

POTENCIAL SOLAR DE ENTORNOS URBANOS  
EN LA CIUDAD DE MENDOZA - PRIMEROS RESULTADOS.

Alfredo Esteves\*, Carlos de Rosa\*\*, Mirza Basso\*\*\*,  
José Luis Cortegoso\*, Miguel Atencio\*\*

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (LAHV) - Centro  
Regional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Mendoza  
(CRICYT-Me) - Casilla de Correo 131 - 5500 Mendoza.

RESUMEN

La necesidad de implementar niveles más elevados de conservación de energía y aprovechamiento de los recursos climáticos en edificios, es predecible en el mediano plazo. Debe además considerarse que un altísimo porcentaje del parque edilicio se inserta y lo hará aún más en el futuro, en un medio eminentemente urbano. Desde el punto de vista de la planificación urbana y energética, deberá prestarse máxima atención a las limitaciones que impone el medio urbano al acceso a los recursos climáticos, particularmente la radiación solar en regiones en que es abundante. Resultará por lo tanto imprescindible, conocer las configuraciones y límites de densidad compatibles con el pleno acceso al sol en agrupamientos edilicios nuevos y por otra parte, determinar el potencial de utilización solar del tejido urbano actual, ya se trate de insertar en él nuevos edificios solares o de reciclar los existentes.

Como parte de las tareas realizadas en el PID "Diseño Urbano Bioclimático", se ha desarrollado una metodología para la selección de tramas urbanas representativas en cuanto al uso homogéneo del suelo, y distintos valores de densidad poblacional y de edificación, para su posterior evaluación en cuanto a conservación de energía y acceso a los recursos del clima.

Para la evaluación del acceso al sol, se ha desarrollado un modelo computacional que permite calcular las áreas soleadas de fachadas colectoras y la intensidad de la radiación incidente sobre las mismas, para cualquier hora y día del año.

INTRODUCCION

Para el relevamiento de las tramas urbanas se han analizado, por un lado, los amanzanamientos y los parcelamientos, y por otro, la edificación de tres zonas de diferente densidad poblacional (baja, media y alta) de la ciudad de Mendoza. La metodología de análisis incluye el estudio de los siguientes puntos:

- 
- \* Investigador Contratado (CRICYT)
  - \*\* Investigador Independiente (CONICET)
  - \*\*\* Profesional Principal (CONICET)
  - Profesional Adjunto (CONICET)
  - Profesional Contratado (CRICYT)

1. Trama Urbana
2. Parcelamiento
3. Edificación

Con vistas a obtener el potencial solar disponible, se requiere conocer el grado de asoleamiento de fachadas potencialmente colectoras de radiación solar, para las distintas épocas del año. Los métodos gráficos disponibles para determinar el enmascaramiento de los rayos solares arrojados [1,2] pueden utilizarse para evaluar un nuevo emplazamiento y en general en zonas suburbanas; pero cuando se quiere evaluar la interacción sombra-edificio en ambientes urbanos, y para todos los edificios de la manzana, estos métodos resultan altamente inapropiados.

Se ha encontrado una relación entre el azimut solar y los rumbos de cada fachada del edificio, con lo cual se posibilita el cálculo computacional del área sombreada efectiva de los edificios de la manzana, con un grado de exactitud que está condicionado al tiempo de máquina disponible.

#### SELECCION DE TRAMAS URBANAS

Con el objeto de conocer el comportamiento térmico de los edificios, se realiza un estudio tipológico de los mismos. Como resultado del análisis se opta por la clasificación según la forma, que define a la edificación como un sistema volumétrico-espacial.

A partir de la observación fotográfica y de los planos catastrales, se determinan 6 tipologías con sus subtipologías, divididas en esquemas compactos y abiertos. Dentro de ellos, se subdividen en menores y mayores de 10 metros de altura, y éste último, en anteriores y posteriores al Código de Edificación de 1971.

En muchos casos aparecen construcciones independientes en un mismo lote, por lo que se les asigna la clasificación tipológica a cada uno de ellos, y en otros, si bien su forma no responde a ninguna de las clasificaciones propuestas, se pueden diferenciar dos tipologías en la misma construcción.

El universo analizado, está constituido por 37 manzanas, de acuerdo al siguiente detalle: 17 manzanas de mínima densidad poblacional, 11 de media y 9 de máxima. De las 37 manzanas se seleccionaron 1 de cada categoría. Para la aplicación del modelo computacional de acceso al sol se procesó la de máxima densidad de construcción. Figura 1 y 2.

