0	448,8	409,8
Precipitación	mm	137,0	112,8	94,9	21,5	2,9	0,7	1,1	2,3	7,4	39,2	77,0	131,4	628,2
Pp. Max. Diaria	mm	91,5	84,0	71,0	64,6	20,0	19,0	17,5	23,0	15,4	48,6	105,7	90,0	105,7
Días con Lluvia		15	13	11	4	1	0	0	1	3	6	10	14	79
Días con Granizo		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Velocidad del viento	km/hr	8,9	8,5	7,8	8,7	6,2	6,4	7,4	8,9	12,4	9,7	11,9	10,4	8,9
Dirección del viento		S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S

* 1975 se cambió la estación a CODETAR
 * 19/07/78 se cambió la estación a el fundo de Agronomía (U)
 * 25/04/2000 se cambió la estación a la carrera de Forestal (U)

Fuente: SENAMHI, 2023⁴⁹

Ante las diferentes mediciones y registros de temperatura, finalmente se optó por los datos generados dentro del propio software de simulación ENVI-met, correspondientes al día típico de calor extremo.

Edificaciones

El uso de adobe y arquitectura en tierra data hace miles de años por los pueblos indígenas de América (GAMA-CASTRO *et al.*, 2012). En el centro histórico de Tarija, se identifican construcciones con esta tipología de construcción con tierra o adobe (arcilla y arena), para los muros exteriores con revestimiento de cal y uso de teja colonial en las cubiertas. Según MINKE (2001 p.22), los adobes son los bloques de barro producidos a mano, rellenando barro en moldes y secados al aire libre, entre las medidas más comunes en Latinoamérica entre 38*38*8cm o 40*20*10cm.

El *software* ENVI-met (desarrollado en Alemania), no presenta informaciones de este tipo de material, sin embargo, posibilita la creación de nuevos materiales en su base de datos *DBmanager*.

Para el estudio, fue preciso incorporar el muro de adobe en la simulación, por tanto, considerar las propiedades térmicas y valores de: absorción, transmisión, reflexión, emisividad del material, calor específico, conductividad térmica y densidad.

Se realizó una revisión bibliográfica sobre las propiedades térmicas del adobe (Tabla 22), asumiendo valores para la simulación y configuración de nuevos materiales para el *Database* en ENVI-met.

Tabla 22. Propiedades térmicas del adobe

Concepto	Unidad de medida	Valor asumido/ consultado	Autor	País
Espesura	M	0.4 0.17 a 0.48	Condori (2010) Pinheiro (2023 p.174)	Bolivia Brasil
Coefficiente de absorción	(0 a 1)	0.6	Default ENVI-met	Alemania
Coefficiente de transmisión	(0 a 1)	0	Default ENVI-met	Alemania
Coefficiente de reflexión	(0 a 1)	0.4	Default ENVI-met	Alemania
Emisividad	(0 a 1)	0.9	Default ENVI-met	Alemania
Calor específico	(J/kg*K)	1480 2200 (teórico) 1800	González (2019 p.18) Sánchez (2020 p.79) Vitale (2020 p.4)	Perú Ecuador Reino Unido

⁴⁹ Planillas en formato Excel, proporcionado de manera digital en respuesta a solicitud de información, en fecha 13/02/2023 de la Estación Meteorológica del Aeropuerto-Tarija.

Conductividad térmica	(W/m*K)	900	Holguino <i>et al</i> (2018)	Perú
		0.85	Condori (2010 p.2010)	Bolivia
		0.60	González (2019 p.18)	Perú
		0.57	Oke (p.169)	Canadá
		0.455 (s/fibra)	González (2019 p.51)	Perú
		0.417 (c/fibra)		
		0.371 (s/tipa)	Pinhas (2018)	
		0.349 (c/tipa)		
		0.35	Holguino <i>et al</i> (2018 p.290)	Perú
		0.24 a 0.33	Sánchez (2020 p.79)	Ecuador
Densidad	(kg/m3)	0.18	Apud Holguino (2018)	Reino Unido
		0.176	Apud. Young (2009)	
		1600	González (2019 p.18)	Perú
		1616.6-1814,7 (adobe 85)	Sánchez (2020 p.79)	Ecuador

Fuente: Autora, 2023

Los valores asumidos para la creación de nuevos materiales en el *software* son los siguientes (Tabla 23).

Tabla 23. Propiedades térmicas de materiales

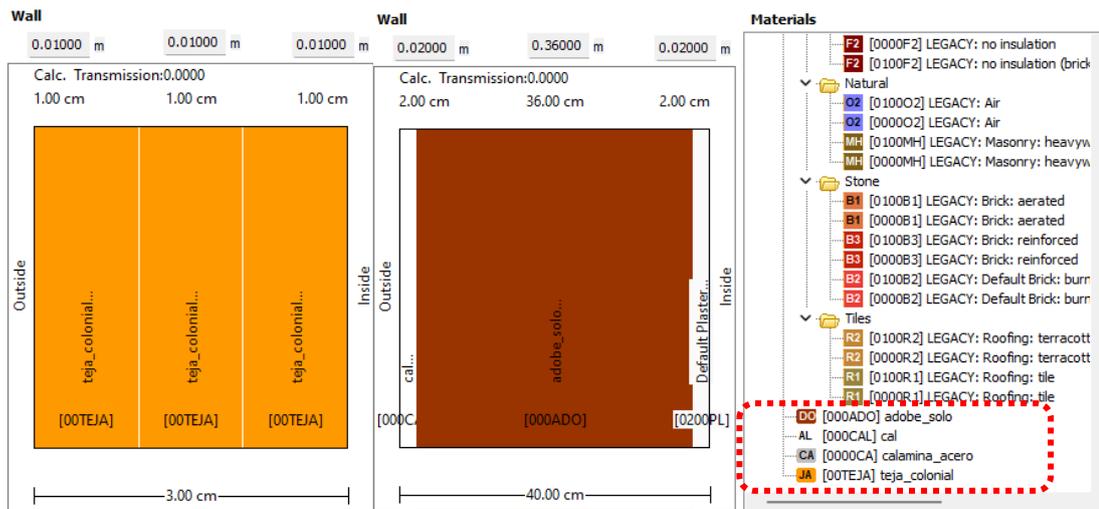
Material	Espesura (M)	C. absorción (0 a 1)	C. transmisión (0 a 1)	C. reflexión (0 a 1)	Emisividad (0 a 1)	Calor específico (J/kg*K)	Conductividad térmica (W/m*K)	Densidad (kg/m3)
Adobe	0.4	0.6	0	0.4	0.9	1480	0.85	1600
Cal	0.02	0.2	0	0.8	0.9	837	0.7	1200
Teja	0.03	0.6	0	0.4	0.9	921	0.93	1500
Calamina	0.02	0.3	0	0.7	0.1	420	45	8000

Fuente: Autores varios, 2023

Los materiales del sistema constructivo adicionado en el *software*, consiste en asignar los valores de las propiedades térmicas de los materiales en el *database* de ENVI-met, específicamente en la herramienta *DBmanager*. Creando inicialmente el nuevo material (solo adobe, adobe con revoque, cal, calamina, teja colonial) en *Wall/Roof Materials* y posteriormente en *Wall/Roof Constructions*. Para el adobe con revoque, fue definido un ancho total de muro de 0.4mt con revoque externo de cal y revoque interno de yeso por *default plaster* del programa, para la teja colonial definido un espesor de 0.03m (Figura 61).

En el área de trabajo *Spaces* se asume la caracterización del sistema constructivo del adobe en muros y cubierta de teja en color amarillo (Figura 62), a las edificaciones de 1 nivel a altura, es decir, 3m en todo el recorte de simulación.

Figura 60. Material teja, adobe en database de ENVI-met V5.5.1



Fuente: Autora, 2023

Figura 61. Casas con adobe en modelo Spaces de ENVI-met V5.5.1



Fuente: Autora, 2023

En resumen, se realizó el modelo considerando tres capas: edificaciones, cuadras, calles, en cada uno de ellos asignado los materiales correspondientes.

Edificaciones (hasta 7 niveles de altura o 21mt)

Materiales de cubierta

Policarbonato (*single walls*)

Teja colonial (nuevo)

Losa de H°(concrete slar Hollow block)

Calamina

Materiales de muro

Ladrillo hueco (brick wall aerated)

Adobe (nuevo)

Piso

Cuadras, aceras, patios (*concrete used dirty*)

Asfalto (asphalt road)

Áreas verdes (desarrollado en siguiente subtítulo)

Plazas

Patios vegetados

Vegetación

Sobre el inventario arbóreo realizado, procede la elección de especies para incorporar en el modelo de ENVI-met, que posibilita la creación de nuevas especies a través de su aplicación *Albero*. Ésta se define por criterios de selección: primero se identifican las 5 primeras especies en cantidad (discriminando las palmeras, toda vez que, por su altura, el aporte al sombreado es escaso al igual que el índice de evapotranspiración y no sería recomendable para incluirla en una estrategia en el estudio microclimático a escala del peatón) y segundo, escoger las más comunes de ese grupo.

Las especies más comunes para cada área verde son: míspero (45), lapacho rosado (39), magnolia (27), tarco (23), paraíso (22) y naranjo (26). Teniendo dos especies de bajo porte (míspero y naranjo), una especie de medio porte (lapacho rosado), tres de gran porte (tarco, paraíso y magnolia) y una frutal (naranjo). El detalle de las especies según el área verde en Tabla 24.

Tabla 24. Cantidad de individuos arbóreos por área verde

Especie	Plaza Principal	Plazuela Sucre	Palacio de Justicia	Plaza Lizardi	Total
Míspero	28	10	4	3	45
Lapacho rosado	13	5	17	4	39
Magnolia	13	14	0	0	27
Tarco	4	9	10	0	23
Paraíso	2	9	10	1	22
Naranjo	13	13	0	0	26
	73	60	41	8	182

Fuente: Autora, 2023

Para incorporar las especies escogidas en el *Database* de ENVI-met, es preciso obtener los índices de LAI (según referencias consultadas) y LAD (índice de densidad

foliar expresado en m²/m³), según (LALIC; MIHAIOVIC, 2004) apud. SHINZATO, 2014 p. 81), según el detalle en Tabla 25:

Tabla 25. Datos de LAI y LAD según fichas de levantamiento arbóreo

Especie	Altura de la planta (m)	Diámetro	LAI s/referencia	LAD s/Lalic, Mihaiolovic	Referencia
Míspero	6	4	3	0.4	NParks Singapur ⁵⁰
Lapacho rosado	12	14	3		NParks Singapur
Magnolia	20	7	3	0.33	NParks Singapur
Tarco	15	9	3	0.4	Default ENVI-met
Paraíso	10	7	0.82	0.12	Angrish <i>et al</i> (2009)

Fuente: Autora, 2023

En relación a la vegetación, ENVI-met “determina la temperatura media de las hojas por medio del balance térmico, que considera la condición climática y fisiología de la planta”(SHINZATO; DUARTE, 2018 p.203). Por tanto, se consideran las propiedades fisiológicas de la planta (míspero, tarco), para crear y adaptar el arquetipo de árboles en *Albero* de ENVI-met, según Tabla 26.

Tabla 26. Propiedades fisiológicas de la planta según *Albero* de ENVI-met V5.5.1

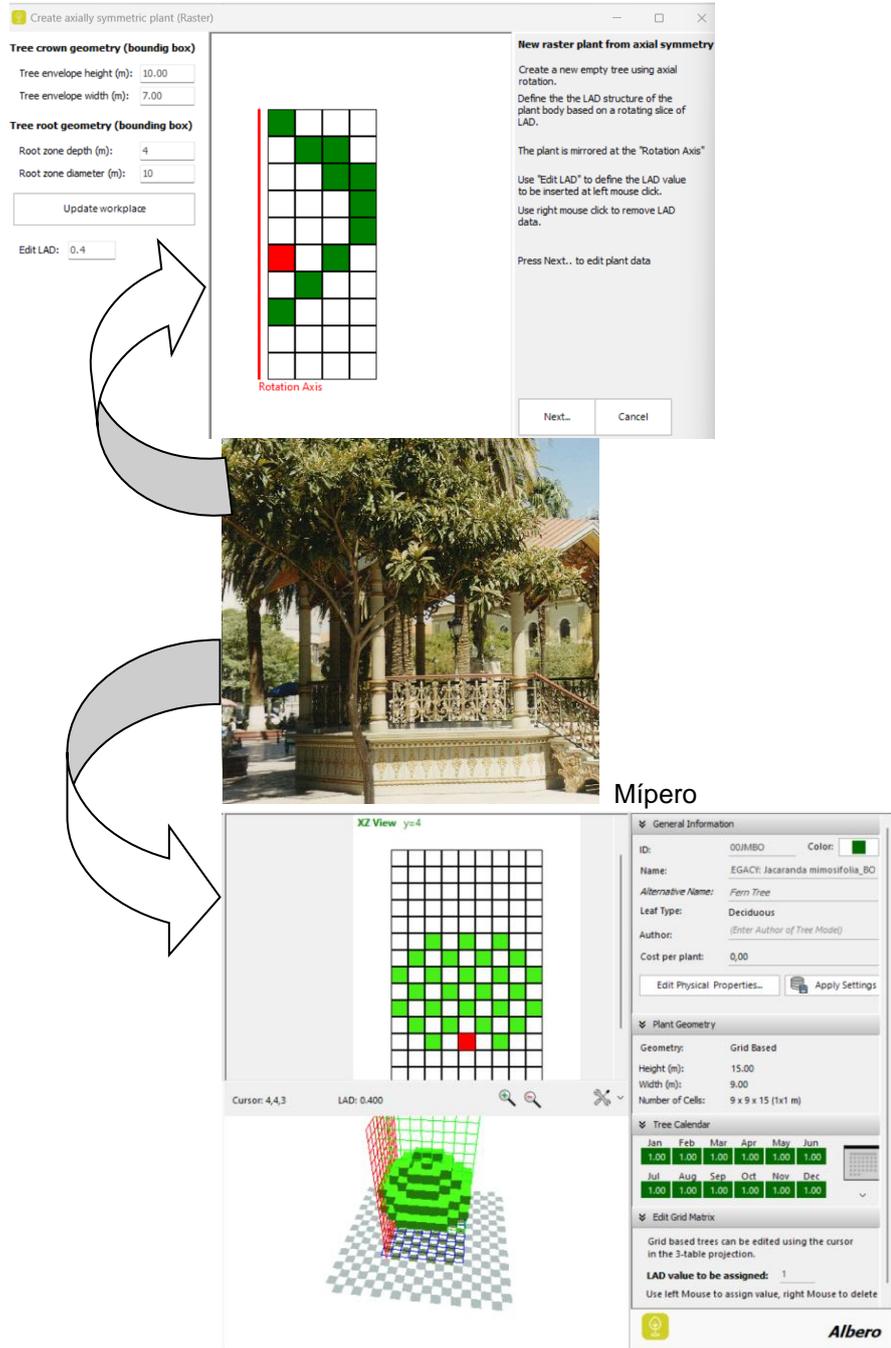
Propiedades de la planta	Míspero (Eriobotrya japónica)	Tarco (Jacaranda mimosifolia)
Fijación de CO ₂	C3-Plant	C3-Plant
Tipo de hoja	Decidua	Decidua
Albedo del follaje	0.3	0.6
Transmitancia del follaje	0.3	0.3
Emisividad	0.90	0.96
Peso (g/m ²)	100.00	100.00

Fuente: Autora, 2023

La aplicación *Albero* presenta el arquetipo de las plantas en formato vertical y horizontal en células de 1*1*1m y visualizarse en 3D, por ello se puede editar y digitalizar la geometría del árbol (incluso considera la densidad de las raíces) (Figura 63). A ejemplo de aquello se muestra el modelo del míspero (Figura 64).

⁵⁰ Singapore Nparks <https://www.nparks.gov.sg/FloraFaunaWeb/Flora/2/8/2878>

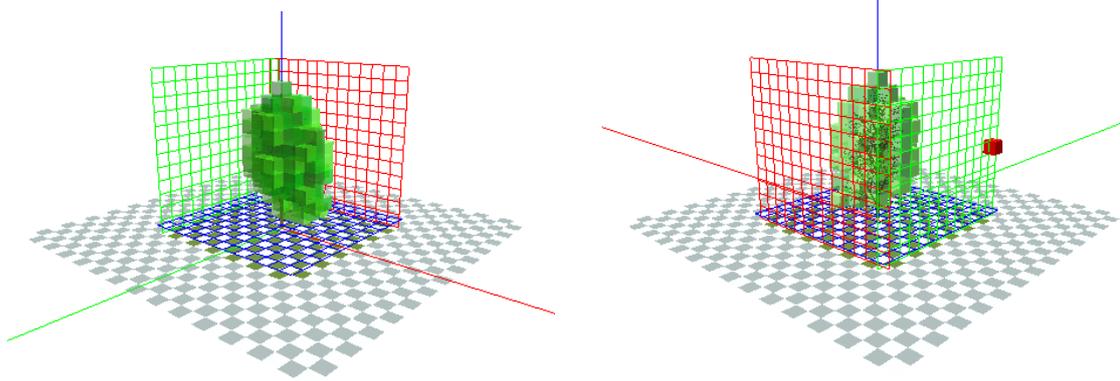
Figura 62. Arquetipo de la planta en *Albero* de ENVI-met V5.5.1



Fuente: Autora, 2023

El modelo resultante de la vegetación en las áreas verdes, corredor y patios queda representado en *spaces* (Figura 66).

Figura 63. 3D de la planta en *Albero*



Fuente: Autora, 2023

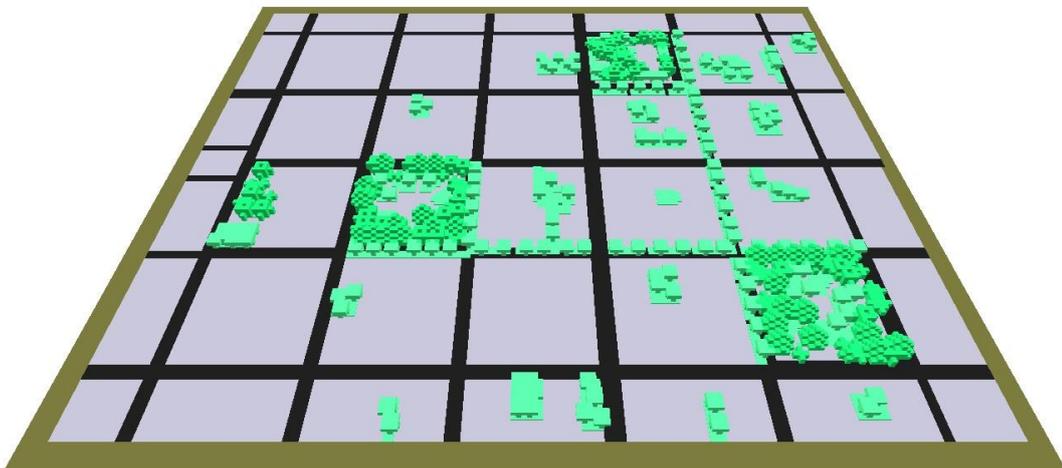
Finalmente se consideraron las especies arbóreas: míspero, lapacho rosado, magnolia, tarco y paraíso para crear la base de datos de vegetación en *Albero* (Figura 65).

Figura 64. Morfología de los árboles para modelo

	Míspero (Eriobotrya japónica)	Lapacho rosado (Tabebuia avellanedae)	Magnolia (Magnolia grandiflora)	Tarco (Jacaranda mimosifolia)	Paraíso (Melia azederach)
Fotografía					
Tipología en <i>Albero</i>					
	Privet	Cersis siliquastrum	Tilia cordata	Jacaranda mimosifolia	Albizia julibrissin

Fuente: Autora, 2023

Figura 65. Vegetación en modelo *Spaces* de ENVI-met V5.5.1



Fuente: Autora, 2023

3.4.3 Escenario 1 (ES1) - Sin vegetación: *Base scenario*

Definir este *Base scenario* tiene como principal objetivo, considerar en la simulación, las interacciones entre suelo, atmósfera, edificaciones en un contexto sin vegetación. Estimar o evaluar los indicadores de confort térmico bajo esa condición. Para ello y conforme a las informaciones obtenidas sobre los edificios (alturas, materiales, paredes, cubierta, pisos), se realizó el modelo tridimensional iniciando con el formato 2D en AutoCAD para Sketchup 2023, posteriormente ese modelo fue exportado para ENVI-met y editado en *Spaces* (Figura 54).

Al polígono de estudio 450*350m, se adicionó 20m de borde, quedando finalmente en un área de trabajo de 530*430m (con las células X=2, Y=2. Z=3). En resumen, los datos de entrada corresponden a los generados por *Forcing Manager* y *Use Full Forcing* que trabaja principalmente con datos de temperatura del aire y humedad relativa del aire, y radiación medida en plano horizontal o vertical, nubosidad, dirección y velocidad del viento, datos medidos a través del EPW (Figura 58) y quedan simplificados en Tabla 27.

El tiempo requerido para la simulación fue de 72h continuas para este escenario con el uso de *License Student* (trabajo desarrollado LaSUS⁵¹).

Tabla 27. Datos de entrada en ENVI-met V5.5.1

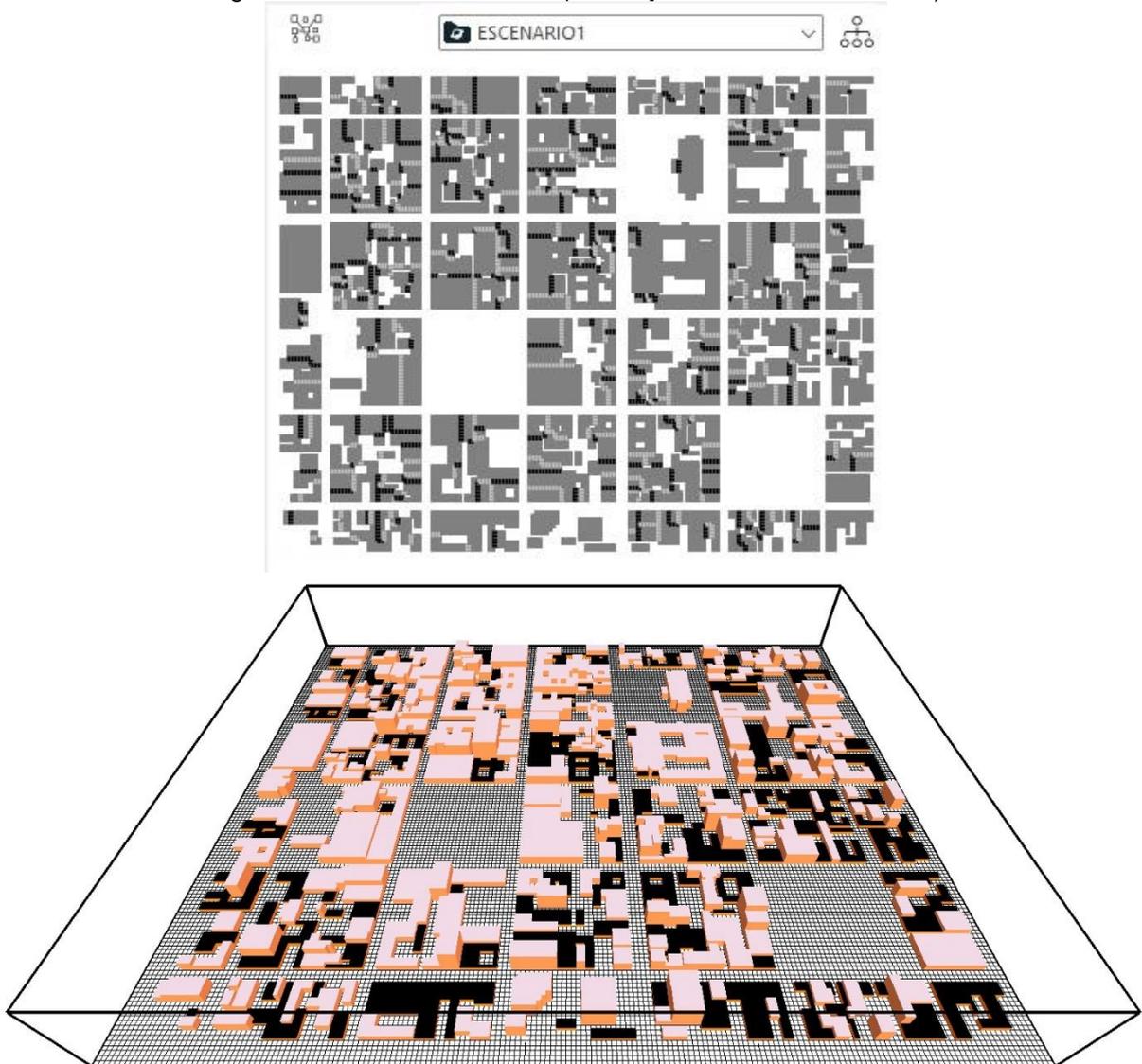
Datos de entrada	Parámetro
Tamaño de pixel	530*430*60
Fecha de simulación	10/12/18
Tiempo total de simulación	72 h
Hora de inicio	06.00.00
Velocidad del viento (m/s)	Forcing Manager (EPW)
Dirección de los vientos (deg)	
Rugosidad	
Temperatura atmosférica T (°C)	
Humedad q (%)	

Fuente: Autora, 2023

El modelo en el área de trabajo *spaces* de ENVI-met V5.5.1, presenta el siguiente formato: volúmenes de los edificios, áreas libres y calles (Figura 67):

⁵¹ Laboratorio de Sustentabilidad (LaSUS) de la Universidad de Brasilia (UnB).

