

- ▲ **Palabras clave/** Espacio público, forestación urbana, piedemonte.
- ▲ **Keywords/** Public space, urban forestation, foothills.
- ▲ **Recepción/** 29 de diciembre 2022
- ▲ **Aceptación/** 6 de enero 2024

Lineamientos de diseño para urbanizaciones en áreas de piedemonte, Mendoza, Argentina: optimización del desempeño térmico

Design Guidelines for Urbanizations on Foothill Areas, Mendoza, Argentina: Thermal Performance Optimization

Ana Laura Castillo

Arquitecta, Universidad de Mendoza, Argentina. Doctora en Ciencias, Área Energías Renovables, Universidad Nacional de Salta, Argentina. Becaria posdoctoral CONICET, Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza, Argentina. alcastillo@mendoza-conicet.gob.ar

Erica Norma Correa

Ingeniera Química, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina. Doctora en Ciencias, Área Energías Renovables, Universidad Nacional de Salta, Argentina. Investigadora principal de CONICET, Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza, Argentina. ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar

María Alicia Cantón

Arquitecta, Universidad de Mendoza, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Mendoza, Argentina. Diploma de Estudios Avanzados (DEA) en Arquitectura, Universidad de Mendoza, Argentina. Investigadora principal de CONICET, Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Mendoza, Argentina. macanton@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN/ El desarrollo de urbanizaciones denominadas barrio parque –núcleos de viviendas unifamiliares con amplios espacios verdes– sobre áreas de piedemonte generan transformaciones climáticas y ambientales en el territorio. Su diseño, centrado en el aspecto paisajístico, no responde a las demandas del área de piedemonte de Mendoza, Argentina. Las características particulares del sector requieren estrategias que consideren un desarrollo adaptado a sus condiciones biofísicas para optimizar su comportamiento microclimático y mejorar la habitabilidad de los espacios públicos exteriores, mitigando el impacto ambiental de la urbanización. El presente trabajo propone y evalúa distintas alternativas de diseño asociadas al uso de la forestación como estrategia de sombreado para disminuir la acumulación de calor sobre las superficies del espacio público. La propuesta –que incorpora boulevard con especies de baja permeabilidad solar– demuestra mayor eficiencia térmica, reduciendo en 3,5°C la temperatura máxima, 1,5°C la mínima y 2,5°C la media. **ABSTRACT/** The development of urbanizations called "barrio parque" (park neighborhood) –single-family houses with ample green spaces– on foothill areas lead to weather and environmental changes in the territory. Their design, focused on the landscape aspect, does not respond to the requirements of the foothill area (Piedemonte) of Mendoza, Argentina. The particular characteristics of the area require strategies that consider a development adapted to its biophysical conditions in order to optimize its microclimatic behavior and improve the habitability of outdoor public spaces, mitigating the environmental impacts of urbanization. This article proposes and assesses different design options associated with the use of forestation as a shading strategy to reduce heat accumulation on public space surfaces. The proposal –which includes boulevards with low sun permeability species– proves to have greater thermal efficiency, reducing the maximum temperature by 3.5°C, the minimum by 1.5°C, and the average by 2.5°C.

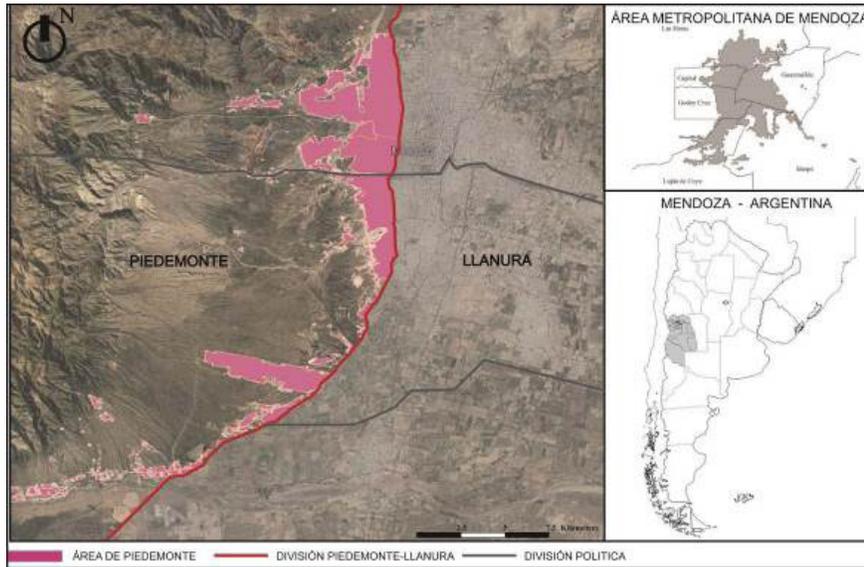
Introducción

El continuo desarrollo de las ciudades ha favorecido el surgimiento de un modelo de crecimiento expansionista, que ha modificado los usos del suelo como también sus condiciones naturales. Grandes extensiones de urbanizaciones han avanzado hacia áreas periféricas en forma fragmentada y descontrolada; dicho crecimiento es característico de las ciudades intermedias

pertenecientes al continente americano, donde el criterio de expansión responde a urbanizaciones de carácter residencial de baja densidad. Estas transformaciones han generado cambios ambientales tales como el aumento de los gases de efecto invernadero, la deforestación, la desertificación y la pérdida de biodiversidad. Además, han alterado los procesos térmicos, aerodinámicos e hidrográficos del territorio,

generando una modificación artificial del clima urbano (Almeida *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Ferrelli *et al.*, 2016).

Esos efectos también se ven reflejados en el territorio del Área Metropolitana de Mendoza (AMM), Argentina, cuyo constante crecimiento urbano ha generado una transformación tanto en su morfología como en su configuración socioespacial (Molina *et al.*, 2020; Frías, 2022). Este desarrollo ha



seguido los mismos criterios expansionistas de ciudades intermedias internacionales dados por la migración de la población de la ciudad consolidada hacia áreas periurbanas -cuyo uso del suelo está destinado al cultivo agrícola como también a la preservación de espacios con valor ecológico. El sector que mayor transformación ha presentado en las últimas décadas ha sido el área de piedemonte, que se caracteriza por ser una franja estrecha de aproximadamente 20 km de ancho ubicada entre la llanura y las vertientes de las sierras al oeste del AMM. Su condición ambiental es de alta fragilidad debido a sus grandes pendientes y diversos cauces aluvionales que atraviesan la región, donde se concentra el agua generada por fuertes lluvias estivales, escasa vegetación y suelos degradados (figura 1). Dada la cercanía del piedemonte a la ciudad, este sector es un gran atractivo y está sometido a una alta presión de uso, con acelerados procesos de deterioro evidenciados fundamentalmente por el avance de la desertificación (Abraham *et al.*, 2005). Entre los impactos y los conflictos más importantes que afectan a la zona se encuentra

