

MONITOREO DE CLIMA URBANO. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS FACTORES QUE DETERMINAN LA ISLA DE CALOR Y SU APORTE AL DISEÑO DE LOS ESPACIOS URBANOS.

E. Correa, ^{1*}; C. De Rosa ^{2*}; G. Lesino ^{2**}.

* Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda. LAHV-INCIHUSA-CRICYT-CONICET
Av. Ruiz Leal s/n. Parque Gral. San Martín. 5500 Mendoza. Tel 0261 4287370. Fax: 0261 4287370

E-mail: ecorrea@lab.cricyt.edu.ar

**INENCO - Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales – U.N.Sa.– CONICET. Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150 – CP 4400 – Salta Capital – Argentina. Tel. 0387-4255424 – Fax 0387-4255489

E-mail: lesino@unsa.edu.ar

RESUMEN: La temperatura del aire dentro del cañón urbano es afectada por un gran número de variables, las cuales no siempre son independientes unas de otras. Es por ello que para determinar las interrelaciones entre las variables y el peso de cada una de ellas en el fenómeno de la isla de calor urbana, se ha utilizado el análisis multivariado, llevando a cabo un análisis por componentes principales con el fin de obtener un número mínimo de variables que permitan explicar el fenómeno.

Los resultados indican que la representación del fenómeno en cuatro ejes podría explicar hasta un 88% de la variabilidad de los datos observados, los cuatro ejes muestran que existe una estrecha relación entre la temperatura del aire dentro de los cañones urbanos evaluados y las propiedades térmicas de los materiales que componen el recinto, principalmente su capacidad de absorber y acumular calor, también las condiciones de acceso al sol y acceso al viento de los recintos evaluados, y el tránsito vehicular.

Palabras clave: isla de calor urbana, tratamiento estadístico de datos experimentales, análisis por componentes principales, diseño urbano sustentable.

INTRODUCCION

Se ha demostrado que las ciudades pueden alterar en mayor o menor medida todos los parámetros de sus climas locales. Estas modificaciones son complejas y de origen múltiple: cambios en la composición del aire, en la naturaleza y rugosidad del suelo y alteraciones del balance de radiación.

La combinación del incremento del consumo de energía y la diferencia en el balance radiativo significa que las ciudades son más calientes que las áreas rurales, entre 1, 3°C y 15 °C, dando origen a un fenómeno conocido como isla de calor urbana. La caracterización de la isla de calor urbana es información fundamental para evaluar el incremento de los consumos energéticos y la contaminación ambiental vinculados al fenómeno de la urbanización. A partir de su análisis y diagnóstico es posible desarrollar una planificación estratégica del crecimiento de la ciudad, que permita en el corto y mediano plazo mitigar los efectos negativos de la urbanización sobre el clima de la región y la calidad de vida de los pobladores urbanos.

Dado que el confort urbano y el consumo de energía de los edificios dependen de las condiciones climáticas locales dentro del cañón urbano, los resultados que presenta esta investigación se han obtenido a partir del tratamiento estadístico de los datos registrados mediante mediciones móviles y estacionarias dentro del Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Las variables medidas fueron: temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, durante el monitoreo por transectas y temperatura y humedad relativa y absoluta, mediante estaciones fijas de adquisición automática.

Frecuentemente al finalizar las campañas de monitoreo el investigador dispone de una matriz de datos en la que existen demasiadas variables que deben ser empleadas para examinar un fenómeno complejo. En estos casos es frecuente desear reducir el número de variables sin que las conclusiones que se extraigan sufran variaciones significativas.

Este es el caso del fenómeno que reanaliza en el presente trabajo. La temperatura del aire dentro del cañón urbano es afectada por un gran número de variables, las cuales no siempre son independientes unas de otras. Es por ello que para determinar las interrelaciones entre las variables y el peso de cada una de ellas en el fenómeno estudiado con el fin de obtener un número mínimo de variables que permitan explicar el fenómeno se ha utilizado el análisis multivariado, llevando a cabo un análisis por componentes principales.

El análisis de factores es una técnica que consiste en resumir la información contenida en una matriz de datos con múltiples variables, identificando un número de nuevas variables llamadas factores los cuales representan combinaciones lineales de las variables originales. En nuestro caso particular el fenómeno a explicar es la temperatura del aire dentro del área urbana analizada. El análisis de factores nos permitirá además identificar las variables que constituyen una unidad a través de un factor para utilizarlo después en otras técnicas estadísticas como son el análisis por regresión y la modelización.

¹ Becaria Posdoctoral CONICET

² Investigador CONICET

METODOLOGÍA. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.

La variación de la temperatura del aire dentro de la ciudad está influenciada regionalmente por parámetros meteorológicos y localmente por parámetros geográficos y constructivos como por ejemplo la altitud, la topografía, el factor de visión de cielo, el grado de urbanización y los materiales de construcción. A continuación se analizan y clasifican las variables que tienen efecto sobre la temperatura de la ciudad que serán consideradas en el análisis de los datos.