Posteriormente se diseñó un programa de computación, que permitió a través del empleo de un digitalizador, ingresar las coordenadas "x" e "y" de cada vértice de las manzanas y de los lotes. En el caso de los edificios se terminó que la forma más sencilla para el ingreso de datos, resulta la representación del conjunto de los mismos, por medio de coordenadas "x", "y" y "z" de cada uno de sus vértices superiores. Otra información que se incorpora al archivo de datos, es la clasificación tipológica de los edificios de cada uno de los lotes. Las limitaciones del modelo computacional no permitieron la lectura del volumen edilicio total. Para poder graficar las manzanas (lotes y edificio) se dividen tanto los espacios abiertos como los construidos en paralelepípedos de cuatro lados, quedando conformado cada lote por un número "n" de edificios.

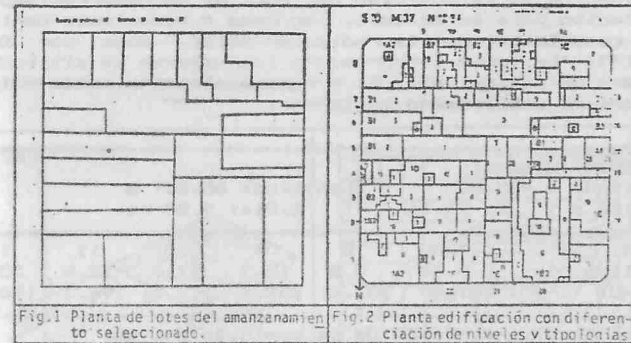


Fig. 1 Planta de lotes del amanzanamiento seleccionado.

Fig. 2 Planta edificación con diferenciación de niveles y tipologías.

El programa ejecuta el cálculo tomando en consideración volúmenes prismáticos no necesariamente regulares. Esto implica una subdivisión de aquellos edificios con techos a dos aguas, o aquellos conformados por cuerpos de volúmenes compuestos o de distintas alturas. Fig. 3 y 4.

A este archivo se incorporan datos catastrales de la sección a que pertenece la manzana, el número de la manzana y el azimut de uno de sus lados respecto al norte. Los lotes se identifican por tres números: el primero corresponde al número de lote de la manzana, el segundo al número de vértices del lote y el tercero, al número de edificios en que está subdividido el lote. Por ejemplo, el lote n° 1 de la manzana 37 que pertenece a la Sección 10, tiene una desviación de 12,5° respecto al Norte y queda codificada en la siguiente forma:

S10; M37; N=12.5°; L=1;4,11

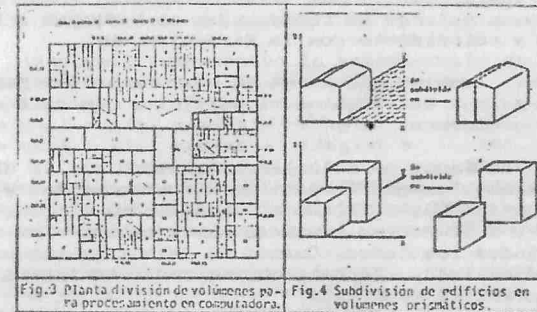


Fig. 3 Planta división de volúmenes para procesamiento en computadora.

Fig. 4 Subdivisión de edificios en volúmenes prismáticos.

#### MODELO DE ACCESO AL SOL

##### Consideraciones preliminares

El modelo computacional se compone de cuatro etapas bien diferenciadas. En algunos casos éstas se representan por medio de programas independientes y en otros en forma de subrutinas del programa principal. Las distintas etapas son:

1. Determinación de la posición del sol: se ha desarrollado un rutina de computación para su cálculo, en base a ecuaciones derivadas del análisis geométrico de la radiación solar, dado por Duffie and Beckman [3]. La tabla 1 representa los valores de altitud y azimut solares para un día del año. El programa almacena estos valores en un archivo para su utilización posterior.