la urbanización acelerada y no planificada, la que se manifiesta no solo en relación con asentamientos espontáneos sino también en aquellos planificados desde el Estado y otros nuevos concebidos como barrios privados, todos los cuales se caracterizan por dar continuidad a los esquemas de urbanización de la ciudad consolidada en geomorfología de llanura; es decir, esquemas de trama racional, morfología urbana en forma de damero y avenidas forestadas cuya orientación acompañan la máxima pendiente (oeste-este) (Castillo *et al.*, 2022). Esta situación particular se vio potenciada a partir del desarrollo de condominios y urbanizaciones privadas del AMM, iniciada a partir de la década del sesenta y con un auge exponencial a partir de 2004, año en el cual surgieron el 60% de los barrios según datos relevados por Oliva y Castro (2015). Estos asentamientos se implantaron sobre sectores periféricos -los cuales presentan valores productivos y ecosistémicos- y su presencia ha generado transformaciones espaciales y políticas, provocando la fragmentación de la distribución del territorio a modo de

segregación social debido a su exclusividad de acceso y la privatización del espacio público (Engelman y Barzola-Elizagaray, 2021; Cortese *et al.*, 2021; Roitman, 2004). Las características urbanas de estos complejos son del tipo abierto: calles anchas, lotes de grandes dimensiones con predominio de extensiones de prado con diseño paisajístico y viviendas residenciales de baja densidad, pero con alta ocupación del suelo.

El esquema urbano de estos complejos y las estructuras verdes incorporadas en ellos responden a un diseño paisajístico cuyo esquema no considera las condicionantes ambientales del piedemonte (Abraham *et al.*, 2005). Sus criterios de diseño no continúan ningún estándar geomorfológico del sitio de implantación, por lo que su construcción requirió grandes movimientos de tierra. La inserción de estos complejos en el área de piedemonte ha provocado enormes impactos sobre el terreno, mal uso de los escasos recursos hídricos y de suelo, destrucción de la vegetación natural, aceleración de la escorrentía y degradación del paisaje (figura 2) (Romero *et al.*, 2005; Janoschka, 2016). A ello se suma el aumento en la pérdida de biodiversidad y fenómenos del tipo microclimáticos, representados entre otros por la magnitud y la localización del efecto isla de calor (Wang y Ouyang, 2017; Castaldo *et al.*, 2017) y el calentamiento urbano. Estudios sobre el fenómeno de la isla de calor urbano (ICU) revelan el impacto negativo de la urbanización de los sectores periurbanos sobre los perfiles de temperatura de la ciudad, particularmente en la zona pedemontana, donde los valores de la isla de calor pueden alcanzar hasta 9° C (Correa *et al.*, 2009). De acuerdo con los fenómenos de transferencia de energía, la intensa magnitud de la ICU diurna sobre el piedemonte se explica considerando que el sellamiento de suelo ocasionado por la urbanización desmedida, especies de árboles no adaptadas (alta permeabilidad solar), sumado a las propiedades térmicas de los materiales que lo componen (ripió, roca y suelos pobres), aumentan la inercia térmica

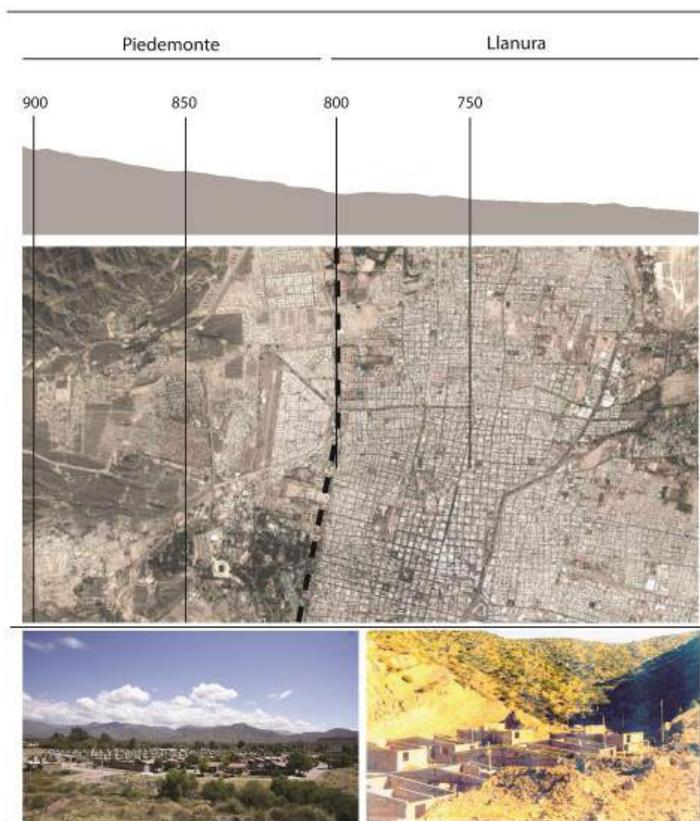


Figura 2. Altimetría, ubicación y efecto de urbanización sobre el territorio del AMM, Argentina (fuente: Elaboración propia, 2023).

de este sector, que extiende su periodo de enfriamiento hasta las primeras horas de la mañana (Correa, 2006).

Ante esta situación tan compleja y para mitigar la vulnerabilidad de la expansión urbana del AMM, es necesario proponer lineamientos de diseño de las urbanizaciones para su óptima adaptación y que respondan a las condicionantes que el piedemonte requiere/demanda. En este marco, la investigación persigue como objetivo general determinar el potencial de rehabilitación térmica de las

urbanizaciones predominantes en el área de piedemonte de Mendoza, Argentina. En particular, este trabajo evalúa distintos lineamientos de diseño asociados al uso de la vegetación como estrategia de sombreado para disminuir la acumulación de calor sobre las superficies del espacio público en tipologías de barrio parque.

METODOLOGÍA

Para evaluar y seleccionar qué lineamientos de diseño sería conveniente incorporar con

el fin de mejorar el desempeño térmico de barrios parques localizados en el sector de piedemonte, en esta sección se presentan las siguientes etapas: a) caracterización del caso de estudio; b) propuestas / lineamientos de diseño urbano; c) método de evaluación de los conjuntos urbanos mediante simulaciones dinámicas con el empleo del software ENVI-met; y d) validación de resultados medidos y simulados.

Caracterización del caso de estudio

El barrio parque¹ analizado está ubicado en el sector de piedemonte, al oeste del AMM. Por su parte, la zona metropolitana se ubica en el centro-oeste de la República Argentina, a una latitud de 32,5°S y longitud de 68,5°O; su tipo de clima es árido-cálido (BSk). La cantidad e intensidad de radiación solar es elevada en verano (1022.0 W/m² máximos diarios) y cuenta con numerosos días de cielo claro (2762 horas anuales de sol) (Stocco *et al.*, 2018). Constituye un territorio cuya geomorfología tiene características de planicie semidesértica aluvional, con pendientes pronunciadas de orientación Oeste-Este extendiéndose hasta la precordillera de Los Andes. El perfil seccional de la ciudad presenta, hacia el oeste un paisaje dominado por montañas elevadas y hacia el este el territorio desciende y se desarrolla en una amplia llanura, quedando definidos principalmente dos escenarios: llanura (300 a 800 m.s.n.m.) y piedemonte (801 a 1200 m.s.n.m.).

