

## MODELIZACION DE LA INCIDENCIA DE LA FORESTACIÓN SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE RADIACIÓN SOLAR EN CAÑONES URBANOS DE BAJA DENSIDAD. CASO DE LA CIUDAD DE MENDOZA

Cecilia G. Loncharich<sup>1</sup>, Claudia F. Martinez<sup>1,2</sup>, Erica N. Correa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (INAHE-CONICET-CCT Mendoza). C.P. 5500 – Mendoza, Argentina.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. C.P.: 5500, Mendoza, Argentina

Tel. 0261-5244346 e-mail: [cloncharich@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cloncharich@mendoza-conicet.gob.ar)

**RESUMEN:** La ciudad de Mendoza se caracteriza por una intensa forestación utilizada para el acondicionamiento bioclimático de los cañones urbanos durante las horas de sol, respondiendo al modelo de “ciudad oasis”. En esta metrópoli es clave identificar en qué medida el dosel forestal afecta los intercambios radiativos de energía, tomando en consideración que el 80% del sector residencial del área metropolitana está representado por baja densidad edilicia. El trabajo presenta los primeros resultados de una investigación orientada a simular la distribución de la radiación solar en las distintas fachadas que componen el cañón urbano tomando en cuenta la influencia de la morfología, la tecnología urbano-edilicia y su combinación con distintas especies forestales. Se utilizó el software Rhino y la interfaz de programación visual Grasshopper con tres complementos principales Ladybug, Honeybee y Lands Design. La contrastación de los primeros resultados obtenidos mediante simulación y su vinculación con los datos monitoreados a campo, muestra un buen nivel de ajuste, con un error relativo que oscila entre +/- (2 a 25) % cuando se comparan datos simulados y medido. Esto muestra una performance aceptable del modelo, considerando la complejidad asociada a la modelización de las distintas especies y su combinación con la volumetría urbana.

**Palabras clave:** radiación solar, cañones urbanos, forestación urbana, baja densidad edilicia, modelos de simulación.

### INTRODUCCIÓN

En los entornos urbanos, los árboles proporcionan numerosos servicios ecosistémicos, muchos de los cuales pueden aprovecharse para gestionar el consumo y la disponibilidad de energía de los edificios residenciales. Existe en la bibliografía internacional referencias respecto de su potencial para proporcionar sombra, ayudar al acondicionamiento del espacio (Speak A. et al., 2020) y reducir las temperaturas del aire urbano (Tan, Z. et al., 2016). Está demostrado que influyen en la demanda de consumo energético doméstico, y en el suministro de energía a través de incidencia en las posibilidades de calefacción solar pasiva y la generación de energía renovable a partir del aprovechamiento del recurso solar (Staley D. C., 2015; Liu, H. et al., 2023).

En ciudades de zonas áridas, la fuerte presión antrópica asociada a la urbanización ha repercutido principalmente sobre la sustentabilidad de dos recursos básicos para su gestión y uso, como son: el agua y la energía. En estas ciudades, la ventaja de utilizar energía solar como recurso energético, frente a otras fuentes como la biomasa, la energía hidroeléctrica o la energía nuclear, radica en que no precisa agua y, por tanto, elimina las preocupaciones ambientales relativas al incremento de su consumo y los consiguientes problemas de escasez. (Noorollahi, Y. et al., 2021).



De modo particular, en la ciudad de Mendoza, seleccionada como caso de estudio, una intensa forestación ha sido utilizada para el acondicionamiento bioclimático de los cañones urbanos durante las horas de sol, respondiendo al concepto de “ciudad oasis”. Por lo tanto resulta fundamental en el ámbito de esta metrópoli, establecer en qué medida el dosel forestal afecta los intercambios de energía de tipo radiativo, tomando en consideración que el 80% del sector residencial del área metropolitana está representado por baja densidad edilicia cuya altura oscila entre uno y dos niveles (3 a 6 m), la cual se encuentra flanqueada por un arbolado en alineación cuya altura preponderante corresponde a especies de primera y segunda magnitud (15 a 25 m), plantados a una distancia de 3 a 5 m de la línea de edificación (Martínez et al., 2014). Sumado, la orientación preponderante de la trama de la ciudad es O-E, por lo que el resultado de la combinación entre las edificaciones, la forestación y el recorrido solar tiene un impacto significativo en la disponibilidad de radiación solar en techos y fachadas, tanto para su aprovechamiento en calefacción e iluminación de los espacios, como su disponibilidad para la captación solar en paneles fotovoltaicos o sistemas solares térmicos (Fogl y Moudrý, 2016). Por lo tanto, cuantificar la influencia de los árboles en la radiación solar interceptada por los edificios es un aspecto importante para comprender las complejas interrelaciones entre la forma urbana y las condiciones ambientales (Freitas, S. et al., 2015). Los resultados de la literatura consultada indican que los árboles reducen por término medio el 38% de la radiación solar total recibida por los tejados de los edificios residenciales. Además, se encontraron fuertes correlaciones entre las medidas de la estructura de los árboles (altura media, variabilidad de la altura de los árboles y volumen normalizado de los árboles) y la radiación directa interceptada en verano, mientras que las relaciones con la radiación difusa fueron consistentes durante todo el año. Por último, un examen de la relación horaria entre los atributos estructurales de los árboles y las estimaciones de radiación interceptada permite informar a los planificadores los impactos acumulativos de los árboles en las iniciativas de gestión de la energía en las ciudades (Tooke, T. et al., 2011).

