

IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA ESTADÍSTICA PARA LA EVALUACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR DE ENTORNOS URBANOS DE LA REGIÓN ANDINA.

Arboit, Mariela¹; Diblasi, Ángela² y de Rosa, Carlos³

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV)
Instituto de Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (INCIHUSA - CONICET)
C.C.131, (5500) Mendoza, Argentina. Tel. 0261-4288797 – Fax 0261-4287370 E-mail: marboit@lab.cricyt.edu.ar

RESUMEN: El presente trabajo se inserta en una línea de investigación, la bioclimatología urbana, que se está desarrollando en el LAHV desde 1999. El objetivo es generar conocimientos y metodologías que permitan realizar propuestas conducentes a una mayor sustentabilidad energético-ambiental de los sistemas urbanos regionales, en función de sus características morfológicas y del recurso solar disponible. Se toma el Área Metropolitana de Mendoza (AMM) como caso de estudio. Se prevé la transferencia de resultados y conclusiones a organismos de planificación urbana y energética para la implementación de normas a ese fin. Las tareas ya realizadas y comunicadas han partido del reconocimiento de zonas urbanas morfológicamente homogéneas, identificación de variables morfológicas; selección de una muestra representativa de las unidades de análisis (manzanas urbanas); creación de indicadores relevantes del aprovechamiento solar, cálculo de los mismos e implementación de análisis estadístico multivariado, como herramienta de análisis. El estudio que se presenta se desarrolla a partir de los indicadores relevantes propuestos y los resultados de su análisis estadístico. Los indicadores expresan relaciones entre morfología urbana y acceso al recurso solar para calefacción de espacios en el AMM, incluyen: Factor de Asoleamiento Efectivo (FAE), Factor de Asoleamiento Útil (FAU), el Factor de Asoleamiento Volumétrico (FAV) y los Ahorros Potenciales de Energía (APE). Los resultados del análisis estadístico han permitido evaluar el peso relativo de cada variable morfológica sobre cada indicador, proponiendo además una ecuación sencilla que permite calcular el valor del indicador según distintas alternativas morfológicas y combinaciones de las mismas, lo que constituye la parte sustancial de este trabajo. Solamente se presentan los valores correspondientes a FAE y FAU.

Palabras clave: Desarrollo urbano sustentable, Morfología urbana, Potencial solar, Reciclaje energético, Metodología estadística.

1. INTRODUCCION

En regiones áridas templado-frías con un generoso recurso solar, tales como las provincias andinas del centro-oeste de Argentina, es posible obtener importantes economías de energía convencional implementando sistemas solares pasivos de calefacción de espacios en edificios urbanos. Dichas economías están en función de una serie de variables definidas por las características morfológicas del medio urbano y de las construcciones existentes en el mismo.

Aún cuando el impacto del clima en las condiciones térmicas de los edificios es claramente predecible, resulta más difícil estimar sus efectos sobre las condiciones ambientales de los espacios urbanos en los que existe una mayor complejidad de relaciones entre las variables intervinientes. Esta situación plantea dificultades cuando se apunta a optimizar el uso de la energía en los edificios urbanos existentes, lo que involucra decisiones a nivel de planeamiento urbano y diseño de los edificios, considerando además la incorporación de tecnologías adecuadas que permitan reducciones en el consumo de energía convencional. (Owens, 1986)

Por otra parte, el máximo reciclaje posible del parque edilicio existente es esencial para minimizar los impactos ambientales a lo largo de las tres etapas fundamentales del ciclo de vida de las construcciones: desde la reducción de las extracciones de materiales de canteras, a través de la mínima demanda de energía y sus consecuentes emisiones durante el ciclo operativo, hasta la máxima reducción de los residuos sólidos sobre el ecosistema en su disposición final.

El objetivo principal del presente trabajo es profundizar el conocimiento sobre los indicadores energéticos que permitirán el establecimiento de bases técnicas para normativas sobre planeamiento energético y urbano en el futuro, para poder mejorar integralmente la sustentabilidad del desarrollo.

Para obtener economías en el consumo de energía, se propone maximizar el uso del recurso solar para calefacción de espacios y mejorar las características de conservación de energía de los edificios, en el marco de políticas que apunten a alcanzar la mayor sustitución posible de combustibles fósiles y el mínimo impacto ambiental (Jenks et al., 1996).

El Área Metropolitana de Mendoza (AMM), cuenta actualmente con una población cercana al millón de habitantes y ocupa una extensión aproximada de 114.000 ha. Los entornos urbanos de baja densidad representan aproximadamente el 90 % de la superficie urbanizada y por lo tanto, queda plenamente justificado su estudio en términos morfológicos y cuantitativos para desarrollar y verificar nuevas alternativas energéticamente sustentables para esas densidades.

La región estudiada está localizada en el centro-oeste de Argentina (latitud: -32,88, longitud: 68,85, altitud: 827 m.s.n.m.); presenta un clima mesotermal árido con inviernos templado-fríos, veranos cálido-secos e intensa radiación solar durante todo el año (media anual: 18,06 mj/m² día); otros datos climáticos significativos son: horas anuales en confort: 21,53 %,

¹ Becaria de Formación Doctoral CONICET

² Profesional Principal CONICET

³ Investigador Principal CONICET

calefacción necesaria: 70,14 % y enfriamiento necesario: 8,33 %. Los valores de las variables climáticas del AMM proveen suficiente justificación para proponer el máximo aprovechamiento del recurso solar en áreas urbanas, en conjunción con estrategias no-tradicionales de conservación de energía en las construcciones de la ciudad. Esto permitirá un avance significativo en el camino hacia la futura sustentabilidad energética y ambiental de los medios urbanos regionales. (Basso et al., 2003), (Fernández et al., 2001).

2. METODOLOGIA. TRABAJO PREVIO

Si bien el desarrollo metodológico de esta investigación ha sido ya parcialmente informado en publicaciones previas (Arboit, et al. 2007), se estima necesario presentar aquí una síntesis del mismo con el fin de facilitar la comprensión de los resultados de las tareas recientes que se presentan por primera vez en este trabajo.

Las etapas ya concluidas han sido:

1. Recopilación de la información catastral disponible y mapeo de la misma para toda el AMM. Zonificación de áreas de baja densidad a considerar en el estudio.