Para la selección y luego caracterización del barrio parque evaluado se realizó un relevamiento del área de piedemonte mediante imágenes satelitales y planos catastrales. Siguiendo la tendencia de crecimiento de barrios privados, se seleccionó un barrio icónico del sector debido a que fue el primero de esas características que se implantó (1976), no solo en ese sector sino también en la provincia; además, presenta la mayor extensión en su urbanización sobre el

1 Barrio parque: núcleo urbano de viviendas unifamiliares con amplios espacios verdes y limitado número de habitantes. Persigue unir las ventajas del campo y las de la ciudad. Su origen se centra en las ideas de E. Howard que alcanzaron gran difusión a partir del siglo XIX.



Figura 3. Caracterización del barrio analizado y tipología de residencias unifamiliares (fuente: Elaboración propia, 2023).

territorio del AMM (178 ha). Este desarrollo de viviendas fue extendiéndose en varias etapas; la primera fue la construcción de viviendas unifamiliares de baja densidad para luego combinar las tipologías originales con viviendas multifamiliares de media y alta densidad (Gómez, 2015). El diseño urbano es de tipo abierto siguiendo con los criterios de la urbanización parque: forma particular de asentamiento urbano localizado en zona suburbana en la cual el tipo de uso, fraccionamiento y ocupación del suelo conforman áreas urbanizadas donde la vegetación y las condiciones paisajísticas se manifiestan como elementos dominantes del conjunto (Ley 4886, 1983). Su trama es de diseño racional lineal; el 90% de las manzanas tienen orientación noroeste-sureste; las calles también acompañan esta orientación con un ancho de 20 m; los lotes son de 12 x 25 m; el FOS es de 0,35 m, el FOT de 1 retiro frontal

y lateral, en un lado del terreno de 3 m, con altura máxima de 8 m.

El diseño paisajístico planteado en este barrio parque se caracteriza por grandes extensiones de prados verdes y arbolado con valor estético, pero no responden a las condiciones de aridez que el piedemonte presenta. La especie para el arbolado en alineación es *Chimus molle* (Aguaribay), especie de alta permeabilidad solar. En la figura 3 se puede observar la extensión y el crecimiento en etapas del barrio parque seleccionado. Además, se identifican las tipologías que han surgido en los últimos 20 años. En este trabajo se analizará el sector de la etapa inicial debido a que es el área urbana más consolidada del barrio.

Propuestas/lineamientos de diseño urbano

Para optimizar el desempeño térmico del barrio parque se tomaron lineamientos de diseño del espacio público que responden a

criterios de ciudades sustentables, a partir de diferentes estrategias de incorporación de verde en canales viales (García-Doménech, 2017; Sun *et al.*, 2017). Estas estrategias corresponden a la incorporación de especies de árboles en calles y su distribución ha sido estudiada a nivel internacional para la rehabilitación de ciudades (Aram *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2017). La presencia de arbolado de alineación permite mitigar los impactos ambientales del desarrollo urbano; disminuye la temperatura del espacio público exterior con un enfriamiento promedio de 1 a 4,7°C (Vogt *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2010); mejora la calidad del aire entre 0,8% y 2,9% (Barwise y Kumar, 2020; Diener y Mudu, 2021); desacelera la escorrentía pluvial y las inundaciones; reduce los niveles de ruido; y suministra el hábitat para la fauna silvestre (Pava-Meza, 2020).

Para incrementar el porcentaje de sombra sobre el espacio público, se propone adicionar una línea de árboles al canal vial -a modo de boulevard. Se evalúan dos alternativas de especies arbóreas: una con conformación del boulevard con la especie utilizada actualmente como arbolado de alineación -Aguaribay- caracterizada por ser del tipo perenne y de mayor permeabilidad solar (24,48%) y otra que modifica la especie utilizada actualmente por la especie *Morus alba* (Morera), caracterizada por ser del tipo caduca y de menor permeabilidad solar (9,87%) (Papparelli *et al.*, 1996). Para el cálculo de permeabilidad solar de diferentes especies de árboles, Cantón *et al.* (1994) lo evalúan mediante tres métodos: 1) modelo fotográfico-computacional que determina la permeabilidad del arbolado a la radiación solar; 2) modelo analítico que evalúa el área sombreada por árboles con volúmenes esféricos y elipsoides; y 3) modelo analítico para la determinación de la energía solar disponible en urbanizaciones forestadas (Cantón *et al.*, 2000). Se propone la evaluación de ambas alternativas en dos esquemas de distribución: a tresbolillo y alineada.

El esquema del canal vial se caracteriza por una red viaria de 10 m, franjas verdes -espacio

destinado al árbol- a cada lado de la calle de 2,5 m y veredas de 2,5m. El ancho de los canales viales de 20 m permite la adición de otra línea de árboles que brinda sombra al centro, aporta superficies permeables para la absorción de agua lluvia y restringe el área destinada al vehículo induciendo la disminución de la velocidad. Para ello se modificaron las dimensiones de las calles y de los espacios verdes quedando definido el siguiente esquema: 12 m de calle -con la incorporación del boulevard de 1m, calzada de 5,5 m en cada lado- 1m de ancho del espacio verde destinado a la implantación de árboles y veredas de 2,5 m. La propuesta persigue modificar mínimamente la infraestructura original. Finalmente, con el objetivo de valorar el impacto del uso del arbolado de alineación

sobre el espacio público se compararon las alternativas de diseño descritas previamente con dos casos de análisis: el caso actual sin forestación y las propiedades ópticas de los materiales actuales que conforman la envolvente del espacio urbano edilicio: albedo 0,3 para techos (teja francesa cementicia negra mate) y el albedo de 0,05 para los pavimentos. El segundo caso optimiza los albedos de las envolventes utilizando: 0,85 para techos (pinturas atérmicas) y 0,5 para pavimentos (mezcla asfáltica con ligante sintético pigmentado con óxido titanio o concreto con agregado claro). En la figura 4 se observa el diseño del canal vial que presenta actualmente el barrio parque y las distintas propuestas de intervención del espacio público descritas previamente.

La figura 4 muestra la condición actual del barrio parque (a) y siete propuestas de análisis: (b) boulevard con especie con mayor permeabilidad a tresbolillo; (c) boulevard con especie con mayor permeabilidad alineada; (d) condición actual con especie de menor permeabilidad solar; (e) boulevard con especie de menor permeabilidad solar a tresbolillo; (f) boulevard con especie de menor permeabilidad alineada; y (g) condición actual sin árboles. Todas aquellas propuestas donde se modificaron y agregaron árboles tienen un albedo de 0,3 para techos y 0,05 para pavimentos. Mientras que para la propuesta (h), condición actual sin árboles con albedo de cubiertas y pavimentos optimizados, el albedo de techos es de 0,85 y el de pavimentos es de 0,5.