La forma tridimensional urbana y su relación con las características morfológicas del arbolado en alineación de calles es un factor determinante de las condiciones ambientales dinámicas de las ciudades. Es por ello por lo que se requiere información estructural detallada de los edificios y la vegetación, combinada con observaciones micrometeorológicas, para modelar con precisión las interacciones espaciales y temporales con la radiación solar (Hofierka y Kanuk, 2009, Wiginton et al., 2010). A partir de la información resultante de esta combinación es posible desarrollar información precisa sobre el microclima urbano y su potencial para el aprovechamiento de la energía solar en un entorno determinado.

La evaluación del recurso solar bajo estos considerandos implica la necesidad de adaptar distintas herramientas de simulación de la realidad local y/o desarrollar nuevas si fuera necesario para la estimación del potencial solar en entornos urbanos (Martín Ávila et al., 2015). En este marco, la presente investigación describe el desarrollo de un protocolo de mediciones a campo, que se desarrolla en áreas urbanas y tiene por objetivo establecer un modelo empírico que posibilite cuantificar la incidencia de distintas especies forestales de uso urbano sobre la disponibilidad de radiación, en los paramentos horizontales y verticales que componen los cañones urbanos. Posteriormente este modelo de evaluación empírica será utilizado para evaluar la aptitud de distintos modelos de estimación de la radiación solar para representar adecuadamente la condición radiativa real del espacio.

## **METODOLOGÍA**

La investigación se estructura en las siguientes etapas: 1. Selección de casos de estudio. 2. Monitoreo a campo. 3. Confección de la maqueta virtual. 4. Armado del modelo y simulación de los casos de estudio.

### ***Criterios de selección de casos***

Se seleccionaron cuatro cañones urbanos ubicados en la ciudad de Mendoza, según los siguientes criterios:

- Mismo ancho desde línea municipal a línea municipal (20m)
- Orientación del cañón urbano, Oeste-Este
- Presencia de homogeneidad de especie forestal en el frente de la vivienda, como así también en la vereda opuesta.

- Densidad edilicia: baja (menor a 2m<sup>3</sup> por m<sup>2</sup>)

La selección del ancho del cañón urbano responde a que el 75% de éstos en la ciudad de Mendoza tienen esta medida (Ruiz et. al.,2015). La selección de la orientación Oeste-Este se debe a la importancia de la ganancia solar en este caso, y que resulta superior a la de los cañones urbanos Norte-Sur. Investigar en sectores de baja densidad constructiva se justifica porque ésta es representativa del 80% del parque edilicio de la ciudad.

Considerando el Censo de Arbolado de la Provincia del año 2022 (<https://miarbol.gov.ar>) las especies seleccionadas son: *Platanus hispánica* (plátano), *Morus alba* (morera) *Fraxinus excelsior* (fresno europeo), *Paracenegalia visco* (acacia visco). Esta selección se fundamenta en la alta representatividad de estas especies dentro del total que componen el arbolado en alineación de la ciudad de Mendoza. La especie *Paracenegalia visco* (acacia visco) además se seleccionó por ser una especie nativa con menor requerimiento hídrico respecto de las otras. La sumatoria de las cuatro especies seleccionadas es representativa del 64% del total de ejemplares implantados. La Figura 1 muestra los cañones urbanos de 20m de ancho monitoreados -, su caracterización forestal y se presenta la localización de cada uno.





Especie Forestal	<i>Platanus hispánica</i> "plátano"	<i>Morus alba</i> "morera"	<i>Fraxinus excelsior</i> "fresno europeo"	<i>Paracenegalia visco</i> "acacia visco"
Imagen				
Caso	<i>Roca 364</i>	<i>- Agustín Álvarez 858</i>	<i>J. de Dios Videla 884</i>	<i>Martín Zapata 50</i>
Entre calles	Martínez de Rosas y Olascoaga	Boulogne Sur Mer y Paso de Los Andes	Boulogne Sur Mer y Huarpes	Boulogne Sur Mer y Tiburcio Benegas

Figura 1: Casos de estudio evaluados y su caracterización forestal.

### Monitoreo a campo

La elaboración del protocolo de medición tuvo en cuenta la trayectoria del recorrido solar, durante la estación estival (cerca del solsticio de verano), la selección del día de medición coincidió con condiciones atmosféricas estables, es decir, día con condiciones de cielo claro, despejado sin nubosidad. Se tomaron mediciones cada 3 horas. El ciclo de mediciones comenzó el 27 de diciembre de 2024 y finalizó el 20 de febrero de 2025. Este trabajo muestra los resultados obtenidos el día 20 de febrero de 2025, en el caso situado en calle Roca N°364 de la ciudad de Mendoza. Las variables medidas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: rango horario y variables de medición

Rango horario	Variables medidas
9:00	Temperatura del aire
12:00	Radiación solar hemisférica global, sobre plano vertical y sobre plano horizontal
15:00	
18:00	Albedo plano vertical y plano horizontal a 1.30m de altura. Sky View Factor (toma de imágenes hemisféricas) sobre plano vertical y horizontal

### ***Equipamiento utilizado:***

Torres de medición: Se diseñaron y construyeron dos torres de medición destinadas a registrar la radiación global incidente en plano vertical. Dichas torres sostienen, cada una, dos sensores de radiación solar del tipo Onset S-LIB-M003 Solar Radiation (Silicon Pyranometer), con una incertidumbre de 3% informada por fabricante, los cuales se ubicaron a una altura de 1.30 y 2.30 m en posición vertical. Junto con los sensores, se incorporó también un datalogger tipo Onset HOBO H21-USB Micro Station para el almacenamiento de la información (Figura 2 y 3).