Figura 66. Modelo Escenario 1 (Planta y 3D en ENVI-met V5.5.1)



Fuente: Autora, 2023)

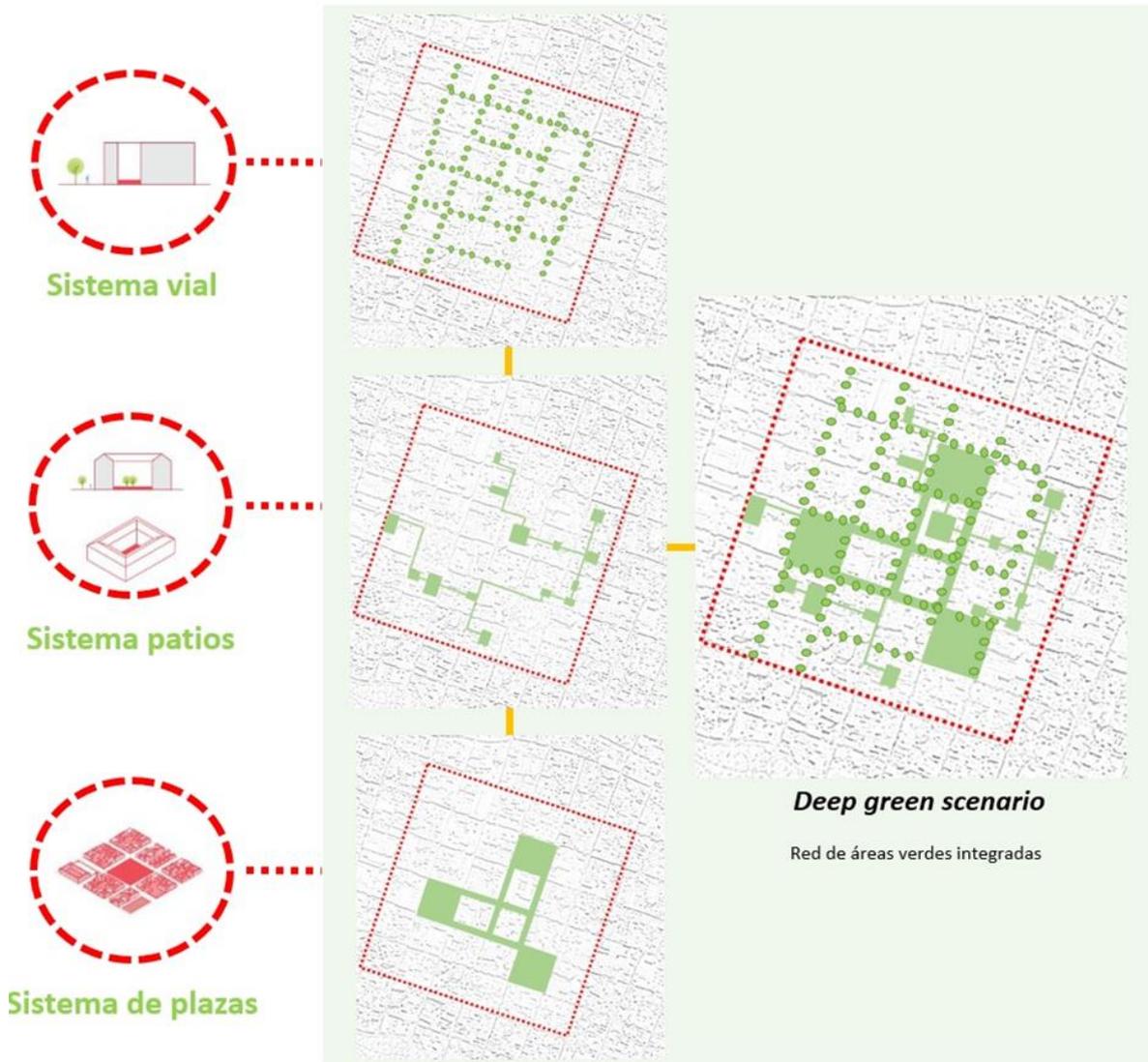
3.4.4 Escenario 2 (ES2) – Con vegetación: *Deep green scenario* (estrategia de mitigación: vegetación + diseño urbano)

Como se había mencionado, el polígono de simulación computacional considera una superficie de 450m*350m, área que abarca 20 manzanas y su área circundante, incluye las plazas centrales del área monumental (Figura 52).

El *Deep green scenario* como estrategia de mitigación a ICU, consiste en crear una red de espacios verdes integrados, que incluye tres *layouts* de verde urbano: 1) incremento de arborización en el sistema vial o vías arborizadas; 2) red de patios

centrales o jardines conectados y 3) corredores verdes que articulan tres plazas en el centro histórico (Figura 68).

Figura 67. Propuesta de verde urbano: *Deep green scenario* en recorte para simulación computacional



Fuente: Autora, 2022

Este escenario *Deep green scenario*, se encuentra delimitado dentro del polígono de simulación. La integración e incremento escalar del verde urbano en una trama reticular conectada con patios y plazas para amenizar el microclima urbano.

El escenario con vegetación comprende:

- Sistema vial o vías arborizadas: con vegetación de medio porte en calles que tienen un perfil de vía entre 8 a 12mt.

(vegetación nativa, frutales, ornamentales). Promoviendo sombra y confort al peatón en las aceras y paisajismo.

- Sistema de patios: articular los patios al sistema de verde urbano propuesto con el incremento de vegetación en la superficie o muros de la vivienda. Posibilita el cambio de uso privado a público, preserva la tipología constructiva. Considera la implementación de huertos urbanos.
- Sistema de plazas: a través de corredores verdes que articulen la Plaza Principal Luis de Fuentes y Vargas, Plazuela José Antonio de Sucre y patio del Palacio de Justicia se promueve la continuidad de procesos naturales o la conectividad ecológica (biodiversidad, regulación climática, servicios ecosistémicos).

El verde urbano se asocia a los parques o grandes masas arbóreas, sin embargo, el desempeño ambiental de corredores verdes, transformando las vías vehiculares en peatonales con vegetación y articulando a los patios centrales - elemento cada vez inexistente en los centros urbanos por el cambio de uso de suelo y urbanización- son elementos que deben ser considerados y preservados al igual que las plazas ajardinadas y arboladas del centro histórico de la ciudad.

Semejante a este concepto, (HOUGH, 1998) propone la articulación de lo urbano-rural-natural desde el centro del sistema metropolitano hacia la periferia, en este sistema también destaca cada elemento que compone un rol en la protección de su naturaleza y localización.

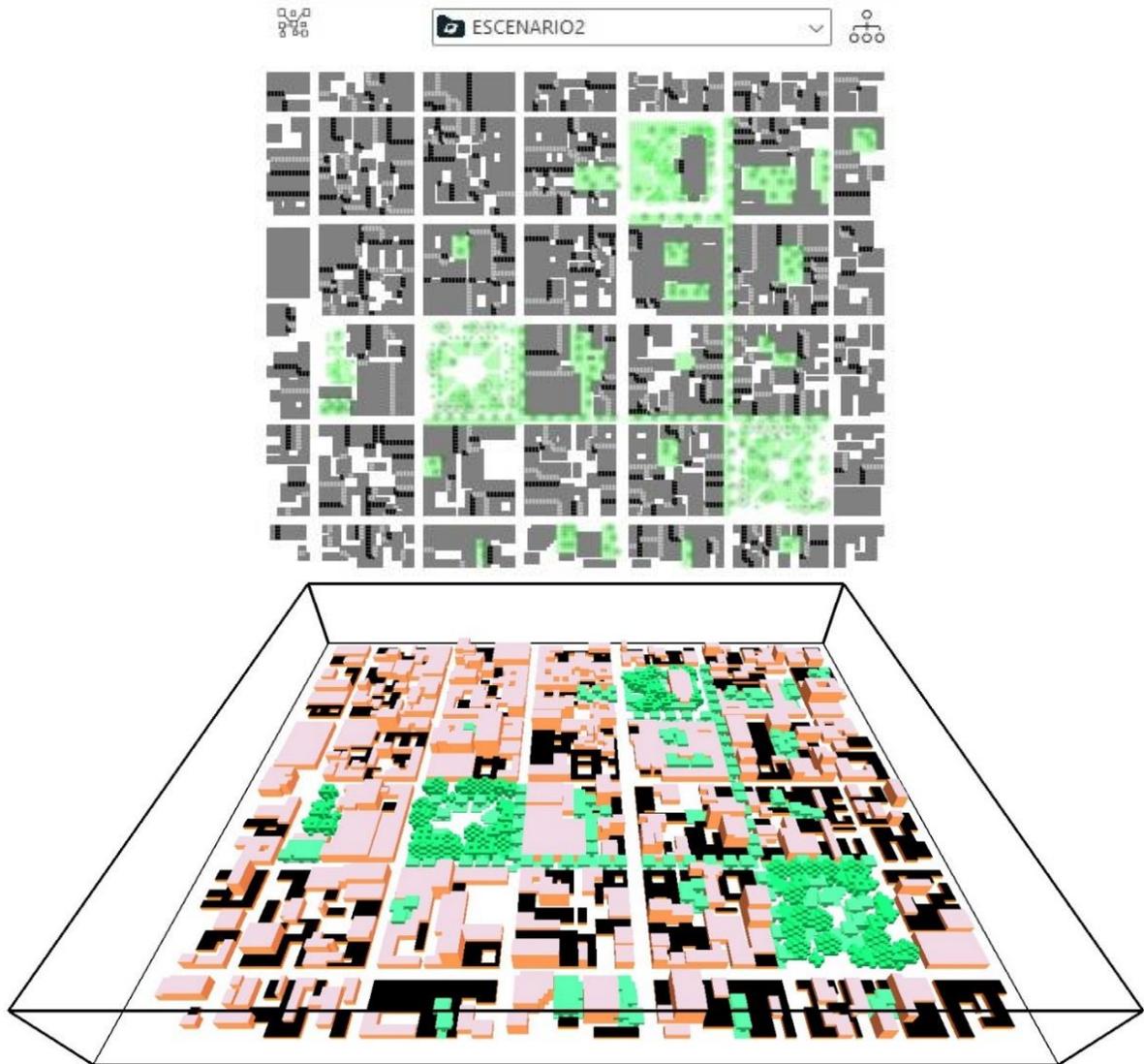
Implementar este escenario de verde urbano valoriza la identidad del centro histórico porque propicia a través de la vegetación una unidad de paisaje urbano, además contribuye a una política de movilidad urbana sostenible y un plan de revalorización del centro (MARTÍNEZ; BUSTOS, 2021).

Considerando que la vegetación incorporada recrea un escenario de verde urbano intenso, está sujeta a simulación microclimática computacional, para un análisis comparativo entre la situación real y la propuesta.

Para el modelo en ENVI-met se incorporó esos tres *layout* de verde urbano: vegetación del área verde según el inventario (especies más comunes Figura 61), patios identificados en los vacíos de edificios, casas, equipamientos y finalmente se articuló esas áreas verdes con corredores verdes, así constituir un sistema de verde

urbano en el sitio histórico. El modelo resultó de la siguiente manera en *spaces* de ENVI-met V5.5.1 (Figura 69):

Figura 68. Modelo Escenario 2 (Planta y 3D en ENVI-met V5.5.1)

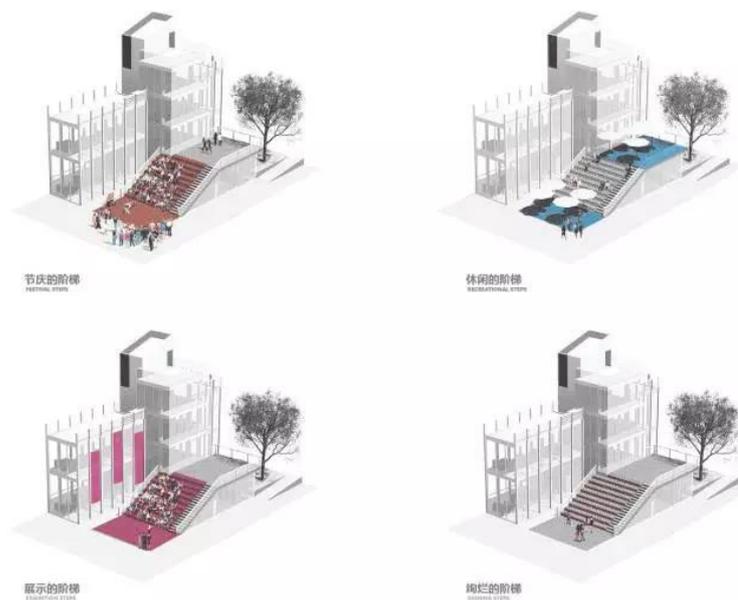


Fuente: Autora, 2023

La concepción de esta estrategia considera el micro urbanismo, que consiste en incorporar los atributos de mejora y cualificación del espacio urbano en predios con carácter patrimonial. Al existir restricciones de uso, es decir, el contexto patrimonial del centro histórico, resguarda valores arquitectónicos para preservar características originales, sin embargo, intervenciones puntuales de pequeña escala pueden ser adoptadas para el incremento de vegetación, así refrescar y amenizar el ambiente urbano.

El *Micro Urban Renovation Project* en el centro histórico de Guangzhou-China, preserva el contexto histórico (que data de 1725), e implementa estrategias sustentables a partir de intervenciones en los callejones del tejido urbano, tales como la renovación de los edificios, uso de materiales originales (azulejos, ladrillos, piedra natural, madera) como parte de los elementos del paisaje: muro en el que cae agua, escalera de madera, jardín en la azotea, expansiones y reconexiones del espacio público abierto (Figura 70).

Figura 69. Lineamientos de *micro-urban design*



Fuente: *Cities as Dense Ecosystems: Cross-Pollination Through Space Design: Micro Renovation and Urban Nature*. Yu (2020)⁵²

De igual manera, Timon McPhearson⁵³ refuerza la idea de que el *Micro urban* consiste en aquellos microespacios de cualquier barrio (con o sin parques, con o sin corredores), que pueden conectarse en red o agruparse para proporcionar una ecología en red que beneficie a toda la ciudad. Por ejemplo, techos verdes, muros verdes, espacios intermedios entre los edificios, se trata de conectar por encima, alrededor y a través.

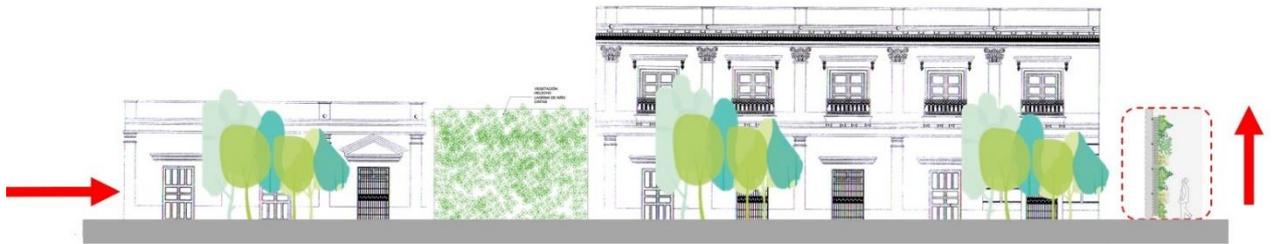
⁵² Disponible en: <https://renchispace.com/2020/09/10/cities-as-dense-ecosystems-cross-pollination-through-space-design-micro-renovation-and-urban-nature/>

⁵³ Disponible en: https://www.thenatureofcities.com/2015/01/03/micro_urban-the-ecological-and-social-potential-of-small-scale-urban-spaces/

En conclusión, una oportunidad para valorizar aún más el acervo patrimonial del sitio histórico de la ciudad es incluir esta estrategia en dos dimensiones (Figura 71 y 72):

- En plano vertical a través de la fachada: patrimonial + verde
- En plano horizontal a través de corredores verdes articulando áreas verdes y activando la vida urbana: EPA+ambiental.

Figura 70. Fachada patrimonial + verde



Fuente: Autora, 2023 en Ilustración de Calle Gral. Bernardo Trigo Espejo (Vacaflo, 2010).

Figura 71. EPA + ambiental



Fuente: Copenhagen Business School. CF Moller (2014)⁵⁴

⁵⁴ Disponible en: <https://www.archilovers.com/projects/143289/copenhagen-business-school.html#drawings>

3.5 Resumen del capítulo

El tercer capítulo desarrolla los procedimientos metodológicos para el estudio integrado escalar. Consta de la definición de los polígonos de estudio a escala de grande estructura, sector y lugar/edificio, aplicando para cada uno de ellos el método de análisis, evaluación, simulación.

En la escala grande estructura se indica la aplicación de teledetección para obtener los indicadores de NDVI y LST. En la misma escala se realiza el estudio de Integración global a través de sintaxis espacial. Para la escala de sector se presenta el estudio de caso de Tarija, el sitio histórico y su contexto patrimonial, y configuracional, identificando los elementos constitutivos del EPA como ser la plaza, patio y calle. Se identifica la clasificación climática y se presenta el inventario arbóreo de las cuatro áreas verdes en el polígono de simulación a escala lugar/edificio.

En esta escala se definen los datos de entrada (*input*) para la simulación computacional comprendidas con la identificación del archivo climático, y base de datos para las edificaciones (muros de adobe) y vegetación, con las especies arbóreas identificadas (creadas en *Albero*) para ENVI-met. Finalmente se realiza la definición de los escenarios de simulación computacional para ENVI-met, a efectos de comparar los resultados en la próxima etapa, el escenario 1 sin vegetación y el escenario 2 con vegetación, de este modo validar o evaluar la estrategia de mitigación a ICU en sitios históricos.

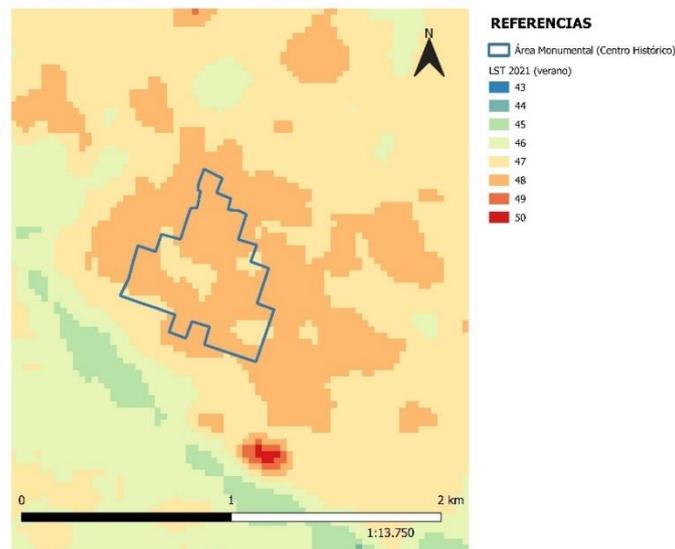
4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de los indicadores obtenidos por el geoprocésamiento y simulación, agrupados en subtítulos según la escala de estudio, es decir serán presentados en primer lugar los indicadores (LST, NDVI, InTHH) de grande estructura. Posteriormente los resultados obtenidos de la simulación computacional comparando los escenarios con y sin vegetación para discutir la medida de mitigación (en diferentes parámetros ambientales y climáticos).

4.1 Islas de Calor Urbano (ICU) de superficie

Del procesamiento de imágenes LANDSAT, se obtuvieron 26 mapas para los indicadores de *LST* y *NDVI*, entre los cuales se recalca el objetivo de comparar temporalmente los cambios registrados para cada estación del año (16 mapas), *LST* media y *NDVI* media en ambos años (2001 y 2021) y finalmente, *LST* y *NDVI* del año 1985.

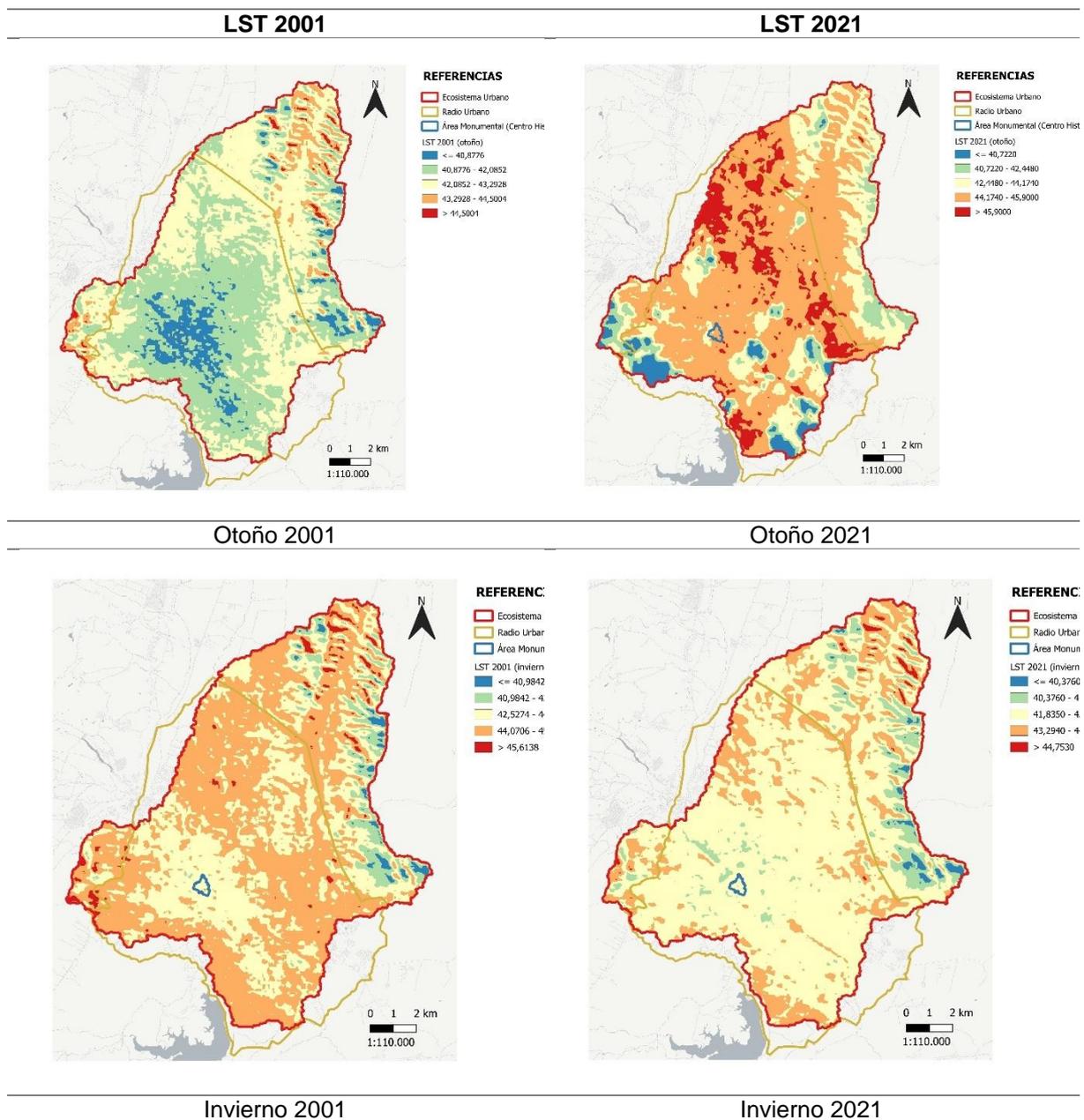
Figura 72. ICU en centro histórico

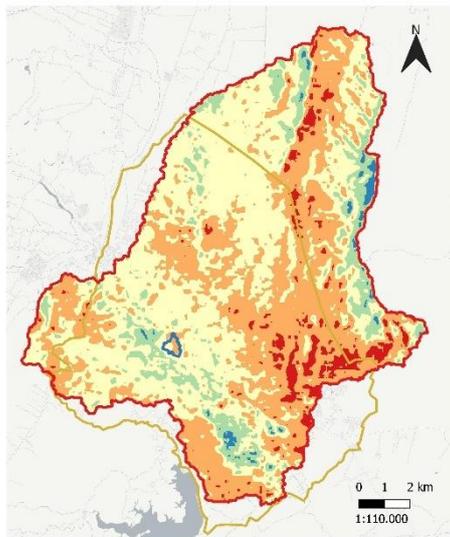


Fuente: Autora, 2022

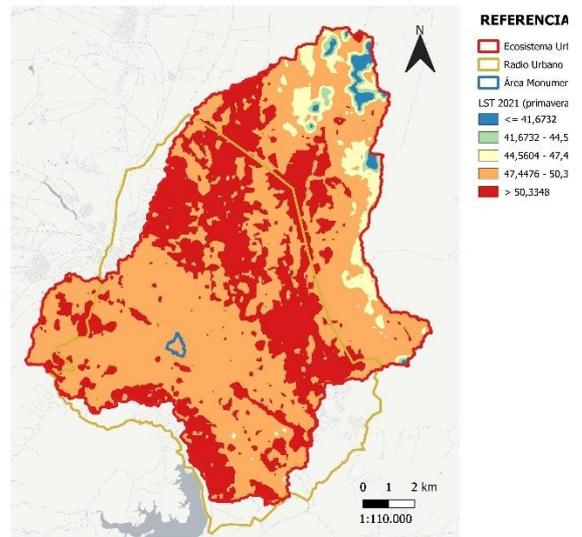
En la Figura 73, se puede evidenciar el registro de la temperatura superficial del suelo (LST) en torno a los 48°C para la estación de verano del año 2021, lo que constituye el área potencial de ICU en el centro histórico de la ciudad de Tarija. Consecuentemente también se evidencia la disminución de temperatura dentro del polígono del área monumental en torno a las plazas.

Tabla 28. Tabla comparativa de mapas de LST (2001 - 2021)

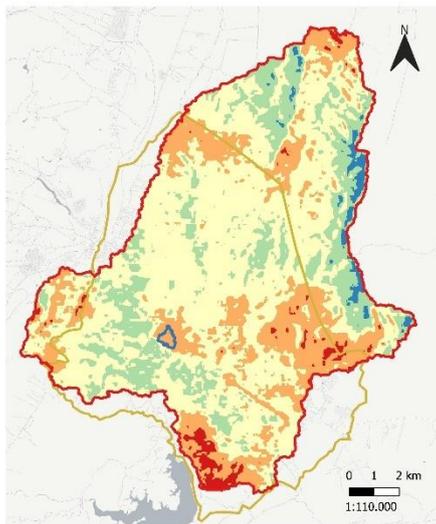




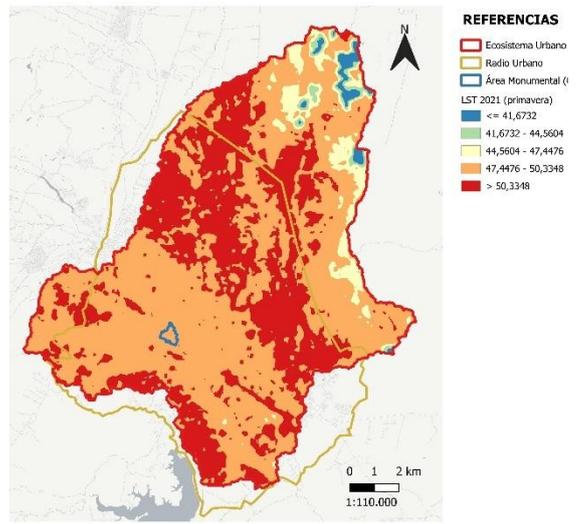
Primavera 2001



Primavera 2021



Verano 2001



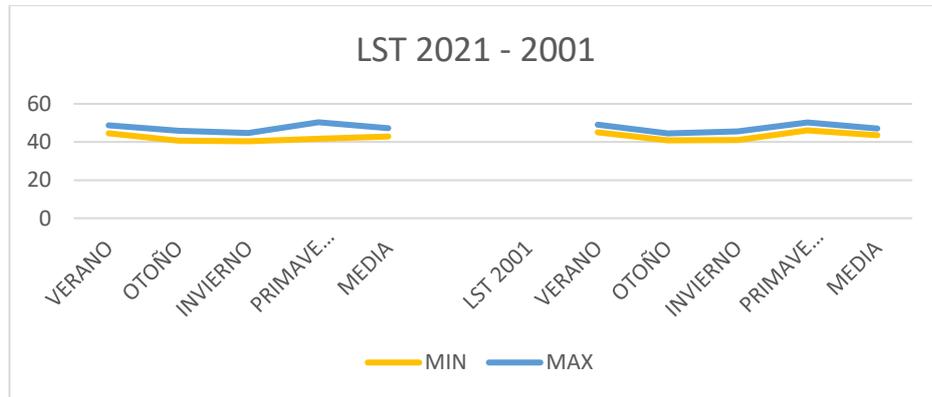
Verano 2021

Fuente: Autora, 2022

En Tabla 28, se realiza un comparativo para el mismo indicador de *LST* en los años 2001 y 2021 respectivamente, para las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano. Se destaca el polígono de ecosistema urbano (o de grande estructura), el polígono del radio urbano (definido según municipio) y polígono a escala de sector o del área monumental del centro histórico, a efecto de identificar las áreas potenciales de ICU de superficie y como parte de un análisis integrado escalár.