1. Clasificación de las variables que intervienen en el fenómeno de la Isla de Calor Urbana.

Variables meteorológicas

Radiación solar: La radiación solar actúa como el generador del balance térmico que tiene lugar en las ciudades y es el responsable último de la temperatura del aire dentro de la trama. La radiación solar recibida por el espacio urbano varía de acuerdo con la transmitancia atmosférica, los condicionantes geográficos como la altitud respecto al nivel del mar, la latitud, etc.

Viento: Existen gran cantidad de estudios que relacionan la velocidad de viento y el desarrollo de la isla de calor urbana (OKE, 1976). En el caso del área de estudio, las brisas locales típicas están constituidas por los tipos de vientos termotopográficos (anabático-catabáticos). Además de las brisas locales ocurren con menos frecuencia: el Surazo desde el SO (frío y seco); la Sudestada desde el SE (frío y húmedo); la Nordesteada (húmedo y templado) desde el NE y el Zonda (extremadamente seco y cálido) desde el NO.

Variables Geográficas

Las condiciones geomorfológicas de un territorio modifican considerablemente la radiación solar, el régimen de vientos, la humedad ambiental etc., poniendo claramente de manifiesto la interacción entre todas las variables del medio natural. A mayor exposición mayores son las oscilaciones térmicas, temperaturas más frías, y mayores las posibilidades de ventilación e iluminación. Otro factor importante es la existencia de agua ya que modifica las condiciones de humedad del aire y por la evaporación absorbe calor logrando un enfriamiento del ambiente. Su alto calor específico la convierte en un elemento estabilizador de la temperatura disminuyendo sus oscilaciones extremas.

Altitud: La temperatura del aire decrece con la altitud hasta un máximo de 9.8°C cada 1000 m pero más frecuentemente 6.5°C cada 1000m (Tabony,1985). Shao (1997) estudió el impacto de la altitud sobre la temperatura del aire en Nevada, USA. Los resultados mostraron que la altitud tiene un considerable efecto sobre la temperatura del aire en condiciones de baja estabilidad atmosférica, pero a medida que la estabilidad se incrementa, el efecto de la topografía es más importante disminuyendo la correlación entre la altitud y la temperatura del aire.

Topografía: A menudo considerado el factor más importante que origina diferencias en la temperatura del aire durante noches extremas (velocidad de viento <2m/s y nubosidad <4/8) (Bogren et.al, 1991), pequeñas diferencias en la topografía pueden producir grandes diferencias en la temperatura del aire. Para explicar el impacto de la micro-topografía en la distribución de temperaturas Tabony (1985) discute la producción de isotermas horizontales que se desarrollan en el área urbana en pequeña escala. A mayor escala la influencia de la topografía sobre los perfiles de temperatura puede ser explicada por la teoría catabática.

Factor de visión de cielo: Es un número adimensional que representa la cantidad de cielo visible en una determinada ubicación. Este parámetro tiene una influencia significativa en la proporción de enfriamiento radiativo nocturno y en las posibilidades de acceso al sol durante el día.

Variables constructivas

El tipo de cobertura de suelo o pavimentos, afecta la reflexión de los rayos solares (albedo) y por tanto a la radiación que incide sobre la edificación y con ello a la acumulación de calor y la respuesta interior a las oscilaciones térmicas. La permeabilidad del suelo urbano varía los coeficientes de escorrentía superficiales y modifica la evaporación.

Las características de la trama urbana circundante y su densidad alteran los intercambios energéticos entre la edificación y el entorno, de forma que a mayor densidad disminuyen las posibilidades de intercambio. La temperatura será más estable sin oscilaciones extremas significativas y se dificultará la ventilación. La altura de las edificaciones colindantes se comporta como obstáculos para la radiación solar directa y el viento.

Otro factor interesante se refiere a la cantidad y calidad de la vegetación circundante ya que modifica la radiación solar: tanto directa formando pantallas como la global por absorción de parte del espectro de la luz solar. Las coníferas debilitan fuertemente la luz solar pero no la modifican cualitativamente; las frondosas la debilitan y producen una absorción selectiva. Es importante evaluar si las especies son de hoja caduca o perenne. Los árboles son barreras eficaces contra el viento y la evapotranspiración especialmente las plantas frondosas aumenta la humedad relativa del ambiente y disminuye la temperatura, además ayudan a crear por diferencias de temperaturas pequeñas corrientes de aire.

La tabla 1 muestra las variables analizadas en este estudio.