En cada lugar de medición, se ubicaron las torres sobre la vereda colindante a la fachada de exposición Norte frente a cada árbol consecutivo y separadas una distancia correspondiente al intervalo de plantación de las especies forestales, respetando la misma posición en cada uno de los casos (Figura 4).

Simultáneamente con la toma de datos de radiación en el plano vertical, mediante albedómetro tipo Kipp y Zonen CMP 3, se registró la radiación global hemisférica incidente en plano horizontal y los valores de albedo a 1.30m de altura en tres localizaciones: centro del cañón urbano y al lado de cada una de las torres. Esto se realiza con el objeto de caracterizar cada uno de los entornos analizados. El albedómetro tiene una incertidumbre combinada declarada por el ente de calibración de 1.5%.

Las mediciones se realizan en forma itinerante registrando la radiación solar global hemisférica horizontal cada 20 segundos durante un minuto (3 registros por punto de medición). Se considera un lapso de espera de 2 minutos entre cada medición a fin de que el instrumento se estabilice a la condición del sitio. Este procedimiento se realiza dos veces por cada sitio de medición.

Para la evaluación visual de la incidencia del forestal sobre ambos planos -vertical y horizontal-, y la determinación del grado de enmascaramiento, para cada horario de medición se tomaron imágenes hemisféricas con cámara de ojo de pez, marca Nikon Colpic. Ver Figura 5.



Figura 2: Croquis de torre de medición construida. Figura 3: Ubicación de las torres de medición.

### ***Procedimiento de medición:***

Se registró el horario de llegada y se colocaron las torres de medición sobre la fachada elegida, respetando la ubicación presentada en el croquis de la Figura 2. Los solarímetros colocados en las torres registran el dato de radiación solar global en superficie vertical cada 20 segundos y permanecen operativas todo el tiempo que dura la medición.

Se procedió a tomar tres imágenes con la cámara fotográfica de ojo de pez: una en el centro de la calzada con orientación vertical (para tomar la amplitud de bóveda celeste), y las otras dos contiguas a cada torre de medición con orientación vertical (para tomar la amplitud del cañón urbano). Esta disposición se muestra en la Figura 3.



Figura 4: Puntos azules numerados como 1,2 y 3 indica la toma de imágenes hemisféricas y los puntos de ubicación del solarímetro.



Figura 5. Imágenes hemisféricas, Caso plátanos, hora 12:00PM. Calle Roca

Posteriormente, se efectuaron mediciones de radiación hemisférica global horizontal utilizando un solarímetro (albedómetro), así como la evaluación del albedo correspondiente en cada entorno. Estas mediciones se realizaron en los tres puntos previamente identificados para la toma de imágenes hemisféricas: uno en el centro de la calzada y dos junto a cada torre de medición. Cada registro tuvo una duración de un minuto por punto. Como medida de seguridad, se estableció un tiempo de espera de 2 minutos entre cada registro para asegurar que el sensor se estabilice a la nueva condición de medición.

***Criterios de transcripción de datos. Escalado de las imágenes para la construcción de la maqueta virtual.***

El procedimiento metodológico parte de dos insumos fundamentales: la medición de radiación solar in situ y el relevamiento arquitectónico y forestal del área de estudio. Estos datos son incorporados al entorno de modelado tridimensional en Rhinoceros (Rhino), donde se desarrolla una representación detallada del espacio urbano bajo análisis.

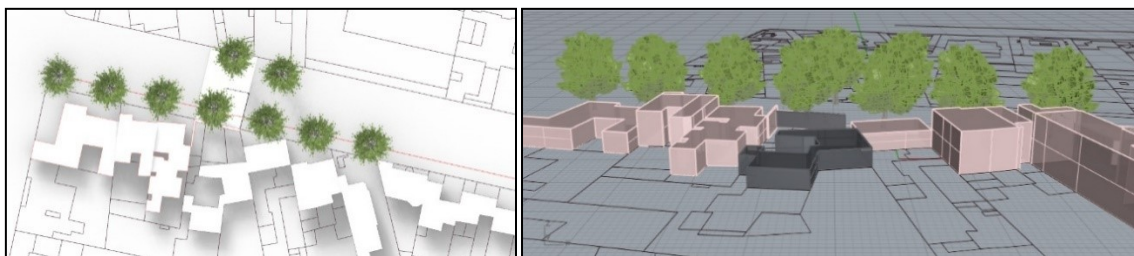
Como primer paso, se procedió a representar el trazado urbano de la zona en estudio en planta, para poder extruir la volumetría del mismo, utilizando planos catastrales. A continuación, se escaló y relevó la posición de cada uno de los puntos de medición, para luego utilizar las cotas de los mismos y extraer valores de radiación en cada uno de ellos (Figura 6).



*Figura 6: Detalle de puntos de medición y escalado de la imagen*

### ***Armado del modelo y simulación de los casos de estudio.***

Como próximo paso, se realizó la representación de la información recopilada en el programa de modelado Rhinoceros 8 (Rhino), ver Figura 7, utilizando tanto la vista en planta como la volumétrica para desarrollar geometrías adaptativas que simulan la incidencia del sol en diferentes configuraciones superficiales. Esto facilita la identificación de áreas con mayor y menor aprovechamiento del potencial solar. Luego, se creó la conexión con la interfaz de Grasshopper mediante el uso de los programas de diseño ambiental Ladybug, Honeybee y Lands Design.