Los datos registran un incremento en la temperatura del suelo para la época de verano entre:45°C a 49°C en 2001 y 44°C a 48°C en 2021, los valores máximos registran una temperatura de (50°C) y mínimos (40°C) en 2001 Gráfico 5.

Gráfico 5. LST comparado

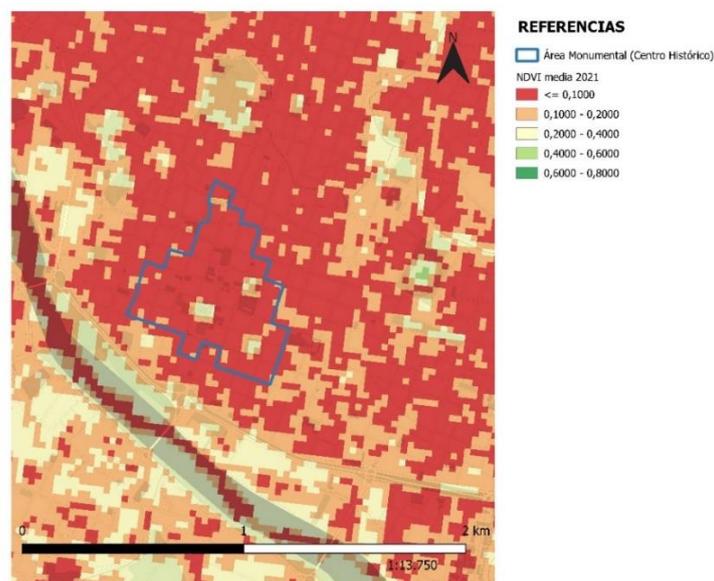


Fuente: Autora, 2022

4.2 NDVI

Los datos registrados para el indicador *NDVI* demuestran, que dentro del polígono del área monumental (o escala sector), se evidencia la presencia de vegetación en tres plazas, con valores entre 0.2 y 0.4, por el contrario, el valor <0.1 demuestra la masa construida en el centro histórico (Figura 74). Otra consideración es evidente en torno al río Guadalquivir que se extiende del sureste a oeste con presencia de vegetación.

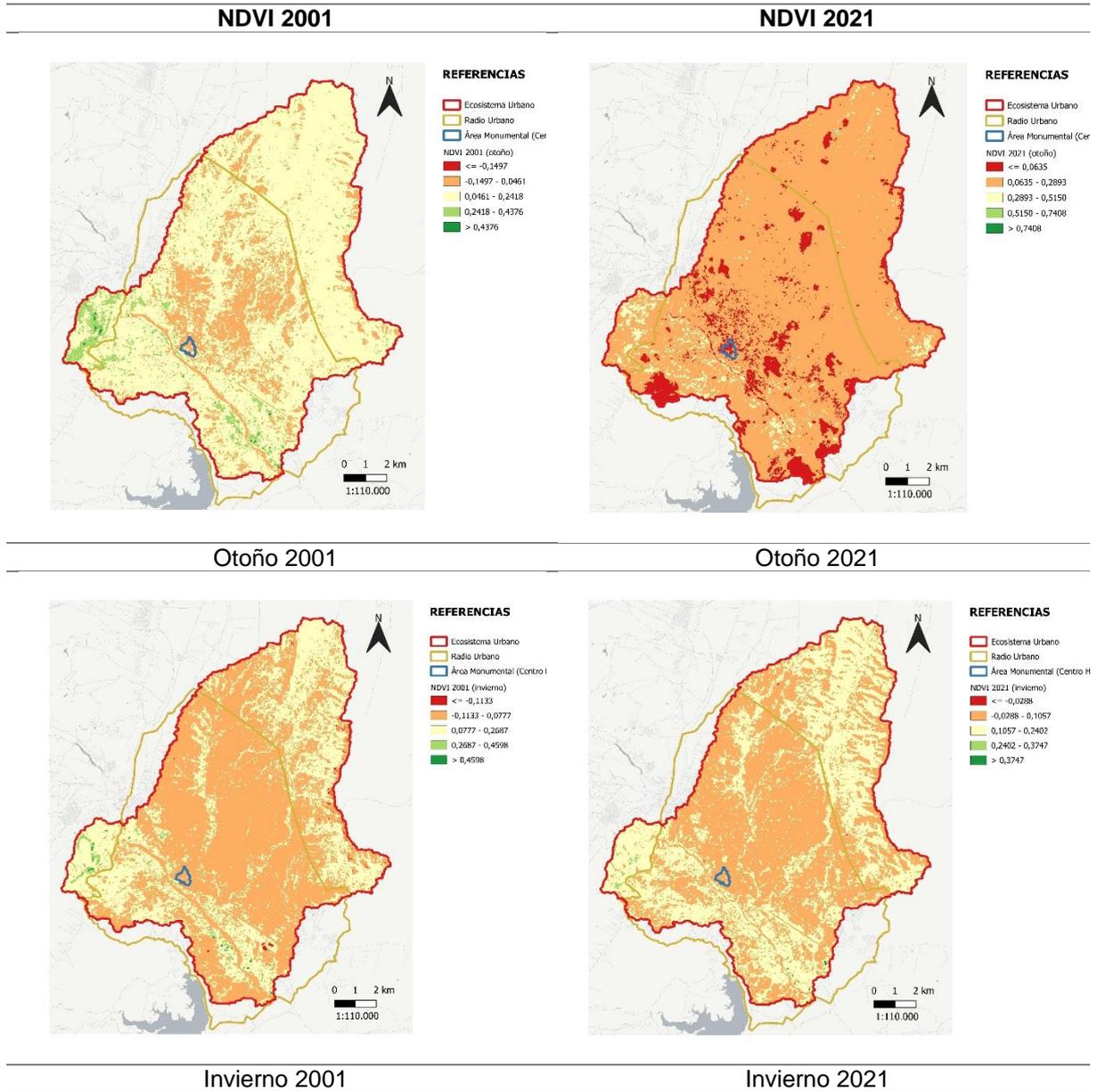
Figura 73. NDVI en el área monumental del centro histórico

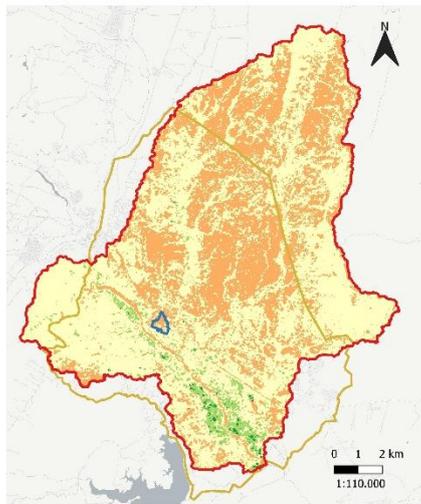


Fuente: Autora, 2022

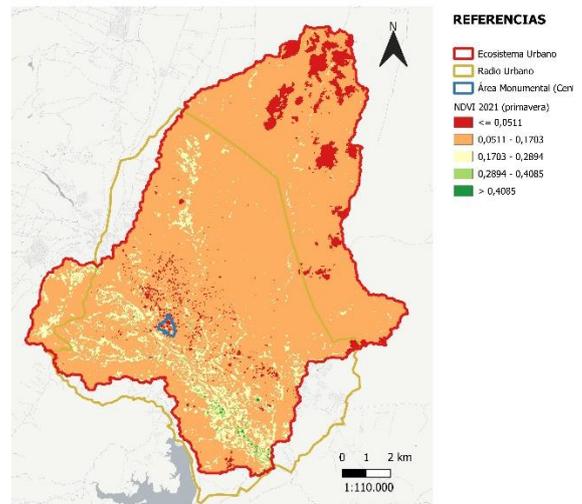
Los datos registran que el indicador *NDVI* tiene valor máximo (0.4598) y mínimo (-0.0651) para el 2001 y registra el valor máximo (0.7408) y mínimo (-0.0288) para el 2021 en el área de estudio. La comparación de los mapas en Tabla 29.

Tabla 29. Tabla comparativa de mapas de *NDVI* (2001 - 2021)

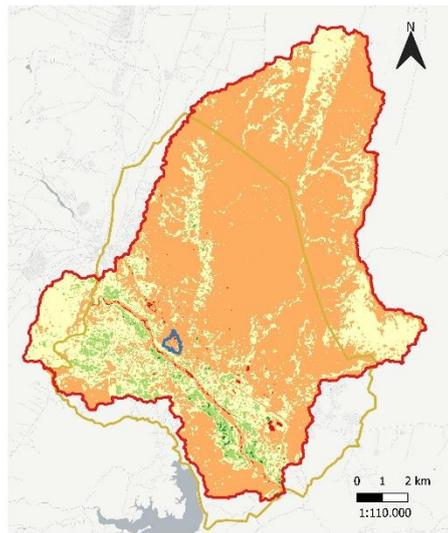




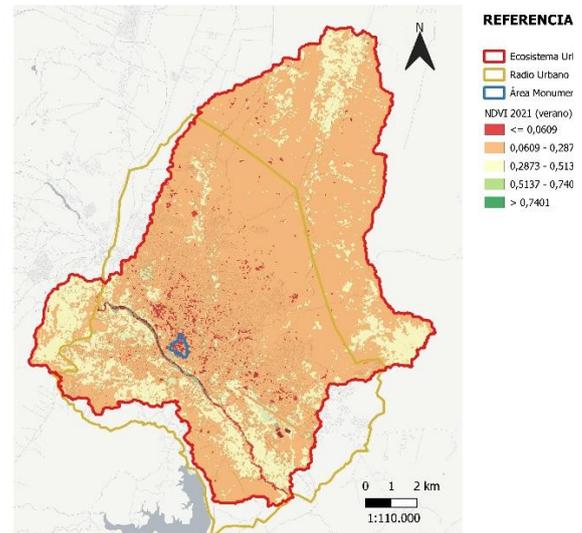
Primavera 2001



Primavera 2021



Verano 2001

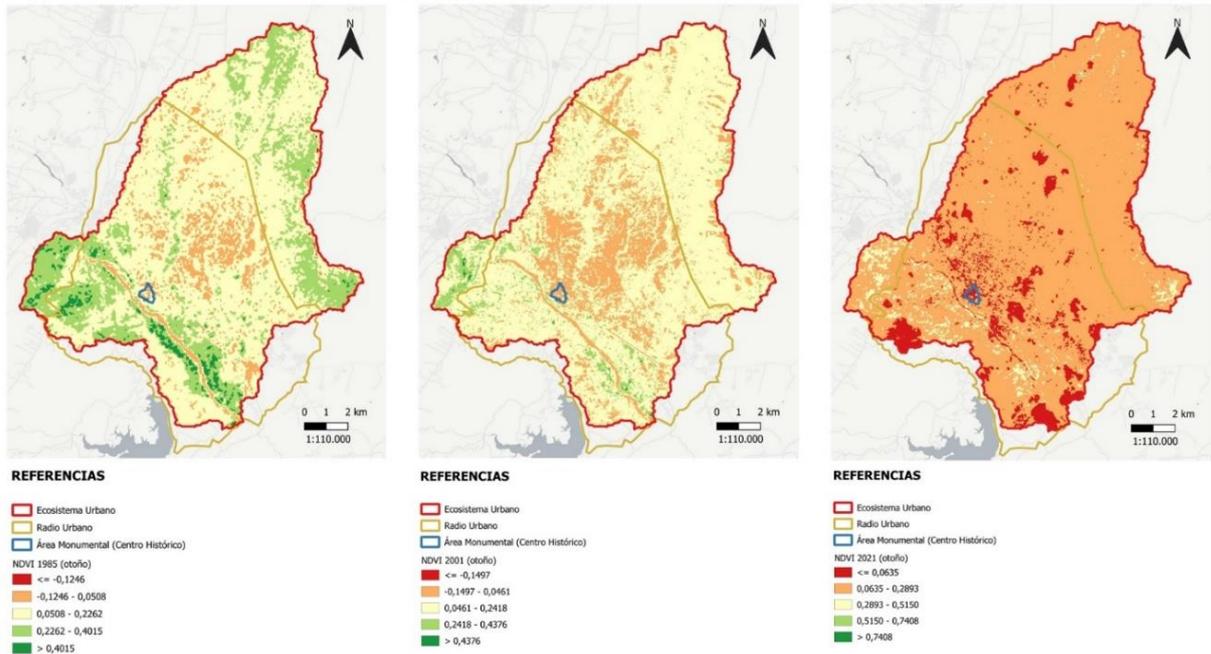


Verano 2021

Fuente: Autora, 2022

En una comparación temporal del indicador *NDVI* para los años 1985, 2001 y 2021, en los tres casos para la estación de otoño, se obtienen los siguientes resultados (Figura 75) y se puede constatar el detrimento del factor de vegetación fotosintéticamente activa. En 1985 se registra con predominancia valores de 0.2 y >0.4, para el año 2001 se registra entre 0.04 y >0.2 con predominancia y finalmente en 2021, mayoritariamente se observa el registro entre el valor 0.06 y 0.28. Visualmente a través de los mapas se verifica el detrimento de las áreas con mayor vegetación.

Figura 74. NDVI para 1985, 2001, 2021

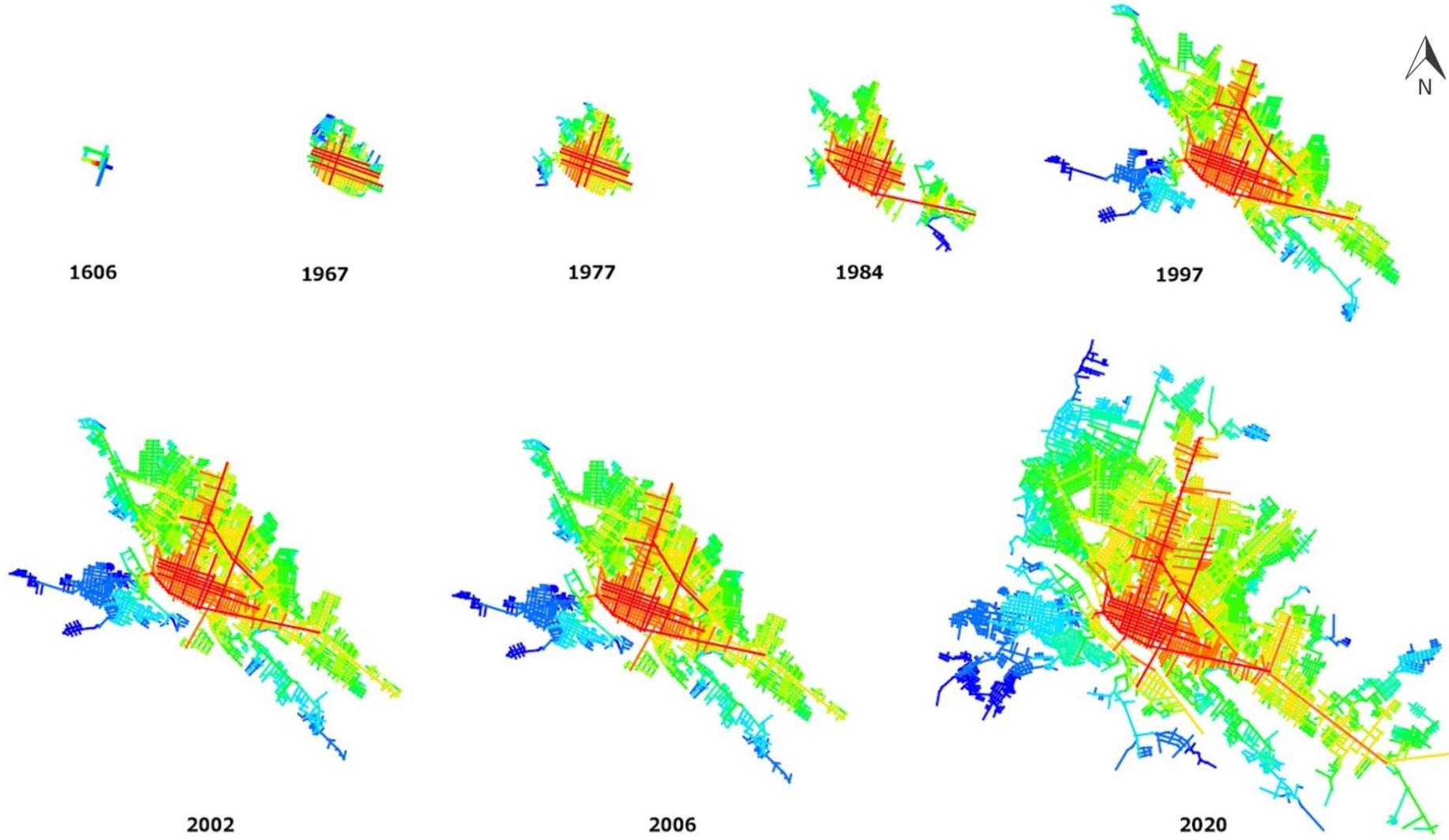


Fuente: Autora, 2022

4.3 Integración y centralidad

Continuando con los resultados a escala de mayor estructura, a partir de 1967 se observa el alto potencial de accesibilidad, como el área más integrada del sistema, aunque crece con el tiempo, el centro no se desplaza, lo que refuerza el alto rendimiento en el núcleo histórico, que sigue siendo la principal centralidad urbana en la actualidad (MANSILLA & MEDEIROS, 2020). Durante la década del 80 y más acentuada en la década del 90, Tarija sufrió una migración poblacional (del norte del país, por el cierre de las minas) y se puede verificar que la ciudad se extiende rumbo este a oeste, siguiendo el eje natural del río Guadalquivir. Posteriormente, a partir del 2000 la tendencia de crecimiento se consolida rumbo norte, sobre áreas rurales de la jurisdicción de otro municipio (San Lorenzo) y rumbo sud oeste sobre el área de amortiguamiento del área Protegida Nacional Reserva de Sama (que recibe y alimenta los afluentes de agua superficial), en este último caso, se denota el grave impacto que provoca en el servicio ecosistémico de provisión. Los patrones más segregados se articulan al proceso de fragmentación progresiva.

Tabla 30. Mapa axial (Inthh) - Análisis diacrónico Tarija



Fuente: Mansilla & Medeiros (2020 p.457)

Sin embargo, en todos los casos, el indicador de Integración (Inthh) referida a la accesibilidad configuracional, es claramente legible en los ejes y mapas axiales presentados en el capítulo de resultados (Tabla 30). De la misma manera es posible verificar que la centralidad morfológica de Tarija se mantiene en el núcleo fundacional que se ubica en el centro histórico y como se mencionó anteriormente, constituye una justificación para desarrollar el estudio en esta área de la ciudad. Hecho que varía en otras ciudades, donde se identifican dos o más centros, desplazando el centro fundacional de la ciudad.

Con la identificación y comprensión de la escala grande estructura (para las ICU y centralidad), queda en lo sucesivo interpretar el análisis en la escala lugar/edificio con la evaluación del desempeño ambiental de la estrategia de mitigación de ICU propuesta a través de la simulación computacional de escenarios de verde urbano.

4.4 Simulación microclimática y confort térmico

Fueron extraídos a través del *plugin* Leonardo de ENVI-met 5.5.1, 13 mapas con indicadores climáticos que serán comparados entre el escenario con y sin vegetación. Serán presentados a través de mapas (para facilitar la comparación visual entre los escenarios) y se organizan gráficos con los valores resultantes para cada parámetro en el día extremo de calor 10/12/2018 (según EPW).

El software brinda datos simulados a cada hora, sin embargo, siguiendo la recomendación de la OMN serán presentados en gráfico de líneas para las 9h, 12h, 15h, 18h y 21h en cada parámetro y a través de mapas, serán presentados los correspondientes al horario de las 15h, que registra los valores más representativos (casi en todos los parámetros).

Los resultados serán presentados en 5 grupos que corresponden a las carpetas de datos de salida del software, será enunciado la definición del indicador, los resultados, gráfico de líneas comparando las horas de simulación en los escenarios 1 y 2 (desde 6h a 0h) y los mapas comparativos en el horario de las 15h. La primer carpeta: *Surface*, para verificar la temperatura superficial (potencial de ICU superficial) y efectos de sombreado por la vegetación; *Atmosphere*, que registra los valores

de la temperatura del aire (potencial ICU atmosférica) y variables de velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura radiante media; *Biomet*, para los índices de confort térmico de PMV – PET; *Vegetation*, para verificar la temperatura de las hojas y finalmente la carpeta *Buildings*, para verificar las temperaturas de fachada (material de adobe).

a) Surface

Temperatura de superficie (*T Surface*). El valor varía por las condiciones de irradiancia directa (RS) y el tipo de material (albedo y conductividad térmica) (MARRONE; ORSINI, 2018).

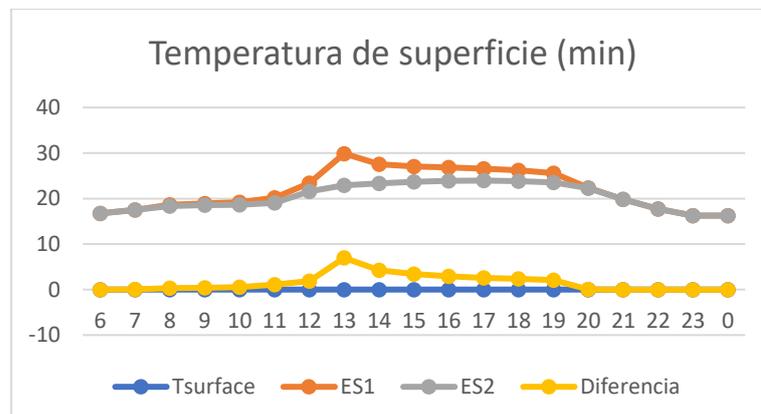
La temperatura de superficie, la diferencia entre el Escenario 1 (*Base scenario*) y el Escenario 2 (*Deep green scenario*), es de 3.39 °C para el registro de temperatura mínima, es decir para el ES1 con 27.05 °C y el ES2 con 23.66 °C. Respecto a la temperatura máxima en ambos escenarios se visualizan constante con 56.5 °C para las 15h (en día de calor extremo).

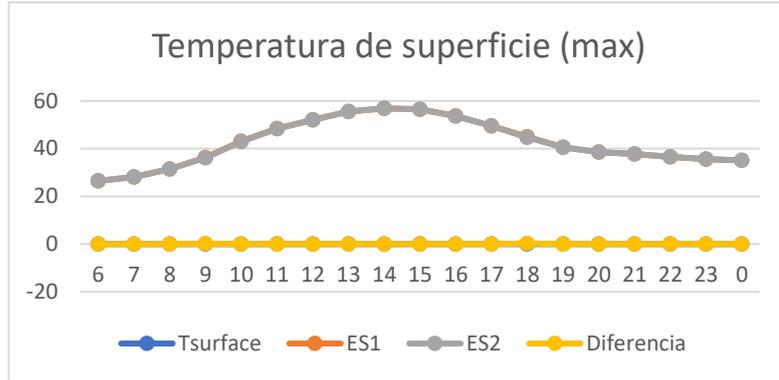
Estos valores (extraídos de la carpeta de *Surface*), se corresponden a los datos extraídos de Temperatura del suelo (extraídos de la carpeta *Soil*), con una diferencia de 3.41°C. para la temperatura mínima y 55.38 para la máxima.

Recordemos que según el geoprocesamiento (escala de grande estructura), se registraban para *LST*, valores entre 44°C a 48°C en verano del 2021 y registro de temperatura máxima de 50°C (Tabla 31).

Esta diferencia de temperatura se registra en los valores mínimos y según los valores máximos no se registran mayores diferencias (Gráfico 6).