MENDOZA (Ciudad)						
Latitud:	-32.80°	Longitud:		68.85° W		
n: 166 ;	s: 23.31°	D. Día:		9.84 hs.		
HORA:	7.08	8	9	10	11	12
ALTITUD [°]:	0.00	9.8	19.3	27.0	32.0	33.8
AZIMUT [°]:	241.90	233.8	233.5	211.0	196.3	180.0

TABLA 1: Determinación de la posición del sol

2. Determinación de la sombra arrojada por los edificios: se calcula la altura de sombra que produce cada edificio en cada punto de una grilla. Estos puntos pertenecen a la intersección de cada fachada con el plano de la manzana. La separación entre puntos dará la exactitud del cálculo. Mientras menor sea esta separación, mayor será la precisión del cálculo, pero mayor será el tiempo empleado en resolverlo. Para una separación de 0.5 m (a escala real) el error no será mayor del 5%.

Para determinar el volumen de sombras arrojado por los edificios del entorno, se necesita conocer cuáles fachadas de cada edificio producen sombras y cuáles se encuentran asoleadas.

Si uno observa un edificio en planta, puede suceder que una, dos o tres fachadas estén sombreadas al mismo tiempo. Para determinar esto, se calculan los rumbos del lado y se los compara con el azimut del sol. Por ejemplo en la Figura 5 se observa un edificio en planta de cuatro lados (a,b,c,d) cuyos vértices se indican por los números 1,2,3 y 4 y cuyos valores de coordenadas se refieren a los ejes x e y siendo el eje y coincidente con la dirección sur.

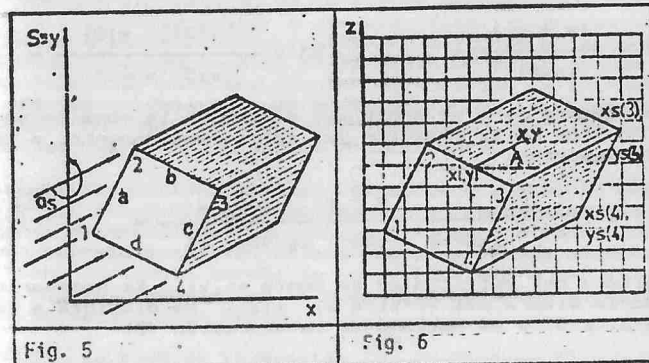
Cuando el sol (que se encuentra en una posición representada en planta por el azimut  $\alpha_s$ ) ilumina el edificio, en este caso los lados c y d estarán en sombra.

Los rumbos de los lados se calculan comenzando por la dirección Oeste y tomando los ángulos que forman las direcciones 4-1 y 1-4 respecto del Sur. Estos son los del lado d. Luego para el lado a, se toma la dirección 1-2 y 2-1. Así se continúa hasta obtener los rumbos respecto al Sur de todos los lados. Cuando el azimut se encuentra entre los dos rumbos de un lado, la cara correspondiente estará asoleada, en caso contrario estará sombreada.

Los rumbos se deben comenzar a calcular por el lado Oeste, en este caso el lado d. Su expresión será:

$$R4-3 = \text{rumbo (4-3)} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{x(3) - x(4)}{y(3) - y(4)} \right)$$

$$R3-4 = R4-3 + 180^\circ \quad (1)$$



De la misma manera se procede para el cálculo de los rumbos restantes. En nuestro caso, el lado d estará asoleado si se cumple la siguiente relación:  $R4-3 < \alpha_s < R3-4$ . Cabe destacar que el orden de cálculo es de suma importancia, ya que en este caso el lado d y el b son paralelos, pero los rumbos son distintos o iguales, dependiendo de la forma de cálculo. Conociendo ya la situación de todos los lados, para aquellos en sombra, encontramos el área de sombras que indica los límites de influencia de la misma. Para el lado d, el área de sombras, será la encerrada por los puntos 4, 3,  $(x_s(3), y_s(3))$  y  $(x_s(4), y_s(4))$ . Figura 6.

Los puntos  $(x_s, y_s)$  representan la intersección de la sombra del lado con el plano horizontal. Su expresión será:

$$x_s(i) = x(i) + z(i) \text{ sen}(\alpha_s - \alpha) / \text{tg}(\varphi) = \quad (3)$$

$$y_s(i) = y(i) + z(i) \text{ cos}(\alpha_s - \alpha) / \text{tg}(\alpha) = \quad (4)$$

Se ha confeccionado una subrutina AZIMUT que calcula los rumbos de cada cara respecto del Sur. Estos luego se comparan en el programa principal y se determina el lado en sol y el lado en sombra.