*Figura 7: Volumetría resultante de elevación de planimetría*

Con el modelo creado, se inician varias líneas de trabajo complementarias, incluyendo la integración de herramientas climáticas mediante un archivo epw obtenido de Climate One Building (2009-2023) en la ciudad de Mendoza, lo que permite la geolocalización de la maqueta virtual. En el siguiente paso, se añaden elementos de vegetación al modelo, analizando el impacto de las sombras generadas por los árboles urbanos sobre las estructuras construidas, con el plugin Lands Design, el cual permite agregar las características, medidas y especificaciones técnicas del forestal (Figura 8).

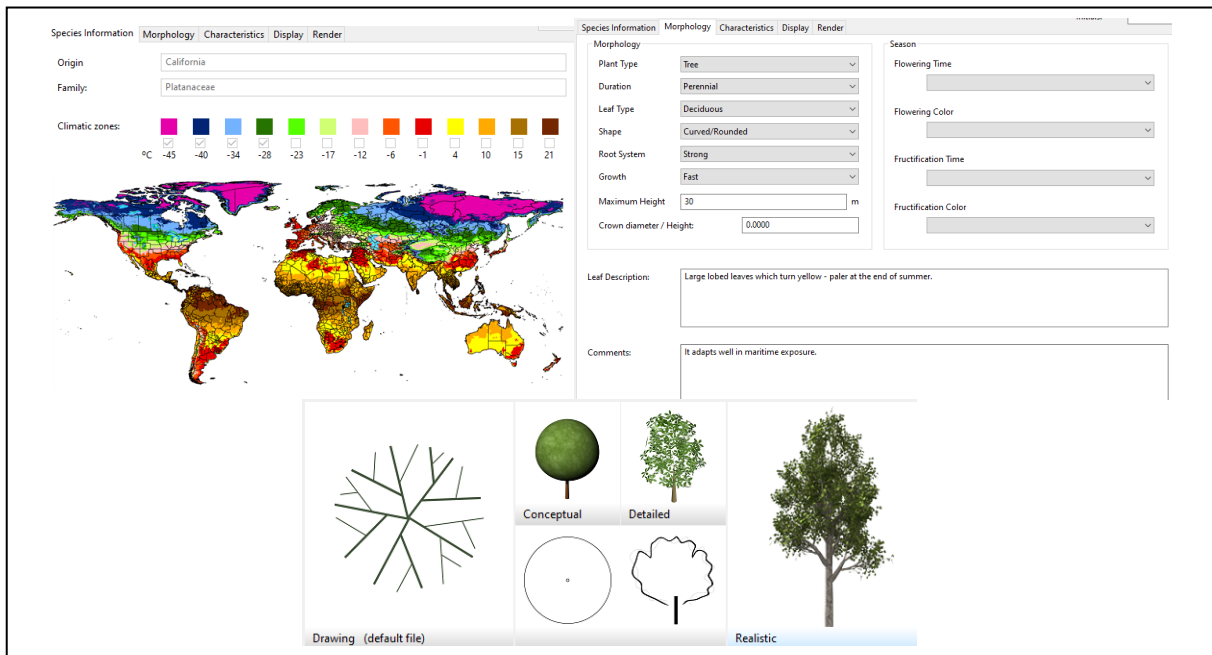


Figura 8: Configuración del forestal seleccionado en Lands Design.

Esta fase permite calcular la radiación solar incidente sobre plano vertical y horizontal teniendo en cuenta la influencia del follaje. Este proceso de trabajo se resume en la Figura 9.

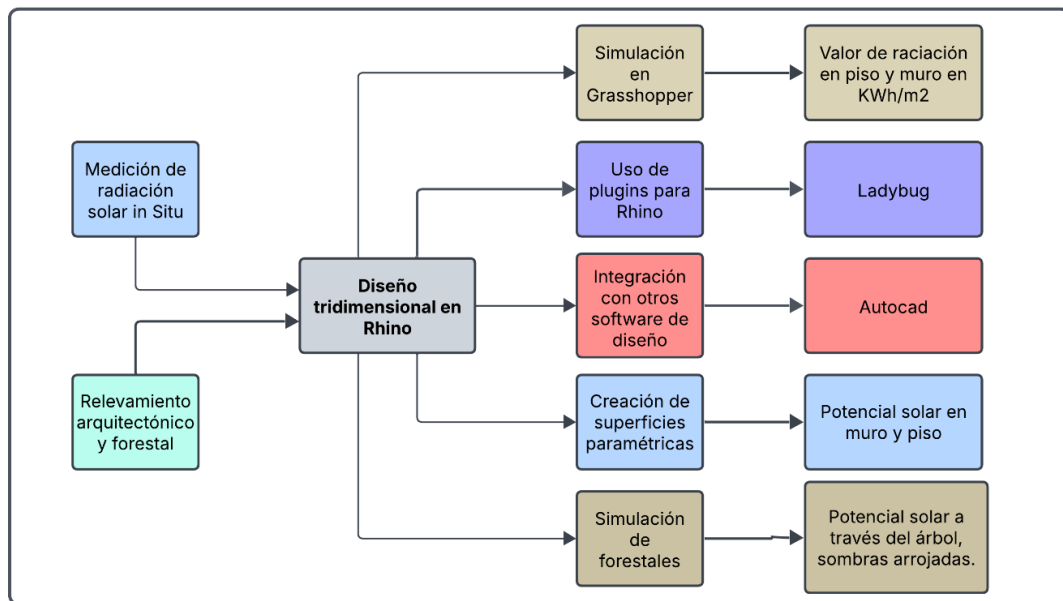


Figura 9: Diagrama de flujo de trabajo paramétrico en Rhinoceros.