2. Definición de un conjunto de variables morfológicas, urbanas y edilicias, para el análisis de su incidencia en el acceso al recurso solar de los edificios urbanos. Se toma a la manzana urbana como unidad de análisis.

Variables urbanas: Forma de las manzanas: Está referida a la proporción de los lados de manzanas aproximadamente rectangulares, según dichas proporciones se determinan 5 (cinco) tipos y se los identifica mediante dichas proporciones: 5/5 (cuadrada), 5/4, 5/3, 5/2 y 5/1. **Orientación de las manzanas:** Se refiere al ángulo formado por el lado más largo de la manzana y la directriz N-S. Se determinaron 12 tipos en tramos de 15° cada uno, resultando 0 (0°) para la directriz norte, +6 (+ 90°) para el este y -6 (- 90°) para el oeste. **Ancho de los canales viales:** Se toman los anchos reales de calles existentes entre líneas municipales en el AMM: 13 y 16 m. (secundarias), 18 y 20 m. (primarias) y 30 m. (avenidas). **Características de la arboleda urbana:** Se compone de 3 variables: magnitud, permeabilidad y plenitud. **Magnitud:** es función del tamaño del fenotipo de la especie arbórea; se definen 5 tipos: 1(uno) especies de mayor tamaño de diámetro de copa y altura, sucesivamente hasta 5 (cinco) para ejemplares jóvenes no más altos de 1,5 m. **Permeabilidad:** se refiere a la cantidad de radiación global media invernal que atraviesa la copa de los árboles, respecto a la cantidad de radiación global en el mismo periodo, sin obstrucciones. Se la considera en valores porcentuales. **Plenitud:** expresa la relación porcentual entre el número de árboles existentes alrededor de una manzana urbana y la cantidad máxima posible considerando la distancia adecuada entre individuos, en porcentaje.

Variables edilicias: Morfología edilicia: está representada solamente por 2 (dos) tipos: 1. homogéneas (conjuntos de viviendas sociales morfológicamente homogéneos), 2. heterogéneas (manzanas de construcción lote a lote morfológicamente heterogéneas). **Factor de Forma (FF):** es la relación entre el área de la envolvente de un edificio y su volumen interior. Se expresa en m²/m³. **Factor de Ocupación del Suelo (FOS):** es la relación entre el área de un edificio construida en planta baja y la superficie total construible del terreno. Se expresa como fracción. (Código de Edificación de Mendoza, 2000). **Factor de Ocupación Total (FOT):** es la relación entre el área total construida de un edificio y la superficie total construible del terreno. Se expresa como fracción. (Código de Edificación de Mendoza, 2000)

Las últimas 3 (tres) variables se calculan como sumatorias de todos los edificios situados en cada manzana, resultando en un valor único, como si se tratara de un solo edificio. (Tabla 1)

3. Selección de una muestra representativa de manzanas urbanas para su análisis detallado. Se determina un conjunto preliminar de 32 unidades para cada una de las 3 (tres) variables consideradas como primarias: forma de las manzanas, orientación de las manzanas y morfología edilicia; a partir de su lectura sobre el mapa confeccionado. Se establece la representatividad porcentual de los distintos tipos de cada variable y según la misma, se procede a completar un conjunto de 32 unidades por variable. La distribución espacial de las mismas se realiza mediante un método aleatorio (random). Se completa el procedimiento relevando "in-situ" el resto de las variables: características de la arboleda y el cálculo de los tres variables secundarias restantes: FF., FOS. y FOT.

Escenario N°	VARIABLES URBANAS						VARIABLES EDILICIAS			
	Manzanas		Ancho del Canal Vial (m)	Arbolado Urbano			Morfología	Factor de Forma	FOS	FOT
	Forma	Orientación		Magnitud	Permeabilidad	Plenitud				
1	05:02	-5	20	2 ^a	52	57	Irregular	0.49	0.74	0.97
2	05:03	-6	20	2 ^a	52	55	Irregular	0.64	0.56	0.78
3	05:02	-6	20	2 ^a	52	65	Irregular	0.6	0.72	0.98
4	05:03	87	20	2 ^a	43	69	Irregular	0.61	0.69	0.91
5	05:03	86	20	2 ^a	52	70	Irregular	0.59	0.74	1.00
6	05:04	-6	20	1 ^a	35	77	Irregular	0.68	0.6	0.66
7	05:05	-5	20	1 ^a	43	71	Irregular	0.63	0.68	0.75
8	05:05	-1	20	1 ^a	51	81	Irregular	0.89	0.57	0.61
9	05:04	-1	20	1 ^a	51	79	Irregular	0.64	0.58	0.61
10	05:04	74	20	1 ^a	43	76	Irregular	0.65	0.62	0.62
11	05:04	74	20	1 ^a	43	68	Irregular	0.88	0.52	0.52
12	05:04	74	16	1 ^a	43	69	Irregular	0.57	0.67	0.67
13	05:02	-23	13	2 ^a	43	64	Regular	0.62	0.55	0.57
14	05:02	-23	13	2 ^a	43	74	Regular	0.63	0.55	0.56
15	05:02	-23	13	2 ^a	43	85	Regular	0.64	0.51	0.52
16	05:02	-23	13	2 ^a	43	76	Regular	0.59	0.53	0.54
17	05:02	-23	13	2 ^a	43	83	Regular	0.53	0.53	0.8
18	05:02	-23	13	2 ^a	43	67	Regular	0.54	0.52	0.79
19	05:01	65	15	3 ^a	43	54	Regular	0.68	0.52	0.55
20	05:01	65	15	3 ^a	43	57	Regular	0.56	0.61	0.61
21	05:01	65	15	3 ^a	43	54	Regular	0.62	0.57	0.59
22	05:02	65	15	3 ^a	39	47	Regular	0.62	0.58	0.58
23	05:02	65	15	3 ^a	39	67	Regular	0.64	0.55	0.56
24	05:02	65	15	3 ^a	39	56	Regular	0.7	0.52	0.53
25	05:02	-24	15	2 ^a	43	66	Regular	0.63	0.60	0.6
26	05:02	-24	15	2 ^a	43	71	Regular	0.61	0.57	0.57
27	05:01	-24	15	2 ^a	43	67	Regular	0.61	0.58	0.58
28	05:02	-24	15	2 ^a	43	57	Regular	0.64	0.54	0.54
29	05:03	67	18	1 ^a	43	79	Regular	0.58	0.63	1.05
30	05:03	67	18	1 ^a	43	68	Regular	0.56	0.65	1.08
31	05:03	67	18	1 ^a	43	74	Regular	0.56	0.66	1.08
32	05:03	67	18	1 ^a	43	68	Regular	0.53	0.69	1.16

Tabla 1: Listado de valores de las variables urbanas y edilicias del conjunto muestral.

