



# Validación de modelo microclimático calculado con ENVI-met como herramienta para el análisis térmico edilicio de EnergyPlus.

## Validation of microclimatic model calculated with ENVI-met as a tool for thermal building analysis of EnergyPlus.

### Julieta Balter

Filiación: Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de Cuyo  
Dirección: Centro Universitario, Parque General San Martín s/n, Mendoza (CP 5500), Argentina  
Correo: [julietabalter@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:julietabalter@mendoza-conicet.gob.ar)

### Noelia Alchapar

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET  
Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina  
Correo: [nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:nalchapar@mendoza-conicet.gob.ar)

### Érica Correa

Filiación: Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET  
Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina  
Correo: [ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar)

### Carolina Ganem

Filiación: Universidad Nacional de Cuyo - Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) del Centro Científico Tecnológico Mendoza, CONICET  
Dirección: Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín, Mendoza (CP 5500), Argentina  
Correo: [cganem@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:cganem@mendoza-conicet.gob.ar)

**Manuscript Code:** 014

**Date of Acceptance/Reception:** 27-09-2018/24-08-2018

### Resumen

El microclima alrededor de un edificio, establecido por la interacción con su entorno, es uno de los factores determinantes en el comportamiento termo-energético edilicio. La presente investigación propone desarrollar un método de integración de dos programas de simulación, uno a escala edilicia -EnergyPlus- y otro a escala urbana -ENVI-met-, con el objetivo de determinar la potencialidad predictiva del modelo de simulación urbano para crear datos microclimáticos fiables para conformar las bases climáticas del software EnergyPlus. El análisis se llevó a cabo en la zona con mayor concentración de densidad del área metropolitana de la ciudad de Mendoza y se tomó como caso de estudio un edificio másico de altura media. La investigación se divide en las siguientes etapas: (i) descripción de área urbana; (ii) diseño y validación del modelo numérico urbano (ENVI-met) y edificio (EnergyPlus); (iii) ingreso de variables climáticas -monitoreadas versus calculadas- para un día de diseño en el programa EnergyPlus y según nivel de altura de departamento; (iv) contrastación de los resultados termo-energéticos interiores. Los resultados de la presente investigación revelan las capacidades y ventajas de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de datos climáticos. El alto grado de ajuste -R<sup>2</sup> superiores a 0.94- de la temperatura del aire interior monitoreada y ajustada con EnergyPlus versus la utilizada con los datos microclimáticos calculados con el simulador urbano ENVI-met, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos del método de integración de ambos softwares.

**Palabras claves:** EnergyPlus; ENVI-met; Validación de modelos climáticos; Simulación integrada

### Abstract

The microclimate around a building, established by the interaction with its environment, is one of the determining factors in the building thermo-energetic behavior of a building. The present investigation proposes to develop a method of integration of two simulation programs, one at building scale -EnergyPlus- and another at urban scale -ENVI-met-. The objective consists in determining the predictive potential of the urban model to create reliable microclimatic data to conform the climatic bases of the EnergyPlus software. The analysis was carried out in the area with the highest concentration of density in the metropolitan area of Mendoza city and a medium-height mass building was taken as case studied. The investigation is divided into the following stages: (i) description of urban area; (ii) design and validation of the urban numerical model (ENVI-met) and building (EnergyPlus); (iii) input of climatic variables -monitored versus calculated- for a design day in the EnergyPlus program and according to department height level; (iv) comparison of the interior thermo-energetic results. The results of this research reveal the capabilities and advantages of working with ENVI-met as a tool for the generation of climate data. The high degree of adjustment -R<sup>2</sup> above 0.94- of the indoor air temperature monitored and adjusted with EnergyPlus versus that used with the microclimatic data calculated with the urban simulator ENVI-met, supports the reliability of the predictive results of the integration method of both softwares.

**Keywords:** EnergyPlus; ENVI-met; Validation of climate models; Integrated simulation

## Introducción

Las áreas urbanas son responsables del 75% del consumo mundial de recursos (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), y dentro de ellas el sector edilicio cumple un rol fundamental en el balance energético global. Si consideramos el sector residencial, éste resulta el más ineficiente en cuanto al incremento en sus consumos de gas natural y electricidad, representando a fines del 2010 el 91% del total del consumo del sector (Secretaría de Energía, 2014). En este sentido, el micro-clima alrededor de un edificio, establecido por la interacción morfológica y ambiental con su entorno urbano, se conforma como un factor determinante en el comportamiento termo-energético edilicio.

La ciudad de Mendoza, Argentina se concibe como una ciudad-oasis (Bórmida, 1984) debido a su intensa forestación urbana inscrita en una zona árida templada continental. La ciudad define desde el punto de vista ambiental dos estratos en altura dados por dicha forestación: con y sin arbolado. En este contexto los espacios interiores ubicados hasta el tercer nivel -bajo la copa de los árboles- cuentan con una situación micro-climática moderada y se ven beneficiados térmica y energéticamente tanto en invierno como en verano. Sin embargo, en los espacios de los niveles superiores -sobre la copa de los árboles- la situación es más extrema y los consumos para climatización son mayores en ambas estaciones debido a la exposición completa de sus envolventes (Balter, 2015). En este contexto, el comportamiento térmico interior y los consumos energéticos de cada unidad de vivienda ubicada en los edificios en altura se encuentran afectados de acuerdo al proceso de intercambio de energías entre la envolvente edilicia y el ambiente circundante. Para estudiar el desempeño edilicio según tal diferenciación en altura, el monitoreo de la situación ambiental *in situ* -tanto interior como exterior- presenta un gran valor dada la particular estructura de ciudad-oasis. No obstante, para realizar mediciones exhaustivas en este entorno urbano es preciso contar con un instrumental específico para cada estrato, lo cual muchas veces dificulta el monitoreo debido a la gran cantidad de variables meteorológicas demandadas. Al respecto, los modelos teóricos de simulación microclimática urbana son una herramienta adecuada y necesaria para poder no sólo diagnosticar el comportamiento termo-ambiental de una zona exterior, sino también para predecir el comportamiento edilicio inserto en una determinada configuración urbana existente o escenario propuesto.