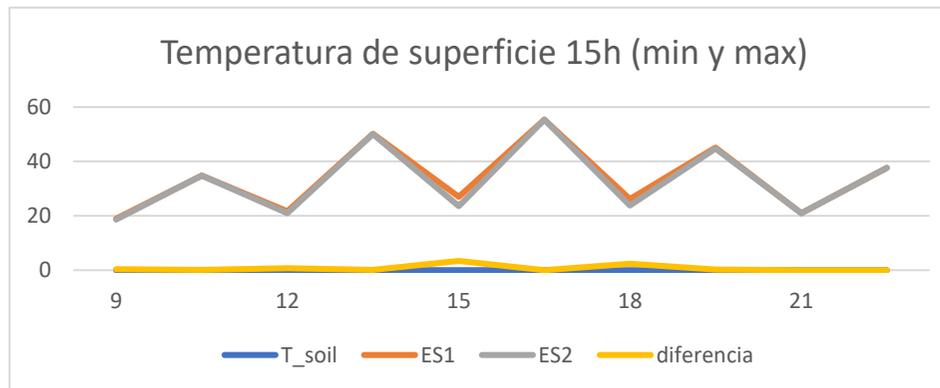
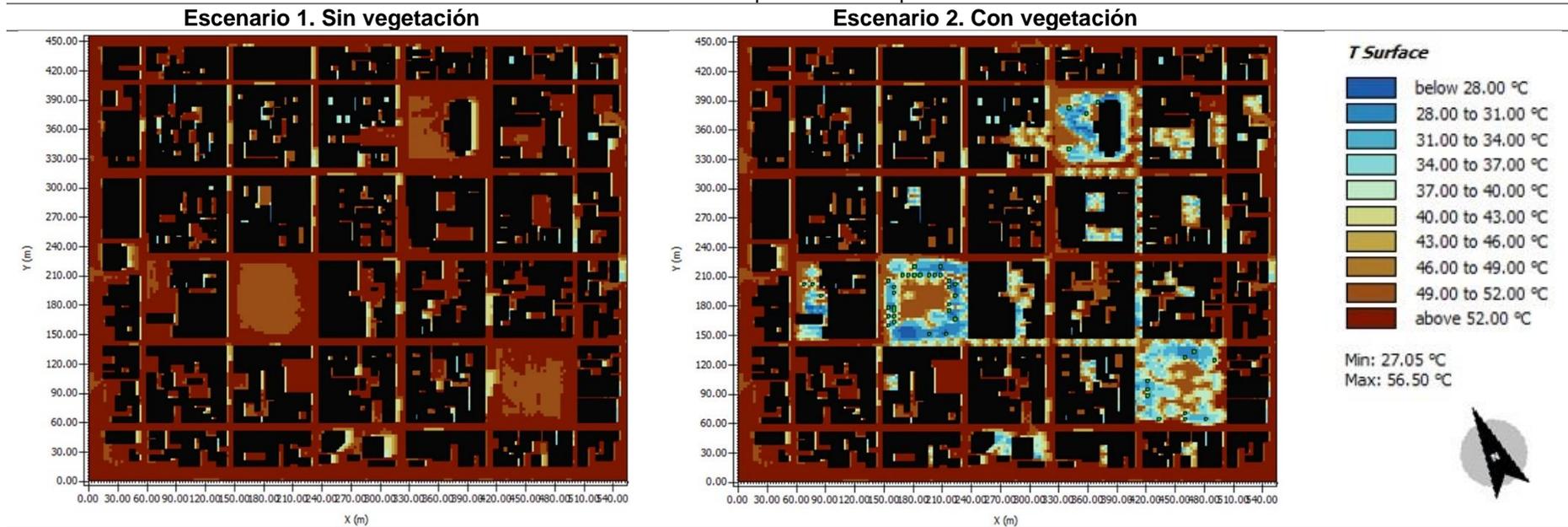
Gráfico 6. Temperatura de superficie (min y max)





Fuente: Autora, 2023

Tabla 31. Temperatura de superficie



Fuente: Autora, 2023

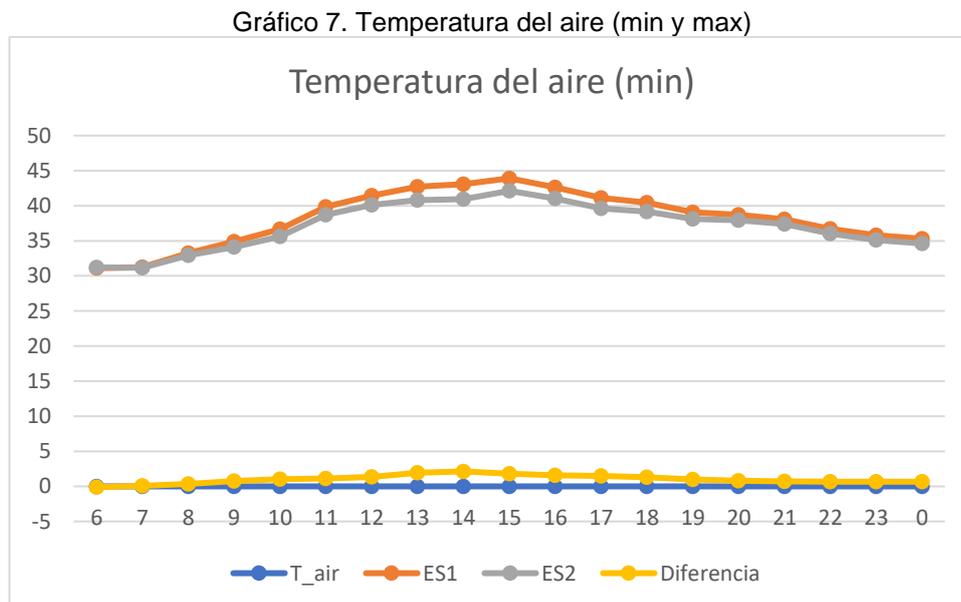
b) Atmosphere

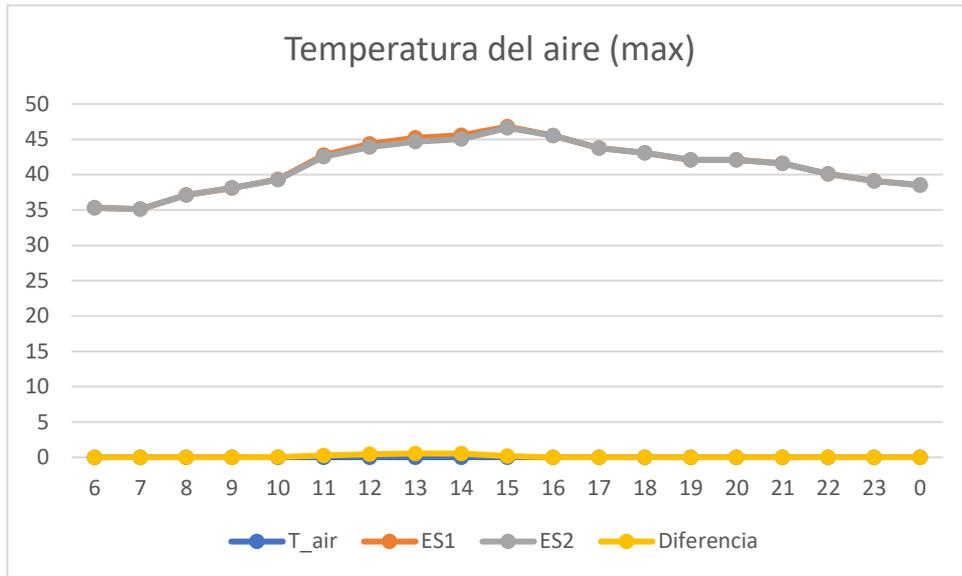
De esta carpeta se revisaron los indicadores de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y temperatura radiante media.

Temperatura del aire (Air Temperature). El valor está fuertemente influenciado por las condiciones de irradiancia (RS) y la temperatura superficial (ST) (MARRONE; ORSINI, 2018).

Respecto a la temperatura del aire, la diferencia entre el Escenario 1 (*base scenario*) y el Escenario 2 (*Deep green scenario*), es de 1.79°C. Es decir, ES1, máxima de 43.91°C y ES2 con 42.12°C para las 15h Si bien los valores son altos (por encima de 40°), obtener 1°C de diferencia cumple con el objetivo de amenizar el área, Tabla 32.

En el gráfico de líneas se verifica que las mayores diferencias entre los escenarios entre las 9h a 18h para la temperatura del aire mínima y para la temperatura del aire máxima solo entre las 11h y 15h (Gráfico 7).





Fuente: Autora, 2023

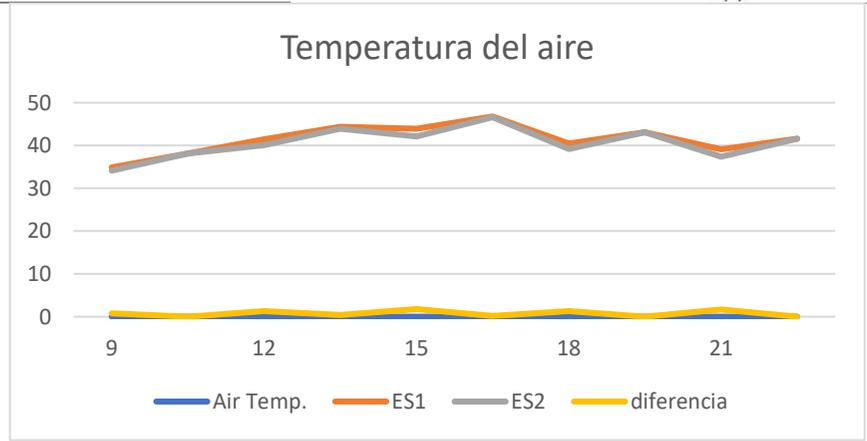
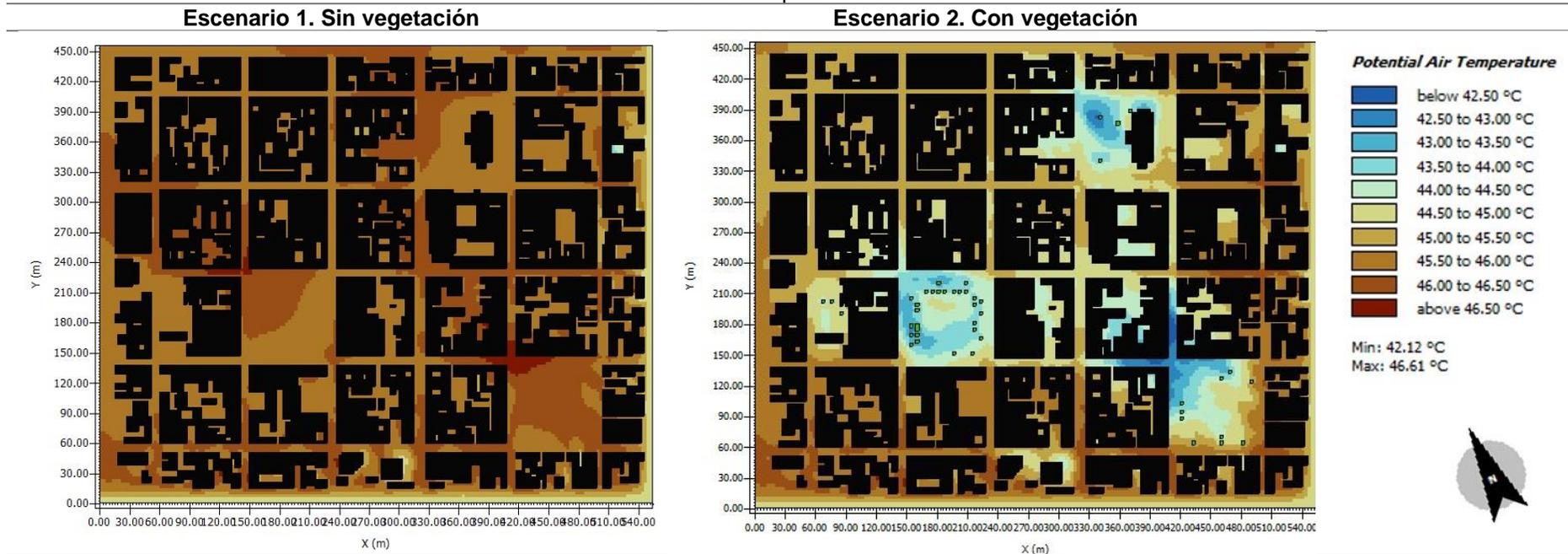
Por otro lado, en Tabla 33 se verifica en corte (Eje X) las cuatro áreas verdes, patios y corredor verde con su respectivo efecto en la temperatura del aire para el Escenario 2.

- A: Palacio de Justicia, patios
- B: Plaza Lizardi, Plaza Principal, patio
- C: Corredor verde en calle 15 de Abril
- D: Plazuela Sucre.

En Tabla 34, se presenta el corte (Eje Y) el efecto en la temperatura del aire por los EPA sugeridos en Escenario 2.

- A: Plaza Lizardi
- B: Patio, Plaza Principal
- C: Patios, Palacio de Justicia
- D: Corredor verde en calle Colón
- E: Plazuela Sucre

Tabla 32. Temperatura del aire



Fuente: Autora, 2023

Tabla 33. Cortes (x) en Escenario 2: *Deep green scenario*

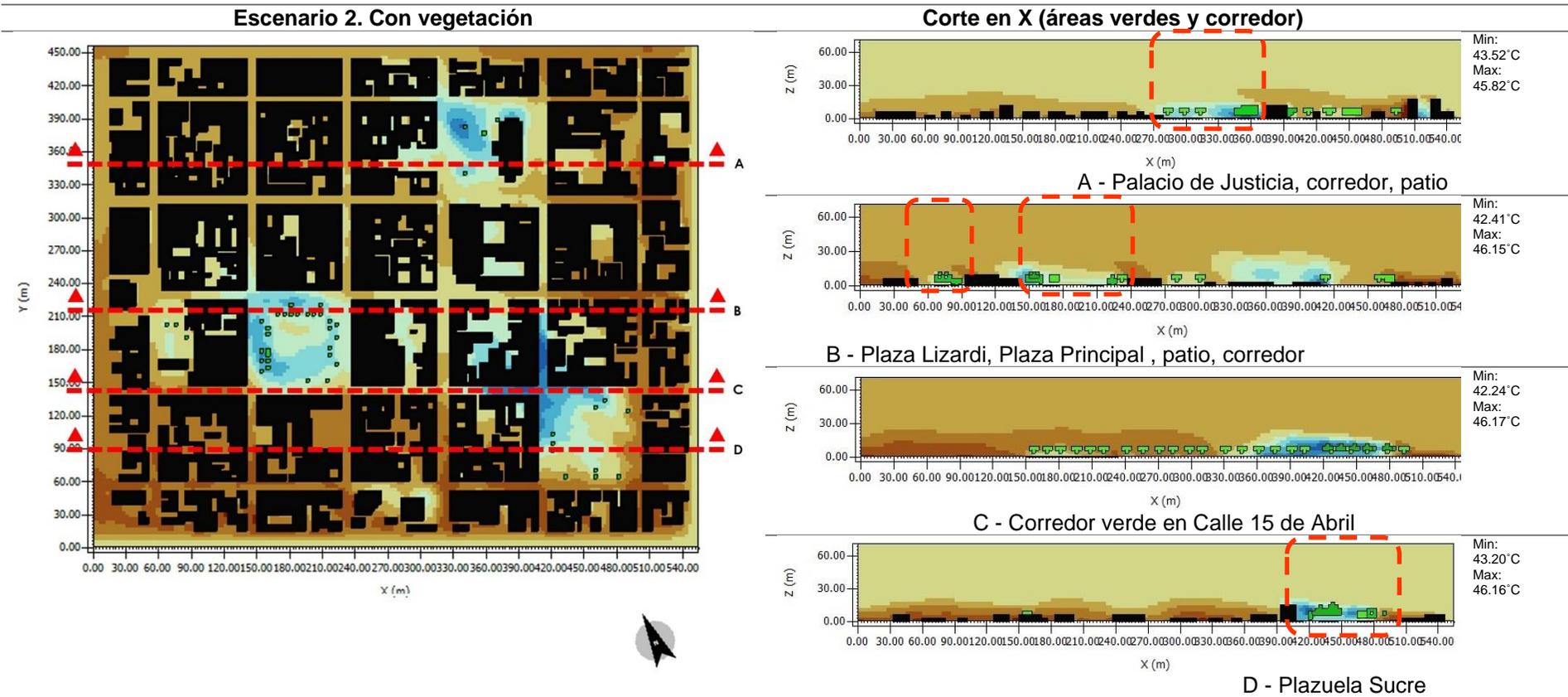
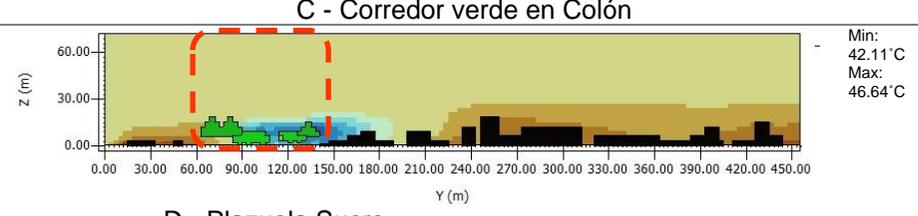
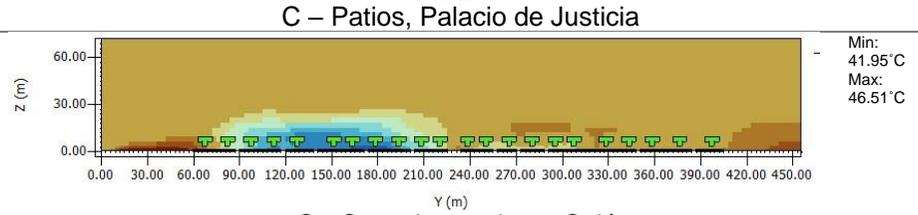
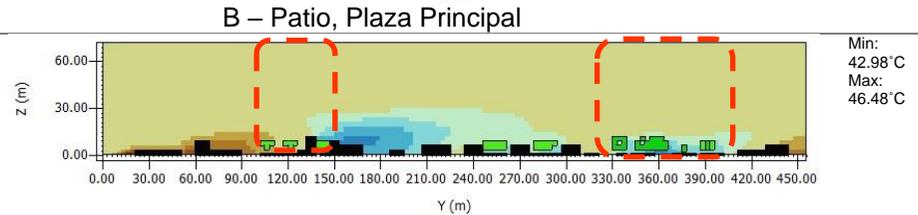
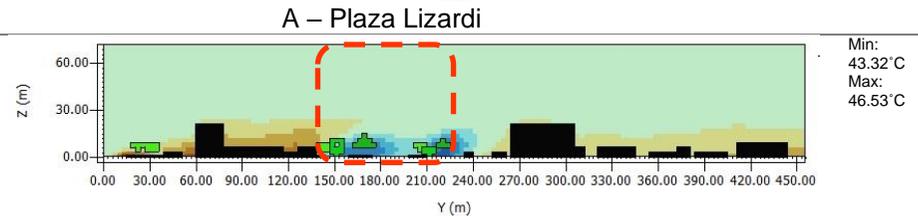
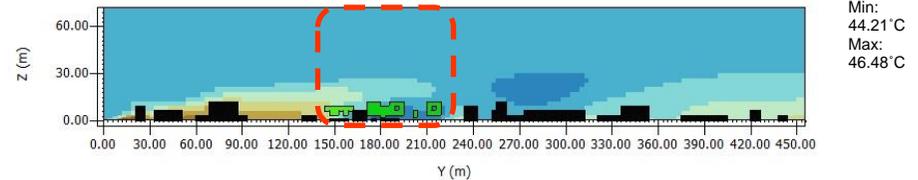
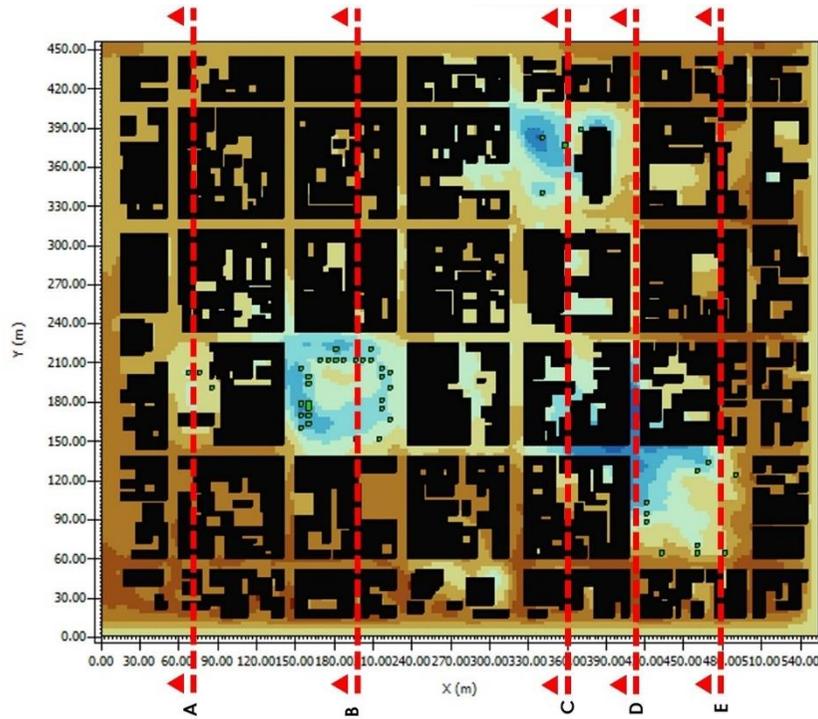


Tabla 34. Cortes (y) en Escenario 2: *Deep green scenario*

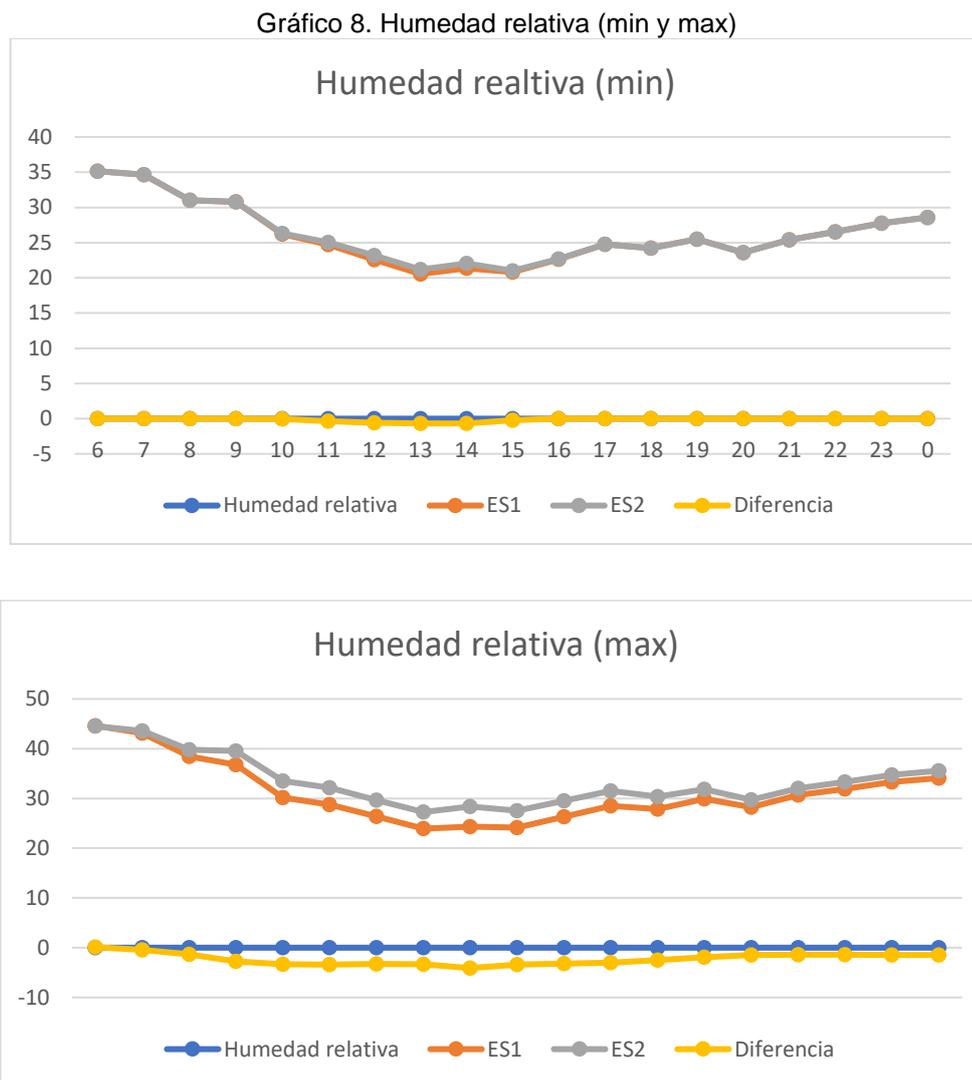
Escenario 2. Con vegetación

Corte en Y (áreas verdes y corredor)



Fuente: Autora, 2023

Humedad relativa del aire (*Relative Humidity*). En ambos casos los valores se mantienen constantes. Para el ES1 con 20.81% pasa a 21.01% en ES2 y los valores máximos registran una diferencia de 3.41% más de humedad en el ES2 (Tabla 35). Respecto a los valores medidos a cada hora de simulación (Gráfico 8), se registran diferencias en el horario de las 11 a 15h, para los valores mínimos. El valor máximo registrado ya difiere con el escenario 2, con valores de más humedad.



Fuente: Autora, 2023

Velocidad del viento (*Wind Speed*). Este parámetro se mantiene contante en ambos escenarios con 2.37m/s (Tabla 36).

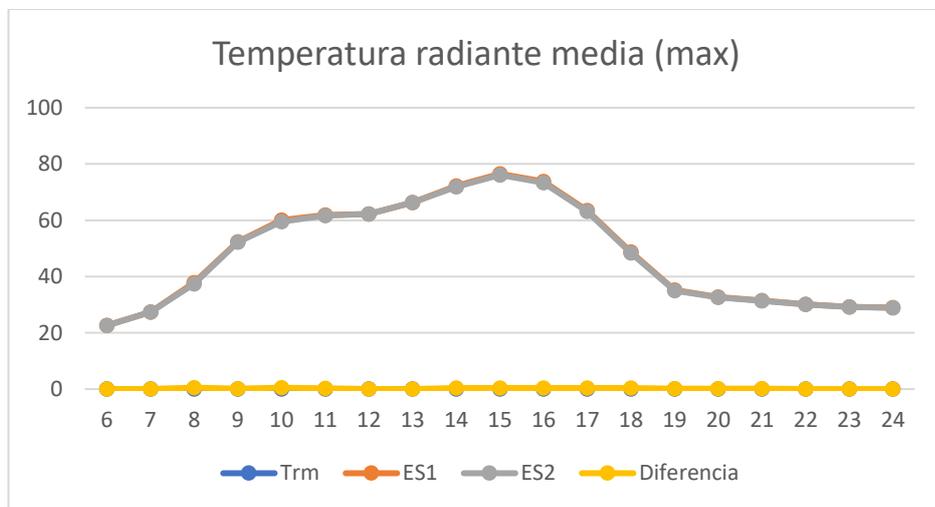
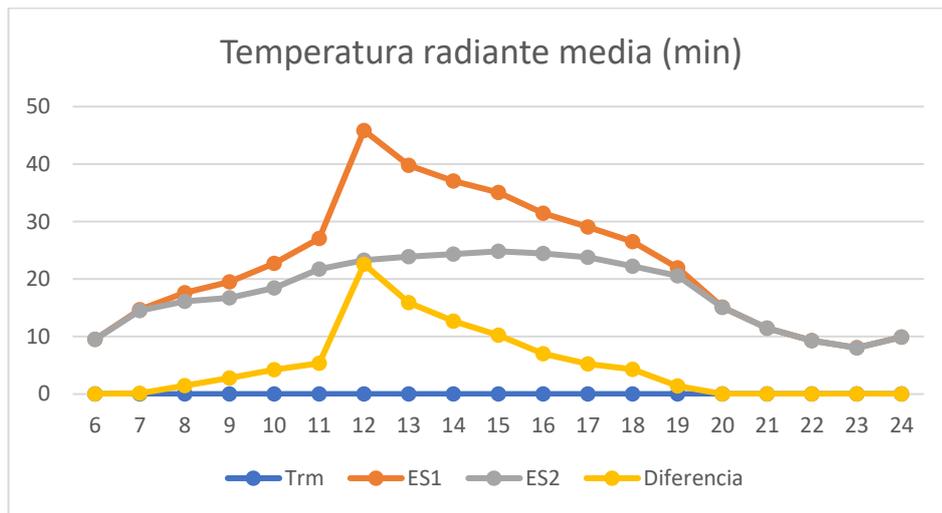
Temperatura radiante media (*Mean radiant temperature*). Es uno de los principales factores que influyen en el confort térmico exterior. Se ve afectada por la cantidad total de radiación absorbida por el cuerpo humano y está directamente

influenciada por la morfología urbana, el cañón urbano, la velocidad del viento, las fachadas de los edificios y los materiales de las superficies (YILMAZ et al., 2021).