4. Determinación del acceso al sol de superficies verticales orientadas al norte, mediante el uso de un modelo gráfico-computacional: (Mesa et al., 2000) el mismo trabaja dibujando y luego midiendo las áreas de los distintos sectores graficados

sobre perspectivas axonométricas “vistas desde el sol”. El modelo se corre para las 5 (cinco) horas centrales del día y para 6 (seis) días-tipo mensuales de invierno. Se realizan 2 (dos) series de corridas, una con enmascaramientos sólidos (edificios), la restante con enmascaramientos sólidos + permeables (edificios + árboles) (Cantón et al., 1994).

5. Se calculan seguidamente los valores del comportamiento térmico de las unidades de la muestra para 2 (dos) situaciones diferenciadas: i. la situación actual sin cambios y ii. maximizando la captación solar sobre todas las superficies verticales al norte y reduciendo sustancialmente las pérdidas de energía a través de la envolvente. Se proponen sistemas de GD con uno y dos vidrios y aislación nocturna. Se utiliza para el cálculo el método: Relación Carga/Colector del Los Alamos National Laboratory (Balcomb et al., 1983). Los indicadores calculados incluyen: i. Coeficientes Global, Neto y Volumétrico de Pérdidas, ii. Area Colectora, iii. Relación Carga/Colector, iv. Fracción de Ahorro Solar y Energía Auxiliar necesaria.

6. A continuación se desarrolla un conjunto de indicadores solares expresivos de las distintas relaciones entre la morfología urbana y el aprovechamiento solar de las unidades de análisis:

• **Factor de Asoleamiento Efectivo (FAE):** Expresa la relación entre la sumatoria de la radiación incidente sobre áreas de fachadas orientadas al norte (+/-15°), parcial y totalmente asoleadas, considerando enmascaramientos sólidos (edificios) y permeables (árboles), para cada hora del día-tipo mensual de cálculo, durante un ciclo anual de calefacción y la sumatoria de la radiación incidente sobre las mismas áreas, libres de todo enmascaramiento, durante el mismo periodo, como porcentaje. El FAE proporciona una medida del enmascaramiento de superficies potencialmente colectoras para calefacción de espacios, en función de las variables de la morfología urbana consideradas. Su expresión matemática es:

$$FAE = \frac{\sum_{m:4}^{08} \sum_{d:1}^{30} \sum_{h:9.30}^{14.30} [A_{fn} - (A_{es} + (A_{ep} \cdot (1-P)))] \cdot R}{Nm \cdot Nd \cdot Nh \cdot (A_{nw} \cdot R_{max})} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:
 A_{fn}: Área total potencialmente colectora en fachadas norte (m²)
 A_{es}: Área de enmascaramiento sólido (construcciones): fachada potencialmente colectora afectada por las sombras proyectadas por construcciones edilicias próximas (m²)
 A_{ep}: Área de enmascaramiento permeable (árboles): fachada potencialmente colectora afectada por las sombras proyectadas por el arbolado urbano, se aplican los porcentajes de permeabilidad solar de cada especie vegetal, para determinar el área de captación real (m²)
 P: Factor de Permeabilidad: porcentajes de permeabilidad solar de cada especie vegetal (%)
 R (m-d-h): Radiación horaria diaria en fachadas norte para cada mes de la estación de calefacción (Wh/m²)
 Nm: N° de meses a calefaccionar (n),
 Nd: N° de días mensuales (5),
 Nh: N° de horas diarias(n)

• **Factor de Asoleamiento Útil (FAU):** Expresa la relación entre la energía solar incidente sobre la sumatoria de las áreas verticales orientadas al norte, no enmascaradas y la energía disponible sobre el total de la manzana considerada; es decir, la sección normal del “prisma máximo” de radiación, sobre la superficie edificable del terreno y las del ancho de las calles al este, sur y oeste, durante un ciclo anual de calefacción, Si bien el indicador tiene poca aplicación práctica, el conocimiento de su valor es útil a efectos de demostrar la reducida fracción de la energía solar incidente que es aprovechable para calefacción solar de espacios mediante sistemas pasivos, en las configuraciones urbanas actuales.

Su expresión matemática es:

$$FAU = \frac{\sum_{m:4}^{08} \sum_{d:1}^{30} \sum_{h:9.30}^{14.30} A_{afn} \cdot R_{n.s.}}{Nm \cdot Nd \cdot Nh \cdot (A_{tp} \cdot R_{n.s.}_{max})} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:
 A_{afn}: Areas asoleadas de las fachadas norte vistas desde el sol, (m²).
 A_{tp}: El área total de la sección normal del prisma de radiación sobre la superficie edificable de la manzana urbana, (m²).
 R_{ns} (m-d-h): Radiación horaria diaria en fachadas norte para cada mes de la estación de calefacción (Wh/m²)
 Nm: N° de meses a calefaccionar (n),
 Nd: N° de días mensuales (5),
 Nh: N° de horas diarias(n)

• **Factor de Asoleamiento Volumétrico (FAV):** Expresa la relación entre la energía total neta incidente sobre superficies verticales al norte (+/- 15°), no enmascaradas, durante un ciclo anual de calefacción y el volumen total de los espacios a calefaccionar. El indicador es posiblemente el que mejor describe el potencial solar para calefacción de espacios mediante sistemas solares pasivos, en particular, la Ganancia Directa, en MJ/m² año. Su expresión matemática es:

$$FAV = \frac{\sum_{m:4}^{08} \sum_{d:1}^{30} \sum_{h:9.30}^{14.30} [A_{fn} - (A_{es} + (A_{ep} \cdot (1-P)))] \cdot R}{Volumen \text{ a calefaccionar}} \quad (3)$$

Donde:
 A_{fn}: Área total potencialmente colectora en fachadas norte (m²)
 A_{es}: Área de enmascaramiento sólido (construcciones): fachada potencialmente colectora afectada por las sombras proyectadas por construcciones edilicias próximas (m²)
 A_{ep}: Área de enmascaramiento permeable (árboles): fachada potencialmente colectora afectada por las sombras proyectadas por el arbolado urbano, se aplican los porcentajes de permeabilidad solar de cada especie vegetal, para determinar el área de captación real (m²)
 P: Factor de Permeabilidad: porcentajes de permeabilidad solar de cada especie vegetal (%)
 R (m-d-h): Radiación horaria diaria en fachadas norte para cada mes de la estación de calefacción (Wh/m²).
 m: N° de meses a calefaccionar (n), d: N° de días mensuales (5), h: N° de horas diarias(n).