El objetivo de la presente investigación es evaluar la potencialidad predictiva del software microclimático ENVI-met V.3.1 para proveer los datos climáticos utilizados por el software EnergyPlus V.8.8.0 y así determinar el comportamiento termo-energético de dos unidades de vivienda (bajo y sobre la copa de los árboles) en un edificio en altura media en la ciudad de Mendoza. Para ello se contrastan los resultados del modelo edilicio corrido con EnergyPlus y ajustado con los datos microclimáticos registrados *in situ*, en contraposición a los resultados de otro modelo edilicio que introduce datos microclimáticos calculados por ENVI-met. Este trabajo busca avanzar en la integración de ambos softwares para mejorar la precisión de los modelos de simulación y la validez de sus predicciones bajo la influencia de distintos entornos urbanos, lo que finalmente servirá para generar directrices en nuevos desarrollos urbanísticos que promuevan el uso racional de la energía.

## Estado del arte del problema

A nivel internacional, las investigaciones realizadas respecto a la integración de programas de simulación dinámica (EnergyPlus - ENVI-met) pueden clasificarse de acuerdo al foco de estudio o bien, según a la metodología adoptada. El trabajo de Yang et al. (2012) plantea y desarrolla una metodología de simulación integrada basado en los programas ENVI-met y EnergyPlus a partir de establecer una correspondencia de las superficies de un edificio. El trabajo utiliza el programa Building Controls Virtual Test Bed (BCTVB) para desarrollar un módulo de acoplamiento con el fin de transferir los resultados de la simulación entre los dos programas. Otros trabajos, se enfocan en el efecto de la sombra de los árboles en el desempeño térmico edilicio: Morakinyo et al. (2016) trabaja mediante la comparación de dos edificios educativos similares de tres niveles; con y sin sombra de los árboles. A través de monitoreo de las condiciones microclimáticas exteriores y térmicas interiores *in situ*, se validó en una primera instancia el modelo urbano en ENVI-met y luego, los datos meteorológicos exteriores específicos se utilizaron para crear el objeto de "un día de diseño" y aplicarlo como condición de contorno para cada edificio en la simulación con Energy Plus. Los resultados del trabajo muestran el impacto de las sombras en el confort térmico local en un microclima cálido-húmedo y. En cuanto que en el estudio de Kuo-Tsang y Yi-Jhen (2017) se analiza el impacto de distintas tipologías de cañones urbanos en las demandas energéticas para enfriamiento en edificios. El estudio emplea los dos simuladores citados anteriormente a partir de datos de bases meteorológicas de un año típico para simular las condiciones microclimáticas de los cañones urbanos para las condiciones climáticas más cálidas del año. Los resultados indican que el ancho de las calles produce la máxima influencia en los consumos de energía en las construcciones, seguido de la orientación, la densidad y la vegetación. Asimismo, Pastore et al. (2017) estudian los efectos de la vegetación en el confort térmico interior en un área urbana

residencial, a partir de las siguientes etapas: a) simulación con ENVI-met de un área del barrio a fines de contar con las condiciones de contorno ante la ausencia de mediciones climáticas reales; b) con las variables climáticas obtenidas se simula el barrio a menor escala con diferentes escenarios de vegetación urbana; c) por último las variables climáticas de salida se utilizan para simular con EnergyPlus las temperaturas y las condiciones de confort interiores mediante la integración de la vegetación exterior y algunas estrategias de rehabilitación edilicia. Por otro lado, Schwede y Sheng (2017) analizan las demandas energéticas anuales para enfriamiento en edificios en su contexto urbano en 26 ciudades de China. El estudio aplica un algoritmo para traducir los datos climáticos (EPW) en bases de datos anuales para localizaciones y micro-climas específicos mediante la simulación con ENVI-met. Esta información se utiliza para simular las condiciones térmicas y las demandas de enfriamiento en edificios mediante el programa TRNSYS.

A escala regional, en el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE-CONICET) se ha trabajado intensamente en el uso de simuladores como una herramienta predictiva de los comportamientos microclimáticos bajos diferentes configuraciones morfo-materiales (Sosa et al., 2018, Alchapar et al., 2017, Alchapar y Correa et al., 2016); así como también a escala edilicia (Mercado et al., 2018, Barea et al., 2016, Balter et al., 2016, Fillipín et al., 2013, Mercado et al., 2010). Sin embargo, hasta el momento no se registran trabajos que integren softwares en ambas escalas.

## Metodología

La investigación se divide en las siguientes etapas detalladas a continuación: (i) descripción de área urbana; (ii) diseño y validación del modelo microclimático urbano (ENVI-met) y edilicio (EnergyPlus); (iii) ingreso de variables climáticas - monitoreadas versus calculadas- para un día de diseño en el programa EnergyPlus y según nivel de altura de departamento; (iv) contrastación de los resultados termo-energéticos interiores. La Figura 1 muestra el esquema de la metodología empleada.

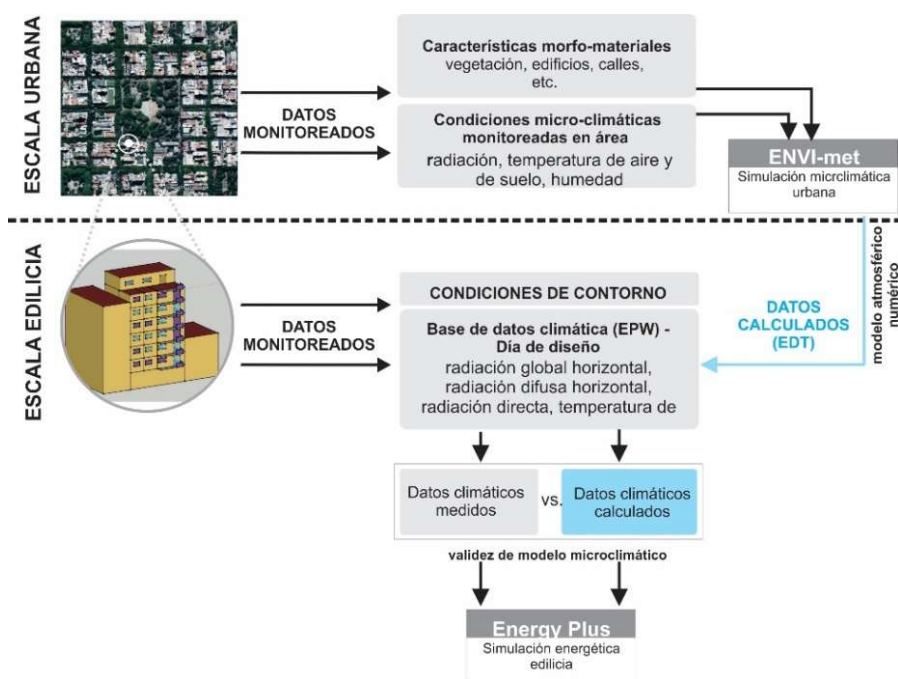


Figura 1. Esquema metodológico de la simulación termo-energética que integra el modelo numérico ENVI-met y EnergyPlus.  
Fuente: Elaboración propia; 2018.