Como resultado de la simulación, se obtuvo el comportamiento de la radiación solar incidente sobre muros y pisos, permitiendo obtener valores expresados en kWh/m<sup>2</sup>, tal cual puede observarse en la Figura 10.



Figura 10: Radiación incidente en muro y piso del cañón urbano bajo la influencia de la canopia.

## RESULTADOS

Para el análisis y contrastación de los resultados obtenidos, se confecciona la Tabla 2. Por ser este un informe de avance de la investigación en marcha, se presentan los resultados de las mediciones del cañón urbano con *Plátanus hispanica*, contrastados con los resultados obtenidos de la simulación en dicho cañón urbano, a las 12:00 hs. PM del día de monitoreo referenciado. Se indica radiación incidente en  $W/m^2$ , para el plano horizontal en el centro del cañón urbano y para el plano vertical a una altura de 1.30 m. Además, y con el objeto de inferir la acción de las distintas especies forestales bajo análisis, y su influencia sobre la radiación incidente, se simulan las otras tres especies analizadas, sobre el mismo cañón urbano, y el comportamiento de la radiación incidente en ambos planos –vertical y horizontal– para el caso analizado sin forestales.

Para la evaluación, además, se utilizan dos indicadores: Porcentaje de bloqueo (Ec. 1) y Error relativo porcentual (Ec. 2). El primero permite inferir la acción del forestal sobre la disponibilidad solar de los planos analizados contrastando el caso con forestal versus el cañón urbano sin forestal. El segundo permite evaluar cuánto se aleja la predicción del dato simulado de radiación, versus el dato medido (Ec. 1 y Ec. 2).

$$\text{Porcentaje de bloqueo: } PB = 100 - (Vs/Vt) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Error relativo porcentual: } E\% = (Vm - Vs)/Vm \quad (2)$$

*Tabla 2: Radiación incidente en el plano vertical y horizontal del cañón urbano forestado con plátanos vs datos simulados en 5 escenarios; plátanos, sin forestal, moreras, fresnos y acacias. 12 PM 20/02/2025*

		Hora de Medición	PLÁTANO		CANAL SIN ÁRBOLES	MORERA		FRESNO		ACACIA	
			Valor Medido	Valor Simulado	Simulado de referencia (T)	Valor Simulado	Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$	Valor Simulado	Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$	Valor Simulado	Porcentaje de bloqueo: $PB=100-(Vs/Vt)*100$
			Radiación en $W/m^2$								
<b>ESTE</b>	<b>MURO</b>	12:06	28,8	22,5	96,43	12,03	87,52	9,22	90,44	10,25	89,37
<b>OESTE</b>	<b>MURO</b>	12:05	30,04	31,94	93,43	86,87	7,02	87,99	5,82	86,87	7,02
<b>CENTRO</b>	<b>CALLE</b>	12:02	49,56	51,15	94,78	73,58	22,37	93,82	1,01	74,09	21,83

Los resultados de la Tabla 2 muestran los valores promedio de las mediciones de radiación solar realizadas en cada punto, versus los valores obtenidos en esos puntos, a partir del modelo simulado, tanto para el caso monitoreado (considerado caso base), como para un conjunto de tres escenarios simulados sobre el caso base, el cañón urbano sin árboles, el cañón urbano con: moreras, fresnos y acacias.

*Tabla 3: Datos de Radiación incidente en el plano vertical y horizontal del cañón urbano forestado con plátanos corregidos por desviación st. e incertidumbre del instrumental.*

		Hora de Medición	PLÁTANO			
			Valor Medido ( $W/m^2$ )	Desviación st.	Incertidumbre medición %	Rango de Medida ( $W/m^2$ )
<b>ESTE</b>	<b>MURO</b>	12:06	28,8	+ / - 0,28	3,00	27,66-29,95
<b>OESTE</b>	<b>MURO</b>	12:05	30,04	+ / - 0,27	3,00	28,88-31,22
<b>CENTRO</b>	<b>CALLE</b>	12:02	49,56	+ / - 0,47	1,50	48,35-50,78

La Tabla 3 muestra los valores promedio de las 6 mediciones de radiación en cada punto, corregida por su desviación st. y la incertidumbre del instrumento, los resultados muestran que la medida promediada en el muro este se desvía +/- 1.15  $W/m^2$ , la del muro oeste, +/-1,17  $W/m^2$  y la del centro +/- 1.23  $W/m^2$ .

Tabla 4: Error relativo, entre el valor simulado y el valor medido en cada caso, tomando como cierto el valor medido

		Hora de medición	PLÁTANO		Error porcentual	Porcentaje de bloqueo
			Medido Promedio	Simulado	$E\% = \frac{V_m - V_s}{V_m} \cdot 100$	$PB = 100 - (V_s/V_m) \cdot 100$
			W/m <sup>2</sup>		Vm	
ESTE	MURO	12:06	28,8 +/- 1,15	22,5	18-25 %	76,67
OESTE	MURO	12:05	30,04 +/- 1,17	31,94	+/- 4%	65,81
CENTRO	CALLE	12:02	49,56 +/- 1,23	51,15	+/- 2,4 %	46,03