• **Ahorros Potenciales de Energía (APE):** Puede ser expresado como el cociente entre la sumatoria de la energía ahorrada por el incremento de medidas de conservación más la energía neta (no enmascarada) ganada mediante el incremento de áreas

colectoras asoleadas al norte (ambos mediante el reciclado de edificios existentes) y la energía neta perdida por los edificios en su estado actual; es decir, las pérdidas brutas menos la contribución solar existente a través de ventanas asoleadas orientadas al norte, durante un ciclo anual de calefacción, expresadas como porcentajes. El indicador es el que mejor expresa las posibilidades de ahorro energético mediante el reciclado de las construcciones existentes. Su expresión matemática es:

$$APE = \frac{Q_{\text{cons. renov}} + Q_{\text{solar renov}}}{Q_{\text{tot. exit}} - Q_{\text{solar exit}}} \cdot 100 \quad (4)$$

Donde:
 Q tot. exit: Calor necesario para satisfacer la carga térmica anual actual de calefacción. (Wh/°C)
 Q solar. exit: Contribución solar existente. (Wh/°C)
 Q cons. renov: Calor necesario para satisfacer la carga térmica anual de calefacción de la situación teórica a alcanzar (situación optimizada) (Wh/°C).
 Q solar. renov: Contribución solar teórica a alcanzar (situación optimizada) (Wh/°C).

Se calcularon los valores de los 4 (cuatro) indicadores para el total del conjunto muestral de 32 unidades, (Tabla 2) concluyendo en este punto la exposición de la labor ya informada.

ESCENARIO N°	FAE %	FAU %	FAV MJ/m3	APE %
1	69	11	79	78
2	74	12	106	80
3	70	15	110	80
4	71	12	91	79
5	70	8	71	76
6	65	12	86	77
7	75	14	86	78
8	71	12	116	80
9	66	12	75	79
10	74	10	81	75
11	63	11	100	73
12	78	10	69	74
13	77	10	91	75
14	75	10	88	74
15	73	8	80	73
16	72	9	80	74

ESCENARIO N°	FAE %	FAU %	FAV MJ/m3	APE %
17	67	15	96	76
18	76	16	100	77
19	74	6	46	66
20	64	5	39	65
21	73	7	49	67
22	80	8	63	69
23	69	5	44	63
24	71	5	43	61
25	75	12	100	75
26	74	11	97	75
27	68	10	85	73
28	73	9	83	74
29	48	7	30	67
30	50	9	38	66
31	57	9	41	71
32	47	9	37	64
Media	69	10	75	73

Tabla 2: Valores de los indicadores calculados para las unidades del conjunto muestral.

3. METODOLOGÍA – TRABAJO ACTUAL

Vista la cantidad y complejidad, de las variables, de sus interrelaciones y diferentes niveles de incidencia, intervinientes en la definición del potencial de ahorros energéticos, mediante el reciclaje de edificios existentes en entornos urbanos de baja densidad, se decidió recurrir al Análisis Estadístico de Regresión Lineal Múltiple (MERLM) con el fin de determinar el nivel de incidencia de las variables morfológicas (variables explicativas) sobre los distintos indicadores energéticos (variables respuesta), y poder descartar aquellas variables de mínimo impacto. Paralelamente, se obtiene para cada indicador, una ecuación sencilla que permite calcular el valor del mismo, evitando la pesada tarea de determinación del asoleamiento real mediante las 60 corridas del modelo gráfico-computacional. Se elaboró un MERLM para cada uno de los 4 (cuatro) indicadores estudiados. El trabajo presenta resultados y conclusiones para 2 de dichos indicadores: el Factor de Asoleamiento Efectivo (FAE) y Factor de Asoleamiento Útil (FAU).

4. RESULTADOS

Como se ha expuesto, la contribución del análisis estadístico es doble: i. Provee un listado jerarquizado según su nivel de incidencia de las variables explicativas (morfológicas) para explicar las variables respuesta (indicadores energéticos), descartando todas las variables no-significativas; ii. Aporta una herramienta de cálculo simple a partir de los datos obtenidos de la muestra y de los resultados de los 2 (dos) modelos, gráfico y estadístico, mediante una ecuación sencilla.

Con el objeto de generalizar los resultados, a partir de un número limitado de casos, el MERLM permitió correlacionar los valores del potencial solar del parque edilicio urbano actual, resultantes de las simulaciones realizadas con el modelo gráfico-computacional, con el conjunto de variables explicativas urbanas y edilicias. Dichas correlaciones permitieron identificar las alternativas morfológicas más eficientes para las situaciones analizadas.

Los pasos para construir el modelo de la regresión lineal fueron los siguientes: i. Comprobación de los supuestos del modelo. ii. Aplicación de la transformación de Box & Cox. iii. Selección de un subconjunto de variables como las más significativas en la explicación de la variable respuesta mediante el procedimiento step-wise. iv. Estudio de la significación de cada variable (p-value), test de la bondad de ajuste para el modelo, coeficientes de correlación al cuadrado que simbolizan la varianza explicada por el modelo y v. Obtención del error estándar residual (Faraday, 2005), (Venables, 2002), (Box & Cox, 1964). A continuación se presentan los valores obtenidos para los 2 (dos) indicadores estudiados: (Tabla 3).