Variables meteorológicas	Variables geográficas	Variables constructivas
Radiación solar	Altitud	Inercia térmica= $(K \cdot \rho \cdot C_p)^{1/2}$
Temperatura del aire	Factor de Visión de Cielo (FVC)	Factor edilicio (FE)
Nubosidad	Orientación	Emisividad/Absortividad
Dirección y velocidad de viento	Usos del suelo	h (altura media de los edificios)
Humedad/punto de rocío		w (ancho de canal vial)
Presión atmosférica		h/w (profundidad del cañón urbano)

Tabla 1. Clasificación de las variables analizadas

2. Mecanismo de obtención de los datos

La fuente de información fundamental de este estudio son los datos de temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento obtenidos mediante el método de las transectas compuesto por 69 estaciones de monitoreo emplazadas en distintos puntos del desarrollo de la ciudad entre marzo de 2004 y marzo de 2005 y los datos de temperatura y humedad obtenidos a partir de 16 estaciones fijas colocadas dentro del AMM desde enero de 2005 a enero de 2006.

La radiación solar se midió con solarímetro de cúpula de vidrio del tipo Kipp & Zonnen constante solar = 11 W/m² μV. Se obtuvieron los datos horarios de temperatura, humedad relativa, nubosidad, visibilidad, presión atmosférica, velocidad y dirección de viento registrado por las dos estaciones meteorológicas emplazadas en el AMM, dependiente de Fuerza Aérea Argentina, correspondientes a cada uno de los días evaluados.

La información sobre los factores morfológicos de los recintos urbanos monitoreados tiene su origen en distintas fuentes: 1°- la estructura urbana se obtuvo a partir del parcelario del AMM ; los datos fueron suministrados por la Dirección Provincial de Catastro, en formato CAD, las configuraciones de cada uno de los espacios monitoreados (anchos de calles y veredas, alturas de los edificios, materiales de los pavimentos, cantidad y tipo de forestación, etc.) fueron tomadas in situ mediante campañas de relevamiento y fotografías.

Los datos de altitud en cada punto fueron calculados a partir de superponer la localización espacial georeferenciada de cada uno de los puntos de monitoreo, con un modelo espacial de elevaciones generado por la DOADU (Dirección de Ordenamiento Ambiental Urbano) del Gobierno de Mendoza.

El factor de visión de cielo se obtuvo a partir del procesamiento de una serie de imágenes hemisféricas tomadas en cada uno de los puntos mediante cámara digital con lente ojo de pez, se ha obtenido el valor del parámetro para los meses de invierno y verano. En total se han procesado aproximadamente 400 imágenes a partir de una subrutina diseñada especialmente para la obtención del Factor de Visión de Cielo (FVC) a partir de este tipo de imágenes.

3. Tratamiento estadístico de los datos. Análisis por componentes principales (ACP)

El análisis de componentes principales es una técnica estadística propuesta a principios del siglo pasado por Karl Pearson como parte del análisis de factores. Sin embargo la complejidad de los cálculos retrasó su desarrollo hasta la aparición de las computadoras y su utilización en la segunda mitad del siglo XX.

Este método de análisis factorial permite sintetizar la información recogida en un determinado experimento con un número reducido de nuevas variables a las que se denomina factores. Es por tanto una técnica estadística que intenta explicar un fenómeno a partir de una información recogida en una matriz de datos de n observaciones y k variables (de distribución normal), mediante W factores, siendo W < k. Este análisis factorial supone que hay una parte de la variabilidad de los datos (comunalidad) explicada por factores comunes no observables, y otra parte específica de cada variable que se denomina factor único. Se asume que estos últimos factores son independientes entre sí.

El análisis de componentes principales tiene como objetivo calcular una serie de combinaciones lineales de las variables de forma que maximicen la varianza de las componentes con la restricción de que distintas combinaciones lineales sean ortogonales. O dicho de otro modo el ACP es una técnica que transforma ciertas variables en otras incorrelacionadas, de media cero, que pueden escribirse como combinaciones lineales de las primeras y que se llaman factores o componentes principales, las cuales pueden ordenarse por la magnitud de su varianza. Las primeras F componentes principales bastan para describir en alto porcentaje la variabilidad total de las variables originales. Con frecuencia F vale 2 o 3, siendo el primero de ellos el caso más deseable. Aunque todas las variables originales entran en la composición de cada componente principal, algunas son más importantes que otras. Estas, las más importantes, determinan la naturaleza de cada componente. El ACP es una técnica descriptiva, pero también puede ser utilizado con fines de inferencia.

Las ideas comentadas se concretan en el modelo que expresa la ecuación 1 .

$$X_{ij} = a_{1j} * F_{i1} + a_{2j} * F_{i2} + \dots + a_{kj} * F_{ik} + U_j \quad (1)$$

Donde:

X_{ij} es el valor de la j-ésima variable correspondiente al i-ésimo caso.

F_{ik} son los coeficientes factoriales (factores comunes) correspondientes al i-ésimo caso.

a_{kj} son las puntuaciones factoriales

U_j es el factor único correspondiente a la j-ésima variable.