Tomando estas desviaciones de la medición en cuenta y contrastando con los valores simulados, de la observación de la Tabla 4 se puede inferir un buen ajuste entre los datos que arroja el simulador y los datos medidos, siendo su error relativo entre +/- (2.4 a 4) %, mientras que la predicción es más pobre para el caso del muro norte al este, donde el error relativo se encuentra entre 18 a 25%. Sin embargo, para ser una primera aproximación, se considera que el modelo utilizado ofrece un ajuste aceptable considerando la complejidad de la morfología del forestal en la ciudad, que se encuentra afectada por el manejo de poda a lo largo del año, tanto a cargo del municipio como de empresas prestadoras de servicios (electricidad, telefonía e, internet). Cuando analizamos el porcentaje de bloqueo del forestal sobre la distribución de la radiación incidente en el plano vertical -muros- y horizontal -calle-, observamos que, para el caso del plátano, ver Tabla 4, especie de primera magnitud, de aproximadamente-18 m de altura, la forestación incide sobre la radiación generando mayor homogeneidad en su distribución en los planos evaluados, con un porcentaje de bloqueo de la radiación sobre los muros que oscila entre 65.81 y el 76,67%. Este comportamiento es beneficioso en términos de protección y manejo de la radiación, pero perjudicial, en lo relativo a las posibilidades de aprovechamiento en verano.

Cuando analizamos el porcentaje de bloqueo del forestal, para el caso de las otras especies analizadas, ver Tabla 2, se observa que por tratarse de especies de segunda magnitud forestal (8 a 12 m de altura), la distribución de la radiación incidente en el plano vertical es mucho más heterogénea, generando sobre los muros condiciones de luz y sombra, y un menor bloqueo de la radiación sobre el plano horizontal. El efecto de la morera y de la acacia, en relación al bloqueo de la radiación incidente, resulta semejante, reportando valores de bloqueo para el caso del muro del orden de 7 a 90% dependiendo del punto de medición observado. En el caso del centro del cañón urbano el bloqueo de ambas especies sobre plano horizontal es semejante y del orden del 22%. Esta asimetría dificulta el manejo del diseño de las protecciones solares en verano, pero mejora las posibilidades de aprovechamiento activo de la radiación solar. Cabe destacar que, a semejanza de su comportamiento en términos de incidencia sobre la distribución de la radiación solar, acacia visco es una especie nativa de menor requerimiento hídrico que la morera.

Finalmente, el fresno, especie también de segunda magnitud (altura 8 a 12m), pero con un desarrollo de copa más compacto que las anteriores, muestra un comportamiento de bloqueo de tipo puntual sobre la porción del muro inmediata más próxima, se observa que el bloqueo asciende al 91 % de la radiación incidente sobre el muro norte al este, sin embargo, sobre el muro norte al oeste observamos que este porcentaje desciende al 5.8%; y muestra el manejo más desfavorable hacia el centro del cañón urbano, donde el bloqueo no supera el 1%.

El comportamiento verificado pone de manifiesto la importancia de la selección del forestal de acuerdo a las opciones de diseño y a los objetivos de aprovechamiento de la energía en las zonas de baja densidad edilicia que, en la ciudad de Mendoza, son de uso mayoritariamente residencial. Es necesario definir previamente a la renovación forestal o la forestación de un cañón urbano, si lo que se busca, durante el verano, es el aprovechamiento activo de la misma o el manejo pasivo, en términos de asegurar niveles adecuados de iluminación y protección de la radiación solar en verano de los espacios.

La Figura 11 compila las salidas gráficas del modelo utilizado en los escenarios analizados.