### Descripción del área estudio

El análisis se llevó a cabo en el área metropolitana de Mendoza (AMM) con una superficie de 65 km<sup>2</sup>. Dicha zona es la de mayor densidad edilicia en altura, principalmente de uso residencial y con una densidad poblacional de más de 800 hab/ha. Esta zona presenta una geometría urbana abierta, conformada por canales viales anchos fuertemente arbolados y una estructura edilicia del tipo piramidal (Cantón, et al. 2004). La ciudad de Mendoza está situada al pie de la cordillera de los Andes, zona centro oeste de Argentina (32°40' latitud sur, 68°51' longitud oeste, y 750 m sobre el nivel del mar). Es un conglomerado urbano inserto en un clima continental semiárido con bajos porcentajes de humedad relativa atmosférica y alta heliofanía.

El área de estudio seleccionada abarca una cuadrícula de 7 x 7 hectáreas que suma una superficie total de 36 manzanas. Está conformada por las cinco plazas principales de la ciudad: Independencia, Chile, San Martín, España e Italia. Con respecto a la configuración material, los pavimentos vehiculares representan el 40 % del total de la envolvente urbana y los peatonales ocupan el 15 %, mientras que los techos representan el 22 %; el porcentaje restante corresponde a las superficies descubiertas -patios, plazas, jardines, etc.-Se releva un uso generalizado del pavimento peatonal tipo calcárea en diferentes colores: amarillo (31%), rojo (21%), negro (11%) y de cemento color gris (22%), entre otros, con un albedo medio de 0.3. Los materiales opacos superficiales que componen las fachadas del cañón urbano son predominantemente de piedra, ladrillo y/o pinturas. El albedo promedio de los materiales verticales es 0.2. El 80% de los techos son planos, construidos en hormigón armado y membranas o azotea accesible (albedo promedio=0.3). El 20% restante es inclinado y construido con tejas principalmente de cerámica (albedo promedio = 0.35) (Alchapar et al., 2014).

El 68% de los árboles plantados en alineación en la ciudad de Mendoza corresponden a tres especies: Morera (*Morus alba L.*) 38%; Plátano (*Platanus hispanica Tend.*) 21% Fresno europeo (*Fraxinus excelsior L.*) 19%. El 32% restante corresponde a: Fresno americano (*Fraxinus americana*), Acacia visco (*Acacia visco*), Paraíso común y paraíso sombrilla (*Melia azedarach*), Tipa (*Tipuana tipu*), Álamos (*Populus spp.*), Acer (*Acer negundo*) (Martínez et al., 2017). (Figura 2 y 3).

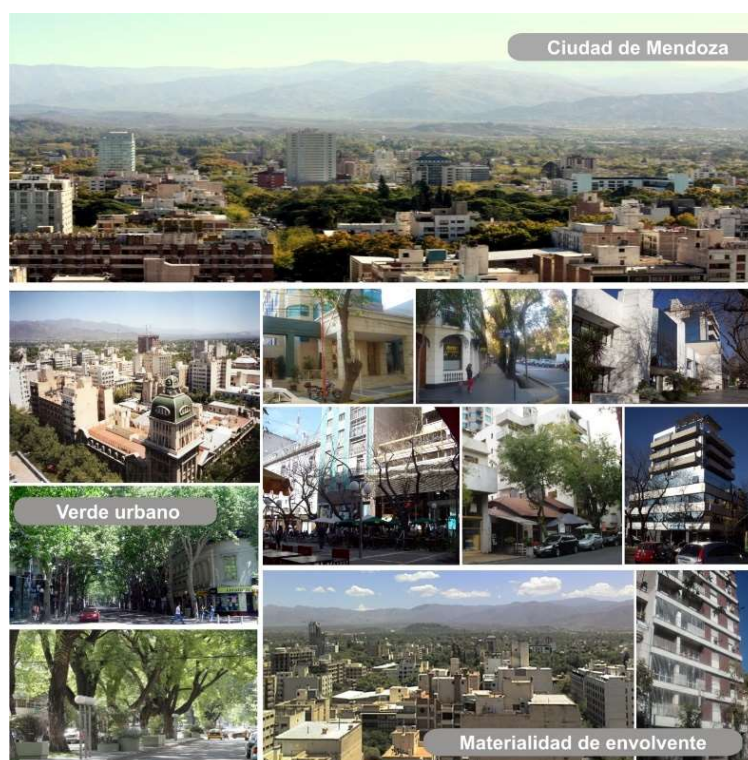


Figura 2. Área Metropolitana de Mendoza (AMM), Argentina. Características morfológicas, materiales y forestales de la ciudad estudiada. Fuente: Elaboración propia; 2015.

### Diseño y validación del modelo numérico a escala urbana. ENVI-met 3.1

Para realizar el diseño numérico se utilizó el programa de acceso gratuito ENVI-met 3.1, desarrollado por Michael Bruse en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz, Alemania. Este modelo computacional tridimensional trabaja a escala de microclima urbano y simula las interacciones entre el aire y la superficie del entorno urbano con una resolución típica de 0.5 a 10 metros en el espacio y cada 10 segundos en tiempo. ENVI-met 3.1 está basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y la termodinámica. El modelo incluye la simulación de: flujos alrededor y entre edificios; procesos de intercambio de calor y vapor de las superficies de suelo y paredes; turbulencia; parámetros de la vegetación; bioclimatología; y dispersión de contaminantes (Bruse, 2006).