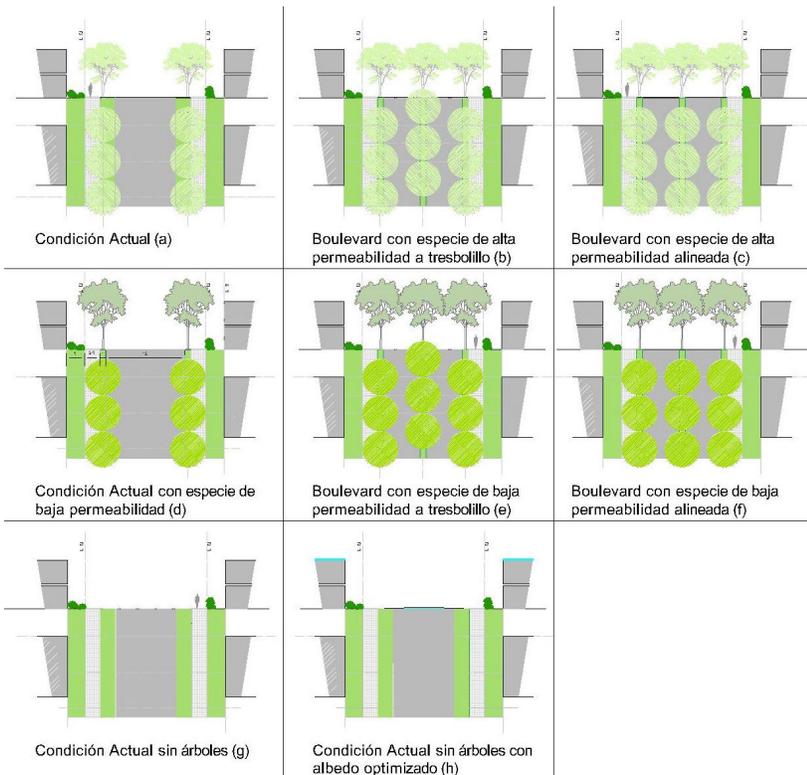


Figura 4. Propuestas de esquemas de incorporación de verde urbano (fuente: Elaboración propia, 2023).

Método de evaluación mediante simulaciones dinámicas

Para identificar los lineamientos de diseño presentan la mejor respuesta térmica, la evaluación se realizó en tres etapas: a) Selección y monitoreo de un caso testigo (barrio representativo del área de piedemonte), b) Modelo de Simulación, descripción del software utilizado y c) validación del modelo teórico a partir del modelo real monitoreado.

Selección y monitoreo de un caso testigo

La selección del caso testigo se realizó mediante un análisis morfológico de los diferentes conjuntos urbanos del área de piedemonte relevados a partir de imágenes satelitales y planos catastrales. Se identificó como el más representativo del área de piedemonte del AMM el barrio de trama racional (80%), caracterizado por largo de manzanas de 150 m, ancho de calles de 16 m y 20 m, superficie de lotes de 200m², factor de ocupación de suelo de 0,55 m y retiro frontal de 2 m. Solo tienen un retiro lateral de 5,50 m ya que el diseño del barrio consta de viviendas apareadas. La trama está forestada por la especie *Melia azedarach* (Paraíso), árbol de 15 m de altura máxima y diámetro de copa que varía entre 6 m y 8 m. Este caso fue monitoreado microclimáticamente en verano durante un período de 28 días

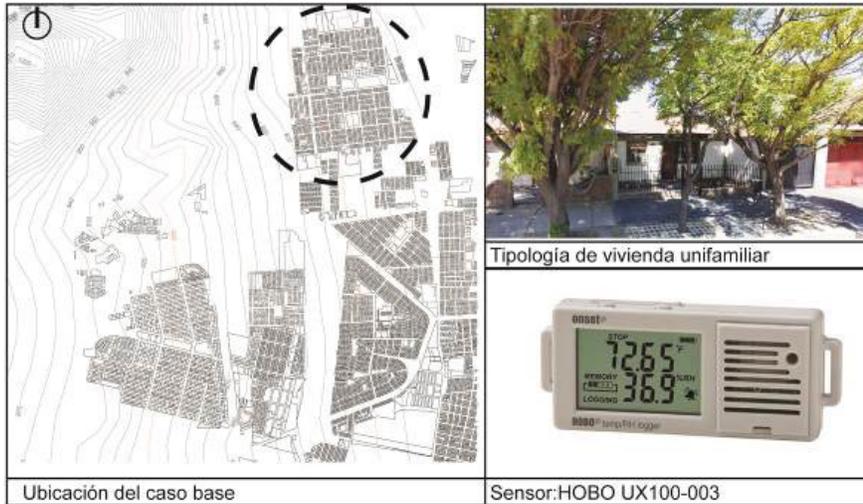


Figura 5. Ubicación de caso base, caracterización de sensor de medición (fuente: Elaboración propia, 2023).

(del 2 al 30 de enero). Se adquirieron en forma simultánea datos de temperatura y humedad relativa del aire cada 15 minutos mediante sensores del tipo HOBO UX100-003 (Temperature/Relative Humidity Data Logger), ubicados en el centro de dos canales viales con distinta orientación: norte-sur y oeste-este, a una altura de 2 m desde el nivel de la calle (Oke, 2004). Los equipos de medición se ubicaron dentro de una caja perforada de PVC blanco a fin de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación del

aire. En la figura 5 se muestra la ubicación del caso base y del tipo de sensor utilizado.

Modelo para simulaciones dinámicas

Para la evaluación del comportamiento microclimático de las propuestas que incorporan o modifican la distribución del verde, se realizaron simulaciones dinámicas mediante el uso del software ENVI-met. Este software está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica (Tsoka *et al.*, 2018). Para la configuración de los modelos teóricos, se

incorporan los siguientes datos en archivos de entrada principal:

Área de entrada: se representa a través de una interfaz gráfica y contiene los datos de los valores del diseño físico del modelo; es decir, la ubicación geográfica del esquema urbano, la forma y las dimensiones de las viviendas, la vegetación, la distribución de materiales de superficie y tipos de suelo y la ubicación de los receptores en la grilla planteada. Las simulaciones se realizaron con una superficie de referencia de 300 x 300 m, la grilla es de 100 x 100 x 30 m. Por lo tanto, la resolución del área es de 3 x 3 x 3 m y el número de grillas totales es de x: 86; y: 86; z: 30. En cada propuesta se ubicaron nueve receptores² en los canales viales urbanos; la distribución se realizó a partir de una ponderación de superficie en sombra de los canales viales existentes, quedando el 60% del área en sombra. La figura 6 presenta la distribución de los receptores en los canales viales evaluados.