Como fases del análisis por componentes principales se distinguen: a) Selección de las variables explicativas. b) Examen de la matriz de correlaciones de todas las variables que constituyen los datos originales. c) Extracción de los factores comunes. d) Rotación de los factores con el objeto de facilitar su interpretación (si fuese necesario). e) Representaciones gráficas. f) Cálculo de las puntuaciones factoriales para cada individuo.

Por último cabe destacar que un análisis factorial de este tipo tiene sentido si existe suficiente nivel de correlación entre las variables ya que esto es indicativo de la existencia de factores comunes. La comprobación analítica del grado de intercorrelación entre las variables puede realizarse por varios métodos, en este trabajo se utilizará la matriz de correlación y la prueba de esfericidad de Bartlett.

Los coeficientes de correlación múltiple indican el grado de asociación entre una variable y todas las otras que intervienen en el análisis, en la parte inferior de la matriz de correlaciones se encuentra la significatividad de los coeficientes anteriores. En el presente caso un valor inferior a 0.05 indica que la correlación correspondiente es significativamente distinta de 0 el 95% de las veces, indicando que existe dependencia y factores comunes.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Se hicieron dos series de corridas de ACP utilizando como herramienta el software XLStat ®. La primera para los datos obtenidos mediante el monitoreo por transectas, en este caso las variables que conformaron la matriz de análisis fueron: temperatura ; humedad relativa (no se tuvo en cuenta finalmente pues se encuentra estrechamente correlacionada con la temperatura como es propio de los climas áridos); velocidad de viento; orientación; factor de visión de cielo; ancho de canal vial; nubosidad; radiación; altitud sobre el nivel del mar; inercia térmica de los materiales de la envolvente horizontal definida como $(K \cdot \rho \cdot C_p)^{1/2}$; emisividad/absortividad del material predominante de exposición horizontal.

Para seleccionar el número de factores necesarios para explicar la estructura de los datos originales se utilizó el procedimiento de Kaiser, el cual selecciona el número de factores cuyos valores propios sea mayor que uno. Asimismo se utilizó el gráfico de sedimentación de Cattell para confirmar la presente selección.

Para estimar las cargas factoriales se utilizó el método de Componentes Principales y con rotación Varimax a fin de aclarar los resultados contenidos en cada factor. Para confirmar la fiabilidad de utilizar el método de factores se hizo la prueba de esfericidad de Bartlett.

Los análisis se realizaron para 5 campañas de mediciones, 4 de ellas representan días típicos correspondientes a cada una de las estaciones del año evaluado en los tres periodos (mañana, tarde, noche) y la restante corresponde a un día atípico (nublado). Se calculó la matriz de correlación para todos los casos, en la tabla 2 se presentan a modo de ejemplo los resultados del estudio para el caso de primavera (20-09-04) para el periodo matutino y nocturno del día ejemplificado.

	temperatura	vel.viento	altura	FVC	emisividad	ancho canal	orientacion	nubosidad	inercia
temperatura	1	0,113	0,411	0,174	0,067	0,134	0,101	0,836	-0,164
vel.viento	0,113	1	0,040	0,291	0,009	0,009	0,018	0,123	-0,050
altura	0,411	0,040	1	0,102	0,406	-0,293	-0,018	0,157	-0,443
FVC	0,174	0,291	0,102	1	-0,118	0,165	-0,200	0,176	0,119
emisividad	0,067	0,009	0,406	-0,118	1	-0,361	-0,104	-0,007	-0,966
ancho canal	0,134	0,009	-0,293	0,165	-0,361	1	0,029	0,176	0,290
orientacion	0,101	0,018	-0,018	-0,200	-0,104	0,029	1	0,103	0,035
nubosidad	0,836	0,123	0,157	0,176	-0,007	0,176	0,103	1	-0,053
inercia	-0,164	-0,050	-0,443	0,119	-0,966	0,290	0,035	-0,053	1
<i>En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0,050 (prueba bilateral)</i>									
Mañana 20-09									
	temperatura	vel.viento	altura	FVC	emisividad	ancho canal	orientacion	nubosidad	inercia
temperatura	1	-0,369	-0,326	-0,520	-0,247	0,102	0,297	0,390	0,189
vel.viento	-0,369	1	0,581	0,201	0,273	-0,057	-0,056	-0,413	-0,285
altura	-0,326	0,581	1	0,102	0,406	-0,293	-0,018	-0,503	-0,443
FVC	-0,520	0,201	0,102	1	-0,118	0,165	-0,200	-0,158	0,119
emisividad	-0,247	0,273	0,406	-0,118	1	-0,361	-0,104	-0,126	-0,966
ancho canal	0,102	-0,057	-0,293	0,165	-0,361	1	0,029	0,087	0,290
orientacion	0,297	-0,056	-0,018	-0,200	-0,104	0,029	1	-0,260	0,035
nubosidad	0,390	-0,413	-0,503	-0,158	-0,126	0,087	-0,260	1	0,176
inercia	0,189	-0,285	-0,443	0,119	-0,966	0,290	0,035	0,176	1
<i>En negrita, valores significativos (fuera diagonal) al umbral alfa=0,050 (prueba bilateral)</i>									
Noche 20-09									

Tabla 2. Matriz de correlación de las variables utilizadas en el estudio, caso primavera, mañana y noche.