La temperatura radiante media se expresa constante en ambos escenarios: Escenario 1 (*base scenario*) y el Escenario 2 (*Deep green scenario*), para la temperatura máxima (que es 76°C), para el registro de temperatura mínima, el ES1 con 35.06 °C y el ES2 con 29.83°C, teniendo una diferencia de 5.23 °C para las 15h (Tabla 37).

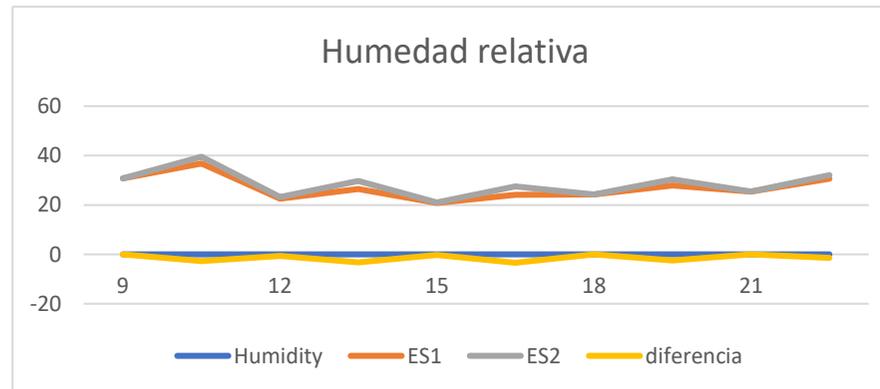
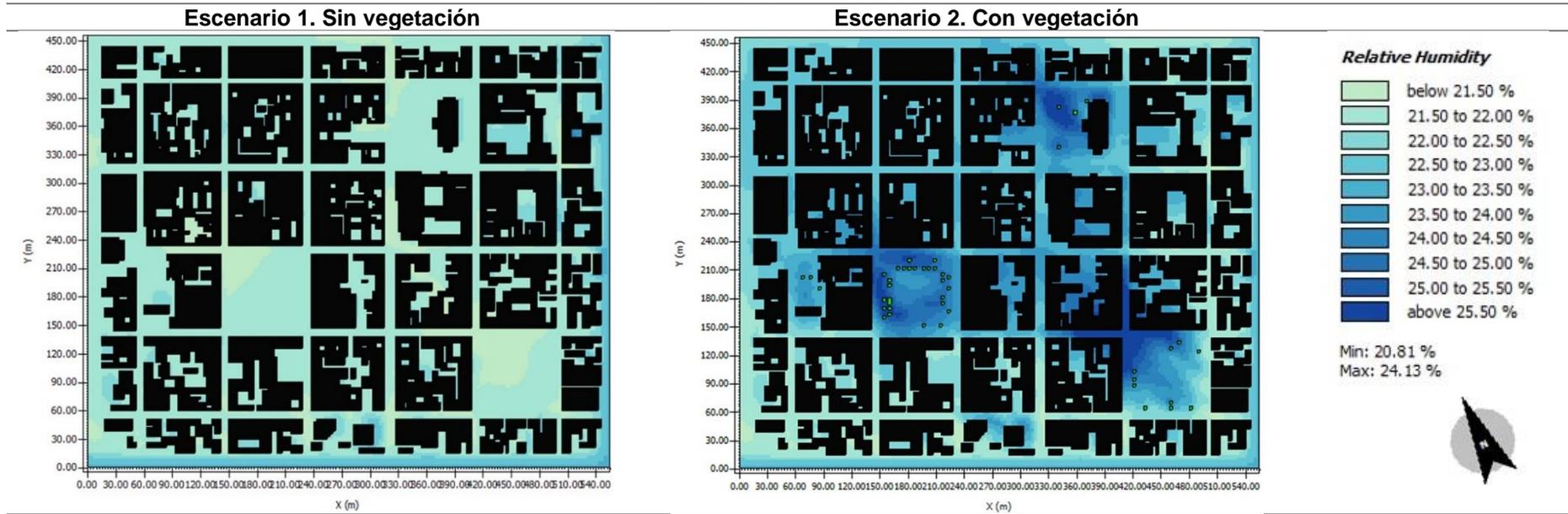
Según el registro de Trm por horas comparado en ambos escenarios, se identifica una notable diferencia en los valores mínimos y mantiene constante los valores registrados en los valores máximos (Gráfico 9).

Gráfico 9. Temperatura radiante media (min y max)



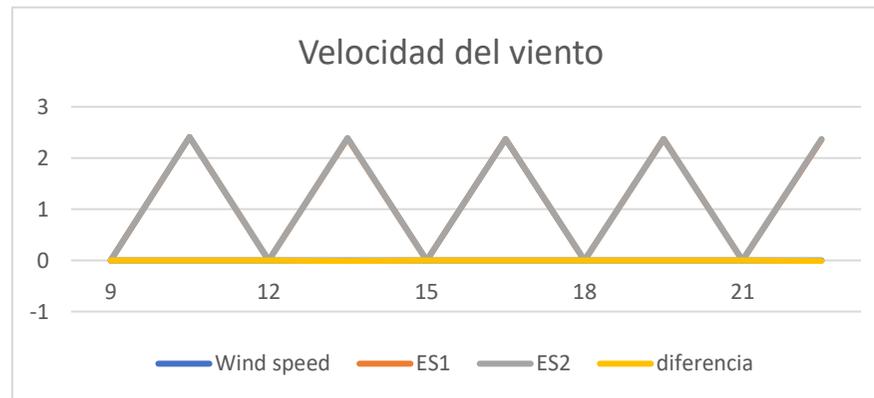
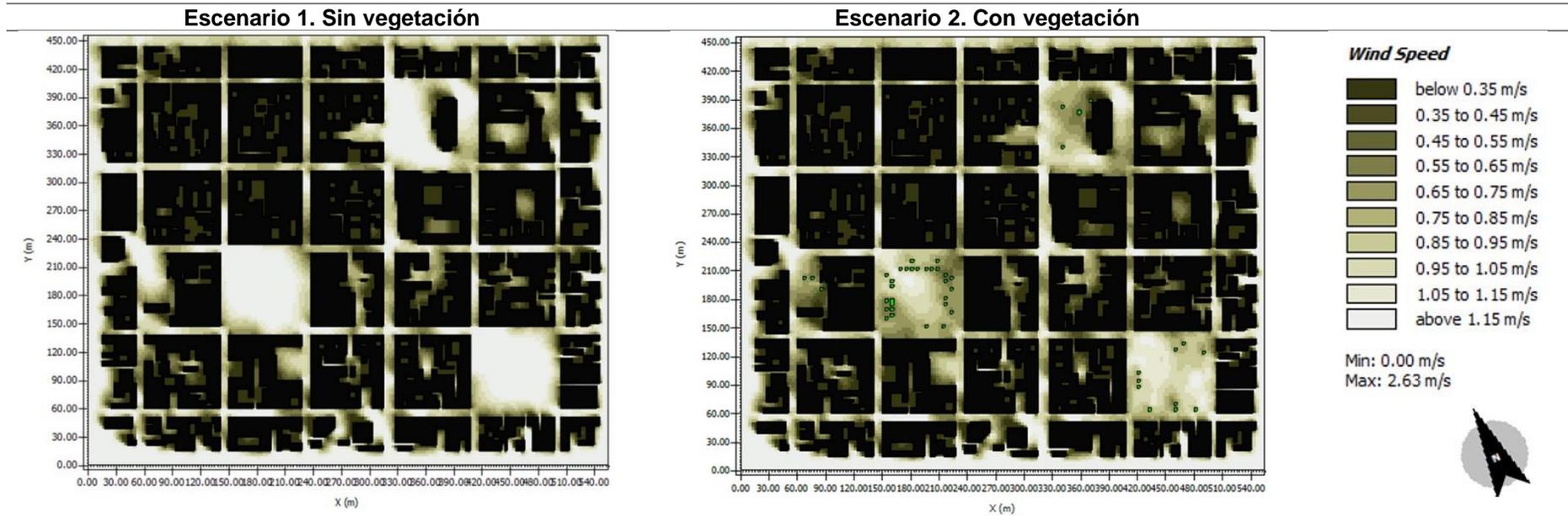
Fuente: Autora, 2023

Tabla 35. Humedad relativa



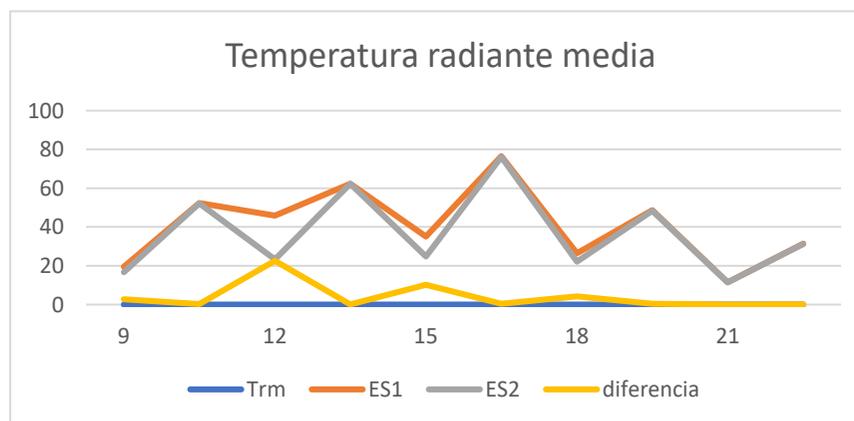
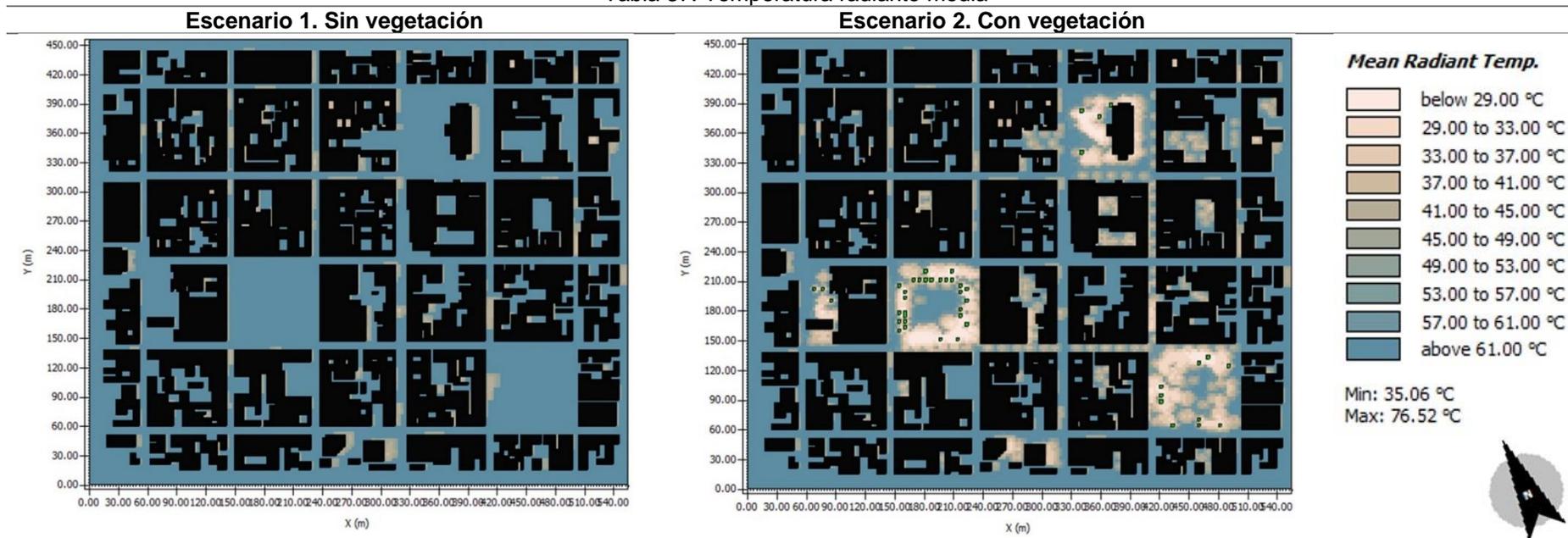
Fuente: Autora, 2023

Tabla 36. Velocidad del viento



Fuente: Autora, 2023

Tabla 37. Temperatura radiante media

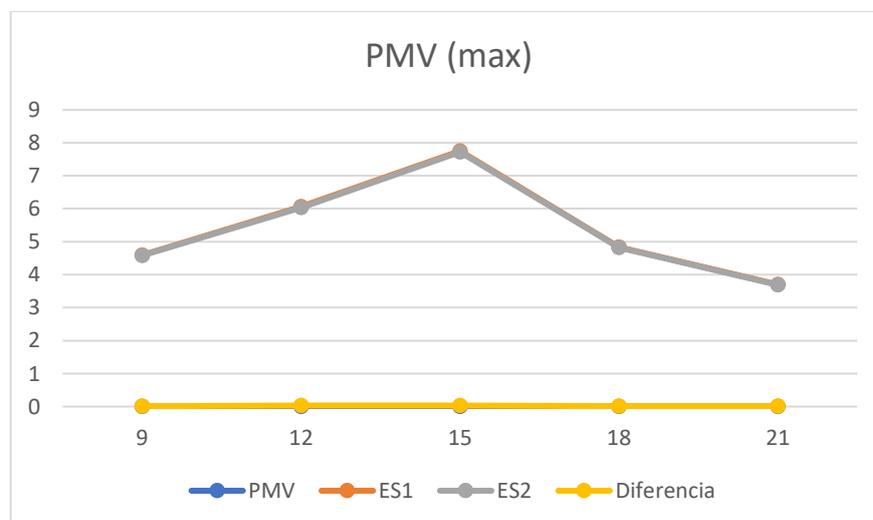
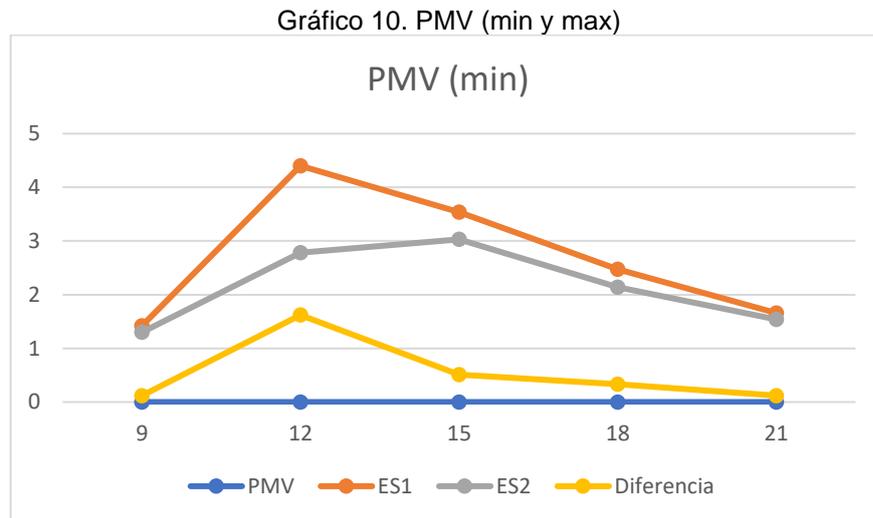


Fuente: Autora, 2023

c) *Biomet*

PMV. Índice de confort térmico. Se calcula a partir de factores personales (tasa metabólica (met), ropa (clo) y factores ambientales (temperatura del aire), temperatura radiante, velocidad del aire y humedad relativa) SOELAIMAN *et al*, 2018. La escala se basa en la clasificación del confort térmico de (FANGER, 1970), comprende los valores de (-3) para el frío y (+3) para el caliente. Teniendo valores entre -0.5 a 0.5, se considera térmicamente confortable. El índice PMV utiliza siete escalas para medir el confort térmico. Según la ASHRAE 55, el confort térmico es la condición mental que expresa la satisfacción con el ambiente térmico (Tabla 38).

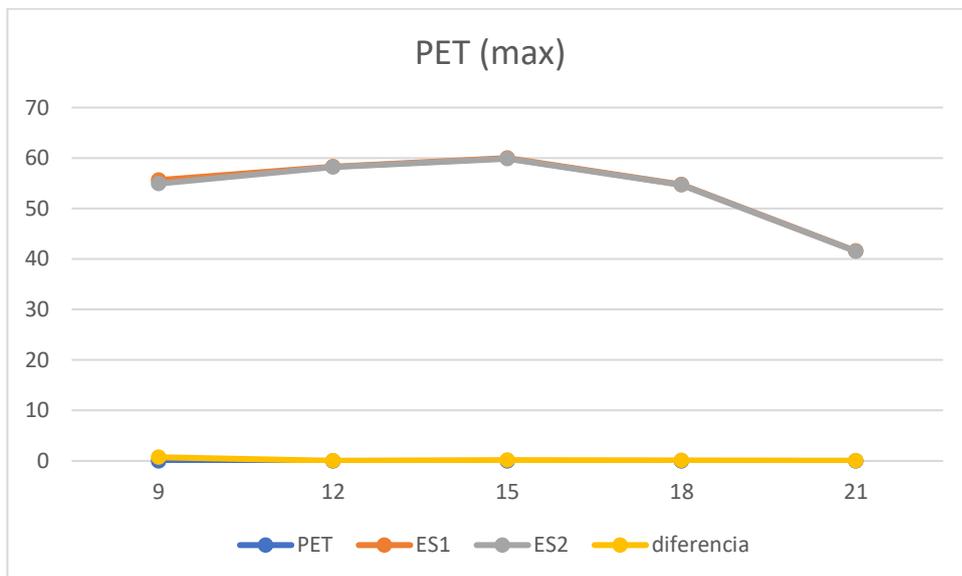
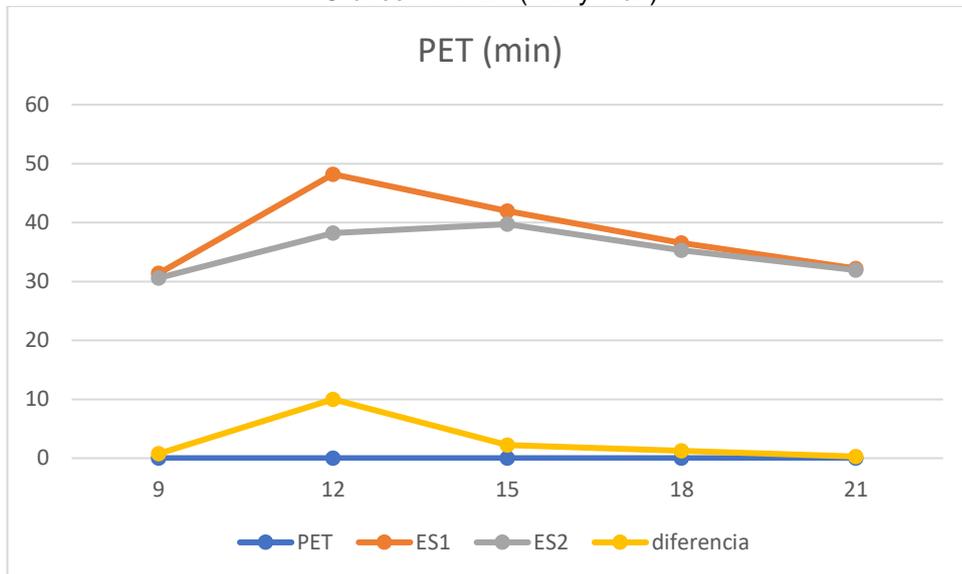
Ambos escenarios registran por encima del indicador 3, que representa caloroso, para ese horario no se registran áreas de confort (Gráfico 10).



Fuente: Autora, 2023

PET. Índice de confort térmico. Temperatura Fisiológica Equivalente a nivel del pedestre, según (HÖPPE, 1999). (Tabla 39).

Gráfico 11. PET (min y max)

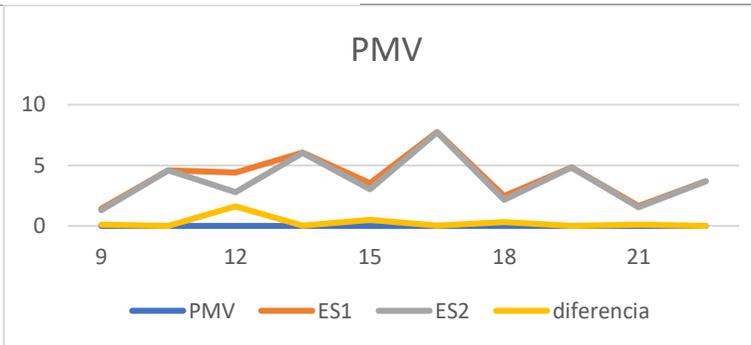
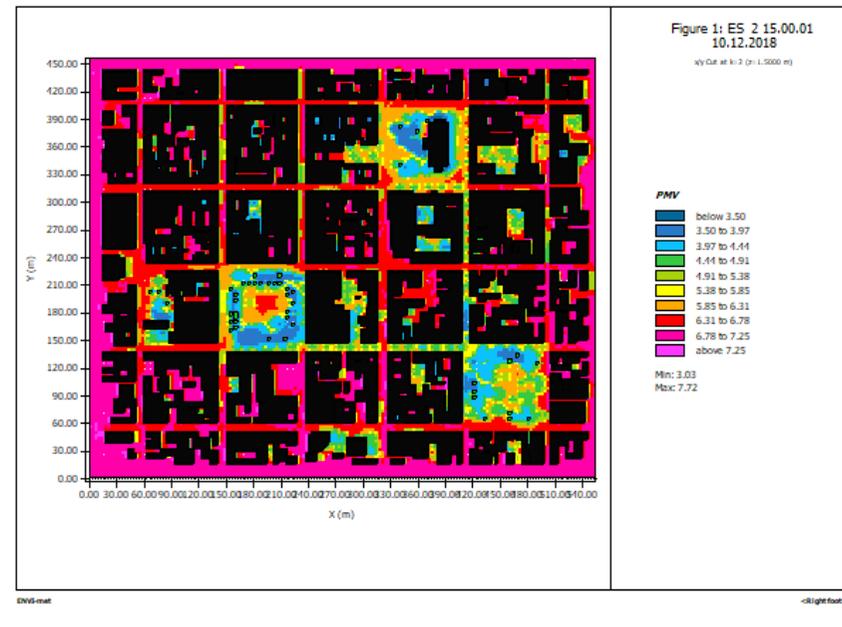
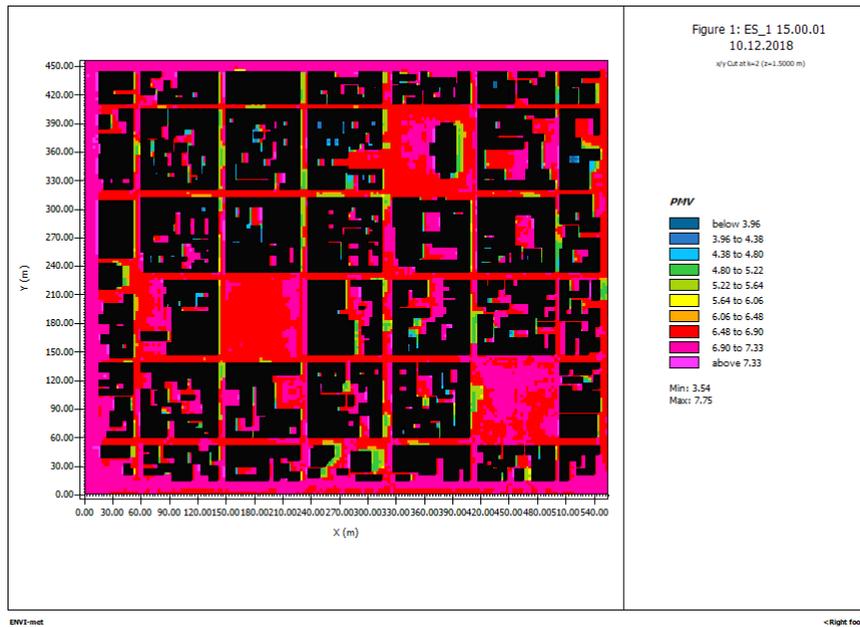


Fuente: Autora, 2023

Tabla 38. PMV

Escenario 1. Sin vegetación

Escenario 2. Con vegetación

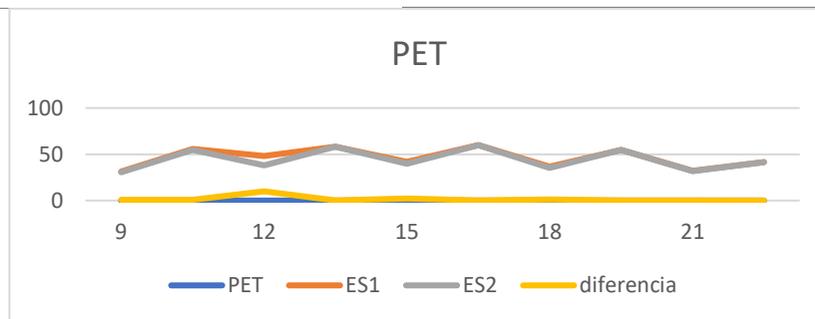
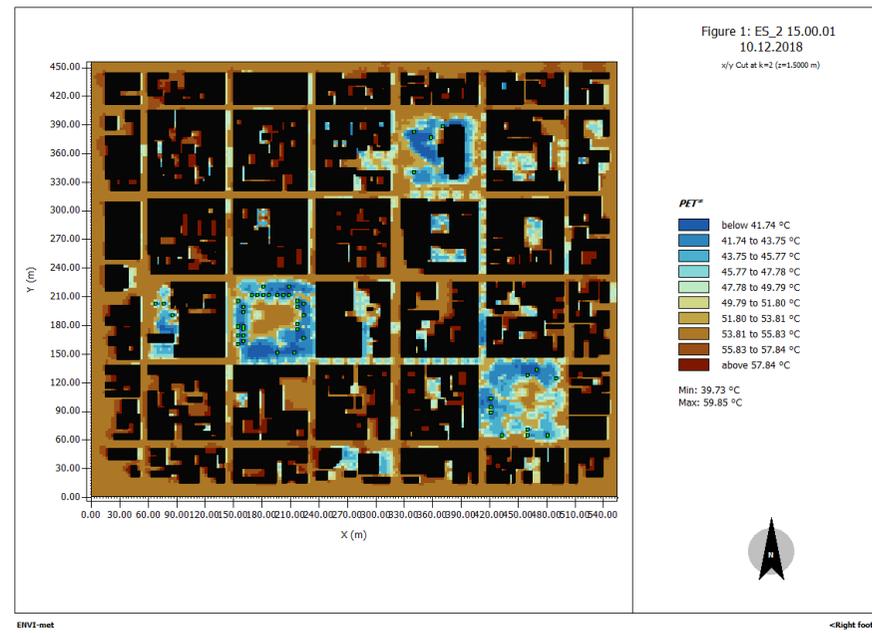
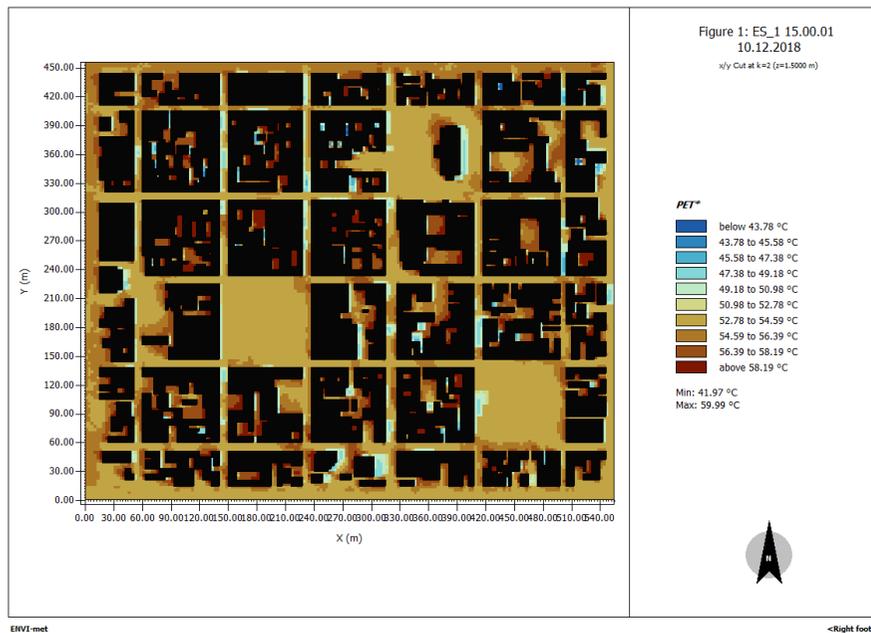


Fuente: Autora, 2023

Tabla 39. PET

Escenario 1. Sin vegetación

Escenario 2. Con vegetación



Fuente: Autora, 2023

d) *Vegetation*

Temperatura de las hojas (*Leaf Temperature*).