Base de datos: se incorporan en esta sección los datos y las características de la forestación y la composición del suelo. La especie de árbol utilizada para el ajuste del caso testigo fue la denominada "TH" de la librería PLANTS. DAT de ENVI-met. La altura se determinó en 15 m ya que corresponde al desarrollo promedio de un árbol de esa magnitud. Las características de esta tipología de árbol son: 400 de resistencia mínima estomática, 0,20 de albedo de onda corta de la hoja de la planta, 2 m de profundidad total de la zona radicular, LAD (Leaf Area Density o densidad del área foliar) de 0,40 a 1,80 en m^2/m^3 y RAD (Root Area Density o densidad de área de raíz) de 0,10 en m^2/m^3 . Para la simulación de las propuestas de incorporación de verde mediante forestación de alta permeabilidad solar (Aguaribay), se utilizó la especie de árbol denominada "DO", a la que le corresponde un valor de LAD de 2,0 a 0,25 en m^2/m^3 ; los valores del resto de las variables son aquellas

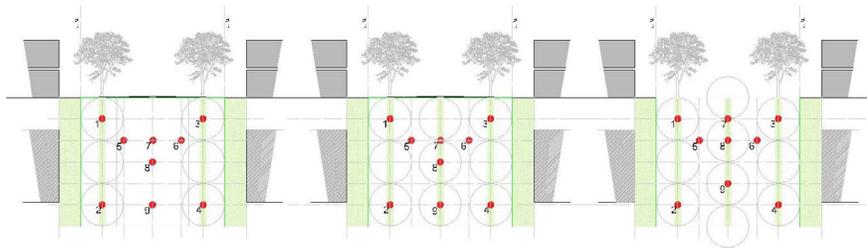


Figura 6. Ubicación de receptores en cada canal vial (fuente: Elaboración propia, 2023).

2 Receptor: emula a un sensor de temperatura y humedad dentro del modelo teórico de simulación.

PARÁMETROS PARA CONFIGURACIÓN ENVI-MET	VALORES
Meteorológicos	
Velocidad viento a 10m sobre suelo	3,5
Dirección viento (0°:N, 90°:E,	135°
Rugosidad z0	0,1
Factor de ajuste solar	1,5
Temperatura atmosférica inicial (K)	298
Humedad específica a 2500 m.s.n.m	2,8
Humedad relativa a 2m (%)	37
Edificación	
Temperatura interior (K)	297
Conductividad pared (W/m²K)	2
Conductividad techo (W/m²K)	0,78
Albedo pared	0,3
Albedo techo	0,2
Suelo	
Temperatura superficial, capa inicial	293K
Temperatura superficial, capa media	290K
Temperatura superficial, capa	290K
Humedad relativa, capa inicial (0-20cm)	20%
Humedad relativa, capa media (20-50cm)	35%
Humedad relativa, capa profunda	60%

Tabla 1. Datos de entrada para configuración del modelo de simulación ENVI-met (fuente: Elaboración propia, 2023).

presentadas previamente. Para la simulación con forestación de baja permeabilidad solar, se utilizó la tipología de árbol "Tb": la altura se determinó en 12 m correspondiente a la especie *Morus alba* (Morera). Las características de esta tipología son: 400 de resistencia mínima estomática, 0,20 de albedo de onda corta de la hoja de la planta, 2 m de profundidad total de la zona radicular, LAD de 0,80 a 2,00 en m²/m³ y RAD de 0,10 en m²/m³. La composición del suelo se configuró en

la librería (SOILS.DAT y PROFILS.DAT) ingresando la caracterización por capa en profundidad del suelo con el objetivo de representar el perfil de suelo del área de piedemonte de Mendoza.

Definición del archivo de clima denominado "Configuration File" en el software: incluye las variables meteorológicas y condiciones del entorno del territorio en el que se evalúan los casos de estudio (velocidad y dirección de viento, rugosidad, temperatura atmosférica

inicial, humedad específica y humedad relativa). El software ENVI-met requiere el ingreso de variables que caracterizan las condiciones de borde de la simulación, tales como: velocidad, dirección del viento (m/s) a 10 m de altura y rugosidad de suelo (z0) al punto de referencia; temperatura atmosférica inicial (K) y humedad específica (gr. agua/kg. aire) a 2500 m de altura. Los datos se obtuvieron del Aeropuerto Francisco Gabrielli -Estación N° 87418, Observatorio Aero de Mendoza- en colaboración con la Universidad de Wyoming; humedad relativa (%) a 2m de altura; registrada con sensor ONSET Weather, tipo HOBO H08-003-02 (punto fijo, para el ajuste). Para la caracterización de las propiedades térmicas de los edificios insertos en el modelo se definió la temperatura interior, la transmitancia térmica y el albedo de paredes, techos y pavimentos. Con el propósito de especificar el comportamiento del suelo, se debe precisar temperatura y humedad para las diferentes capas de suelo. En la tabla 1 se presentan los datos de entrada del archivo de clima para el ajuste del esquema de trama racional. Esta se divide en tres categorías de datos: *meteorológicos*, *edificación* y *suelo*. Los datos meteorológicos de entrada se mantienen constantes en los ajustes, ya que son condiciones climáticas a nivel meso-escala y las viviendas comparten la misma tecnología y materialidad. Por último, se ajustaron el perfil de composición de suelo y las temperaturas superficiales de la capa inicial y media.

Validación de resultados medidos y simulados

Con el objetivo de validar y dar confiabilidad a los resultados de las simulaciones de los casos seleccionados, se realizó un ajuste de los resultados del modelo simulado respecto del caso testigo-real-monitoreado. La figura 7 presenta el contraste entre la curva de la temperatura del aire simulada y medida. Además, con el objeto de ajustar el impacto de la vegetación, se comparan los valores de SVF (Sky View Factor) de ambas situaciones -simulada y medida. Para explicar

el funcionamiento del simulador se calculan siete indicadores estadísticos que indican el grado de precisión del modelo numérico simulado versus el monitoreado. Estos son el coeficiente de determinación (R2), el error de sesgo medio (MBE), el error porcentual absoluto medio (MAPE), la media error absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE), el error cuadrático medio sistemático (RMSEs) y el error cuadrático medio aleatorio (RMSEu). Cada indicador expresa la precisión o tasa de error del modelo desde diferentes perspectivas. El R2 es una medida estadística respecto de qué tan cerca están los datos observados de la línea de regresión ajustada. En este caso, R2 = 0,93 indica que el 93% de los datos medidos de temperatura se ajustan con los datos simulados. El MBE describe la dirección del sesgo de error cuyo valor está relacionado con la magnitud de los valores utilizados; se produce un MBE negativo cuando los valores predichos son menores que los medidos. MBE = -1,9 indica que es más frecuente que las temperaturas simuladas sean inferiores a las observadas. MAPE expresa la exactitud como porcentaje del error. Para este caso, MAPE = 6,1% indica que la temperatura pronosticada en promedio está errada en un bajo porcentaje, lo que refleja el buen funcionamiento predictivo del modelo. MAE mide la media de los errores absolutos entre las predicciones y los valores reales. En este caso, MAE = 0,5 refleja que la media de los valores simulados se separa medio grado de los valores medidos. RMSE es una medida de la magnitud promedio de los errores al cuadrado en una predicción. RMSE = 2,2, donde la raíz cuadrada de este valor (1,4) expresa que el error promedio de predicción puede alcanzar +/-1,4°C. RMSEs evalúa el rendimiento del modelo y de las variables predictivas incluidas y el RMSEu que se debe a los valores residuales del modelo y que no puede ser controlado. Un buen modelo se considera aquel que tiene un RMSEu mayor que el RMSEs (1,1>1). La utilización de estos indicadores estadísticos está validada internacionalmente para estimar la precisión del modelo numérico frente a la