Rhino +  
Grasshopper +  
Lands Design

.epw  
Weather data

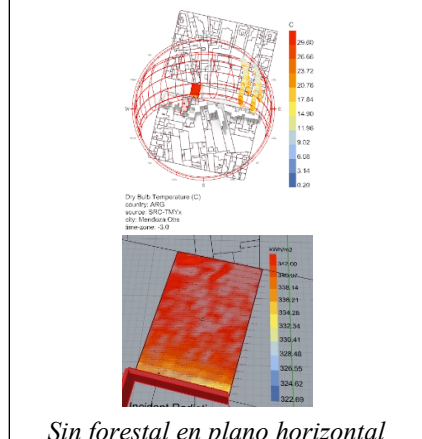
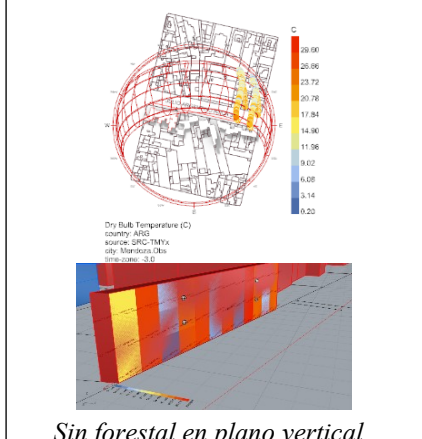
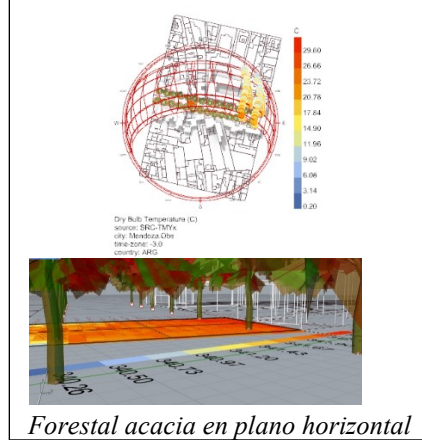
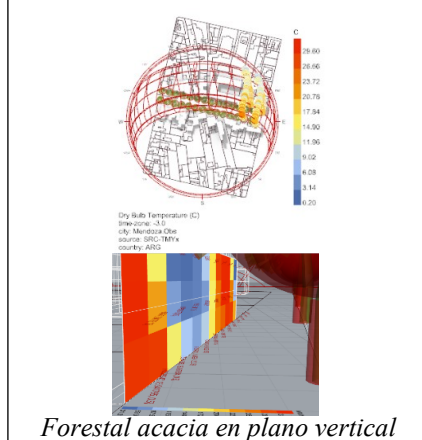
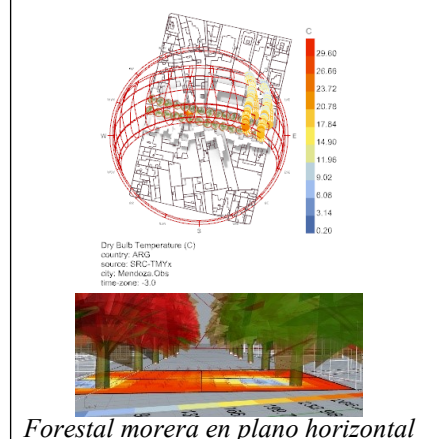
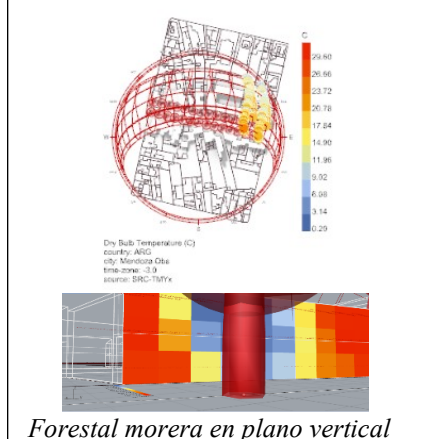
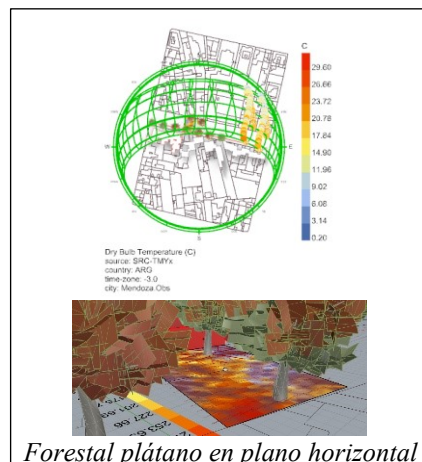
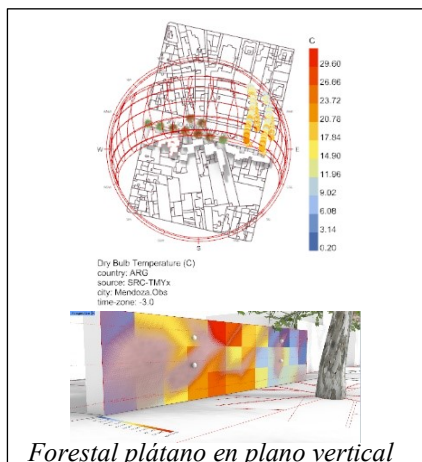


Figura 11: Representación de las salidas gráficas del modelo, para el caso y los escenarios analizados.

Finalmente se observa que, la evaluación del potencial solar sobre las fachadas de un cañón urbano forestado requiere métodos más sofisticados que permitan calcular la radiación solar incidente en un modelo digital 3D que contenga a los forestales y sus características morfológicas y optotérmicas. Es deseable un alto grado de facilidad de uso para los modelos de potencial solar a gran escala, lo que cambia con el número de herramientas de software que se requieren para realizar diferentes tareas dentro de un análisis completo. En este sentido, los modelos que funcionan como componentes no esenciales en un software de diseño asistido por ordenador (CAD), como es el caso de LadyBug utilizado en la presente investigación, ofrecen la ventaja de presentar mayor número de funcionalidades avanzadas de modelado 3D del CAD, que en ocasiones incluyen posibilidades de diseño paramétrico junto con modelos energéticos específicos (Anton y Tănase, 2016), otros ejemplos de estas herramientas son Ecotect, DIVA y Skelion.

## CONCLUSIONES

Este trabajo presenta los primeros resultados de una investigación orientada a simular la distribución de la radiación solar en las distintas fachadas que componen el cañón urbano tomando en cuenta la influencia de la morfología y la tecnología urbano-edilicia y su combinación con distintas especies forestales. Para ello se utilizó el software Rhino y la interfaz de programación visual Grasshopper con tres complementos principales Ladybug, Honeybee y Lands Design.

La contrastación de los primeros resultados obtenidos mediante simulación y su vinculación con los datos monitoreados a campo, muestra un buen nivel de ajuste, con un error relativo promedio del orden de +/-2 a 25 %, esto muestra una buena performance del modelo considerando la complejidad asociada a la modelización de las distintas especies forestales y su combinación con la volumetría urbana.