Como puede observarse en la misma figura, el edificio arroja un volumen de sombras sobre su entorno. Puede calcularse la altura de la sombra para cada punto x,y dentro del área de sombras. Para esto se necesita conocer cuál es la coordenada del rayo inverso en su intersección con el volumen y a partir de allí, se calcula la altura de sombra en base a la distancia desde el punto considerado hasta el edificio, siguiendo el camino del rayo. En la Figura 6 aparece el punto x,y al cual queremos calcularle la altura de sombra correspondiente y el punto  $x_i, y_i$  sobre el edificio. El valor del ángulo A es el complementario de  $(\alpha_s - 180^\circ)$ .

Las coordenadas del rayo inverso, resultan de la intersección entre el segmento 2-3 y el segmento que une los puntos x,y e  $x_i$  e  $y_i$ . Por lo tanto:

$$y_i = \frac{y(3) + B3(x(3) - x + y/\text{tg}(A))}{1 - b3/\text{tg}(a)} = \quad (5)$$

$$x_i = x - \frac{(y - y_i)}{\text{tg}(A)} = \quad ; \quad B3 = \frac{y(3) - y(2)}{x(3) - x(2)} = \quad (6)$$

La altura de sombra para el punto  $x, y$  dentro de la zona de sombras se obtiene en función de la posición del sol en ese momento, a través de la siguiente ecuación:

$$zP(x, y) = z_i - \frac{y - y_i}{\cos(\alpha_s - 180^\circ) \text{tg}(90 - \alpha)} = \quad (7)$$

$z_i$  es la altura del edificio en el punto  $x_i, y_i$ . Es necesario calcularla cuando la altura del vértice 2,  $z(2)$ , es distinta a la altura del vértice 3,  $z(3)$  y se obtiene de la expresión (8)

$$z_i = z(3) + \frac{z(3) - z(2)}{y(3) - y(2)} (y_i - y(2)) \quad (8)$$

De esta manera recorriendo el campo de influencia, en este caso la manzana, por medio de puntos  $(x, y)$  puede obtenerse la altura de sombra para cada uno de ellos.

Puede ocurrir que la sombra de un edificio en un punto se superponga y sea mayor que la producida por el edificio anterior. Es por lo tanto necesario, crear un archivo donde se almacenen los valores de altura de sombra para cada punto  $x, y$  y que se recicle el cálculo, edificio por edificio para permitir de esta manera comparar y dejar la mayor altura de sombra en el archivo.

3. Determinación del área soleada: el área soleada de cada fachada del edificio se obtiene considerando en cada punto de la misma la diferencia entre su altura y la altura de la sombra resultante. El área soleada para cada fachada se obtiene de la siguiente expresión:

$$AS(J) = \sum_{i=1}^{NP(J)} [z(x, y)_i - zP(x, y)_i] \cdot IN \quad (9)$$

$$NP(J) = \text{Número de puntos para la fachada } J = \frac{x(J) - x(J+1)}{IN}$$

IN = Distancia elegida entre punto y punto

Puede realizarse la sumatoria para todos los edificios del área soleada por fachada. Posteriormente con la energía incidente por fachada, se puede obtener la energía incidente total de la manzana, y con ello, el potencial solar.

4. Cálculo de la energía solar incidente sobre cada fachada: la energía solar incidente sobre cada fachada está compuesta de tres componentes: directa, difusa y reflejada. En el estado actual, el modelo considera solamente la energía solar directa.

El cálculo de la energía solar difusa y reflejada en un ambiente urbano de alta densidad, es complicado. La distribución de la radiación difusa no es uniforme sobre todo en los días claros o parcialmente nublados. Si aún supusiéramos una distribución uniforme, se debe conocer la fracción de la bóveda celeste ocultada por el entorno, la cual puede llegar a ser significativa si nos ubicamos a nivel del suelo y el entorno lo conforman edificios en altura. La radiación reflejada está en función de la posición del resto de los edificios, cuyas fachadas, son los planos de reflexión de la radiación incidente. Aún más, depende también del color de la misma. Estas razones implican un estudio profundo y pormenorizado para evaluar estos aspectos, que serán encarados próximamente.

La radiación solar directa, se obtiene a partir del valor de la radiación solar global para ese día en particular tomando las correlaciones desarrolladas por Collares-Pereyra y Rabi indicadas en [3]. Estas correlaciones son la base de un programa desarrollado en BASIC que tiene en cuenta además de la latitud y día del año, la orientación de cada fachada con lo cual se genera la radiación solar incidente en cada una de ellas.