	TEST DE BONDAD DE AJUSTE			VARIANZA EXPLICADA		RESIDUOS
	F-Estadístico de prueba	GL Grados de Lib.	p-value	R-Cuadrado Múltiple	R-Cuadrado Ajustado	Error estándar residual
FAE	21.14	4-27	5.4e-08	0.758	0.7221	0.1946
FAU	12.1	6-25	2.304e-06	0.7438	0.6823	0.1924

Tabla 3: Valores obtenidos por el Modelo Estadístico de Regresión Lineal Múltiple para los indicadores analizados.

Del modelo lineal estimado para las variables de cada uno de los indicadores elegidos, resultan las siguientes ecuaciones:

$$\log\left(\frac{FAE}{1-FAE}\right) = 4.1969 - 0.1486 \text{ An.calles} - 0.0127 \text{ Plen.arb.} + 0.8547 \text{ Morf.edil.} - 0.4721 \text{ FOT} \quad (5)$$

$$\log\left(\frac{FAU}{1-FAU}\right) = -1.2178 - 0.2308 \text{ Orient} - 0.0393 \text{ Ancalles} - 0.109 \text{ Magniurb} - 0.0167 \text{ Permurb} + 0.502 \text{ Morfedil} + 0.730 \text{ FOT} \quad (6)$$

Para cada indicador es posible obtener, una ecuación simple, que se puede utilizar como herramienta práctica que permite inferir los valores de los indicadores, sin necesidad de recurrir al complejo procedimiento gráfico-computacional de determinación de la incidencia solar. Las ecuaciones correspondientes para los 2 (dos) indicadores se presentan seguidamente:

$$FAE = \frac{[\exp(4.1969 - 0.1486 \text{ An.calles} - 0.0127 \text{ Plen.arb.} + 0.8547 \text{ Morf.edil.} + 0.4721 \text{ FOT})]}{[1 + \exp(4.1969 - 0.1486 \text{ An.calles} - 0.0127 \text{ Plen.arb.} + 0.8547 \text{ Morf.edil.} + 0.4721 \text{ FOT})]} \quad (7)$$

$$FAU = \frac{[\exp(-1.2178 - 0.2308 \text{ Orient} - 0.0393 \text{ Ancalles} - 0.109 \text{ Magniurb} - 0.0167 \text{ Permurb} + 0.502 \text{ Morfedil} + 0.730 \text{ FOT})]}{[1 + \exp(-1.2178 - 0.2308 \text{ Orient} - 0.0393 \text{ Ancalles} - 0.109 \text{ Magniurb} - 0.0167 \text{ Permurb} + 0.502 \text{ Morfedil} + 0.730 \text{ FOT})]} \quad (8)$$

Con los datos obtenidos del conjunto muestral y, los resultados de los modelos Gráfico y Estadístico, se desarrolló una herramienta de cálculo en formato de planilla Excel, que infiere el valor de los indicadores del potencial solar de los entornos urbanos de baja densidad, a través de un cálculo sencillo.

El análisis estadístico de un número importante de casos de estudio permitió correlacionar linealmente los valores calculados de los índices seleccionados con los resultantes de las simulaciones obtenidas por el modelo gráfico-computacional, e identificar las alternativas morfológicas más eficientes para la situación de referencia analizada, (actual sin cambios). Dicha herramienta permite en forma sencilla obtener resultados, comparada con la modelización 3D y cálculo a través del modelo gráfico computacional y ampliar los casos de estudio al total la trama urbana de baja densidad pudiéndose determinar la energía disponible en los entornos urbanos para los usos mencionados. La herramienta derivada del MERLM, para los 2 (dos) indicadores analizados, alcanza en promedio un nivel de confianza del 99%. La verificación posterior y convalidación fuera del conjunto muestral principal (32 manzanas urbanas) se realizó sobre 3(tres) manzanas, obteniéndose una varianza explicada del 71 %.

La Tabla 4 presenta los valores obtenidos para los 2 (dos) indicadores para todo el conjunto muestral.

ESCENARIO N°	FAE		FAU	
	ESTADIST	GRAFICO	ESTADIST	GRAFICO
1	0.70	0.69	0.19	0.11
2	0.73	0.74	0.17	0.12
3	0.68	0.70	0.19	0.15
4	0.68	0.71	0.15	0.12
5	0.68	0.70	0.14	0.08
6	0.68	0.65	0.20	0.12
7	0.69	0.75	0.19	0.14
8	0.68	0.71	0.16	0.12
9	0.68	0.66	0.17	0.12
10	0.69	0.74	0.13	0.10
11	0.73	0.63	0.12	0.11
12	0.81	0.78	0.16	0.10
13	0.76	0.77	0.12	0.10
14	0.74	0.75	0.12	0.10
15	0.72	0.73	0.11	0.08
16	0.74	0.72	0.12	0.09
Media	0.70	0.69	0.13	0.10

Tabla 4: Valores de los indicadores analizados para el conjunto muestral.

En el punto siguiente se presentan los restantes resultados del análisis realizado mediante el uso del MERLM para los 2(dos) indicadores en consideración: i. Listados ordenados según niveles de incidencia, de los valores de las variables morfológicas determinadas por el MERLM, ii. Correlaciones entre los valores del indicador y los valores máximo y mínimo encontrados en las unidades del conjunto muestral y iii. Análisis comparativo de los resultados de sustituir todos los valores de las variables morfológicas determinadas estadísticamente, agrupando los más favorables y los menos favorables en cada caso.

4.1 FACTOR DE ASOLEAMIENTO EFECTIVO

	Coefficientes:	Estimate	Error Estándar	p-value
FAE	(Intercepción)	4.196950	0.465424	1.24e-09 ***
	Morfología Edilicia	0.854698	0.147392	3.60e-06 ***
	Ancho de Calles	-0.148641	0.029006	2.18e-05 ***
	Plenitud del Arbolado	-0.012760	0.003833	0.00253 **
	FOT	-0.472146	0.227477	0.04758 *

Tabla 5: Variables seleccionadas por el MERLM para FAE, en orden decreciente.

Correlaciones: FAE/ Morfología edilicia, FAE/ ancho de calles, FAE/ Plenitud del arbolado y FAE/ FOT. Cuadros comparativos de los resultados de agrupar las alternativas más favorables y las menos favorables de las variables ordenadas por el MERLM.