El indicador *Leaf Temperature*, o temperatura de las hojas, además de la transpiración y vitalidad de los árboles son importantes para evaluar los efectos microclimáticos de la vegetación urbana, porque “solo plantas sanas y sin estrés aportan efectos beneficiosos sobre el microclima” (SIMON et al., 2018 p.34).

La temperatura de hojas registrada en el escenario 2, a una altura promedio de 10m, corresponde a valores mínimo de 22.27°C a las 9h y máxima de 38.96 °C a las 15h (Tabla 40).

e) *Buildings*

Temperatura del edificio (Temperature of building – inside)

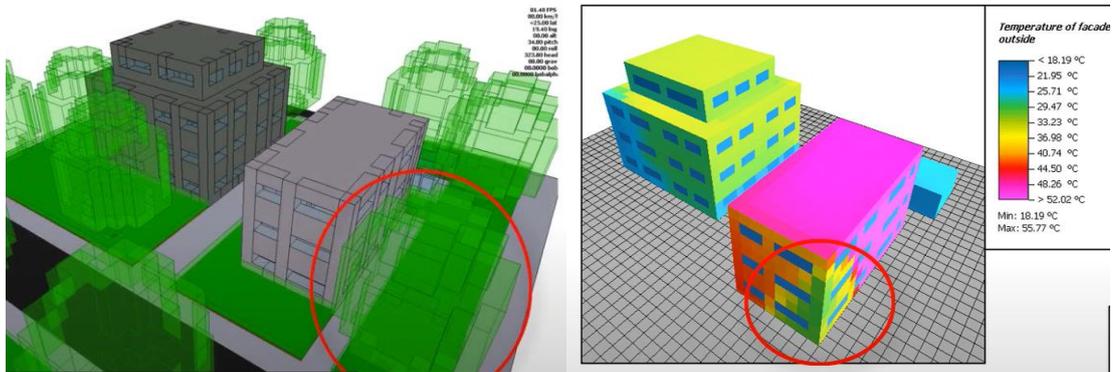
La compleja interacción entre el edificio y la atmósfera está determinada por el impacto de los edificios en el balance energético, la influencia de las condiciones atmosféricas del exterior en el interior del edificio, el consumo de energía para el enfriamiento o calentamiento Figura 76.

El ambiente construido impacta en los componentes de la atmosfera, influencia en la dirección del viento, en el balance del consumo energético, incide en el sombreadamiento. Según Simon (2023), el ambiente interno queda influenciado por las condiciones exteriores y regula las demandas de enfriamiento o calentamiento, a su vez esto repercute en costos adicionales significativos para alcanzar el confort térmico. Es decir, el ambiente externo influencia el desempeño físico de la masa edilicia y en consecuencia el confort interno (confort térmico externo a nivel del pedestre). El mismo autor explica que en un modelo simulado, se calcula la transferencia de calor desde el exterior hacia el interior y viceversa, para la temperatura exterior se estima el balance de energía con la radiación absorbida se tiene una variación de onda larga y cuanto más tiempo la radiación se emite se identifica el flujo de calor sensible, calor latente y conducción de calor.

En resumen, para el cálculo en fachada se calcula la temperatura interna como un parámetro pronóstico o según la energía utilizada para regular la temperatura interior. La simulación vincula la atmósfera con el ambiente construido y ofrece un modelo microclimático holístico (no simula solo el edificio, no simula solo un componente-el viento o temperatura o humedad) y considera el microclima local.

Con el mapa de *Temperature of facade – outside* se puede verificar las áreas donde se identifican mayores temperaturas y como el sombreado de la vegetación regula la incidencia de la temperatura sobre el edificio.

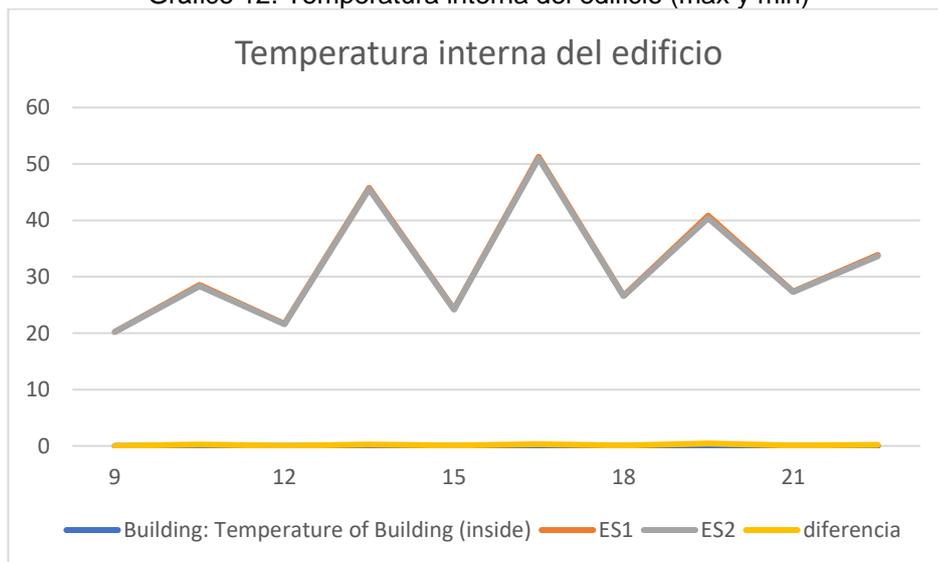
Figura 75. Fisiología de los edificios



Fuente: <ENVli-met GmbH> 2023

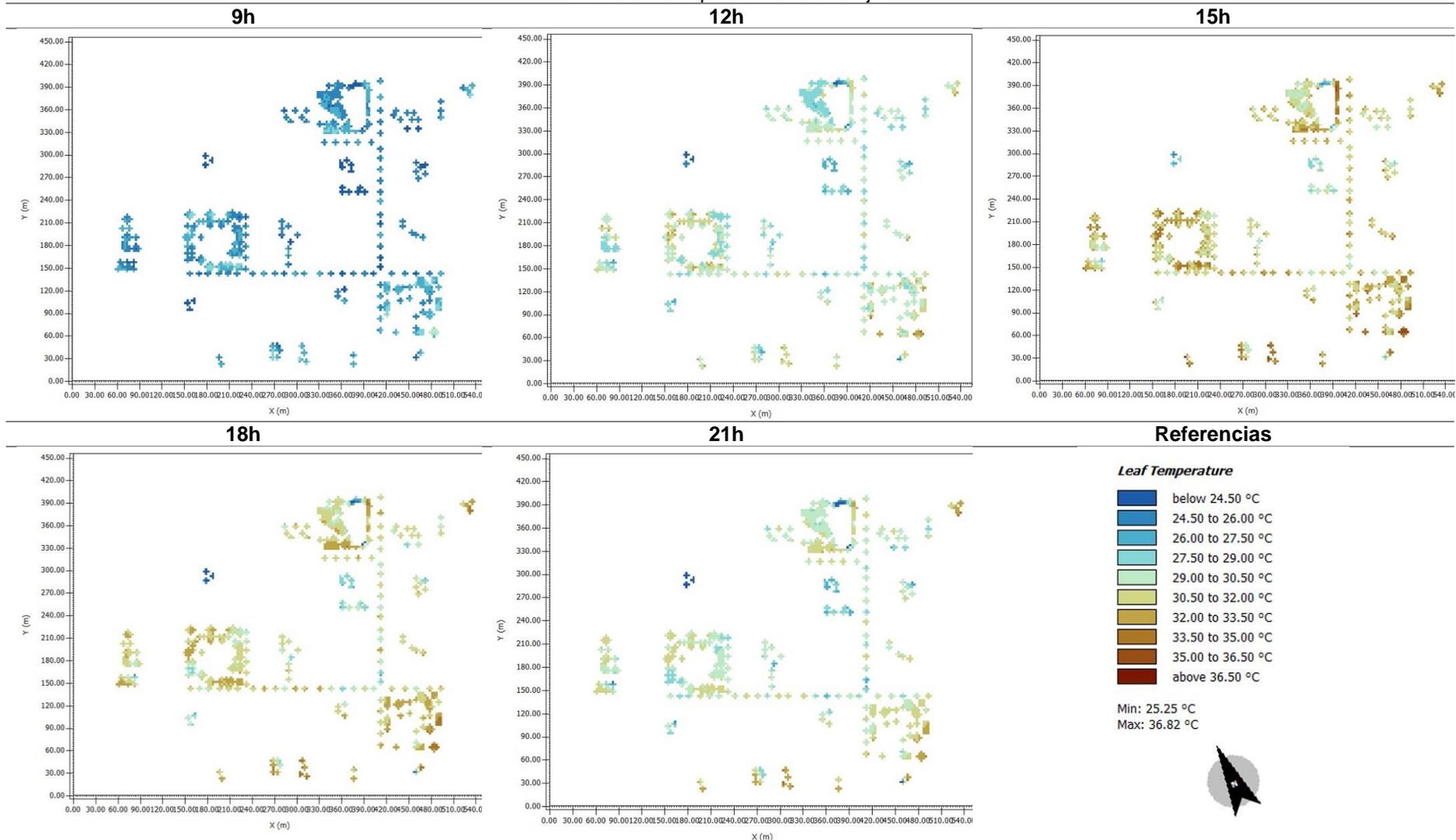
La temperatura interna del edificio para ambos escenarios, no registra diferencias muy significativas a las 9, 12, 15, 18 y 21h. En el horario de las 18h se registra una diferencia de 0.42°C, es decir, en escenario 1 la temperatura máxima registrada es de 40.8°C y en escenario 2 una disminución de temperatura interna de 40.38°C (Gráfico 12) (Tabla 41).

Gráfico 12. Temperatura interna del edificio (max y min)



Fuente: Autora, 2023

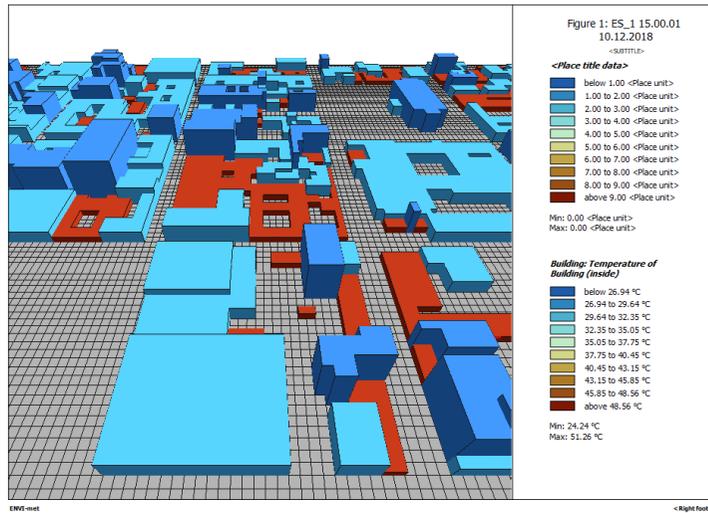
Tabla 40. Temperatura de las hojas



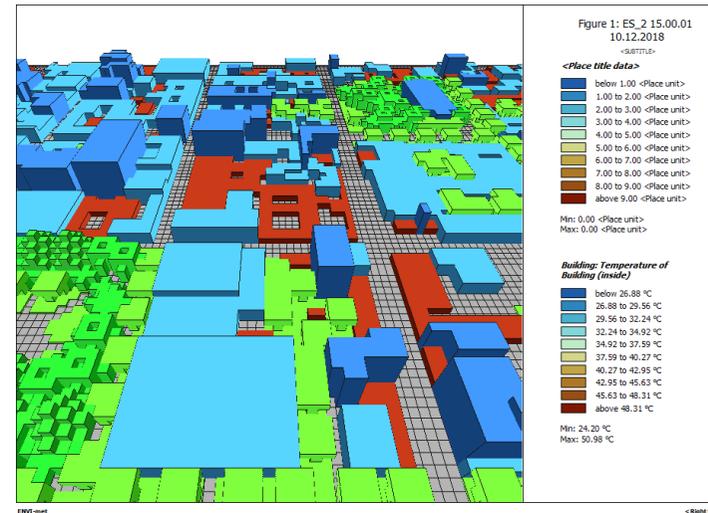
Fuente: Autora, 2023

Tabla 41. Temperatura de edificios

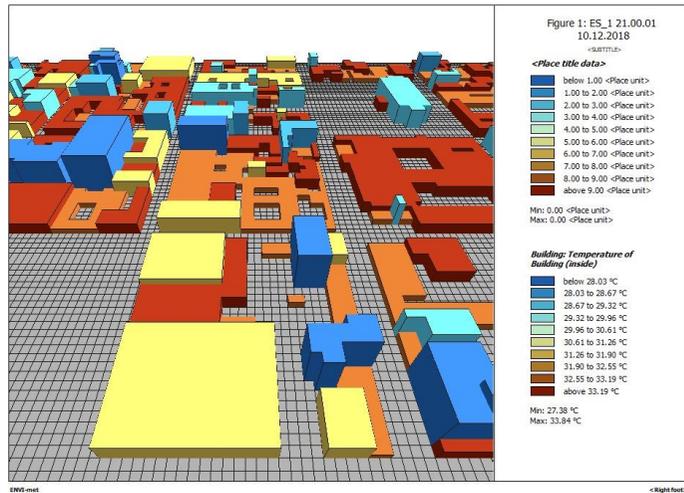
Escenario 1 (15h)



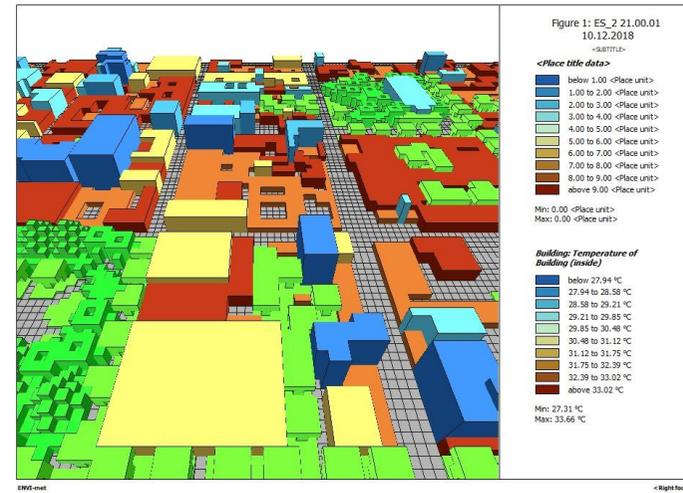
Escenario 2 (15h)



Escenario 1 (21h)



Escenario 2 (21h)



Fuente: Autora, 2023

Los resultados totales obtenidos de las simulaciones se registran en la siguiente Tabla 42.

Tabla 42. Resultados de simulación de ENVI-met comparado por escenarios

Datos de salida	Variable Climática/ Indicador de confort térmico	ES1 Base escenario (Sin vegetación)		ES2 Deep green escenario (Con vegetación)		Diferencia	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
<i>Surface</i>	Temperatura de superficie	35.06	76.52	24.83	76.11	10.23	0.41
	Temperatura del aire	43.91	46.78	42.12	46.61	1.79	0.17
<i>Atmosphere</i>	Humedad relativa	20.81	24.13	21.01	27.54	-0.2	3.41
	Velocidad del viento	0	2.37	0	2.37	-	-
	Temperatura radiante media	35.06	76.52	24.83	76.11	10.23	0.41
<i>Biomet</i>	PMV	3.54	7.75	3.03	7.72	0.51	0.03
	PET	41.97	59.99	39.73	59.85	2.24	0.14
<i>Vegetation</i>	Temperatura de las hojas	-	-	22.27	38.96	-	-
<i>Buildings</i>	Temperatura del edificio – interna	24.24	51.26	24.2	50.98	0.04	0.28
	Temperatura (Node 1) – externa	31.72	70.67	30.94	70.23	0.78	0.4

Fuente. Autora, 2023

Los datos de salida de las carpetas de ENVI-met comparados entre los dos escenarios expresan los siguientes resultados:

Surface: Se registra la mayor diferencia entre ambos escenarios en la temperatura mínima de superficie con 10.23°C de diferencia favorable al ES2 con vegetación o *Deep green scenario*.

Atmosphere: Se registra 1.79°C de diferencia en el ES2 para la temperatura de aire. Respecto a la humedad relativa, se registra un incremento en 3.41% en el ES2. La velocidad del viento se mantiene constante en ambos escenarios. Respecto a la temperatura radiante media registra 10.23°C de diferencia en el ES2.

Biomet: El indicador PMV presenta 0.51°C de diferencia en el ES2.

El indicador PET disminuye en 2.24°C en el ES2.

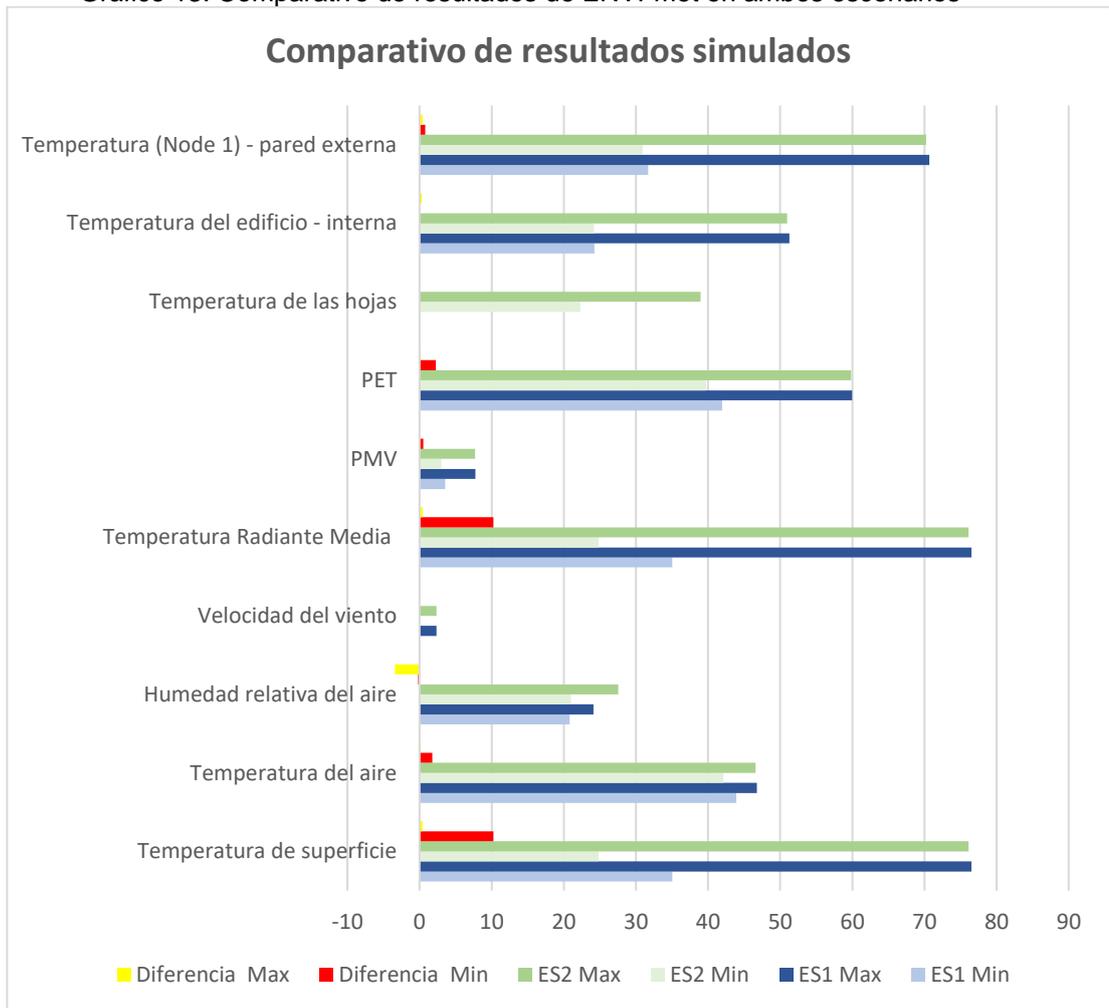
Vegetation: Sobre la temperatura de las hojas el ES2 se registran valores por debajo de los 40°C con 38.96°C.

Buildings: La temperatura interna del edificio disminuye en 0.28°C respecto al ES1, es decir, el material de adobe se desempeña favorable.

La temperatura del muro externo del edificio disminuye con 0.78°C en el ES2.

En resumen, existe favorablemente un mejor desempeño en el ES2 con vegetación, en síntesis, puede ser percibido en el gráfico 13.

Gráfico 13. Comparativo de resultados de ENVI-met en ambos escenarios

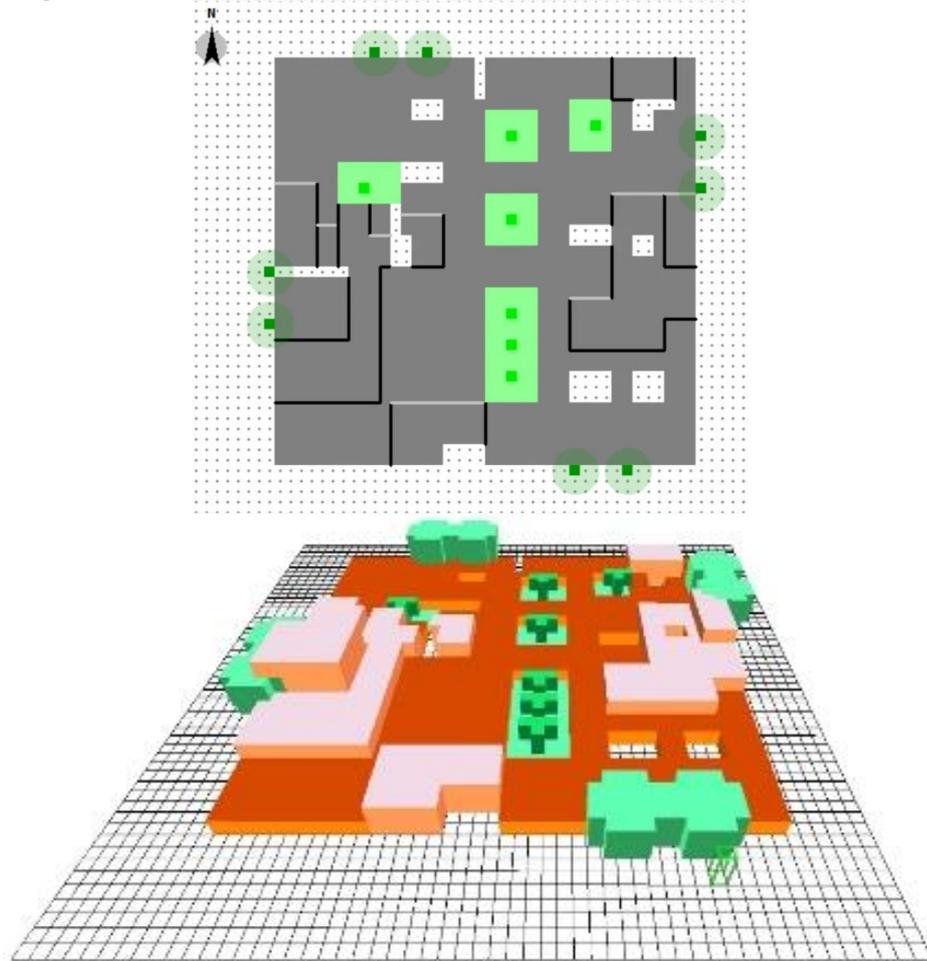


Fuente. Autora, 2023

4.4.1 Simulación del Patio Central

Para verificar el desempeño de los patios, se realiza una simulación específica en una cuadra con tres escenarios: patio sin vegetación, patio con cubierta (calamina), patio con vegetación (Figura 77). Utilizando la misma base de datos en materiales, vegetación y archivo climático.

Figura 76. Modelo de patios con vegetación en *Spaces* de ENVI-met V5.5.1



Fuente: Autora, 2023

Los datos de configuración para el modelo en *spaces* se resumen en Tabla 42.

Los resultados obtenidos para la temperatura del aire a las 15h registran en el escenario 1 valores de 45.90°C, el escenario 2 con 46°C y escenario 3 (con vegetación) registra 44.70°C, es decir una diferencia de 1.2°C implementando vegetación en el patio (Tabla 43).

Los resultados presentados de la simulación de escenarios, contribuyen a visibilizar los efectos de la estrategia de verde urbano en el centro histórico, sin embargo, como refiere (SHINZATO, 2014 p.185) “no importa solamente el tipo de vegetación escogida (formato de la copa, *LAI* y distribución geométrica de la abertura de la copa), sino las características del medio en las que son emplazadas (condiciones microclimáticas locales y el suelo)”. A este referido se le añade la configuración espacial y característica del centro urbano patrimonial, altura de predios, patios internos y plazas.