El análisis de la matriz de correlaciones muestra que durante la mañana la temperatura del aire está positivamente vinculada a la nubosidad y la altura. Esto puede explicarse dado los mecanismos de transferencia que se verifican durante este momento del día, en una primera etapa del monitoreo, antes de la salida del sol, todavía continúa el enfriamiento de las superficies, por lo tanto a mayor nubosidad, menor enfriamiento radiativo de las mismas y mayor es la temperatura del aire en contacto con ellas. Por otra parte, la correlación positiva con la altura, en este caso describe el factor de exposición del área evaluada a la radiación solar, por lo que a mayor altura o exposición, la temperatura del aire es mayor. Este comportamiento de la matriz de correlaciones durante la mañana se observa para todos los casos evaluados.

Además de correlacionar con la altura y la nubosidad, la temperatura del aire durante la mañana se encuentra vinculada con la orientación y la velocidad de viento, lo que habla del acceso del viento al área evaluada, esto se verifica pues la temperatura presenta correlación positiva con la orientación, cuando la orientación aumenta (el sentido del cañón urbano se aleja del E-O), la temperatura del aire por la mañana aumenta, lo que se corresponde con la dirección de los vientos anabáticos durante la

mañana, que provienen del NE, mientras la orientación del recinto evaluado se aleja del sentido E-O hacia el sentido N-S la temperatura del aire aumenta como consecuencia de disminuir sus posibilidades de enfriamiento convectivo.

Durante la tarde la temperatura del aire se encuentra correlacionada fundamentalmente con la altura, la absorptividad (emisividad) y la nubosidad, lo que habla a las claras de la condición de acceso al sol y la capacidad de absorber y acumular calor de los recintos evaluados, además en otros casos evaluados se encuentra también correlacionada con la radiación, el factor de visión de cielo y el ancho del canal lo cual avala la hipótesis de que el acceso al sol y la absorción y acumulación de calor de la superficie es lo que condiciona la temperatura del aire durante la tarde.

Durante la noche la temperatura del aire se halla principalmente correlacionada con el factor de visión de cielo, la nubosidad, la altura y la velocidad de viento, en algunos casos además aparecen la emisividad y la inercia térmica del material, esto indica claramente que la temperatura del aire durante la noche está vinculada fundamentalmente a las posibilidades de enfriamiento radiativo y convectivo.

Los resultados obtenidos a partir del análisis por componentes principales y rotación Varimax de los ejes se muestran en las tablas 3 y 4. De acuerdo al procedimiento de Kaiser y observando los gráficos de Cattell para cada una de las corridas se decide explicar el fenómeno usando los 4 primeros factores que resultan del análisis por componentes principales. La tabla 3 muestra el porcentaje de variabilidad del fenómeno que puede explicar cada factor, para cada periodo de monitoreo y en el caso de ejemplo (20-09 primavera), el resto de los días evaluados sigue el mismo comportamiento. El análisis muestra que mediante estos cuatro factores se podría explicar entre el 75 y el 80% del fenómeno

% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	27,563	22,629	13,662	12,596
% acumulado	27,563	50,192	63,854	76,450
Mañana 20-09				
% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	25,281	24,181	15,587	13,680
% acumulado	25,281	49,462	65,048	78,729
Tarde 20-09				
% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	23,754	18,741	24,239	12,180
% acumulado	23,754	42,494	66,733	78,913
Noche 20-09				

Tabla 3. Porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los factores del ACP. Caso primavera (20-09). Para los tres periodos evaluados.

Con el objeto de confirmar si una variable está fuertemente vinculada a un eje o factor, se debe observar la tabla de cosenos cuadrados, mientras mayor es el valor del coseno cuadrado de una variable, mayor es la relación de esta con el eje correspondiente. A modo de ejemplo la tabla 4 muestra esta relación para el periodo nocturno.

	F1	F2	F3	F4
temperatura	0,011	0,523	0,201	0,005
vel.viento	0,073	0,054	0,457	0,007
altura	0,127	0,013	0,491	0,063
FVC	0,049	0,507	0,078	0,058
emisividad	0,906	0,002	0,017	0,028
ancho canal	0,031	0,000	0,008	0,910
orientacion	0,028	0,584	0,136	0,016
nubosidad	0,001	0,002	0,759	0,002
inercia	0,912	0,000	0,034	0,008
Noche 20-09				

Tabla 4. Cosenos cuadrados de las variables para el periodo nocturno. Caso analizado primavera (20-09).