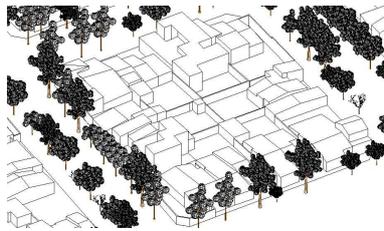


Figura 1: Axonometría del Escenario 12

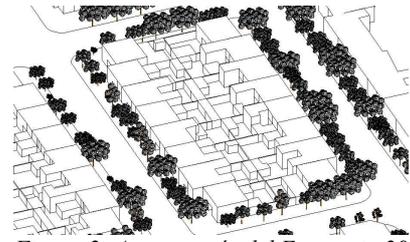


Figura 2: Axonometría del Escenario 29

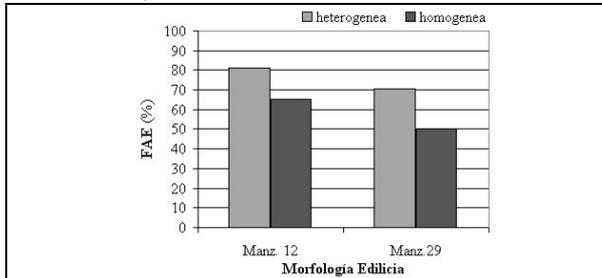


Figura 3: Correlación FAE/ Morfología edilicia

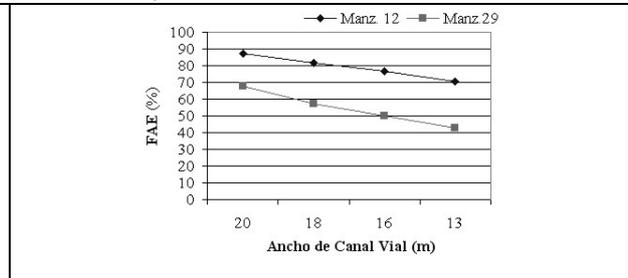


Figura 4: Correlación FAE/ Ancho de Canal Vial

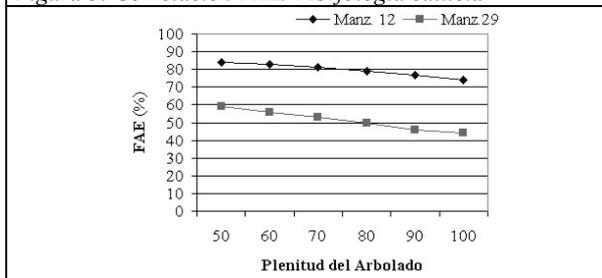


Figura 5: Correlación FAE/ Plenitud del Arbolado

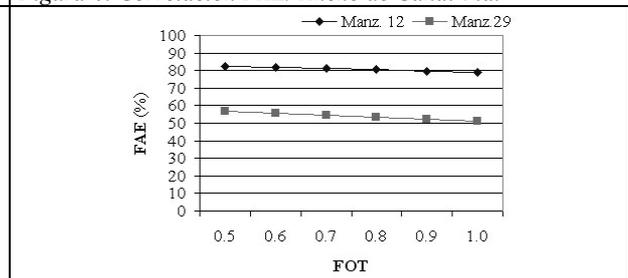


Figura 6: Correlación FAE/ FOT

4.2 FACTOR DE ASOLEAMIENTO ÚTIL

	Coefficientes:	Estimate	Error Estándar	p-value
FAU	(Intercepción)	-1.21782	0.60600	0.055385
	Orientación de las manzanas	-0.23076	0.05918	0.000642 ***
	Morfología Edilicia	0.50222	0.15804	0.003924 **
	FOT	0.73066	0.24727	0.006728 **
	Ancho de Calles	-0.03933	0.03016	0.204115
	Magnitud del arbolado	-0.10910	0.07091	0.136473
	Permeabilidad del arbolado	-0.01658	0.01095	0.142341

Tabla 6: Variables seleccionadas por el MERLM para FAU, en orden decreciente.

Correlaciones: FAU/ Orientación de Manzanas, FAU/Morfología edilicia, FAU/FOT, FAU/Ancho de calles, FAU/ Magnitud del arbolado y FAU/Permeabilidad del arbolado.

Cuadros comparativos de los resultados de agrupar las alternativas más favorables y las menos favorables de las variables ordenadas por el MERLM.