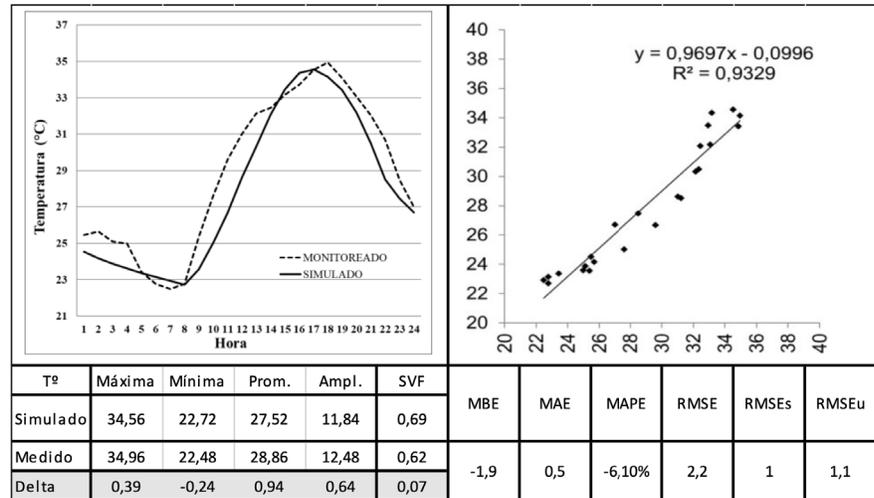


Figura 7. Curva de ajuste del caso simulado e indicadores estadísticos (Fuente: Elaboración propia, 2023).

obtención de datos reales (Sosa *et al.*, 2018; Sinsel *et al.*, 2022; Detomasso *et al.*, 2021).

RESULTADOS

En esta sección se presenta un análisis comparativo de las temperaturas promedio del aire: máximas, mínimas y medias de todos los sensores presentes en cada una de las propuestas evaluadas para un día típico de verano (12 de enero). Este análisis persigue identificar la mejor alternativa de optimización del espacio público.

Propuestas de incorporación de verde urbano

En la figura 8 se presentan los resultados obtenidos en el contraste entre la condición actual del canal vial inserto en el barrio parque analizado con la respuesta térmica de las distintas alternativas que incorporan o modifican la distribución del verde urbano descritas previamente.

Al analizar el comportamiento térmico de las diferentes propuestas que incorporan una línea adicional de árboles de alta permeabilidad al centro de los canales viales, se observa que, tanto para el esquema de distribución a tresbolillo como con el esquema alineado, la temperatura máxima se reduce

aproximadamente en 1°C en comparación con el caso actual.

La alternativa donde se propone modificar la permeabilidad de los árboles por especies de menor permeabilidad solar, manteniendo el esquema de diseño actual, muestra que la temperatura máxima decrece en 1,5°C. Esta alternativa mejora las condiciones de sombra del espacio abierto, disminuyendo la acumulación de calor sobre el pavimento. Además, permite conservar el esquema original de diseño del espacio urbano edificio. Sin embargo, modificar la permeabilidad de las especies implica reforestar los bandejones, por lo que es dificultosa de aplicar como estrategia de rehabilitación, pero tiene mayor posibilidad de implementarse en nuevas etapas de urbanización.

La alternativa que incorpora otra línea de árboles en el centro de los canales viales permite disminuir la temperatura máxima por encima de los 3°C. Este comportamiento responde a los beneficios que brinda el incremento de las superficies sombreadas asociado a la menor permeabilidad solar, lo que provoca gran impacto en el área de piedemonte, caracterizada por su alta irradiancia solar en verano. Aunque esta

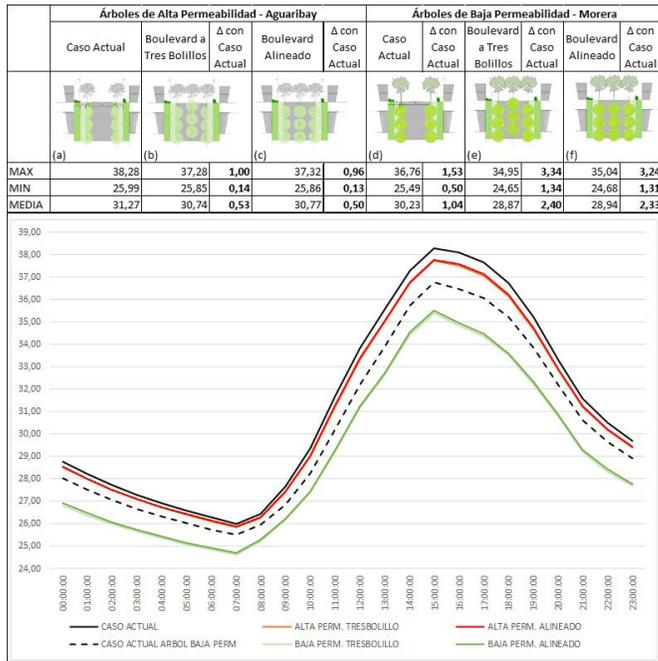


Figura 8. Alternativas de diseño del espacio público evaluadas y su comportamiento microclimático (fuente: Elaboración propia, 2023).

propuesta duplica los beneficios que ofrece la misma alternativa forestada con especies de baja permeabilidad –discutida previamente–, modificar esta característica de las especies implica replantar cada árbol. Por este motivo, es factible aplicarla en nuevas etapas del barrio ya proyectadas.

Respecto del impacto de las alternativas evaluadas en las temperaturas mínimas, se observa que el mayor beneficio se asocia con el esquema de boulevard central forestado con especies de baja permeabilidad solar. Esta alternativa de diseño permite disminuir la temperatura mínima en el orden de 1,5°C independientemente de la distribución de los árboles. Dado que la intensidad y la frecuencia de ocurrencia de la isla de calor en el AMM es mayor durante la noche, esta estrategia es eficiente para mitigar el efecto en el área de estudio.

El impacto de las alternativas evaluadas sobre las temperaturas medias del espacio público muestra un comportamiento análogo al de las temperaturas mínimas, obteniendo disminuciones de la temperatura media de hasta 2,4°C con la estrategia más beneficiosa –boulevard y forestación de baja permeabilidad solar.

Contrastación del caso actual sin forestación y materialidad de techos y pavimentos optimizados

Finalmente, con el objetivo de valorar el impacto del uso del arbolado de alineación sobre el espacio público se comparó el diseño actual con dos casos de análisis: el caso actual sin forestación manteniendo las propiedades ópticas de los materiales que conforman la envolvente del espacio urbano edilicio (g); y el caso actual sin forestación optimizando (disminución de albedo) las propiedades ópticas de los materiales que conforman la envolvente horizontal del espacio urbano edilicio (h).

La figura 9 muestra que la forestación de canales viales con especies de alta permeabilidad en su esquema actual (a), tiene bajo impacto sobre la reducción de las temperaturas máximas, mínimas y medias.