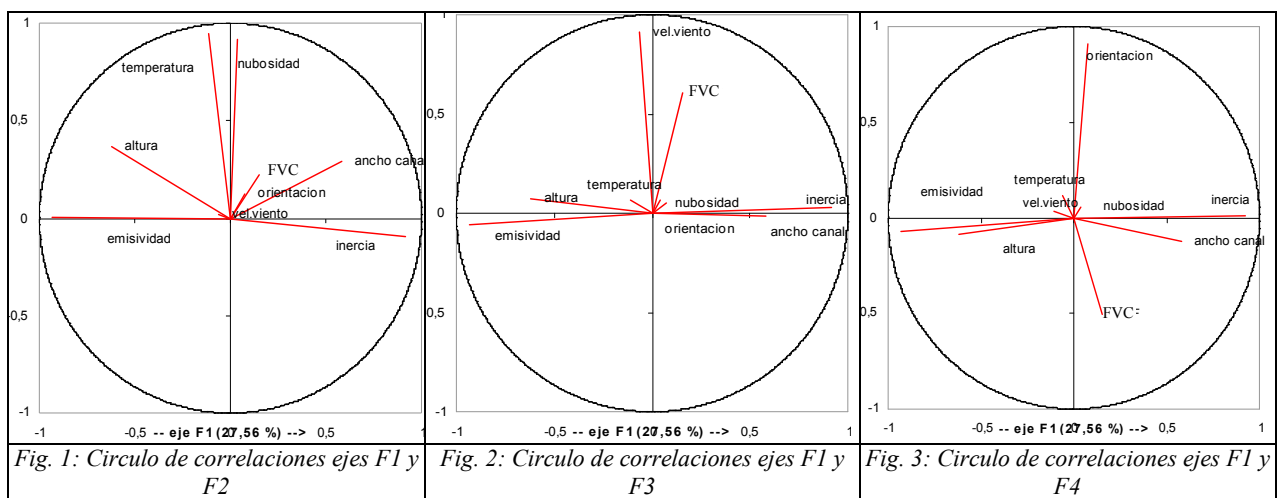
El análisis de la tabla de cosenos cuadrados para los casos analizados muestra para la mañana y la tarde que el factor 1 (F1) está relacionado principalmente por la absorción y acumulación de calor (emisividad e inercia), el factor 2 con la nubosidad, el factor 3 con la velocidad de viento y el FVC (que da idea de la rugosidad); y el factor 4 con la orientación y el FVC, este último término podría estar tanto relacionado con el acceso al sol, como con el acceso al viento, en este caso se puede decir que se trata del acceso al sol pues a medida que la orientación crece, se aleja de los 0° respecto del norte la temperatura del aire desciende como consecuencia del menor acceso al sol.

Durante la noche el F1 representa nuevamente la capacidad de los materiales de acumular y emitir energía en forma de calor, F2 está relacionado con el FVC y la orientación lo que representa la posibilidad de enfriamiento convectivo, pues las coordenadas de las variables muestran que a medida que la orientación disminuye la temperatura disminuye, esto concuerda con el hecho de que durante la noche los vientos provienen del O o SO desde la montaña, además cuando el FVC aumenta (menor rugosidad) la temperatura disminuye. El F3 durante la noche está relacionado con la nubosidad, la altura y la velocidad de viento, lo que indicaría una relación entre las posibilidades de enfriamiento radiativo y convectivo y el F4 con el ancho del canal vial. En este factor no se encuentra una incidencia importante de la velocidad de viento u otra propiedad

relacionada con la transferencia radiativa, por lo que la variable de ancho de canal vial que aparece en el F4 para todos los días evaluados puede estar en relación con la intensidad de tránsito vehicular, ya que los canales viales de mayor ancho corresponden a avenidas y tienen mayor intensidad de tránsito vehicular y esta variable correlaciona positivamente con la temperatura del aire.

En las figuras 1 a 3 se presentan para el periodo diurno dentro del caso ejemplificado los círculos de correlaciones de las variables en los factores (ejes).

El círculo de correlaciones muestra la proyección de las variables iniciales en el nuevo espacio de factores, para dos variables que se encuentran alejadas del centro, se cumple: si ellas están cercanas unas de otras ellas se encuentran positivamente correlacionadas (r cerca de 1), en el presente caso de estudio esto sucede con la temperatura, la nubosidad y la altura, ver figura 1, la velocidad de viento y el FVC, ver figura 2 y la inercia térmica y el ancho del canal, ver figura 3. Si por el contrario las variables iniciales se encuentran en posición ortogonal dentro del círculo de correlaciones ello indica que estas no se encuentran correlacionadas (r cercana a 0); para el presente caso, esto sucede con el FVC y altitud, o velocidad de viento y emisividad, ver figuras 1 a 3. El círculo de correlaciones también sirve para interpretar el significado de los ejes. En el presente caso el eje horizontal F1 está relacionado con las propiedades térmicas de los materiales que componen el cañón analizado principalmente con su capacidad de absorber o emitir radiación y con la inercia térmica de los mismos; F2 se relaciona con las nubosidad y F3 con la velocidad de viento y el FVC (que en este caso funciona como un indicador de la rugosidad del terreno) y el F4 con el acceso a la radiación solar (FVC y orientación).