Sumado los resultados ponen en evidencia el impacto de la morfología de la especie forestal en la disponibilidad de radiación solar en los diferentes planos que componen el cañón urbano vial de 20 m de ancho. Demostrando que, el plátano especie de primera magnitud, genera un bloqueo más homogéneo de la distribución solar en la baja densidad edilicia, del orden del 70 % en los planos verticales al norte y del 46% en los planos horizontales, mientras que el fresno, especie de segunda magnitud, de follaje denso y desarrollo vegetativo de tipo individual, sin solapamiento lateral de copas, presenta un bloqueo heterogéneo de la misma, del orden del 90% en los paramentos verticales al norte en la zona inmediata a la localización del forestal, y de 6% en los paramentos verticales al norte alejados del forestal. Mientras que no evidencia bloqueo prácticamente de la radiación incidente sobre plano horizontal.

Los resultados muestran que Ladybug Tools (LBT), es un complemento paramétrico que permite a los usuarios evaluar los efectos de múltiples variables como geometrías, materiales, climas y forma urbana, de manera ágil e iterativa. Como herramienta, ofrece la posibilidad de desarrollar una retroalimentación del proceso de diseño y análisis de los espacios urbanos y conectar la disponibilidad de la radiación solar de un espacio con las variables que lo caracterizan a fin de identificar las intervenciones necesarias para su manipulación.

En futuras etapas se plantea completar todo el proceso de monitoreo y contrastación, para todos los casos bajo análisis, y utilizar otras herramientas de predicción a fin de identificar fortalezas y debilidades de las mismas, y definir cuál de todas ofrece mayores beneficios bajo los condicionantes que imponen las características de la ciudad en estudio.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Esta investigación ha sido posible por el apoyo financiero del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y la Tecnología (ANPCyT) mediante los fondos recibidos a través de los proyectos de investigación PICT-2020-02444 y PIP 2021-0900.

## REFERENCIAS

Anton, I., y Tănase, D. (2016). Informed geometries. Parametric modelling and energy analysis in early stages of design. *Energy Procedia*, 85, 9-16.

- Censo Georreferenciado del arbolado urbano del Área Metropolitana de Mendoza - UNICIPIO (2022). <https://miarbol.mendoza.gov.ar/tableros/d/rYUH7j7k/estadisticas-sistema-informacion-y-gestion-arbolado?orgId=1&var-municipio=All&var-distrito=All&var-calle=All>
- Fogl, M., Moudrý, V. (2016). Influence of vegetation canopies on solar potential in urban environments. *Applied Geography*, 66, 73-80.
- Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., y Brito, M. C. (2015). Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 915-931.
- Hofierka J, Kaňuk J. (2009). Assessment of photovoltaic potential in urban areas using opensource solar radiation tools. *Renewable Energy*, 34, pp. 2206-2214.
- Liu, H. Y., Skandalos, N., Braslina, L., Kapsalis, V., y Karamanis, D. (2023, July). Integrating solar energy and nature-based solutions for climate-neutral urban environments. In *Solar* (Vol. 3, No. 3, pp. 382-415). MDPI.
- Martín Ávila A. M., Domínguez Bravo J., Amador Guerra J. (2016). Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 18, p. 143-167. ISSN: 1578-5157.
- Martínez CF, MA Cantón, FA Roig Juñent. 2014. Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas: Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia* 39 (12): 890-897.
- Noorollahi, Y., Golshanfard, A., Ansaripour, S., Khaledi, A., y Shadi, M. (2021). Solar energy for sustainable heating and cooling energy system planning in arid climates. *Energy*, 218, 119421.
- Ruiz, M. A., Correa, E. N., y Cantón, M. A. (2015). Incidencia de la selección de la especie forestal en el confort térmico de cañones urbanos de zonas áridas: El caso de Mendoza, Argentina. *Urbano*, 18(32), 60-70.
- Speak, A., Montagnani, L., Wellstein, C., y Zerbe, S. (2020). The influence of tree traits on urban ground surface shade cooling. *Landscape and urban planning*, 197, 103748
- Staley, D. C. (2015). Urban forests and solar power generation: partners in urban heat island mitigation. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 10(1), 78-86.
- Tan, Z., Lau, K. K. L., y Ng, E. (2016). Urban tree design approaches for mitigating daytime urban heat island effects in a high-density urban environment. *Energy and Buildings*, 114, 265-274.
- Tooke, T. R., Coops, N. C., Voogt, J. A., y Meitner, M. J. (2011). Tree structure influences on rooftop-received solar radiation. *Landscape and Urban Planning*, 102(2), 73-81.
- Wiginton L.K., Nguyen H.T., Pearce J.M. (2010): “Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34, pp. 345-357.

#### **MODELING THE IMPACT OF FORESTATION ON THE AVAILABILITY OF SOLAR RADIATION IN LOW-DENSITY URBAN CANYONS. THE CASE OF THE CITY OF MENDOZA**

**ABSTRACT:** The city of Mendoza is characterized by intense forestation used for the bioclimatic conditioning of urban canyons during daylight hours, responding to the “oasis city” model. In this metropolis, it is essential to identify the extent to which the forest canopy affects radiative energy exchanges, taking into account that 80% of the residential sector of the metropolitan area is represented by low building density. This paper presents the initial results of a study aimed at simulating the distribution of solar radiation on the different facades that make up the urban canyon, taking into account the influence of morphology, urban building technology, and their combination with different forest species. Rhino software and the Grasshopper visual programming interface were used with three main add-ons: Ladybug, Honeybee, and Lands Design. The comparison of the initial results obtained through simulation and their link to the data monitored in the field shows a good level of adjustment, with a relative error ranging from +/- (2 to 25) % when comparing simulated and measured data. This shows an acceptable performance of the model, considering the complexity associated with modeling the different species and their combination with urban volumetry.

**Key words:** solar radiation, urban canyons, urban forestation, low building density, simulation models.