#### Variables de ingreso

Los datos de ingreso para la modelación numérica del área urbana evaluada se pueden dividir en tres grupos:

- **Diseño del espacio físico:** El modelo fue realizado en una versión 200 x 200 x 30. La resolución del área es de 3.5 x 3.5 x 3 m y malla de 197 (x); 197 (y), debido a que la superficie de referencia es de 690 x 690 m.
- **Variables climáticas:** El software ENVI-met 3.1 requiere del ingreso de variables no perturbadas que caracterizan las condiciones de borde de la simulación, tales como: (i) velocidad, dirección de viento (m/s) a 10 m de altura y rugosidad de suelo (z0) al punto de referencia; (ii) 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; (iii) humedad relativa (%) a 2m de altura, registrada con sensor ONSET Weather, tipo HOBO H08-003-02 (punto fijo, para el ajuste).
- **Propiedades térmicas del modelo teórico urbano:** Para la caracterización de los edificios es necesario definir temperatura interior, transmitancia térmica y albedo de paredes, techos y pavimentos. Con el propósito de especificar el comportamiento del suelo, se debe precisar temperatura y humedad para distintas capas de suelo. En la Tabla 1 se listan las condiciones de simulación y las propiedades usadas en el trabajo.

**Tabla 1.** Parámetros de ingreso del simulador ENVI-met 3.1. Fuente: Elaboración propia; 2018.

DATOS		
Principales	Velocidad de viento a 10 m [m/s]	4
	Dirección de viento (0:N; 90:E; 180:S; 270:W)	150
	Rugosidad (z0) al punto de referencia	0.1*
	Temperatura atmosférica inicial [K]	297
	Humedad específica a 2.500m [g agua/kg aire]	3.5
	Humedad Relativa a 2m [%]	40.9
Edificios	Temperatura interior [K]	295
	Transmitancia térmica paredes [W/m²K]	2
	Transmitancia térmica techos [W/m²K]	0.7
	Albedo de pared	0.2
	Albedo de techo	0.3
De Suelo	Temperatura Inicial de capa superior (0-20 cm) [K]	293
	Temperatura Inicial de capa media (20-50 cm) [K]	293
	Temperatura Inicial de capa profunda (más de 50 cm) [K]	293
	Humedad Relativa de capa superior (0-20 cm) [%]	50*
	Humedad Relativa de capa media (20-50 cm) [%]	60*
	Humedad Relativa de capa profunda (más de 50 cm)	60*

Nota: Los parámetros con "\*"son valores por defecto de ENVI-met 3.1.

## Monitoreo y calibración

El 30 de marzo de 2013 fue seleccionado como día de ajuste. Esta fecha de referencia es coincidente con el monitoreo *in situ* realizado a escala edilicia (33.2 °C de temperatura máxima, 23.2 °C de temperatura mínima, 27.4 °C de temperatura promedio). Para calibrar el modelo numérico se contrastó la curva de temperatura del aire del área simulado con ENVI-met (Ps), con la curva temperatura del aire obtenida a partir de datos registrados en un punto fijo de referencia (Pf), ubicado dentro del canal vial analizado e indicado en la Figura 3.



Figura 3. Vista aérea del área de estudio y configuración de modelo numérico con ENVI-met 3.1. Descripción del arbolado urbano. Ubicación de: puntos monitoreado (Pf) y simulado (Ps), y edificio monitoreado (Em) y simulado (Es). Fuente: Elaboración propia; 2018.

La Figura 4 grafica la curva de temperatura de aire medido (Pf) con la simulada (Ps) a una altura peatonal (2.5 m). Los estadísticos que caracterizan y comparan los datos muestran una buena predicción del comportamiento térmico del día evaluado, con un  $R^2=0.88$  y desviación estándar= 0.75.

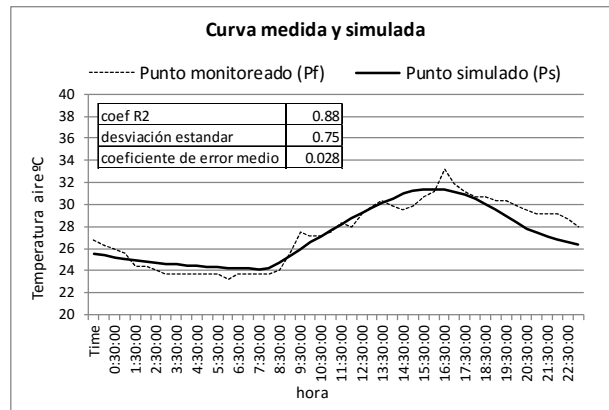


Figura 4. Gráfico de ajuste del punto simulado y monitoreado en el área urbana de estudio. Fuente: Elaboración propia; 2018.

### Diseño y validación del modelo numérico a escala edilicia -EnergyPlus V.8.8.0-

#### Descripción del edificio en estudio

El caso seleccionado es un edificio con orientación Norte correspondiente a la tipología de Torre sin retiros de las líneas divisorias de edificación. Dicha tipología corresponde a una de las tres existentes en Mendoza de acuerdo a la clasificación morfológica según las normativas edilicias en el momento de su construcción (Balter et al., 2013). Las unidades de vivienda monitoreadas son frontales, es decir, orientados a la vía pública y por ende a la arboleda urbana. Asimismo, para su selección se consideró pertinente, dado el contexto urbano que lo favorece, que la acera inmediata al Norte del edificio sea una plaza asegurando la ausencia de sombras por entorno (ver Figura 3).

En cuanto a la materialidad, es un edificio mayormente másico, con un 73% de materiales opacos en su envolvente expuesta. Los muros exteriores son de ladrillo cerámico hueco de 0.30m con revoque y pintura sin aislación y las divisiones interiores son del mismo material de 0.10 m de espesor. Los vidrios son simples de 4mm ( $K= 5.8W/m^2°C$ , factor solar = 0.87). Como elementos de protección solar el edificio cuenta con balcones de 1.20m de profundidad y persianas corredizas con celosías de madera color blanco.

Los departamentos a evaluar son dos unidades de vivienda equivalentes entre sí (superficie cubierta de  $122 m^2$ ) ubicadas una en el primer nivel -bajo la copa de los árboles- y la otra en el quinto nivel -sobre la copa de los árboles-, indicadas en la planta y fachada de la Figura 5.