La segunda evaluación de Análisis por Componentes Principales se hizo para una serie de días típicos, que corresponden a las distintas estaciones del año 2005 monitoreado. Los datos fueron tomados por las estaciones fijas de monitoreo y las corridas se hicieron para tres horarios diferentes, en general las 0.30 h; las 6.00 h y las 16.30 h. Las variables que conformaron la matriz de análisis fueron: temperatura; humedad específica; altura media de los edificios (h); orientación; FVC (factor de visión de cielo); ancho de canal vial (w); FE (denominando al factor edilicio o building factor) que ha sido obtenido a partir del procesamiento de las imágenes hemisféricas; h/w que refleja la profundidad del cañón urbano. Finalmente descartada por ser redundante con el FVC y el FE; altitud sobre el nivel del mar; Inercia térmica de los materiales de la envolvente horizontal definida como $(K \cdot \rho \cdot C_p)^{1/2}$; emisividad/absortividad del material predominante de exposición horizontal.

En esta oportunidad no se han podido evaluar las variables meteorológicas debido a que como los sensores realizan sus registros al mismo horario, no presentan variación en cuanto a la nubosidad, radiación global sobre superficie horizontal y velocidad de viento global, salvo que la radiación y la velocidad de viento fueran monitoreadas en cada estación de medición continua. Para el caso de la radiación el FVC calculado para cada punto de monitoreo da idea de sus posibilidades de acceso al sol.

Al igual que en el caso anterior se utilizó el método de Componentes Principales y con rotación Varimax a fin de aclarar los resultados contenidos en cada factor y para confirmar la fiabilidad de utilizar el método factores se hizo la prueba de esfericidad de Bartlett. Los resultados obtenidos durante las corridas son coincidentes para todos los días evaluados en distintas estaciones del año dependiendo del periodo de análisis.

El análisis de la matriz de correlaciones muestra que durante la mañana antes de la salida del sol y durante la noche, la temperatura del aire está negativamente correlacionada con el factor de visión de cielo, la humedad específica y en algunos casos positivamente correlacionada con el factor edilicio y la inercia térmica.

Como en estas correlaciones no se encuentran presentes las variables meteorológicas nubosidad o velocidad de viento, es difícil determinar si la fuerte correlación con el factor de visión de cielo tiene que ver con el enfriamiento radiativo (visión de la bóveda celeste) o con el convectivo (FVC como indicador de rugosidad) y es posible que tenga que ver con ambas de acuerdo a los resultados encontrados anteriormente. La correlación negativa con la humedad específica (a mayor humedad,

menor temperatura del aire) apunta a los usos de suelo y el tipo de cobertura de los mismos, al igual que la correlación positiva con el factor edilicio y la inercia térmica, es decir a mayor masa de acumulación y sellamiento de suelo, mayor temperatura.

Durante la tarde la temperatura del aire correlaciona positivamente con la humedad absoluta es decir a mayor contenido de humedad del aire mayor temperatura del lugar, esto está de acuerdo con el hecho de que los espacios vegetados o los vacíos urbanos se encuentran más calientes durante la tarde, ya que presentan grandes áreas de acceso al sol, y como no tienen masa de acumulación se calientan rápidamente siguiendo a la radiación solar, es en este tipo de espacios donde tiene lugar la mayor cantidad de evapotranspiración. En el verano durante la tarde, la temperatura del aire se encuentra también vinculada a la absorptividad y la inercia térmica de los materiales que componen el recinto evaluado.

Los resultados obtenidos a partir del análisis por componentes principales y rotación Varimax de los ejes se muestran en las tablas 5 y 6.

De acuerdo al procedimiento de Kaiser y observando los gráficos de Cattell para las corridas se decide explicar el fenómeno usando los 4 primeros factores que resultan del análisis por componentes principales. La tabla 5 muestra el porcentaje de variabilidad del fenómeno que puede explicar cada factor, para cada hora de monitoreo y en el caso de ejemplo (17-01 verano), el mismo comportamiento se registra para el resto de los días evaluados. El análisis muestra que mediante estos cuatro factores se podría explicar entre el 80 y el 88% del fenómeno

% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	24,504	28,164	22,102	12,888
% acumulado	24,504	52,669	74,771	87,659
0.30 h 17-01				
% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	27,911	25,185	19,157	13,369
% acumulado	27,911	53,096	72,253	85,623
6.00 h 17-01				
% de varianza (tras rotación Varimax):				
	F1	F2	F3	F4
% varianza	34,178	27,482	12,279	13,348
% acumulado	34,178	61,660	73,940	87,288
16.30 h 17-01				

Tabla 5 Porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los factores del ACP. Caso verano (17-01). Para los tres horarios evaluados.