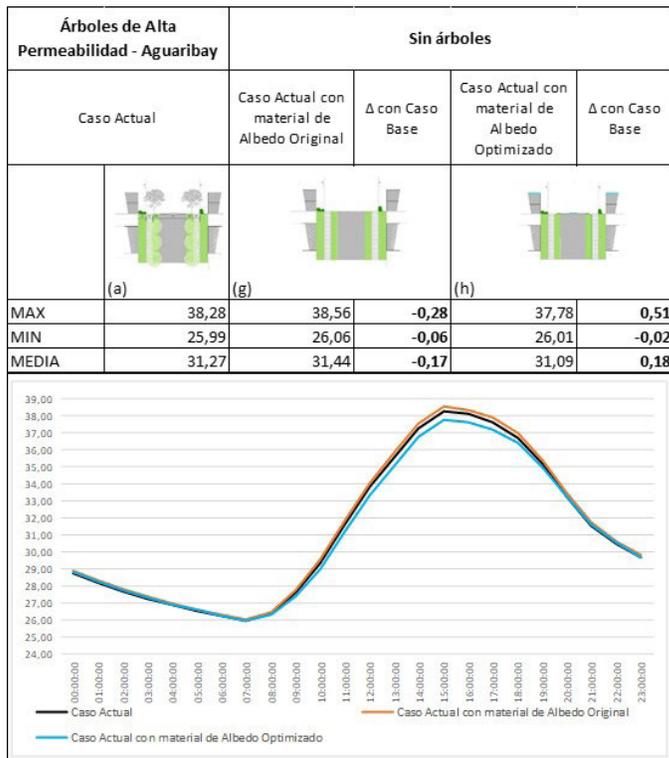


Figura 9. Comportamiento microclimático de alternativas de diseño del espacio público: materialidad sin árboles (fuente: Elaboración propia, 2023).

Esta condición se ve reflejada al comparar el esquema de forestación actual del barrio parque respecto del mismo esquema sin forestación e igual materialidad de sus envolventes. Además, se observa que modificar la condición de la materialidad de las envolventes horizontales -cubiertas de la edificación y pavimento- en ausencia de vegetación impacta levemente en la disminución de las temperaturas máximas del espacio público en aproximadamente 0,5°C. Dichas comparaciones reflejan la importancia que adquiere la estrategia de incorporar verde en los canales viales, el impacto del diseño del esquema de vegetación y la elección de la especie desde el punto de vista de su permeabilidad solar. La combinación eficiente de dichas variables determina el comportamiento térmico del espacio público urbano edilicio.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El crecimiento urbano sobre áreas de piedemonte y el avance exponencial de barrios parque ha provocado transformaciones del orden climático, ecológico y ambiental sobre el territorio, entre otras. Como se discutió en la introducción, las características particulares

del sector -clima árido, alta radiación solar, numerosos días de cielo claro, fuertes tormentas en verano- requieren estrategias de diseño urbano que consideren un desarrollo adaptado a su contexto de inserción. En este marco, optimizar el comportamiento de la temperatura del aire de los espacios públicos del barrio implica mejorar sus condiciones de habitabilidad, disminuir el consumo energético para alcanzar condiciones de confort en las edificaciones y mitigar la isla de calor urbano (ICU). Diversos estudios a nivel internacional muestran que la estrategia de incorporación o modificación del diseño del verde en el espacio público urbano es la opción que presenta mayor viabilidad y eficiencia (Bowler *et al.*, 2010; Jamei *et al.*, 2016; Middel *et al.*, 2015). Sin embargo, en esquema de urbanización del tipo abierto como el caso de la tipología de barrio parque -preponderante en urbanizaciones de piedemonte-, este trabajo aporta una nueva conceptualización con respecto a esta estrategia. Determina que la presencia de arbolado urbano "per se" no garantiza mayor eficiencia en los niveles de confort y en la disminución térmica del espacio público (Castillo *et al.*, 2022), y que la misma depende

primordialmente de dos consideraciones: el esquema de diseño de la forestación y la selección del tipo de especie de acuerdo a su permeabilidad solar. Esto queda demostrado en la evaluación de las temperaturas máximas, mínimas y medias del comportamiento del caso actual con y sin árboles.

En particular, la estrategia que muestra mayor eficiencia es aquella definida por un esquema de arbolado de alineación y boulevard con especies de menor permeabilidad solar (Morera). En la figura 9 se observa, en términos cuantitativos, que esta alternativa reduce aproximadamente la temperatura máxima del aire en 3,5°C, la mínima en 1,5°C y la media en 2,5°C. Tomando en cuenta otros trabajos a nivel internacional donde se discute que el valor de la temperatura máxima se relaciona con el confort térmico -habitabilidad del espacio abierto-, la temperatura mínima con la ocurrencia de la ICU y la media con el consumo energético de la edificación (Morakinyo *et al.*, 2017; Sosa *et al.*, 2018;), se concluye que esta alternativa de diseño impacta significativamente sobre el desempeño energético y ambiental de los barrios del tipo parque y, en consecuencia, en la mitigación del cambio climático. ▲■■

BIBLIOGRAFÍA

- Abraham, M. E.; Roig, F. y Salomón, M. (2005). Planificación y gestión del piedemonte al oeste de la Ciudad de Mendoza. Un asunto pendiente. En *Conflictos socio-ambientales y políticas públicas en la provincia de Mendoza. OIKOS-Red Ambiental*. 267-295. http://www.asicprimerazona.com.ar/asic/publicaciones/planif_oeste_mza.pdf
- Almeida, T. A.; Cruz, L.; Barata, E. y García-Sánchez, I. M. (2017). Economic growth and environmental impacts: an analysis based on a composite index of environmental damage. *Ecological Indicators*, 76 pp. 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.028>
- Aram, F.; Higuera-García, E.; Solgi, E. y Soran, M. (2017). Urban Green space cooling effect in cities. *Heliyon* (5) <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Barwise, Y. y Kumar, P. (2020). Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: a practical review for appropriate plant species selection. *Climate and Atmospheric Science*. (12). <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0115-3>
- Bowler, D.; Buysung-Ali, L.; Knight, T. y Pullin, A. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, (97) 3, 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Cantón, M. A., Cortegoso, J. L. y De Rosa, C. (1994). Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina. *Energy & Buildings-Berkeley-USA*, (20), 219-230.
- Cantón, M. A., Cortegoso, J. L. y De Rosa, C. (2000). Environmental and energy impact of the urban forest in arid zone cities. *Architectural Science Review*, (44), 1, 3-16. Department of Architectural and Design Science. University of Sydney, Australia.
- Castaldo, V. L.; Pisello, A. L.; Pigliantini, I.; Piselli, C. y Cotana, F. (2017). Microclimate and air quality investigation in historic hilly urban areas: Experimental and numerical investigation in central Italy. *Sustainable Cities and Society*. (33), 27-44. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.017>
- Castillo, A. L., Correa, E. N., y Cantón, M. A. (2022). Incidence of forestry solar permeability on the thermal behavior of urbanizations adapted to hillside areas. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 11(21). <https://doi.org/10.18537/est.v011n021.a01>
- Castillo, A. L.; Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2022). Propuestas de desarrollo urbano energético y ambientalmente sustentable de áreas de piedemonte en zonas áridas: Mendoza, Argentina. *Revista de Urbanismo*, (47), 115-135. <http://dx.doi.org/10.5354/0717-5051.2022.64896>
- Chen, D.; Lu, Xinhai; Liu, X. y Wang, X. (2019). Measurement of the eco-environmental effects of urban sprawl: Theoretical mechanism and spatiotemporal differentiation. *Ecological Indicators*, (105), 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.059>
- Correa, E. N. (2006). Isla de Calor Urbana. El caso de la aérea metropolitana de Mendoza. Tesis Doctoral. *Universidad Nacional de Salta*.
- Correa, E. N.; Ruiz, M. A.; Cantón, M. A. y Lesino, G. (2009). Confort térmico y temperatura del aire en los espacios urbanos. *AVERMA*. (13), 121-128. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/96749/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cortese, C.; Bauzá, J. y Carabaca, C. (2021). Desigualdad social y fragmentación territorial en Mendoza en las últimas décadas. *Jornada de Sociología*. Facultad de Ciencias Políticas y Sociales. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina. Repositorio Institucional UNCuyo: https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/17123/02-cortese-js2021-m7.pdf