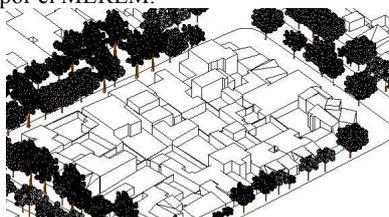


Figura 7: Axonometría del Escenario 6

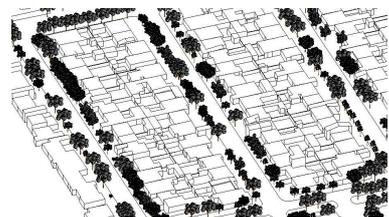


Figura 8: Axonometría del Escenario 19

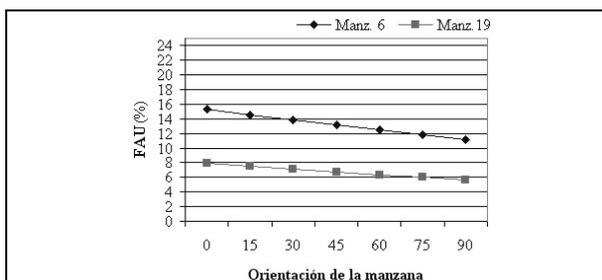


Figura 9: Correlación FAU/ Orientación de Manzana

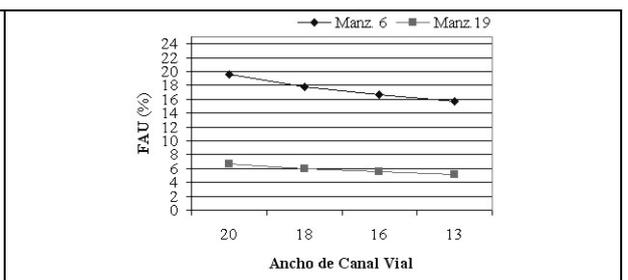


Figura 10: Correlación FAU/ Ancho de Canal Vial

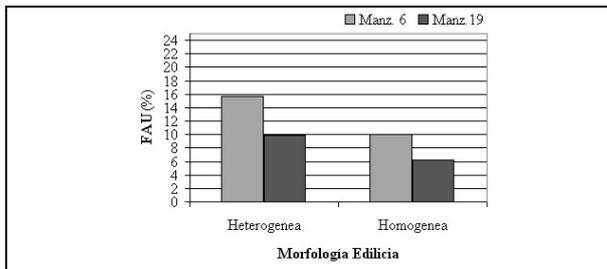


Figura 11: Correlación FAU/ Morfología Edilicia

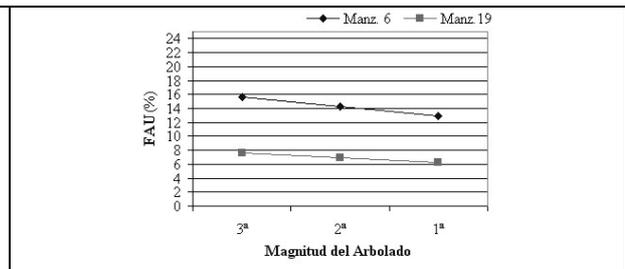


Figura 12: Correlación FAU/ Magnitud del Arbolado

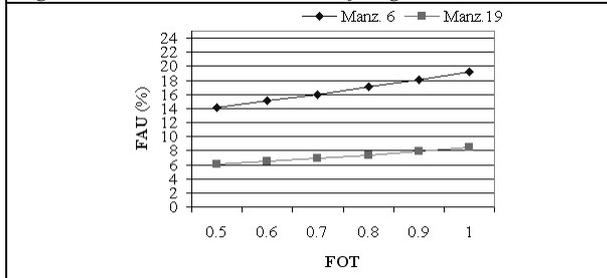


Figura 13: Correlación FAU/ FOT

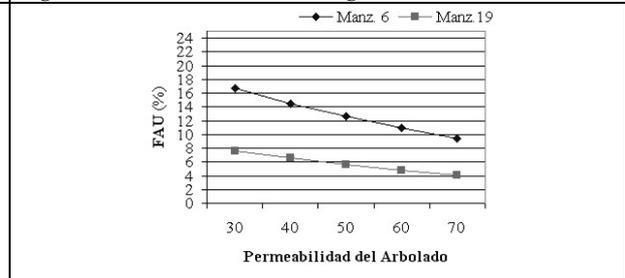


Figura 14: Correlación FAU/ Permeabilidad del Arbolado

Se simularon manzanas con valores extremos en todas las variables que resultan significativas para el modelo estadístico. Se estudia la influencia de variar todos los valores de las variables explicativas.

Se muestran los resultados obtenidos de FAE y FAU.

Ancho de Canal Vial	20
Plenitud del arbolado	50
Morfología Edilicia	1
FOT	0.5
FAE	0.904

Ancho de Canal Vial	13
Plenitud del arbolado	100
Morfología Edilicia	0
FOT	1
FAE	0.371

Orientación de manzana	0
Ancho Canal Vial	20
Magnitud del arbolado	3
Permeabilidad del arbolado	70
Morfología Edilicia	1
FOT	1
FAU	0.249

Orientación de manzana	90
Ancho Canal Vial	13
Magnitud del arbolado	1
Permeabilidad del arbolado	30
Morfología Edilicia	0
FOT	0.5
FAU	0.029

Tabla 6: Valores obtenidos de simular los agrupamientos de las mejores y peores alternativas de variables para FAE y FAU.

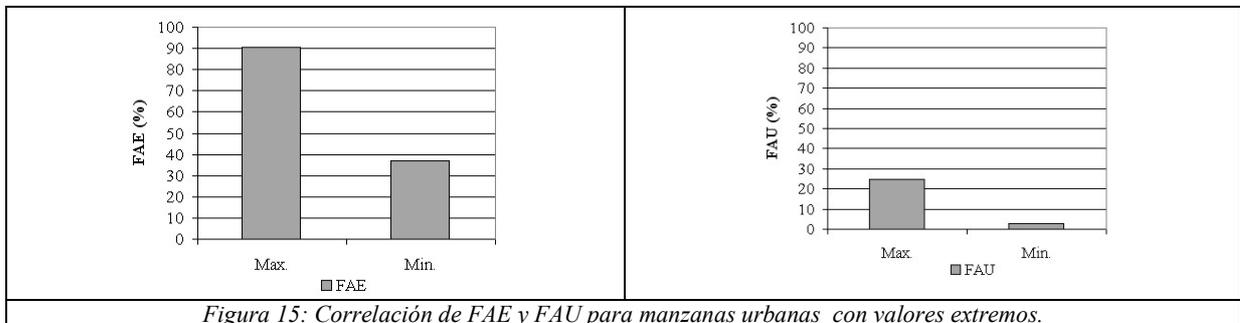


Figura 15: Correlación de FAE y FAU para manzanas urbanas con valores extremos.

5. CONCLUSIONES.

En lo específico, es de interés analizar primero los resultados obtenidos por ambos modelos en la gravitación diferencial de las variables morfológicas sobre los indicadores energético-solares definidos: FAE y FAU.

En el caso del FAE, la Morfología Edilicia (homogeneidad – heterogeneidad) resulta claramente prioritaria, con valores más altos del indicador para las situaciones heterogéneas, en los casos de máximos y mínimos valores del mismo. Esto puede explicarse porque en el caso de los conjuntos heterogéneos, una mayor diversidad morfológica permite una suma de situaciones más favorable que en el caso de situaciones homogéneas en que soluciones muy alejadas del diseño óptimo pueden repetirse (y se repiten) uniformemente para todo el conjunto. En las 2 (dos) variables siguientes la explicación de los resultados es directa: Canales viales más anchos permitirán un menor enmascaramiento solar de fachadas potencialmente colectoras al norte sobre canales viales de dirección este-oeste. Lo mismo es válido, aunque en menor medida, para construcciones de borde en las que muros al norte, perpendiculares a la línea municipal serán parcialmente enmascarados por la arboleda en calles de dirección norte-sur. Por otra parte, es obvio que una mayor Plenitud (densidad) del arbolado producirá un mayor enmascaramiento sobre superficies potencialmente colectoras. Por último, el FAE parece mostrar escasa sensibilidad respecto a la variación del FOT, lo que podría deberse a una compensación de factores positivos y negativos: las construcciones de más de un nivel presentarían fachadas más altas al norte aumentando el área de captación, pero al mismo tiempo, la mayor densidad de los volúmenes produciría un mayor enmascaramiento.