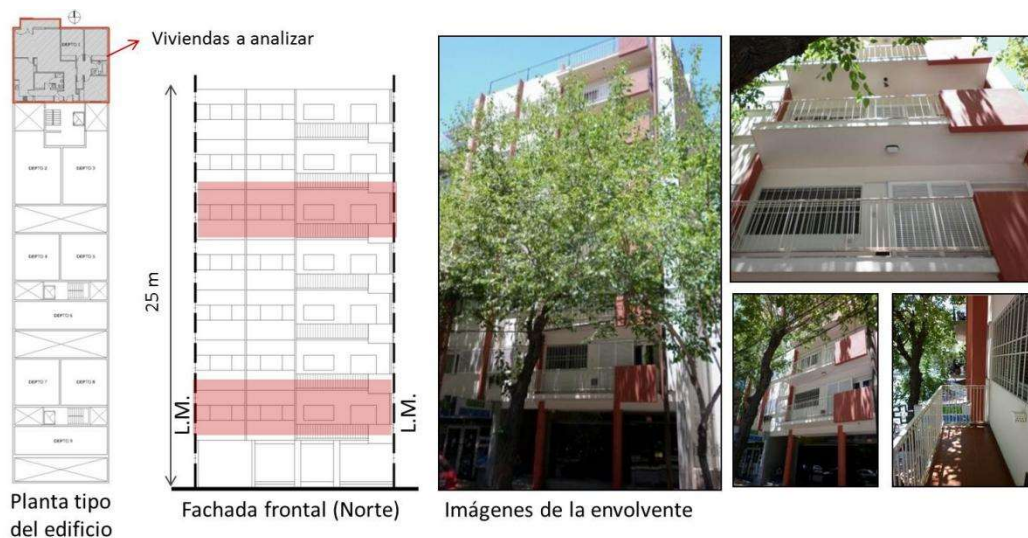


Figura 5. Planta tipo, fachada frontal e imágenes del edificio monitoreado. Fuente: Elaboración propia; 2015.

### Monitoreo y calibración

Respecto a las mediciones higrotérmicas se realizaron auditorías in situ simultáneamente en las dos viviendas en un período comprendido entre el 28 de marzo al 12 de abril. Se utilizaron micro-adquisidores de datos HOBO U12 de temperatura y humedad relativa y se fijaron intervalos de registro cada 15 minutos sincrónicos en todos los instrumentos, criterio adoptado de acuerdo a las recomendaciones de Longobardi y Hancock (2000). Fueron instalados 3 micro-adquisidores para cada una de viviendas ubicados en diferentes ambientes: dos en el interior (estar y habitación) y uno en el exterior (balcón) protegido de la radiación solar. Los mismos se ubicaron a una altura media de 2 metros, siguiendo las recomendaciones de (Kolher y Hassler, 2002) y a una distancia suficiente de la masa de las paredes a los efectos de evitar distorsiones en los datos (Oke, 2004). Las mediciones de Radiación Global se realizaron con un Solarímetro CM 5 KIPP & ZONEN en los mismos períodos y con la misma frecuencia de toma de datos establecida para las mediciones de temperatura de aire y humedad relativa. Las mismas se efectuaron en el Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CCT Mendoza) el cual se ubica dentro de un radio de 2km, distancia apropiada para la validez de los datos (Grossi Gallegos, 2011). Las mediciones efectuadas fueron utilizadas para validar modelos de simulación dinámica mediante el programa Energy Plus, versión 7.0 (2009). Este programa gratuito fue desarrollado por el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) y es actualmente el software oficial para la simulación del Departamento de Energía de EE.UU. Para la simulación térmica de los espacios se tuvieron en cuenta los aspectos detallados en trabajos publicados (Balter et al, 2016). En la Tabla 2 se muestra la descripción de la materialidad opaca ingresada.

Tabla 2. Propiedades de los materiales ingresados en el modelo de Energy Plus. Fuente: Elaboración propia; 2015.

Capas	Rugosidad	Espesor [m]	Conductividad [W/m°C]	Densidad [Kg/m3]	Calor Especifico [J/Kg°C]
<b>MUROS EXTERIORES</b>					
Revestimiento exterior	Muy rugoso	0.025	0.93	1900	1000
Ladrillo hueco	Rugoso	0.3	0.41	1200	600
Revestimiento interior	Muy rugoso	0.025	0.93	1900	1000
<b>MUROS INTERIORES</b>					
Revestimiento interior	Muy rugoso	0.025	0.93	1900	1000
Ladrillo hueco	Rugoso	0.1	0.41	1200	600
Revestimiento interior	Muy rugoso	0.025	0.93	1900	1000
<b>PISOS / CUBIERTAS</b>					
Yeso	Suave	0.025	0.48	741.3	836.3
Hormigón	Rugoso	0.12	1.7	2400	800
Mortero cemento	Rugosidad Media	0.1	1.63	2400	800
Parquet de madera	Suave	0.025	0.11	500	2800

La estación seleccionada para la validación fue el otoño, con el fin de considerar los períodos en los que no se utilizaron medios mecánicos de climatización y así aislar los aportes de calefacción o enfriamiento en el interior de los espacios. Esta situación se observó en los comportamientos térmicos de los espacios auditados y se corroboró en las entrevistas realizadas a los usuarios (Balter, 2015). Las simulaciones se programaron 10 días antes de la fecha seleccionada dado que resulta importante que el modelo físico entre en régimen con anticipación. Las calibraciones se realizaron en los estar por ser los espacios más ocupados y en los que se pudo saber con mayor detalle la influencia de los usuarios. En la Figura 6 se presentan las curvas del ajuste realizadas en el periodo del 6 al 11 de abril.

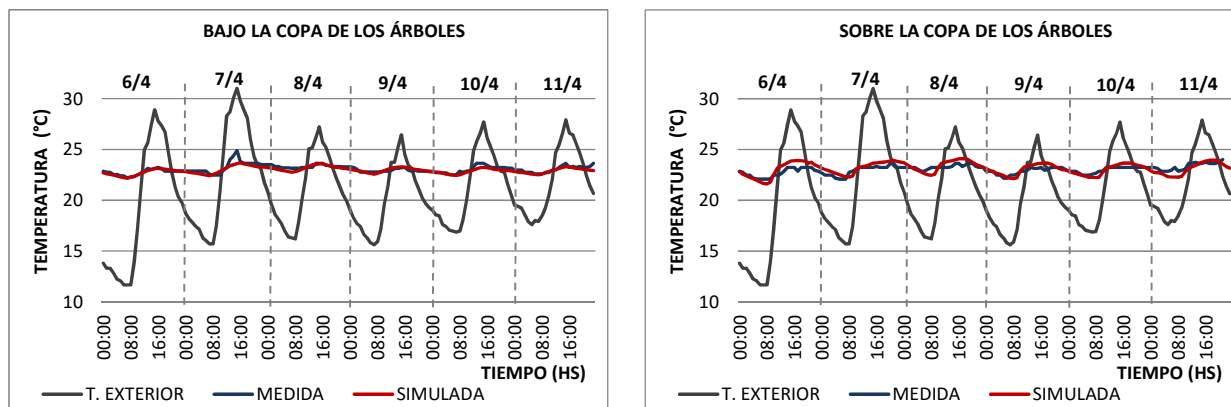


Figura 6. Ajuste de las mediciones en el modelo Energy Plus para las viviendas ubicadas bajo y sobre la copa de los árboles. Fuente: Elaboración propia; 2015.