- Detommaso, M.; Costanzo, V. y Nocera, F. (2021). Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models. Results and critical issues. *Urban Climate* (38). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100895>
- Diener, A. y Mudu, P. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Science of the Total Environment*, (796). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>
- Engelman, A. y Barzola-Elizagaray, P. (2021). Propuesta para el estudio de urbanizaciones cerradas en Latinoamérica: el caso del enclave residencial de elite "Mendoza Norte Country Club", Mendoza, Argentina. *Boletín de Estudios Geográficos* 114. Pp. 101-134. ISSN 0374-6186 | E-ISSN: 2525-1813. <http://revistas.uncu.edu.ar/ojs/index.php/>
- Ferrelli, F.; Bustos, M. L. y Piccolo, M. C. (2019). La expansión Urbana Y Sus Impactos Sobre El Clima Y La Sociedad De La Ciudad De Bahía Blanca, Argentina. *Estudios Geográficos* 77 (281):469-89. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201615>
- Frias, J. I. (2022). En los bordes y en altura. Contrastes socio-espaciales en el crecimiento difuso del Área Metropolitana de Mendoza (1990-2020). *Revista Huellas*, V. 26, N° 2, Instituto de Geografía, EdUNLPam: Santa Rosa. DOI: <http://dx.doi.org/10.19137/huellas-2022-2618>
- García-Doménech, S. (2017). El rol del espacio público en la sostenibilidad de la ciudad contemporánea: La cultura urbana mediterránea en Europa. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*, (21), 44-50. <https://doi.org/10.4206/aus.2017.n21-08>
- Gómez, A. (2015). Los barrios parque y de fin de semana en el mapa de la expansión metropolitana. Buenos Aires, 1910-1950. *EURE* (41), 159-185. <https://www.scielo.cl/pdf/eure/v41n123/art07.pdf>
- Jamei, E.; Rajagopalan, P.; Seyedmahmoudian, M. y Jamei, Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (54), 1002-1017 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>
- Janoschka, M. (2016). Gentrificación, desplazamiento, desposesión: procesos urbanos claves en América Latina. *Revista INVI*, (31), 88. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582016000300002>
- Ley n.º 4.886/83. (1983). Disposición del suelo de zona oeste del gran Mendoza. Provincia de Mendoza. Argentina. <http://www.sajj.gob.ar/4886-local-mendoza-disposicion-suelo-zona-oeste-gran-mendoza-lpm0004886-1983-10-28/123456789-0abc-defg-688-4000>
- Lin, T.; Matzarakis, A. y Hwang, R. (2010). Shading effect on long-term outdoor thermal comfort. *Building and Environment*, (45), 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.06.002>
- Middel, A.; Chhetri, N. y Quay, R. (2015). Urban forestry and cool roofs: Assessment of heat mitigation strategies in Phoenix residential neighborhoods. *Urban Forestry & Urban Greening*, (14), 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.09.010>
- Molina, J. E., Arboit, M. E., Maglione, D. S., Sedevich, A. y Mutani, G. (2020). Estudio de expansión urbana, crecimiento poblacional, consumos energéticos e índices de vegetación en el Área Metropolitana de Mendoza. *AREA*, 26(1), pp. 1-21.
- Oke, T. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *World Meteorological Organization*. Geneva: IOM Report No. 81.
- Oliva, L. y Castro, I. (2015). La década loteada. Unidiversidad, Datos interactivos. Ordenamiento territorial. *Universidad Nacional de Cuyo*. <https://www.unidiversidad.com.ar/ladecadaloteada>
- Papparelli, A.; Cunsulo, M.; Montilla, E. y Kurban, A. (1996). Eficiencia bioclimática arbórea en entornos urbanos de zona árida. *ASADES*.
- Pava-Meza, P. (2020). Vegetación urbana como estrategia para reducir la contaminación del aire en áreas urbanas. *Universidad Militar Nueva Granada*. <http://hdl.handle.net/10654/36084>
- Roitman, S. (2004). Urbanizaciones cerradas: estado de la cuestión hoy y propuesta teórica. *Revista de Geografía, Norte Grande*. N. 32: 5-19. Pontificia Universidad Católica de Chile. ISSN: 0379-8682
- Romero, H. y Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Eure* 94. (XXXI), <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612005009400006>
- Shen, Y.; Sun, F. y Che, Y. (2017). Public green spaces and human wellbeing: Mapping the spatial inequity and mismatching status of public green space <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.06.018> in the Central City of Shanghai. *Urban Forestry and Urban Greening* (27), 59-68.
- Sinsel, T.; Simon, H.; Ouyang, W.; dos Santos-Gusson, C.; Shinzato, P. y Bruse, M. (2022). Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met. *Urban Climate*, (45). <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101279>
- Sosa, M. B.; Correa, E. N. y Cantón, M. A. (2018). Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy & Buildings*, 168, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.006>
- Stocco, S.; Cantón, M. A. y Correa, E. N. (2018). Incidencia de las plazas urbanas sobre el comportamiento térmico del entorno en alta densidad edilicia: el caso de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Urbano*, (21), 94-106. <https://doi.org/10.22320/071836072018.21.3708>
- Sun, X.; Liu, X.; Li, F.; Tao, Y. y Song, Y. (2017). Comprehensive evaluation of different scale cities' sustainable development for economy, society, and ecological infrastructure in China. *Journal of Cleaner Production* (163), 329-337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.002>
- Morakinyo, T.; Kong, L.; Lau, K.; Yuan, C. y Ng, E. (2017). A study on the impact of shadow- cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort. *Build. Environ.* 115 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>
- Tsoka, S.; Tsikaloudaki, A. y Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications-A review. *Sustainable Cities and Society*(43), 55-76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- Vogt, J.; Gillner, S.; Hofmann, M.; Tharang, A.; Dettmann, S.; Gerstenberg, T.; Schmidt, C.; Gebauer, H.; Van de Riet, K.; Berger, U. y Roloff, A. (2017). Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning*, (157), 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.06.005>
- Wang, J. y Ouyang, W. (2017). Attenuating the surface Urban Heat Island within the Local Thermal Zones through land surface modification. *Journal of Environmental Management*, (187), 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.059>