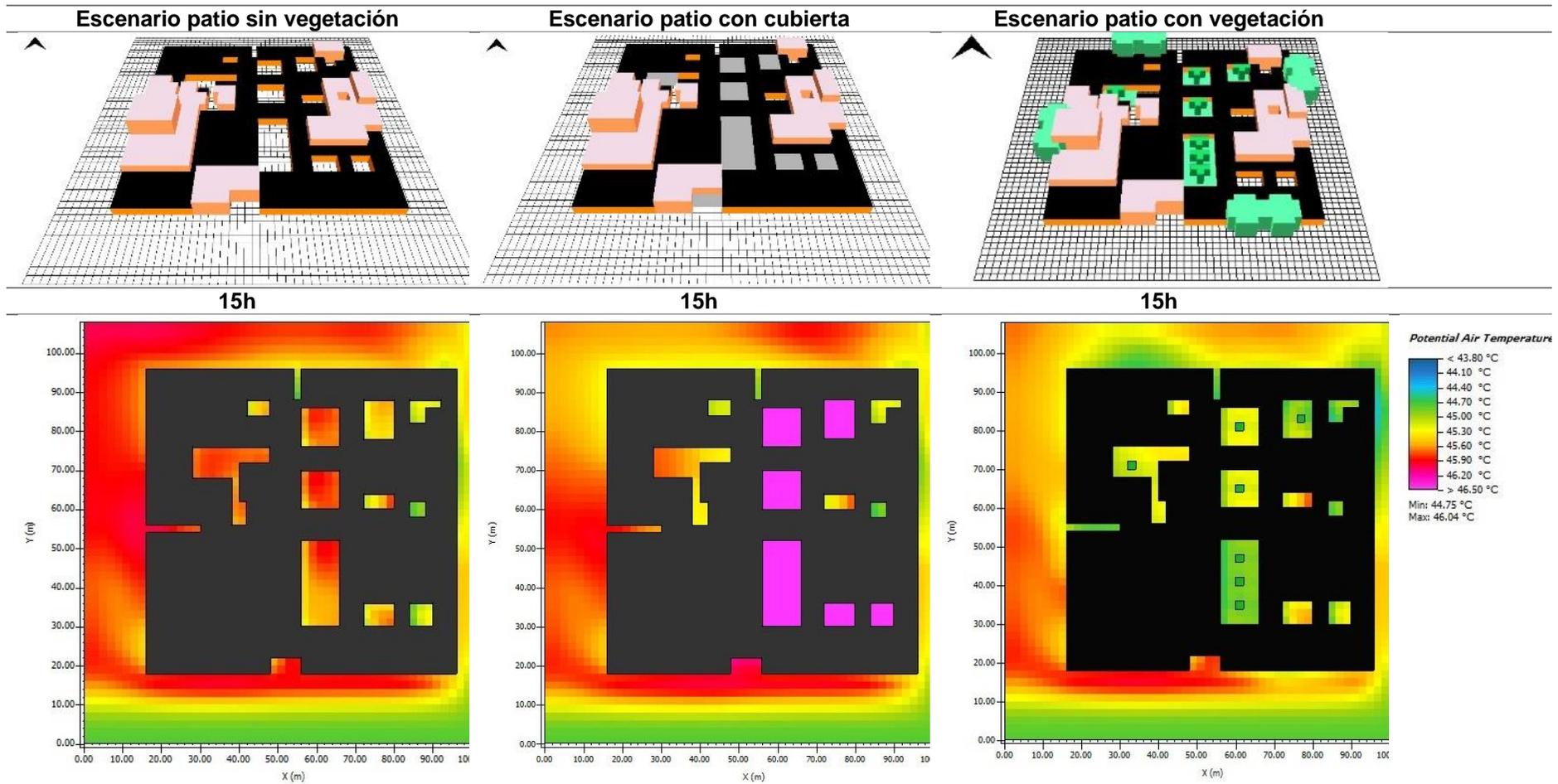
Tabla 43. Parámetros para simulación con ENVI-met

Variable	
Tamaño de pixel	2m x 2m x 3m
Fecha de simulación	10 Dec. 2018
Tiempo total de simulación	24h
Hora de inicio	06.00.00
Velocidad del viento (m/s)	2.075
Dirección de los vientos (deg)	130
Rugosidad	0.010
Temperatura atmosférica T (°C)	Full forcing with fox file (EPW Tarija)
Db manager: Albero	Jacaranda mimosifolia, privet.
Db manager: Buildings	Adobe Brick aerated wall Colonial tile Calamina (single walls) Concrete slab
Db manager: Roads	Asphalt Single stones Pavementt Grass

Fuente: Autora, 2023

En este propósito el uso de herramientas de simulación debe ser cuidadosamente tratado para presentar los datos que contribuyan no solo al análisis de indicadores, sino sobre todo a la formulación de políticas públicas y diseño urbano que coadyuve a mitigar el calentamiento urbano.

Tabla 44. Temperatura del aire en Patios



Fuente: Autora, 2023

4.5 Resumen del capítulo

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos en el desarrollo metodológico para cada escala. En un primer momento se identificaron las áreas potenciales de ICU dentro del polígono de grande estructura, donde el área del centro histórico se considera como un área potencial de ICU, a través del indicador LST. Se corroboró el índice de actividad fotosintética de la vegetación en el periodo de 2001 a 2021, donde se observan según los valores obtenidos el incremento de masa construida y se registran valores por encima de 0.2 en las áreas verdes del polígono de estudio, para el 2021. En la misma escala se identificó el grado de integración y centralidad del tejido urbano, a través de sintaxis espacial, constatando que el centro histórico es el área más integrada de la ciudad.

Sobre la simulación computacional se obtuvieron mapas de indicadores climáticos (confort térmico) y variables climáticas que muestran para la temperatura del aire y superficie una mejora con el escenario 2, *Deep green scenario*. También quedó comprobado que el indicador de confort térmico en ambos casos, expresa valores muy calientes (por considerar el archivo climático extremo), registrando los valores más amenos en ambos escenarios en torno a las 9h y 21h.

La temperatura de las hojas de las especies simuladas se encuentra entre los 22.27°C y en el horario de las 15h registra valores de 28.03°C como mínimo, contribuyendo al efecto de evapotranspiración (siendo perjudicial el registro por encima de los 40°C), no registrado en los horarios simulados.

Respecto a los patios, mantener la tipología constructiva de este elemento arquitectónico de acervo colonial, constituye mejoras en el confort térmico, contribuye a mantener la ventilación en los ambientes y registra 1.2°C de reducción en la temperatura del aire respecto a un escenario de patio con cubierta.

De mayor a menor escala se pudo verificar que con el paso de los años se alteran los indicadores de temperatura del suelo y vegetación. Sin embargo, aplicando medidas o estrategias de verde urbano, se puede amenizar esos efectos, estrategias de preservación del patrimonio y de mitigación del calentamiento urbano.

Tras la simulación de escenarios en el sitio histórico, se formula y presenta la Ficha Bioclimática Patrimonial (FBP) con el objetivo de preservar y destacar la puesta en valor de los elementos constitutivos del EPA.

5. CONCLUSIONES

Frente a la desordenada y acelerada consolidación urbana, los efectos negativos del cambio climático, se hace relevante estudiar los componentes y contribuciones de medidas de mitigación, adecuación y resiliencia en las ciudades, especialmente aquellas que aun preservan elementos de valor histórico en la arquitectura y medio natural.

Con el desarrollo del método de análisis integrado escalar propuesto y la aplicación de geoprocésamiento, sintaxis, simulaciones e inventario *in situ*, fue posible evaluar el desempeño ambiental del verde urbano propuesto en el estudio de caso y sitio histórico de interés patrimonial de la ciudad de Tarija.

A través de los resultados de simulación, los dos indicadores de confort térmico PMV y PET registran una diferencia favorable en el escenario con vegetación (menos 2.24°C). Las demás variables climáticas: temperatura de superficie, temperatura del aire, temperatura de la pared externa e interna registran disminución de los valores en el escenario propuesto de verde urbano. Se registra también un incremento en la humedad relativa de 3.41%. El valor más expresivo registrado en la comparación de ambos escenarios es en la temperatura de superficie y temperatura radiante media con 10.23°C de diferencia.

Poner en relevancia el binomio: patrimonio + clima porque coadyuva al estudio de la ciudad en términos de configuración urbana en relación al clima y patrimonio, por tanto, la investigación, de naturaleza deductiva, estableció una revisión de indicadores y variables climáticas que validan la estrategia de mitigación de ICU, conforme a los resultados obtenidos, así se confirma la hipótesis planteada.

Si bien el estudio incluye la escala de gran estructura urbana, la principal estrategia de vegetación urbana, se particulariza y especifica en un lugar de interés patrimonial, el centro histórico.

Conforme al planteamiento de los objetivos y resultados obtenidos, fue importante conocer el contexto climático con las áreas potenciales de ICU apoyado en el análisis integrado escalar. Fue imprescindible definir polígonos de estudio para aplicar el método propuesto con geoprocésamiento y simulación y facilitar la comprensión del fenómeno climático en la ciudad, posibilitando identificar en destaque el desempeño del verde urbano en el ES2 con vegetación o *Deep Green Scenario*.

Respecto a los objetivos específicos trazados se concluye que:

Los indicadores de *Land Surface Temperature* (LST) y *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) sirvieron para identificar áreas potenciales de ICU, este resultado colabora con la noción de ciudad, es decir, contribuye a la comprensión de la escala de grande estructura (radio urbano) y escala específica en el área de incidencia microclimática (lugar/edificio). En esta misma escala fue posible constatar la centralidad de la ciudad, coincidente con el centro histórico patrimonial. En suma, estudiar un fenómeno urbano implica en principio, una revisión general, escalar. Se registra una diferencia entre los valores identificados por geoprocesamiento en el indicador LST que corresponde a 48°C a diferencia del registro de temperatura de superficie máxima de 52°C, a través de simulación.

Los elementos constitutivos del Espacio Público Abierto (EPA), como ser patio, calle y plaza fueron los más destacados en el sitio histórico patrimonial de la ciudad de Tarija. El centro de la ciudad preserva de manera “moribunda” el legado colonial y republicano en su arquitectura. A través de la Ficha Patrimonial Bioclimática, se refuerza la necesidad de inventariar, catalogar y preservar el patrimonio natural como un conjunto de preservación y unidad de paisaje (medio ambiente construido + medio ambiente natural).

El escenario de verde urbano propuesto (*Deep green scenario*) en el centro histórico que articula un conjunto de 20 manzanas y 4 áreas verdes/plazas, se desempeña ambientalmente de forma más amena frente a un escenario sin vegetación. El microclima urbano es un tópico muy poco tratado en los estudios urbanos y tiene mucha influencia en la recualificación del espacio público, vida y salud urbana en la ciudad.

Por tanto, de manera general se concluye con tres aportes significativos de la tesis:

Primero, **revalorización de la identidad de los centros urbanos** y el paisaje cultural en clave climática. Esto refuerza la necesidad de abordar más estudios en el área para preservar valores morfológicos, históricos, culturales de las ciudades (con principal énfasis de escala intermedia) que no exclusivamente se limite solo a la acción de preservar. Por ejemplo, el perfil configuracional del centro histórico coadyuva a ese propósito y debería ser preservado, para ello se requiere una actuación multidisciplinar (actualmente deficiente en la ciudad de Tarija). Por ello, este trabajo recomienda el registro y valoración del EPA, plazas y patios para su respectiva declaratoria y

catalogación de patrimonio natural (la plaza como hito fundante de la ciudad colonial, el patio central en el arquetipo hispano, la calle como corredor verde para el peatón).

Segundo, contribuir de manera puntual con medidas efectivas que analicen, incorporen y respondan a las exigencias y externalidades del calentamiento urbano en cualquier contexto territorial, con **adecuación bioclimática de los espacios públicos**. Considerando el clima local, la vegetación existente, materiales naturales y elementos constitutivos de los espacios (públicos y privados).

Tercero, el **uso de herramientas digitales** de procesamiento y simulación computacional tiene dos propósitos: contribuyen al cumplimiento de los objetivos trazados en el estudio y segundo, se hacen necesarios en su aplicación porque facilitan la comprensión y visibilizan los efectos de forma práctica (no son aportes netamente teóricos anclados a un discurso político), es decir, la representación gráfica colabora en la comprensión del problema con diferentes actores en la ciudad (principalmente los beneficiarios).

En resumen, fue importante identificar los elementos constitutivos del EPA para sustentar la propuesta de verde urbano, patio, calle y plaza, con ello su respectiva preservación. En ese sentido, fue determinante proponer la FPB como herramienta de gestión urbana para la preservación del patrimonio natural y construido del EPA en sitios históricos y centros urbanos.

Los resultados del geoprocesamiento de imágenes satélite LANDSAT en forma temporal, constatan una pérdida de vegetación e incremento de temperatura superficial del suelo. El mapa axial representa el área más integrada del sistema urbano, el centro histórico de la ciudad. Los resultados de la simulación computacional de escenarios de verde urbano demuestran en las variables climáticas medidas una reducción de valores (solo la humedad relativa incrementa en torno al 3%), esto significa que el escenario propuesto de verde urbano *Deep green scenario*, se desempeña de forma más amena que el escenario sin vegetación.

Estudiar la ciudad denota su complejidad, estudiar el clima también es complejo, por tanto, a través de la presente investigación se pretende contribuir con un método de evaluación del desempeño climático a microescala para reducir el calentamiento urbano a través de la temperatura del aire y superficie preservando los valores del patrimonio arquitectónico y natural.

Buscando el mejor aprovechamiento del estudio, se presentan algunas recomendaciones, sugerencias de estudios futuros y limitaciones encontradas.

5.1 Recomendaciones

Respecto al método de investigación: El procedimiento metodológico y aplicación del diagnóstico escalar, métodos de evaluación, seguimiento y monitoreo del desempeño ambiental a través de teledetección, geoprocésamiento, simulación, inventario y directrices, puede aplicarse en cualquier contexto de la ciudad, es decir, en zonas de carácter industrial, residencial, comercial, etc. El principal aspecto a considerar es la definición de los polígonos de estudio para no sobreponer ni duplicar datos de mensura. Es recomendable espacios de difusión de las investigaciones realizadas y de algún modo sensibilizar y fortalecer la comunicación científica.

Respecto a la tecnología: El desarrollo y aplicación de medios digitales y softwares computacionales posibilitan el acceso y procesamiento de información con un amplio espectro. Resulta muy provechoso simular escenarios para visibilizar efectos ambientales. Aprovechable también el uso de imágenes satélite de plataformas gratuitas para los procesamientos y generación de datos geográficos. Los recursos tecnológicos y la ciencia deben estar al servicio de los requerimientos técnicos en cuanto a la planificación y evaluación (ambiental, sostenible, territorial, urbana, etc.).

Respecto al clima: Es indispensable, considerar los factores climáticos a escala del peatón y por debajo del dosel urbano (independientemente del carácter), el acondicionamiento y mitigación de los efectos del cambio climático. El calentamiento urbano principalmente en zonas residenciales ha alcanzado valores extenuantes y se constituyen en una amenaza a la salud y demanda un mayor consumo energético para el acceso a sistemas de refrigeración.

Respecto a la vegetación: Determinar las especies arbóreas y tipología de vegetación según sus características y medio a ser implantado. “Formato de la copa, IAF y distribución geométrica de las aberturas de copa” (SHINZATO, 2014) “.

El verde urbano incide en la calidad de vida de las personas, (confort térmico, salud mental) e influencia en la imagen urbana de la ciudad.

Articular y crear ecosistemas urbanos ambientales y ecológicos en la ciudad se hacen necesarios para preservar los hábitats de flora y fauna que allí se albergan.

El aporte de la vegetación en el sombreado de superficies, para amenizar la radiación solar y para el aprovechamiento del viento, favorece los índices de confort térmico, sobre todo en espacios abiertos o EPA, sin dejar de lado la configuración urbana y relación formal entre calles y edificios.

Respecto al patrimonio: Homologar los valores del patrimonio arquitectónico con el patrimonio natural, es decir son reconocidos los estilos arquitectónicos de los edificios y deben ser reconocidos también las características y valores de los espacios públicos. Con el estudio se propuso poner en valor y fortalecer la importancia cultural y funcional de los patios (carácter social), por su organización espacial de las casas coloniales y de las plazas como núcleos de vida urbana con valor simbólico (carácter económico, político).

La implementación de la FPB coadyuva a la preservación de la identidad de los centros urbanos, del patrimonio arquitectónico y natural, de la cultura e historia de la ciudad. No solo para los valores físicos, sino también para los valores inmateriales del bien común del sitio histórico o EPA, por tanto, es imprescindible para evitar y atenuar las amenazas de destrucción con la expansión urbana, el crecimiento demográfico, la contaminación y falta de planificación urbano territorial.

Promover la consolidación de Escuelas Taller para la capacitación de mano de obra especializada en la restauración de elementos arquitectónicos patrimoniales y así, valorizar el patrimonio arquitectónico, sistema constructivo y materiales que lo componen.

Respecto al adobe: La tierra es un material noble y natural, contribuye a regular la temperatura interior de viviendas, en suma, al confort térmico. Por el aislamiento térmico (temperaturas más constantes), inercia térmica (reduce fluctuaciones en la absorción de calor), regulación de la humedad (absorbe y libera humedad) y como un factor de construcción sostenible (material local y natural). Por estas propiedades también puede contribuir en la eficiencia energética del edificio. El muro de adobe en muro, cerámico en teja colonial gana un destaque como muestras singulares a preservar frente a sistemas constructivos actuales.

Respecto a la política urbana: Sensibilizar la toma de decisiones, socializar y en algunos casos flexibilizar o adecuar las normas y códigos, respecto a la planificación, sostenibilidad y resiliencia en la ciudad a partir de estudios de

investigación. Promover la participación activa de la sociedad civil y fomentar la institucionalización de buenas prácticas en células barriales. Desarrollar proyectos sensibles a la realidad urbana con responsabilidad climática y reforzar el buen ejercicio de la gobernanza del espacio público. Fortalecer la gobernanza del bien común, aspecto clave y preponderante para alcanzar objetivos de sostenibilidad y resiliencia. Luchar fehacientemente contra la corrupción.

Promover políticas de incentivo para como una estrategia de motivación, reconocimiento y recompensa a los propietarios que colaboran individual o colectivamente en el planeamiento urbano sostenible.

Respecto a la cultura: Fundamental y necesario el fomento de una cultura urbana y arquitectónica no solo patrimonial, esta acción involucra también alfabetización ambiental, participación ciudadana y corresponsabilidad. De vital importancia al fomento, difusión y construcción de conocimiento técnico sensible a desarrollar posteriormente una cultura de cuidado. Involucrar a demás actores sociales (academia, sociedad civil, agentes públicos y privados). Apostar el rescate de valores que fomentan el bien común urbano, la identidad e imagen urbana. Registro de la memoria colectiva de las dinámicas de vida social en el espacio público y arquitectura.

Respecto a las ciudades medias: Evaluar los impactos y efectos de la consolidación urbana, deterioro del paisaje y patrimonio en los centros urbanos que guardan características semejantes en el contexto latinoamericano. Aplicar este tipo de estudio en esa escala territorial representa un aporte significativo (por el representativo número de municipios en Bolivia, 6 de 9 ciudades capitales) para contrarrestar el calentamiento urbano. El estudio desarrollado pretende establecer una línea metodológica para las ciudades medias, fortalecer capacidades técnicas para aplicar los instrumentos y el análisis propuesto.

Respecto a la sostenibilidad: Promover cambios que favorezcan e impulsen la eficiencia de los recursos, en la gestión, planificación y diseño urbano. Promover la peatonalización del centro histórico como una medida de urbanismo sostenible. Apostar a dinámicas de economía circular y favorecer a los grupos de interés envueltos en el proceso (emprendedores, proveedores, especialistas, clientes). Estar atentos y rectificar acciones que malgasten o desperdicien el uso de energía, materiales, recursos naturales que comprometan el acceso a generaciones futuras.

5.2 Trabajos futuros

Se espera en lo sucesivo complementar el estudio con tópicos que alcancen el objetivo y resultados de la tesis, sobre todo para visibilizar efectos y escenarios de simulación. Las sugerencias para trabajos futuros con:

Estudiar y analizar la contribución ecológica de los articuladores verdes (corredores verdes) como estrategia de adaptación climática para costurar áreas verdes fragmentadas y aplicarlos en otras escalas territoriales: barrio, distrito, región.

Estudio complementar de todas las especies arbóreas identificadas en el recorte de simulación discriminando las nativas y exóticas, para futuros proyectos de plantío y forestación, que colabore a un plan de arborización.

Complementar el estudio con los beneficios del sistema de verde urbano en el EPA para el componente cultural, histórico, estético, simbólico y de accesibilidad.

Evaluar la simulación de un tercer escenario, el modificado, es decir, con el patrimonio arquitectónico destruido por modificar la configuración morfológica del centro (edificios en altura).

5.3 Limitaciones del estudio

Aunque se destaque el aporte de los recursos tecnológicos y uso de *softwares*, en el caso específico de la ciudad de Tarija, se evidenció una limitante en el acceso y disponibilidad de datos de información cartográfica (no se cuenta o no están disponibles los datos primarios y fuente de datos de acceso libre, esto dificulta y requiere mayor tiempo para la construcción y/o revisión de los mismos). En algunos casos tampoco existe respuesta a solicitudes de coordinación e información a entidades de gobierno, como a miembros y representantes de la sociedad civil como presidentes de barrio/distrito.

Otro aspecto a considerar es que estas herramientas deben ser calibradas y contar con las licencias de funcionamiento, en ese ámbito es destacable e importante el apoyo de los laboratorios, universidades, institutos, gobierno, ONG's, etc.

6. REFERENCIAS

- ABREU, Loyde. **Avaliação da escala de influência da vegetação no microclima por diferentes espécies arbóreas**. 2008. 163 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- ALCOFORADO, Maria. **Climatologia Urbana para o ensino**. Centro de. Lisboa: Universidade de Lisboa, 2010.
- ANDRADE, Adriano; BRANDÃO, Paulo. A centralidade do espaço na análise histórica da cidade e do urbano. **Cidades médias e pequenas. Reflexões sobre dinâmicas espaciais contemporâneas**, Curitiba, , p. 139-170, 2019. .
- ANDRADE, Henrique. O Clima Urbano - Natureza, escalas de análise e aplicabilidade. **Finisterra**, vol. 40, n.º 80, p. 67-91, 13 dic. 2005. <https://doi.org/10.18055/Finis1479>.
- ANDRADE, Renata. **A contribuição da vegetação para melhoria do microclima urbano: Estudo de caso em superquadras de Brasília**. 2022. 104 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de Brasília, Brasília, 2022.
- ANGELES, Julio; ANGELES, Roberto; FLORES, Jose Luis; ABI, Hugo. Temperatura superficial en América del sur para la identificación de islas de calor urbano superficial. **Revista de Investigación Científica y Tecnológica - Alpha Centauri**, vol. 3, n.º 1, p. 20-23, 2022. <https://doi.org/10.47422/ac.v3i1.53>.
- AYMA-ROMAY, A. I. Guía de selección de especies para el arbolado urbano de Cochabamba. n.º July, p. 52, 2022. .
- AYMA-ROMAY, A. I. **Guía de selección de especies para el arbolado urbano de Cochabamba**. Ciudadanía. Cochabamba: [s. n.], 2021.
- BAI, Yihang; CAO, Mengqiu; WANG, Ruoyu; LIU, Yuqi; WANG, Seunghyeon. How street greenery facilitates active travel for university students. **Journal of Transport & Health**, vol. 26, n.º 101393, p. 15, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101393>.
- BARTALINI, Vladimir. Espaços Livres Públicos O Caso das Praças do Metrô de São Paulo. **Pós - Revista do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - FAUUSP**, vol. 1, n.º 1, p. 11-22, 19 dic. 1990. <https://doi.org/10.11606/issn.2317-2762.v1i1p11-22>.
- BASURTO, Eduardo; GONZÁLEZ, Alicia. Microubanismo, lugar y habitabilidad. , p. 78-91, 2016. Disponible en: <http://cuadrivio.net/academia/>.
- BECK, Hylke E.; ZIMMERMANN, Niklaus E.; MCVICAR, Tim R.; VERGOPOLAN, Noemi; BERG, Alexis; WOOD, Eric F. Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, vol. 5, p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- BERJMAN, Sonia. Tipologías: una mirada al paisajismo del cono Sur Americano. **Paisagem e Ambiente**, n.º 25, p. 9, 2008. <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i25p9-35>.
- BIAS, Edílson; BAPTISTA, Gustavo; LOMBARDO, Magda. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. 2003. **Anais XI SBSR [...]**. Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 1741-1748. Disponible en: http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/09.12.18.52/doc/14_005.pdf.
- BOERI, Andrea; GASPARI, Jacopo; GIANFRATE, Valentina; LONGO, Danila. Accelerating Urban transition: An approach to greening the built environment. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, vol. 223, p. 3-14, 2017. <https://doi.org/10.2495/SC170011>.

BOWLER, Diana; BUYUNG-ALI, Lisette; KNIGHT, Teri; PULLIN, Andrew. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, vol. 97, n.º 3, p. 147-155, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>.

BRUSE, Michael. Assessing Urban Microclimate using Multi-Agent Simulations: A new approach to answer an old problem? **Fifth International Conference on Urban Climate**, Poland, 2003. .

BUFFONI, A; SILLI, V; MANES, F. Air Pollution Removal by Urban Green in Milan Town Centre Results From Model Estimations and Air Quality Measurements. **European Forum on Urban Forestry**, Milano, Italy, vol. 16, p. 2, 2013. <https://doi.org/10.13140/2.1.3966.4009>.

BUYADI, Siti; NAIM, Wan; MISNI, Alamah. Urban Green Space Growth Impact on Surface Temperature Distribution. **Asian Journal of Environment-Behaviour Studies**, vol. 3, n.º 10, p. 198-207, 2018. <https://doi.org/10.21834/aje-bs.v3i10.327>.

CALLE, Raymundo. **Verde urbano en el espacio público intervenido del centro histórico de Cuenca, revisión de indicadores y normativa**. 2022. 68 f. Disertación (Maestría Gobernanza y Planificación Urbana con enfoque de Cambio Climático) – Pontificia Universidad Católica de Ecuador, 2022.

CALZAVARINI GHINELO, Lorenzo. IV Centenario de la fundación del Convento de Nuestra Señora de los Ángeles (Colegio de Propaganda Fide 1755-1918) de Tarija (1606-2006). **Presencia franciscana y formación intercultural en el sudeste de Bolivia según documentos del archivo Franciscano de Tarija (1606-1936)**. CED. Tarija: Centro Eclesial de Documentación, 2004. p. 3500.