## Ingreso de variables climáticas en EnergyPlus monitoreadas versus calculadas con ENVI-met

El software EnergyPlus cuenta con distintas formas de ingresar los datos climáticos. Para el ajuste del edificio en estudio en EnergyPlus se utilizó la variable de datos monitoreados (UseWeatherFile) determinando un período (RunPeriod). Asimismo, con el fin de obtener resultados de la condición microclimática dada bajo y sobre la copa de los árboles, las simulaciones térmicas en el interior se realizaron en las dos unidades de vivienda correspondientes al 1° y 5° nivel.

A partir de los datos microclimáticos calculados con ENVI-met se obtuvieron las condiciones de entorno para ingresar los datos en EnergyPlus. En cuanto a los flujos de radiación solar existen diferencias considerables entre los dos modelos debido a las disparidades entre los modelos físicos y los esquemas numéricos. Una de las principales diferencias tiene que ver con el efecto de sombreado de la vegetación: ENVI-met considera la vegetación como un medio turbulento y calcula su transmitancia como una función de la trayectoria óptica del haz solar a través de las hojas y el índice del área foliar; mientras que EnergyPlus la trata como elementos de sombra del contexto, con una transmitancia constante (Yang et al., 2012). En el presente trabajo, en función de comparar distintos objetos de entrada de datos climáticos se trabajó con un día coincidente de las mediciones edilicias y urbanas (30 de marzo) y se conformaron los siguientes archivos/objetos climáticos:

1. Ingreso de datos monitoreados en el período del 29 de marzo al 12 de abril: se conformó el archivo de clima (extensión EPW) con los datos requeridos: Radiación Global sobre superficie horizontal, Radiación difusa sobre superficie horizontal, Radiación directa normal al haz, Temperatura de bulbo seco exterior, Humedad relativa exterior, velocidad y dirección de vientos. En función de considerar las diferencias de radiación incidente en los dos niveles evaluados se realizan dos archivos climáticos: uno, para la condición dada sobre la copa de los árboles, que contiene las mediciones realizadas de temperaturas y radiación solar global. Y un segundo archivo climático, para el departamento bajo la copa de los árboles, en el cual se modifica la radiación incidente bajo la arboleda urbana de acuerdo a los estudios realizados sobre el grado de permeabilidad de árboles en ciudades del centro oeste de Argentina por Cantón et. al (1994). Dicha permeabilidad a la radiación global al mediodía solar correspondiente a la arboleda urbana existente en el caso de estudio (Morus Alba) es del 38.7% en otoño. Respecto a la velocidad del viento se ingresaron valores predominantes en Mendoza de acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional.
2. Ingreso de datos calculados con ENVI-met para el día 30 de marzo: se conformó el archivo de clima (extensión EPW) con los datos requeridos descritos en el punto 1. En función de contemplar las diferencias bajo y sobre la copa de los árboles se realizaron dos archivos climáticos, ingresando los datos calculados por el simulador para una altura de 3 metros (1°er nivel) y de 15 metros (5° nivel). Se conformó el objeto de entrada "SizingPeriod:WeatherFileDays", en la cual se especifica un periodo del archivo de datos climáticos.
3. Día de diseño con datos calculados con ENVI-met: se conformó un día de diseño ingresando los datos manualmente para el 30 de Marzo con la opción "SizingPeriod:DesignDay", la cual describe días de diseño (similar a las condiciones de diseño de ASHRAE pero en un día completo) usando algunas características del día y EnergyPlus completa los cálculos faltantes (por ej., posición solar). Los datos ingresados necesarios se especifican en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos microclimáticos ingresados en EnergyPlus para un día de diseño. Fuente: Elaboración propia; 2018.

Temperatura de bulbo seco máxima	29.4 °C
Rango diario de temperatura de bulbo seco	7 °C
Temperatura de rocío	1.83 °C
Presión barométrica	91860 Pa
Velocidad de viento	2.12 m/s
Dirección de viento	124.6 °
Índice de claridad de cielo	0.6

## Resultados

### Contrastación de temperaturas interiores

Se presentan los resultados de las cinco simulaciones realizadas -tres modelos simulados sobre la copa de los árboles y dos modelos simulados bajo la copa de los árboles-, de acuerdo a las tres conformaciones de ingreso de datos climáticos. El esquema puede verse en la Figura 7.



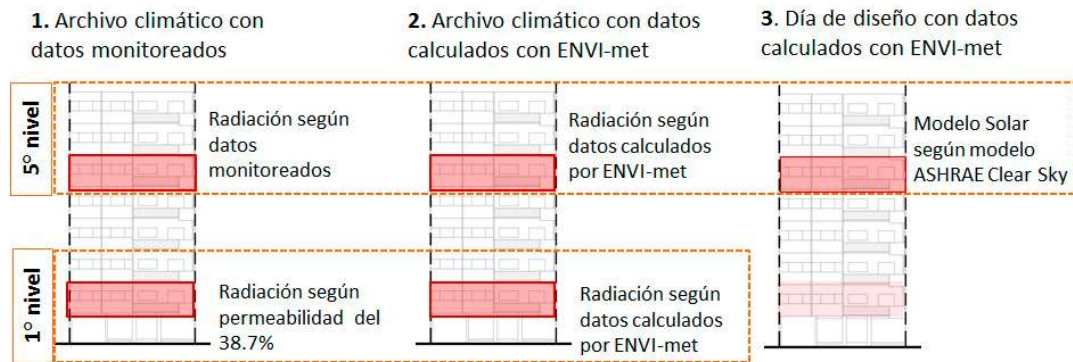


Figura 7. Esquema de ingreso de datos climáticos para cada nivel en altura evaluado. Fuente: Elaboración propia; 2018.