Observando los resultados obtenidos para el FAU, la Orientación de las manzanas demuestra tener una gravitación fundamental, dado que orientaciones desfavorables de la trama urbana condicionan negativamente la orientación de parcelas, frentes y el asoleamiento de la mayor parte de los volúmenes de los edificios, especialmente cuando se trata de entornos que alojan a estratos medios de la población, cuyas parcelas son de superficies ajustadas. Con respecto a la Morfología Edilicia, el FOT y el Ancho de los canales viales, vale lo dicho para el caso del FAE, aunque en este caso, el ordenamiento de las variables en cuanto a su impacto relativo es diferente por razones que requieren de un análisis más profundo. Por último, es evidente que árboles de mayor Magnitud (mayor altura y diámetro de copa) y ramajes de menor Permeabilidad invernal, tendrán un impacto fuertemente negativo sobre el asoleamiento útil de las manzanas urbanas.

Finalmente, la herramienta de cálculo derivada del análisis estadístico, permite simular situaciones en que se producen las mejores y peores condiciones de los indicadores estudiados, las que se obtienen agrupando los valores más favorables y los menos favorables de las variables más significativas ordenadas por el MERLM. En este caso, los valores máximos y mínimos resultan en 90,4 % y 37,19 % para el FAE y 24,92 % y 2,96 % para el FAU. Las notables amplitudes de los rangos entre los valores límites de cada indicador, ponen en evidencia las importantes posibilidades de mejoramiento que podrían obtenerse mediante un adecuado diseño de las morfologías urbanas y edificaciones en la región.

Volviendo a considerar el aspecto metodológico de este estudio, resulta indudable que el ajuste de los valores obtenidos mediante el Modelo Gráfico-Computacional y el MERLM es indicativo de la confiabilidad del método estadístico para el análisis de situaciones complejas, como las de la presente investigación, en las que se debe integrar la consideración de un número significativo de variables (variables explicativas), determinando en cada caso el peso relativo de cada variable sobre un determinado indicador (variable respuesta). La extensión posible del uso de las ecuaciones derivadas del análisis a situaciones estructuralmente similares pero cuantitativamente diversas, constituye también un valioso aporte instrumental cuando se trate de establecer criterios de planificación urbana y energética, básicos para la elaboración de normas, que apunten a la consecución de una cuota mayor de sustentabilidad energética y ambiental en el desarrollo urbano hacia el futuro.

REFERENCIAS

- Balcomb, J. et al. (1983). "Passive Solar Design Handbook". American Solar Energy Society, Inc. New York.
- Basso, M., et al. "Urban morphology and solar potential of the built environment in Andean Cities of Hispanic Layout. Assessing proposals towards a more sustainable energy future". 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture, PLEA 2003, Santiago – Chile, Nov. 2003.
- Box, G.R.P & Cox, D.R. (1964) "An Analysis of Transformations", Journal of the Royal Statistical Society, series B, 26, 211-252.
- Canton, M.A., Cortegoso, J.L. y de Rosa, C. "Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina". Energy and Buildings, Berkeley, USA, Vol. 20, N° 3, pp.219-230, 1994.
- Faraday, J.A. (2005). Linear Models with R, Chapman & HLL/CRC, Boca Raton, London, New Cork, Washington DC.
- Fernández, J. C. et al. "An assessment of the solar potential of the built environment in the city of Mendoza, Argentina. A study in advance". Proceedings of the 18th PLEA Conference, Florianopolis, Brasil, 2001.
- Jenks, M. et al. (Editors). "The Compact City- A Sustainable Urban Form". E & FN Spon. London, 1996.
- Mesa N. A. et al. (2000) "Determinación de áreas de fachadas potencialmente colectoras en medios urbanos, a través de un modelo gráfico computacional". Memorias del Ises Millennium Solar Forum 2000, ANES, México, D. F.
- Municipalidad de Mendoza. "Código urbano de Edificación. Recopilación y Actualización". Ciudad de Mendoza, 2000.
- Owens, S, "Energy, Planning and Urban Form". Pion Ltd., London, 1986.
- Venables, W. N. et al. (2002) "Modern Applied Statistics with S-Plus", Springer-Verlag, Berlín New York, Heidelberg-London.

IMPLEMENTING A STATISTICAL PROCEDURE TO ASSESS THE SOLAR POTENTIAL OF URBAN ENVIRONMENTS IN THE ANDEAN REGION.

ABSTRACT: The present study is included in a research line, the Urban Bioclimatology, that has been under development at LAHV since 1999. Its goal is to generate knowledge and methodologies that allow proposing actions leading to a greater measure of energetic and environmental sustainability of the regional urban systems, as a function of their morphologic features and the available solar resource. The city of Mendoza's Metropolitan Area has been chosen as case study. It is expected to transfer the findings and conclusions of the research to urban and energy planning agencies for the implementation of norms to that end. The already completed and communicated stages of the work have departed from the survey of morphologically homogeneous urban zones; the selection of a representative sample of the analysis units (city-blocks); the creation of relevant indicators of solar energy use; calculations of the same and implementation of multivariate statistical analysis as a research tool. The present study develops from the relevant indicators proposed and the results of their statistical analysis. The indicators express relationships between urban morphology and access to the solar resource for space heating in Mendoza's Metropolitan Area; they include: Effective Insolation Factor (FAE), Useful Insolation Factor (FAU), Volumetric Insolation Factor (FAV) and Potential Energy Savings (APE). The results from the statistical analysis have allowed evaluating the relative weight of each morphologic variable on each indicator, proposing besides a simple equation that allows calculating the indicator's value for different morphologic alternatives and their combinations, which is the substantial part of this research. Only the results of FAE and FAU are presented in this paper.

Keywords: Sustainable urban development, Urban morphology, Solar potential, Energy retrofitting, Statistical methodology.