CANTUÁRIA, Gustavo; IAHN, Juliana; JUSTI, Alexander; ALMEIDA, Beatriz; LIMA, Isabelle. Estudo comparativo das superfícies urbanas, vegetação e conforto microclimático. 2020. **Mudanças climáticas e suas interferências [...]**. Brasília: CEUB, Centro Universitário de Brasília, 2020. p. 273-288.

CAPITEL, Antón. **La arquitectura del patio**. Barcelona: Gustavo Gili, SA, 2005. Disponible en: http://oa.upm.es/35270/1/La_arquitectura_del_patio.pdf.

CASTELHANO, Francisco. **O clima e as cidades**. Curitiba: Intersaberes, 2020.

CASTILLO, Mario; CASTILLO, Claudia. Aproximación bioclimática para el diseño de espacios públicos, análisis inicial en distintas plazas chilenas. **Arquitectura y Urbanismo**, vol. 35, n.º 3, p. 69-82, 2014. .

CAVAN, Gina; KAZMIERCZAK, Aleksandra. Urban greening to adapt urban areas to climate change: The Oxford Road Corridor case study. **The Bruntwood Initiative for Sustainable Cities at the University of Manchester**, Manchester, UK, n.º EcoCities project, p. 24, 2011. .

CHANDLER T. J. **Urban Climatology and its relevances to urban design**. UNEP. Geneva, Switzeland: World Meteorological Organization, 1976.

CHÁVEZ, Freddy; FLORES, Nelson; ARNOLD, Iván; ZAMORA, Marcela. **Manual de Planificación Municipal de Adaptación Urbana al Cambio Climático. Método SICCLIMA URBANO**. NATIVA. Tarija: [s. n.], 2015. Disponible en: <https://issuu.com/nativabolivia/docs/combinado>.

CLEVELAND, David; SOLERI, Daniela. Household gardens as a development strategy. **Human Organization**, vol. 46, n.º 3, p. 259-270, 1987. .

COELHO, Ana Maria Antunes; FERNANDES, Sidney Carneiro de Mendonça; NAGANO, Wellington Tohoru. Conexões na paisagem – A arborização urbana como infra-estrutura bioconectora. **Arq.Urb**, n.º 32, p. 94-107, 2021. <https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi32.534>.

CULLEN, Gordon. **El Paisaje Urbano. Tratado de estética urbanística**. Reimpresió. Barcelona: Editorial Blume, 1974. vol. 1, .

D'ANDREA, Nicolas; MARTIN, Ceydric. La ciudad de Tarija: análisis de los factores de estabilidad del crecimiento demográfico. *In: DOMENACH HERVÉ; CELTON D.; ARZE, H.; HAMELIN, Philippe (eds.)*. Córdoba: Marseille: UNC-CEA, IRD, 2007.

DE LOS RÍOS, Emelyn; LONGÁS, Marcelo; RISOM, Jeff. **La Dimensión Humana en el Espacio Público - Recomendaciones para el Análisis y el Diseño**. PNUD: [s. n.], 2017.

DOMINGUEZ, Maria Cristina; CZAJKOWSKI, Jorge; ROSENFELD, Elias. Valoración bioclimática y patrimonial en un edificio para la salud. **Comunicaciones**, , p. 149-150, [s. d.] .

DUARTE, Denise H S. Vegetation and climate-sensitive public places. **Urban Climate Challenges in the Tropics**, , p. 111-162, 2016. .

DUARTE, Taise; ANGEOLETTO, Fabio Henrique Soares; CORREA SANTOS, Jeater Waldemar Maciel; LEANDRO, Deleon Da Silva; COPETTI BOHRER, João Fernando; VACCHIANO, Marcelo Caetano; LEITE, Leandro Bernardo. O Papel da Cobertura Vegetal nos Ambientes Urbanos e sua Influência na Qualidade de Vida nas Cidades. **Desenvolvimento em Questão**, vol. 15, n.º 40, p. 175-203, 2017. <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2017.40.175-203>.

ESCOBEDO, Francisco J.; GIANNICO, Vincenzo; JIM, C.Y.; SANESI, Giovanni; LAFORTEZZA, Raffaele. Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors? **Urban Forestry & Urban Greening**, vol. 37, p. 3-12, ene. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.02.011>.

EU. **Evaluating the impact of nature-based solutions: A Handbook for Practitioners**. European C. Luxembourg: European Commission, 2021. <https://doi.org/10.2777/244577>.

EU. **Towards an EU Research and Innovation policy agenda for Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities**. Luxembourg: [s. n.], 2020. <https://doi.org/10.2777/765301>.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort – Analysis And Applications in Environmental Engineering, 1970**. . McGraw-Hill Book Co. New York: [s. n.], 1970.

FERREIRA, Maurício; ZABOTTO, Alessandro; PERIOTTO, Fernando. **Verde urbano**. Unaspress. São Paulo: UNASP, 2021. <https://doi.org/10.19141/978-65-89185-53-6>.

GAMA-CASTRO, Jorge E; CRUZ Y CRUZ, Tamara; PI-PUIG, Teresa; ALCALÁ-MARTÍNEZ, René; CABADAS-BÁEZ, Héctor; JASSO-CASTAÑEDA, Carolina; DÍAZ-ORTEGA, Jaime; SÁNCHEZ-PÉREZ, Serafín; LÓPEZ-AGUILAR, Fernando; VILANOVA DE ALLENDE, Rodrigo. Arquitectura de tierra: el adobe como material de construcción en la época prehispánica. **Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana** , México , vol. 64, n.º 2, p. 177-188, 2012. .

GAMT. **Plan Municipal de Ordenamiento Territorial - PMOT**. Tarija, Bolivia: [s. n.], 2010.

GAMT. **Plan Municipal Director de Ordenamiento Territorial de Tarija**. Tarija: [s. n.], 2023.

GARTLAND, Lisa. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

GIVONI, Baruc. **Climate considerations in Buildings and Urban Design**. New York: John Wiley, 1998.

GRILO, Filipa; PINHO, Pedro; ALEIXO, Cristiana; CATITA, Cristina; SILVA, Patrícia; LOPES, Nuno; FREITAS, Catarina; SANTOS-REIS, Margarida; MCPHEARSON, Timon; BRANQUINHO, Cristina. Using green to cool the grey: Modelling the cooling effect of green spaces with a high spatial resolution. **Science of the Total Environment**, vol. 724, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138182>.

GUARDIA, Fernando; GISBERT, Teresa; CALVIMONTES, Carlos. **Revitalización de áreas centrales urbanas**. La Paz: MVSB/Banco Mundial, 1998.

HIGUERAS, Ester. **Urbanismo bioclimático** . Gustavo Gili. Barcelona: [s. n.], 2006. vol. 1a Edición, .

HIJIOKA, Akemi; SANTOS, Augusto; KLINTOWITZ, Danielle; QUEIROGA, Eugenio; ROBBA, Fábio; GALENDER, Fany; DEGREAS, Helena; ALVAREZ, Karla; CYRILLO, Kim; CERQUEIRA, Lucila; PRETO, Maria Helena; KAIMOTI, Naiara; MAMBRINI, Natália; OLIVEIRA, Paulo; SOUZA, Roberto; MACEDO, Silvio; BRITO, Sirlene; SARDAO, Ulisses; CUSTÓDIO, Vanderli. Espaços livres e espacialidades da esfera de vida pública: uma proposição conceitual para o estudo de sistemas de espaços livres urbanos no país. **Paisagem Ambiente: ensaios**, vol. 23, p. 116-123, 2007. .

HILLIER, B.; HANSON, J. **The social logic of space**. University. London: Cambridge University Press, 1984. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511597237>.

HINOJOSA, Boris; MAILLARD, Oswaldo; SAUCEDO, Diego. Temperatura de la superficie terrestre y escenarios climáticos por el cambio de uso de suelo en los municipios metropolitanos del departamento de Santa Cruz, Bolivia. **Ecología en Bolivia**, vol. 56, n.º 1, p. 17-28, 2021. .

HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, vol. 43, p. 71-75, 1999. .

HOUGH, M. **Naturaleza y ciudad. Planificación urbana y procesos ecológicos**. Ed: Gustavo Gili. [S. l.: s. n.], 1998.

HOWARD, Luke. **The Climate of London deduced from Meteorological Observations**. London: IAUC, 1833. <https://doi.org/10.2307/1793062>.

IZARD, Jean-Louis; GUYOT, Alain. **Arquitectura bioclimática**. Gustavo Gili. [S. l.: s. n.], 1980. vol. 4 Colección, .

JACOBS, Jane. **Muerte y vida de las grandes ciudades**. Entrelínea. Madrid: Capitán Swing, 2011.

JENDRITZKY, Gerd; BUCHER, K.; LASCHEWSKI, G.; WALTHER, H. Atmospheric heat exchange of the human being, bioclimate assessments, mortality and thermal stress. **Int J Circumpolar Health.**, vol. 59, n.º 3-4:222-7, 2000. .

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JIMÉNEZ, Marina; DE LAS RIVAS, Juan Luis. Echoes of olmsted in Europe. The park System and origins of Contemporary European urbanism. **RA Revista de Arquitectura**, vol. 20, 2018. <https://doi.org/10.15581/014.20.86-103>.

JUNIOR, Roberto. ArbVias: método de avaliação da arborização no sistema viário urbano. 35., 2015. **Paisagem e Ambiente Ensaios** [...]. São Paulo: FAUUSP, 2015. vol. 35, p. 89-117. <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i35p89-117>.

JUNIOR, Roberto. **Vias para a arborização da cidade de São Paulo**. 2016. 428 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2016.

KENWARD, Alyson; YAWITZ, Daniel; SANFORD, Todd; WANG, Regina. **Summer in the City: hot and getting hotter**. Princeton: [s. n.], 2014. Disponible en: www.climatecentral.org.

KILLEEN, Timothy J; GARCÍA, Ernília; STEPHAN, Beck. **Guía de Árboles de Bolivia**. La Paz: [s. n.], 1993.

KNIGHT, Teri; PRICE, Sian; BOWLER, Diana; KING, Sian. How effective is «greening» of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the «urban heat island effect»? A protocol to update a systematic review. **Environmental Evidence**, vol. 5, n.º 1, 26 feb. 2016. <https://doi.org/10.1186/s13750-016-0054-y>.

LABAKI, Lucila; SANTOS, Rosely; BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina; ABREU, Loyde. Vegetação e Conforto Térmico Em Espaços Urbanos Abertos. **Fórum Patrimônio**, vol. 4, n.º 1, p. 23-42, 2011. .

LAIF. **Índice de Vulnerabilidad al cambio climático en las ciudades de La Paz y Tarija en Bolivia**. Tarija: [s. n.], 2020.

LALIC, B.; MIHAILOVIC, D. An empirical relation describing leaf-area density inside the forest for environmental modelling. **J.Appl. Met.**, 2004. .

LANDSBERG, H. E. The urban climate. **The urban climate**, , p. 53-82, 1982.
<https://doi.org/10.2307/214663>.

LENTON, Timothy M; HELD, Hermann; KRIEGLER, Elmar; HALL, Jim W; LUCHT, Wolfgang; RAHMSTORF, Stefan; SCHELLNHUBER, Hans Joachim. **Tipping elements in the Earth's climate system**. [S. l.: s. n.], 2008. Disponible en: www.pnas.org/cgi/content/full/.

LOMBARDO, M.A. **Ilhas de Calor nas Metr p les: o exemplo de São Paulo**. HUCITEC. São Paulo: [s. n.], 1985.

LONDE, Patrícia; MENDES, Paulo. A INFLUÊNCIA DAS ÁREAS VERDES NA QUALIDADE DE VIDA URBANA. **HYGEIA**, vol. 10, n.  18, p. 264-272, 2014. .

LÓPEZ, Rafael. Urbanismo dibujado. La cuadrícula en América en el siglo XVI. Valladolid, , p. 383-389, 2013. .

LYNCH, Kevin. **The image of the City**. Barcelona, Espa a: Gustavo Gili, SA, 2008.

MACEDO, S lvio Soares. Espaços livres. **Paisagem Ambiente Ensaio São Paulo**, vol. 7, p. 15-56, 1995. .

MACEDO, S lvio Soares; BAROZZI, Yolanda. Quap  – quadro do paisagismo no Brasil – paisagismo contemporâneo brasileiro. **Departamento de Projeto da FauUSP**, , p. 232-240, 2019. .

MAIGUA, PAOLA. **Ciudad y Cambio Microclimático**. 2020. 341 f. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, 2020.

MANSILLA, Maria Eugenia; MEDEIROS, Valério de. Integra o e segregao urbana na cidade colonial de Tarija , Bolívia. 2020. **PNUM 2021** [...]. Lisboa: [s. n.], 2020. p. 449-460.

MANSILLA, Maria Eugenia; MEDEIROS, Valério De. Integra o e segregao urbana na cidade colonial de Tarija , Bolívia. 2021. **Identidades e din micas de reconfigura o urbana na Era Digital - 9  Conferência da Rede Lusófona de Morfologia Urbana** [...]. Lisboa: Center for Innovation in Territory, Urbanism and Architecture (CiTUA), 2021. p. 449-460.

MARRONE, Paola; ORSINI, Federico. Resilience and open urban environments. Comparing adaptation and mitigation measures. **TECHNE**, vol. 15, p. 348-357, 2018.
<https://doi.org/10.13128/Techne-22099>.

MARTÍNEZ MANSILLA, María Eugenia. Environmental performance of the urban microclimate in pedestrian zones of Tarija, Bolivia. **Urbani Izziv**, vol. 32, n.  2006, p. 107-122, 2021.
<https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2021-32-supplement-7>.

MARTÍNEZ MANSILLA, María Eugenia; MEIRELLES HERMUCHE, Potira. UP ' s para resignificar el paisaje contempor neo en Lazareto. 2019. **ARQUISUR 2019** [...]. Belo Horizonte: [s. n.], 2019. p. 18.

MARTÍNEZ, María Eugenia; BUSTOS, Marta. **New Centralities for Integrated and Universal Mobility in Latin América**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponible en: <http://www.mobilize.org.br/>.

MASCARÓ, Juan Luís. **Loteamentos urbanos**. 2da Edi o. Porto Alegre: [s. n.], 2005.

MEDEIROS, José Marcelo. **Parques Lineares ao Longo de Corpos Hídricos Urbanos: Conflitos e Possibilidades; O caso da Orla do Lago Paranoá - DF**. 2016. 384 f. Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MEDEIROS, José Marcelo Martins; MELO CESAR, Luiz Pedro. A cidade como uma Rede de Paisagens Estimulantes: Considera es sobre a composi o dos Espaços Livres, seus Elementos de

Destaque e Monumentos. **Paranoá: Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, vol. 31, p. 18, 20 jul. 2021. <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n31.2021.02>.

MEDEIROS, Valério. **Urbis Brasiliae ou sobre as cidades do Brasil. Inserido assentamentos urbanos do país em investigações configuracionais comparativas**. 2006. 520 f. Universidade de Brasília, 2006.

MENDONÇA, Francisco. O estudo do clima urbano no Brasil. Evolução, tendências e desafios. **Clima Urbano**. Contexto. São Paulo: [s. n.], 2003. p. 175-192.

MINKE, Gernot. **Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra**. Alemanha: Forschungslabor für Experimentelles Bauen Universidad de Kassel, Alemanha, 2001.

MONTEIRO, Carlos Augusto. **Teoria e clima urbano**. IGEO. São Paulo: [s. n.], 1976.

MONTEIRO, Carlos Augusto. Teoria e Clima Urbano. Um projeto e seus caminhos. **Clima Urbano**. Contexto. São Paulo: [s. n.], 2003. p. 9-68.

MONTEIRO, Leonardo Marques; ALUCCI, Marcia Peinado. Proposal of an outdoor thermal comfort index: Empirical verification in the subtropical climate. **PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**, n.º November, p. 433-438, 2011. .

MONTEIRO, Leonardo Marques; ALUCCI, Marcia Peinado. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. **Ambiente Construído**, vol. 7, n.º 3, p. 43-58, 2007. .

NAGASHIMA, Kei; TOKIZAWA, Ken; MARUI, Shuri. **Thermal comfort**. [S. l.]: INNOVA, 2002. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63912-7.00015-1>.

NDOSSI, Milton Isaya; AVDAN, Ugur. Application of open source coding technologies in the production of Land Surface Temperature (LST) maps from Landsat: A PyQGIS plugin. **Remote Sensing**, vol. 8, n.º 5, 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8050413>.

OKE, T R. Canyon Geometry and the Urban Heat Island. **Journal of Climatology**, vol. 1, p. 237-254, 1981. Disponível em: [doi:10.1002/joc.3370010304](https://doi.org/10.1002/joc.3370010304).

OKE, T. R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, vol. 11, n.º 1-3, p. 103-113, 1988. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6).

OKE, T. R.; JOHNSON, G. T.; STEYN, D. G.; WATSON, I. D. Simulation of surface urban heat islands under «ideal» conditions at night part 2: Diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 56, n.º 4, p. 339-358, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF00119211>.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. Second. [S. l.]: Routledge, 1987.

OKE, T.R. Initial Guidance To Obtain Representative. **Wmo lom**, n.º 81, 2004. .

OLIVEIRA ALBIERI, Lucimara. **Centros urbanos e espaços livres públicos: produção e apropriação em Palmas-TO**. 2016. 338 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Paulo, 2016.

OLIVERA-VILLARROEL, S. M.; CANDIA-CALDERON, A. G.; BORJA-VEGA, CH. Ruleta climática en Bolivia: Vulnerabilidad ante la incertidumbre y sus efectos. **Revista Iberoamericana Bioeconomía y Cambio Climático**, vol. 7, n.º 14, p. 1676-1699, 18 nov. 2021. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v7i14.12810>.

PEIXOTO, M., C.; LABAKI, L., C.; SANTOS, R. F. Conforto térmico em cidades: o efeito da arborização no controle da radiação solar. **Anais do ENTAC 95 - Tecnologia e Qualidade na Habitação**, Rio de Janeiro, , p. 629-634, 1995. .

PELOROSSO, Raffaele; GOBATTONI, Federica; LEONE, Antonio. Green courtyards as Urban Cool Islands: towards Nature-based climate adaptation plans of compact cities. **CSEJournal - City Safety Energy. Planning and Land Safety**, vol. 18, n.º 1-2016, p. 83-110, 2016. .

PEÑARANDA, Ligia. **Conservando nuestro patrimonio. Manual para la conservación del patrimonio arquitectónico habitacional de Sucre**. Sucre: [s. n.], 2011.

REIN, Miriam. El confort urbano en la ciudad y su evolución en los últimos años. **Agenda 21 Málaga**, , p. 28, 2013. .

REN, Chao; NG, Edward Yan Yung; KATZSCHNER, Lutz. Urban climatic map studies: A review. **International Journal of Climatology**, vol. 31, n.º 15, p. 2213-2233, 2011. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>.

ROMERO, Marta. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. 4a reimpre. Brasília: Editora: Universidade de Brasília, 2015.

ROMERO, Marta. **Arquitetura do lugar. Uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília**. 1.ª ed. São Paulo: Nova Técnica Editorial, 2011.

ROMERO, Marta. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. Brasília: Universidade de Brasília, 2013.

ROMERO, Marta; BAPTISTA, Gustavo; LIMA, Erondina; WERNECK, Daniela; VIANNA, Elen; SALES, Gustavo. **Mudanças Climáticas e Ilhas de Calor Urbana**. 1a ed. Brasília: Editora: ETB, 2019. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18830/ISBN.978-85-67405-25-4>.

ROMERO, Marta; SILVA, Caio. Brasília, um plano verde. **Cinco cidades que nasceram arborizadas**. UFMS. Brasília: Editora UFMS, 2022. p. 117-153. Disponible en: <https://repositorio.ufms.br>.

SÁ CARNEIRO, Ana Rita; SILVA, Joelmir Marques da. **Inventário dos jardins de Burle Marx no Recife (Jardins Públicos)**. I. Recife: Editora: UFPE, 2017. vol. I, .

SANTOS, Teresa; SILVA, Caio; TENEDÓRIO, José António. Promoting citizens' quality of life through green urban planning. **Communications in Computer and Information Science**, vol. 936, p. 153-175, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06010-7_10.

SCHLEE, Andrey Rosenthal; MEDEIROS, Ana Elisabete; FERREIRA, Oscar Luís. **Intervención Patrimonial**. Brasília: [s. n.], 2013.

SCHMITZ, Lisana. Mitigación De Los Efectos Del Cambio Climático Y Calentamiento. n.º January, 2017. .

SCHMITZ, Lisana; MENDONÇA, Francisco. Reestruturação urbana e conforto térmico: Cenários de modelização em Curitiba-PR após a copa de 2014. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 8, p. 61-81, 2014. .

SCIARAFFIA, Flavio. Árboles . In: MOSTAFAVI, Mohsen; DOHERTY, Gareth; DURÁN, Ana María; VALENZUELA, Luis (eds.). **Urbanismo ecológico en América Latina**. Gustavo Gili. Barcelona: The Harvard University, 2019. p. 306.

SHINZATO, Paula. **Impacto da vegetação nos microclimas urbanos em função das interações solo-vegetação-atmosfera**. 2014. 205 f. Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, 2014. Disponible en: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-12092014-115829/>.

SHINZATO, Paula; DUARTE, Denise Helena Silva. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, vol. 18, n.º 2, p. 197-215, 2018. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250>.

SHINZATO, Paula; SIMON, Helge; SILVA DUARTE, Denise Helena; BRUSE, Michael. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4—Sao Paulo case study.

Architectural Science Review, vol. 62, n.º 2, p. 112-125, 2019.

<https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1563522>.

SILVA, Caio Frederico. **O conforto térmico de Cidades Urbanas: Contexto climático do Distrito Federal**. 2013. 193 f. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, 2013.

SILVA, Caio Frederico; FERNANDES, Júlia; CINTRA, Milena. **Simulação de Paisagens Urbanas para Qualidade Ambiental. Experiências com o software ENVI-met**. Appris Ltda. Curitiba: [s. n.], 2021.

SILVA, Caio; ROMERO, Marta. Simulação do clima urbano do Distrito Federal: experimentando o ENVI-met. **Simulação, Ambiente e Energia no Espaço Construído**. Brasília: Editora: Universidade de Brasília, 2020. p. 17-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.26512/9786558460435.c1>.

SIMON, Helge; LINDÉN, Jenny; HOFFMANN, David; BRAUN, Peter; BRUSE, Michael; ESPER, Jan. Modeling transpiration and leaf temperature of urban trees – A case study evaluating the microclimate model ENVI-met against measurement data. **Landscape and Urban Planning**, vol. 174, p. 33-40, 1 jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.003>.

SITTE, Camilo. **City planning according to artistic principles**. Rondon House. New York: [s. n.], 1965.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 93, n.º 12, p. 1879-1900, 2012.

<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.

TEIXEIRA, Éderson. **Os palácios de Oscar Niemeyer. Uma arquitetura modernista e bioclimática**. 2018. 236 f. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

TZORTZI, Julia Nerantzia; LUX, Maria Stella. Renaturing historical centres. The role of private space in Milan's green infrastructures. **AGATHÓN | International Journal of Architecture, Art and Design**, vol. 11, p. 226-237, 2022. <https://doi.org/10.19229/2464-9309/11202022>.

VIGLIOCCO, Miguel Angel. El planeamiento territorial en las Leyes de Indias. **Cuadernos Geográficos**, n.º 47, 2008. .

VILLACAMPA, A.; VILLACAMPA, Y. Re-use of the industrial heritage of Bovisa: A model for urban and cultural regeneration. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, vol. 155, p. 869-880, 2012. <https://doi.org/10.2495/SC120732>.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, vol. 86, n.º 3, p. 370-384, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).

WANG, Chengcong; REN, Zhibin; DONG, Yulin; ZHANG, Peng; GUO, Yujie; WANG, Wenjie; BAO, Guangdao. Efficient cooling of cities at global scale using urban green space to mitigate urban heat island effects in different climatic regions. **Urban Forestry and Urban Greening**, vol. 74, n.º April, p. 13, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127635>.

WERNECK, Daniela. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas: estudo de caso em áreas comerciais em Brasília - DF**. 2018. 118 f. UnB, 2018.

WIDIYASTUTI, Dyah; MUDIANTORO, Bagus; ANDRIYANI, Lilik. Investigating urban space: Potential urban green space in dense city of Yogyakarta. **E3S Web of Conferences**, vol. 200, n.º October, p. 0-6, 2020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020007002>.

WOLF, Kathleen L.; LAM, Sharon T.; MCKEEN, Jennifer K.; RICHARDSON, Gregory R.A.; BOSCH, Matilda van den; BARDEKJIAN, Adrina C. Urban trees and human health: A scoping review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, vol. 17, n.º 12, p. 1-30, 2020. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124371>.

WORLD BANK GROUP. **A Catalogue of Nature-Based Solutions for urban resilience**. World Bank. Washington, DC.: The World Bank, 2021.

WORLD BANK GROUP. **Ciudades Intermedias en Bolivia. Informe de asistencia técnica**. [S. l.: s. n.], 2017.

YILMAZ, Sevgi; MUTLU, Başak Ertem; AKSU, Ayşegül; MUTLU, Emral; QAID, Adeb. Street design scenarios using vegetation for sustainable thermal comfort in Erzurum, Turkey. **Environmental Science and Pollution Research**, vol. 28, n.º 3, p. 3672-3693, 1 ene. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10555-z>.

ZHOU, Decheng; XIAO, Jingfeng; BONAFONI, Stefania; BERGER, Christian; DEILAMI, Kaveh; ZHOU, Yuyu; FROLKING, Steve; YAO, Rui; QIAO, Zhi; SOBRINO, José A. Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives. **Remote Sensing**, vol. 11, n.º 1, p. 1-36, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>.

ZUCKER, Paul. **Town and square from the agoras to the village green**. New York: Columbia University Press, 1959.

ANEXO 1

FICHA PATRIMONIAL BIOCLIMÁTICA						
ESPACIO PÚBLICO ABIERTO - EPA						
Uso del EPA						
Descripción general						
Ubicación		Mapa	Imagen Satélite	Fotografía		
VALORACIÓN PATRIMONIAL						
Categorías de preservación		Morfología	Constructivo	Arquitectura de integración		
Manutención	Estado de conservación					
Conservación						
Ampliación	Recomendación (<i>Mise en valeur</i>)					
Restauración						
Refuncionalización						
Valores de identidad						
Histórico			Base	Frontera	Entorno	
Simbólico						
Artístico						
Cultural						
Natural						
Arquitectónico						
VALORACIÓN BIOCLIMÁTICA						
Ambiental		Simulaciones	Diagrama bioclimático	Carta solar/Rosa de vientos		
Suelo						
Aire						
Agua						
Energía						
Vegetación						
Datos climáticos						
Radiación solar		Clasificación climática	ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS Y DE PRESERVACIÓN			
Temperatura						
Vientos						
Humedad						