La Figura 8 grafica los resultados de las simulaciones del espacio interior evaluado (estar) para cada nivel en altura. Los resultados de los modelos simulados con datos monitoreados y datos calculados por ENVI-met muestran temperaturas interiores similares tanto bajo como sobre la copa de los árboles. En ambos casos la curva con datos monitoreados cuenta con mayor delta T: en el 1° nivel dicha diferencia ( $\Delta T$ ) es de 1.5°C con datos monitoreados y de 1.1°C con datos de ENVI-met; mientras que en el 5° nivel las diferencias son de 2.9°C con datos monitoreados, de 2.5°C de acuerdo al archivo climático con datos de ENVI-met y de 1.9°C con la opción del día de diseño. El aplanamiento de la curva de temperatura calculada con ENVI-met ocurre con mayor intensidad en las simulaciones de estaciones intermedias (otoño-primavera) e invierno, debido a que el ángulo solar es menor (Kántor et al., 2014).

Los valores dados en las temperaturas máximas resultan similares en todos los casos evaluados, con diferencias que pueden considerarse despreciables, menores a 0.2°C. Las mayores diferencias se encuentran en las temperaturas mínimas: en el primer nivel ésta es de 0.37°C; y en el quinto nivel la diferencia de los datos monitoreados respecto a los datos con ENVI-met es de 0.50°C, mientras que entre los datos monitoreados y el día de diseño resulta de 1.25°C.

La Figura 9 muestra la relación de temperaturas con datos monitoreados y datos de ENVI-met, en donde puede verse un grado de ajuste importante. Para el primer nivel el  $R^2$  es de 0.97; mientras que en el quinto nivel la relación entre los datos monitoreados y los datos con ENVI-met es de 0.98 y entre los datos monitoreados y los datos con un día de diseño el  $R^2$  es de 0.94.

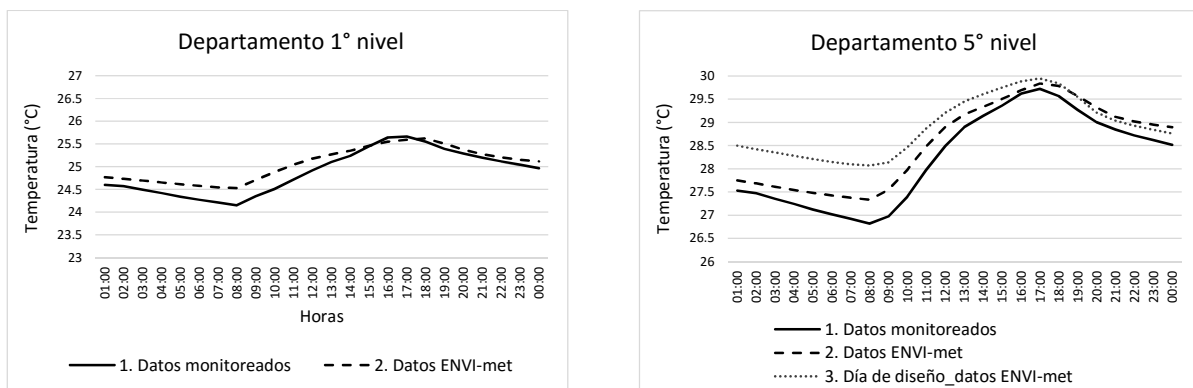


Figura 8. Temperaturas interiores con diferentes conformaciones de ingreso de datos climáticos para el 1° y 5° nivel. Fuente: Elaboración propia; 2018.

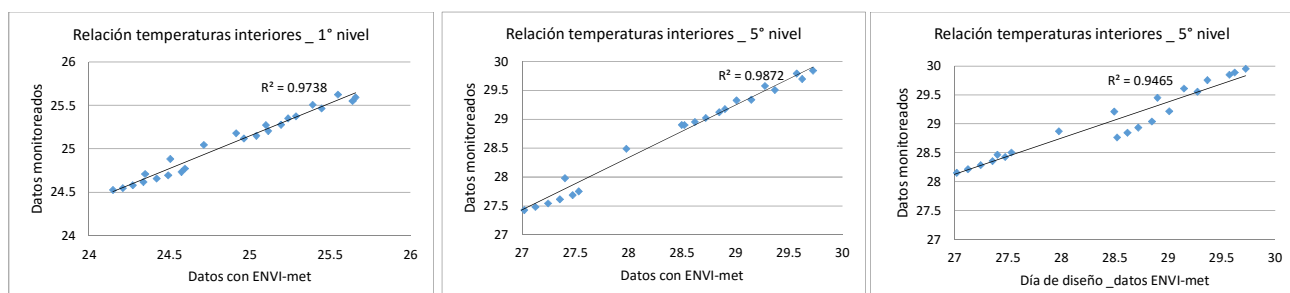


Figura 9. Relación de temperaturas interiores de acuerdo a los datos monitoreados y calculados por ENVI-met. Fuente: Elaboración propia; 2018.

## Discusión y Conclusiones

Los resultados de la presente investigación revelan las capacidades y ventajas de trabajar con ENVI-met como herramienta para la generación de datos climáticos que incorporan y reflejan la influencia del entorno urbano. El alto grado de ajuste - $R^2$  superiores a 0.94- de la temperatura del aire interior monitoreada y ajustada con EnergyPlus versus la utilizada con los datos microclimáticos calculados con el simulador urbano ENVI-met, apoya la fiabilidad de los resultados predictivos del método de integración de ambos softwares.

Este trabajo abre distintas posibilidades de trabajos a futuro. Por un lado, la exploración de las variables climáticas utilizadas para el objeto de entrada del día de diseño (SizingPeriod: DesignDay), el cual si bien es óptimo para dimensionar sistemas y calcular cargas de calefacción/enfriamiento, puede presentar variaciones en relación a las condiciones reales del contexto. De acuerdo a lo descrito en el manual de EnergyPlus (EngineeringReference) la ecuación utilizada por el modelo de ASHRAE para cielo claro usualmente sobreestima la radiación que recibe el edificio debido a que no da el máximo valor de radiación normal directa que ocurrirá en el mes, sino un valor representativo en condiciones de cielo claro para una atmosfera relativamente seca y limpia. Para atmósferas muy claras, el valor puede ser hasta 15% mayor que el predicho por esta ecuación. Esto se corroboró en los resultados térmicos interiores del modelo que utilizó un día de diseño, en donde las temperaturas interiores son mayores.

Por otro lado, los resultados obtenidos muestran temperaturas mínimas interiores mayores con los datos calculados por ENVI-met, lo cual puede indicar que los cálculos del simulador urbano reflejan la dificultad del enfriamiento nocturno dado por el follaje arbóreo. Esto indica la potencialidad de explorar el efecto de sombreado de la vegetación con ENVI-met.