EJEMPLO: se tomó de la Sección 10, la Manzana 37 que posee 22 lotes y 26 edificios, de los que, al subdividirlos según lo expuesto anteriormente, se obtuvieron 236 volúmenes. Tomando 0,5 m (a escala real) de distancia entre punto y punto, resulta una grilla conformada por 9.062 puntos.

El ejemplo considera el cálculo para el día 15 de junio. El sol para este día se encuentra ubicado a  $196,3^\circ$  de azimut y  $32^\circ$  de altitud a las 11 hr (hora solar). El azimut del lado Este de la manzana es  $12,5^\circ$  medido desde el Norte hacia el Oeste.

Luego de cargar los datos correspondientes a los vértices de cada edificio, se procede al cálculo del volumen de sombras. Este está conformado por la sombra que todos los edificios arrojan sobre la manzana. En la Figura 7, se observa una axonometría de los volúmenes edificios. El área soleada para cada fachada potencialmente colectora, se determina en base al volumen de sombras (Figura 8) y en base a la orientación de la misma, se calcula la intensidad de radiación solar incidente.

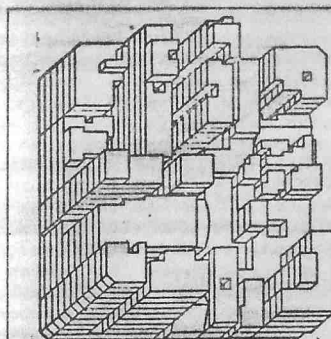


Fig. 7 Axonometría de volúmenes edificios de la manzana elegida.

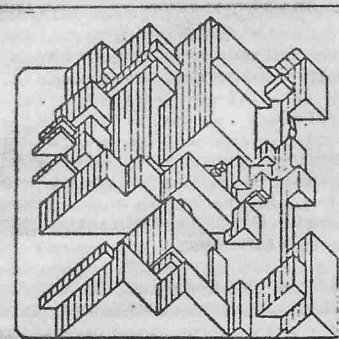


Fig. 8 Axonometría de volúmenes de sombra de la manzana elegida.

La Tabla 2 muestra para el Lote 1, el área asoleada (AA), el área total (AT) y la Radiación solar directa incidente (RI), para cada fachada de los volúmenes del lote. Además aparece la radiación solar directa incidente en cada fachada para el conjunto total de edificios.

CALCULO DEL AREA ASOLEADA PARA LA MANZANA 1B							
AREA ASOLEADA (m2) Y RADIACION SOLAR INCIDENTE (MJ/hr)							
LOTE	EDIF.	FACHADA ESTE			FACHADA NORTE		
		ABDL.	AREA TOTAL	RADIACION SOLAR INCIDENTE	ABDL.	AREA TOTAL	RADIACION SOLAR INCIDENTE
1	1	198	198	197.2	261.0	270.0	173.1
	2	126.0	126.0	125.5	0.0	144.0	0.0
	3	36.0	36.0	35.8	56.9	56.9	103.2
	4	9.0	63.0	9.0	15.0	105.0	27.2
	5	18.0	187.0	17.9	9.0	63.0	16.3
	6	0.0	162.0	0.0	0.2	72.0	0.4
	7	43.7	144.0	43.5	171.0	180.0	310.0
	8	11.0	63.0	10.9	16.5	126.0	29.9
	9	0.7	54.0	0.7	0.0	54.0	0.0
	10	3.8	90.0	3.8	0.0	162.0	0.1
	11	ES UN PATIO					

Radiacion total en el conjunto de edificios en MJ/hr  
 En la fachada Este: 444,28 ; en la Norte: 960,14

TABLA 2: Cálculo del área asoleada para un lote de la manzana 1B

Este cálculo se repite luego para todas las horas del día, y se determina la radiación solar incidente sobre la fachada de los edificios del lote para un día completo. Esto permitirá determinar el grado de recuperabilidad solar de los agrupamientos urbanos existentes y correlacionarlo con las principales variables del sistema urbano: densidad volumétrica, altura media, orientación de la trama, tipología dominante, etc.

#### REFERENCIAS

- [1] Koenisberger, O.H. and Ingersoll T.S. "Manual of Tropical Housing and Building". Longman Inc, NY (1974).
- [2] Mazria, E. "The Passive Solar Energy Book". Rodale Press, Emmaus, PA (1979).
- [3] Duffie J. and Beckman W. "Solar Engineering of Thermal Processes". Ed. John Wiley & Sons, NY (1980).