En trabajos futuros se prevé extender este método de simulación integrada a escenarios urbanos que modifiquen parámetros relacionados a la materialidad de la envolvente, la morfología edilicia, densidad, porcentaje de vegetación en canales viales, etc. Este conocimiento generado brindará directrices para la planificación urbano/ambiental en pos de alcanzar pautas de diseño en base a configuraciones urbanas que alcancen mejoras en el consumo energético edilicio para ciudades de clima árido.

## Agradecimientos

- PICT 2017-3248: Valoración Energética y Ambiental de los Espacios Urbanos en Ciudades de Zonas Áridas. Generación de Herramientas de Calificación y Evaluación Predictiva. Titular: Correa Cantaloube, Érica.
- PICT 2013-2036: Uso racional de la energía en edificios en altura: integración en la envolvente de sistemas de acondicionamiento pasivo y sistemas productores de energía (fotovoltaicos y solares térmicos). Titular: Ganem, Carolina.

## Referencias

- Alchapar N., Correa E. (2016). The Use of Reflective Materials as a Strategy for Urban Cooling in an Arid Oasis City. *Sustainable Cities and Society*, 27 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.015>
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., Cantón, M. A. (2014). Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 69, 22–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.012>
- Alchapar N. Pezzuto C., Correa E., Labaki L. (2017) The Impact of Different Cooling Strategies on Urban Air Temperatures: The Cases of Campinas, Brazil and Mendoza, Argentina. *Theory & Application Climatology* 130 p. 35 – 50. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1851-5>
- Balter, J. (2015) Sustentabilidad de edificios en altura en Ciudades-Oasis. Características arquitectónicas y ambientales para el caso de la ciudad de Mendoza. Tesis doctoral. Universidad Nacional de La Plata.
- Balter, J., Ganem, C., Cantón, M.A. (2013) Evolución morfológica y materialización en edificios en altura en la ciudad de Mendoza. Incidencias en el comportamiento térmico interior. *Revista Área* n°19, p. 8 - 25. FADU- UBA.
- Balter, J., Ganem, C., Dicoli, C. (2016) On high-rise residential buildings in an Oasis-city: thermal and energy assessment of different envelope materiality above and below tree canopy. *Energy and Buildings* 113, 61-73.
- Barea, G., Mercado, V. (2016) Estudio de sistemas de climatización natural innovativos (Ventanas Multiazimutales - SIRASOL) en distintas localidades – 3er Congreso Sudamericano de Simulación de Comportamiento de Edificios. 4ta Jornada – BIM – FADU.UBA.



Bruse E. ENVI-met 3.1. On-Line Manual. 2006. Disponible en: <http://www.envi-met.com>.

- Bórmida, E. (1984). Mendoza, una ciudad Oasis. Mendoza: Universidad de Mendoza.
- Cantón, M.A., Cortegoso, J.L., De Rosa, C. (1994). Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina. *Energy Buildings* 20.
- Cantón, M.A., Mesa, A., De Rosa, C. (2004) Análisis de los modelos de desarrollo del arbolado urbano como estrategia de control de la radiación solar en la estación cálida. II Reunión Binacional de Ecología. Ecología en Tiempos de Cambio, Mendoza.
- Energy Plus. The official building simulation program of the United States Department of Energy. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/> [accessed 16/06/2013]
- Filippin, C., Flores Larsen, S., Mercado, V., (2013) Monitoreo, simulación y calibración del Comportamiento térmico de un edificio bioclimático en Argentina. XII ENCAC Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construido y VIII ELACAC Encuentro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construido. Setiembre. Brasilia. Brasil
- Grossi Gallegos, H., Righini, R. (2011). Acerca de la representatividad de los valores de radiación solar global medidos por la Red Solarimétrica en la Pampa Húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- Kántor N, Lin T, Matzarakis A (2014). Daytime relapse of the mean radiant temperature based on the six-directional method under unobstructed solar radiation. *International Journal of Biometeorology* 58 (7) 1615–1625
- Kolher, N., Hassler, U. (2002). The building stock as a research object. *Building Research & Information* 30.
- Kuo-Tsang, H., Yi-Jhen, L. (2017). Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand. *Energy and Buildings* 154, 448-464.
- Longobardi, M., Hancock, M. (2000). Field trip strategies. *Proceedings of TIA.Oxford*.
- Martinez, C., Ruiz, M., Atencio, L. (2017). Proyecto integral de forestación y reforestación urbana para Mendoza. Sustentabilidad ambiental del bosque urbano para ciudades de zonas áridas de Argentina"- Etapa 1 UNICIPIO - Provincia de Mendoza. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía INAHE – CCT CONICET Mendoza. 96 pp.
- Mercado M.V., Barea Paci, G., Esteves, A., Filippín, C. (2018) Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Revista Hábitat Sustentable* Vol. 8, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 54-67 <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>
- Mercado, V., Esteves, A., Filippín, C. (2010) Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Ambiente Construido*, Vol. 10, tomo 2; *Revista On-line*: <http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido>. pp.87-101.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being e Current State and Trends*. Washington, DC: Island Press.
- Morakinyo, T.E., Dahanayake, K.W.D., Adegun O.B., Balogun A.A. (2016). Modelling the effect of tree shading on summer indoor and outdoor thermal condition of two similar buildings in a Nigerian university. *Energy and Building* 130, 721-732.
- Oke, T.R. (2004). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. Iom Report. World Meteorological Organization. Geneva.
- Pastore, L., Corrao, R., Heiselberg, P.K. (2017). The effects of vegetation on indoor thermal comfort: The application of a multi-scale simulation methodology on a residential neighborhood renovation case study. *Energy and Buildings* 146, 1-11.
- Schwed, D., Sheng, M. (2017) Assessment of the annual energy demand for cooling of buildings in their urban context in 26 cities in China. *Procedia Engineerin* 198, 305-312.
- Secretaría de energía (2014) Informe Nacional de Monitoreo de la Eficiencia Energética de la República Argentina, 2014. Disponible de: [http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37142/S1420670\\_es.pdf?sequence=4](http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37142/S1420670_es.pdf?sequence=4). Acceso en: Enero 2018.
- Sosa, M., Correa, E., Cantón, M. (2018) Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy and Buildings*; 168 137 -146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.006>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., Meng, Q. (2012) An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Building* 54, 243-251.