La tabla 6 muestra un ejemplo del comportamiento de los cosenos cuadrados de las variables dentro de cada factor. Como se dijo anteriormente mientras mayor es el valor del coseno cuadrado de una variable, mayor es la relación de esta con el eje correspondiente.

	F1	F2	F3	F4
altura	0,172	0,002	0,573	0,042
FVC	0,001	0,766	0,032	0,032
emisividad	0,927	0,005	0,007	0,020
ancho canal	0,002	0,085	0,081	0,780
orientacion	0,136	0,053	0,330	0,402
FE	0,000	0,900	0,010	0,003
h	0,033	0,721	0,000	0,008
temperatura	0,234	0,226	0,382	0,000
humedad abs	0,000	0,056	0,782	0,002
inercia térmica	0,944	0,001	0,014	0,001
0.30 h 17-01				

Tabla 6 Cosenos cuadrados de las variables para el periodo nocturno. Caso analizado verano (17-01).

La observación de la tabla de cosenos muestra que durante la noche (0.30 h) el F1 está relacionado con la inercia y la emisividad, es decir con la cantidad de calor acumulado y transferido por enfriamiento radiativo, ya que los signos de las variables indican que a menor emisividad mayor temperatura y a mayor inercia mayor temperatura.

El F2 está relacionado principalmente con el factor edilicio, la altura media de los edificios y el factor de visión de cielo, este factor parece responder al mecanismo de enfriamiento convectivo, pues las variables FE, h y FVC indican o están relacionadas con la rugosidad del terreno. Los signos de las variables responden a lo anteriormente dicho pues a mayor factor edilicio y altura media de los edificios (mayor rugosidad) mayor es la temperatura; y a mayor FVC (menor rugosidad) menor es la temperatura, además este factor prácticamente no se relaciona con la emisividad por lo que no puede tratarse de enfriamiento radiativo y se encuentra levemente vinculado a la orientación y el ancho del canal. Si se evalúan los signos de las variables, se observa que a mayor ancho de canal, menor temperatura y a menor orientación (más cerca del sentido E-O o 0° respecto del norte) menor es la temperatura. Esto avala que se trata del acceso al viento, debido a que durante la noche los vientos descienden de la montaña desde el O o SO.

El F3 está vinculado a la humedad específica, es decir el grado de forestación o vegetación presente en los espacios.

El F4 está representado por el ancho del canal vial y la orientación, esto puede responder o bien al acceso al viento, o como se dijo anteriormente representar la vinculación de la intensidad de tránsito con la temperatura del aire, ya que a mayor orientación hay mayor temperatura durante la noche por menor acceso al viento, puede ser que en estas condiciones el calor aportado por el tránsito vehicular se vuelva importante.

Durante las primeras horas de la mañana antes de la salida del sol (6.00 h) los factores explicativos responden a las mismas variables, solo que las variables que explican el F1 en este horario se corresponden con el F2 durante la noche; e igualmente las que explican el F2 se corresponden con las del F1 durante la noche.

Durante la tarde el F1 compuesto por la inercia térmica, la absorptividad y la humedad específica de los espacios, vincula la temperatura del aire con la absorción y acumulación de calor de los espacios, como con la cantidad de calor sensible transformado en calor latente mediante evaporación, es decir está vinculado a las propiedades térmicas de los materiales que componen el espacio.

El F2 vinculado al factor de visión de cielo, al factor edilicio y la altura media de los edificios, habla de la relación de la temperatura del aire durante la tarde con el acceso al sol de los recintos evaluados y no con el acceso al viento como se explicó para otros horarios, esto queda apoyado en los signos que presentan las variables durante el análisis, a mayor FVC mayor temperatura (si se tratara de acceso al viento debería ser al revés); también se observa a mayor FE menor temperatura y a mayor h menor temperatura, lo que da idea del efecto de sombra de los edificios.

El F3 relacionado con la orientación responde bien a las posibilidades de acceso al viento de los recintos, ya que a mayor orientación se aleja del sentido E-O, mayor temperatura del aire, en concordancia con el sentido de los vientos durante la tarde que provienen del NE.

Finalmente el F4 vinculado al ancho del canal, parece reflejar el efecto de la intensidad del tránsito sobre la temperatura del aire durante la tarde.

CONCLUSIONES.

Los resultados del análisis por componentes indican que la representación del fenómeno en cuatro ejes podría explicar hasta un 88% de la variabilidad de los datos observados, los cuatro factores obtenidos muestran que existe una estrecha relación entre la temperatura del aire y las propiedades térmicas de los materiales que componen el recinto evaluado, principalmente su capacidad de absorber y acumular calor caracterizada por las variables: absorptividad e inercia térmica, tipo de cobertura de suelo y grado de forestación; el acceso al sol caracterizado por las variables: factor de visión de cielo, factor o densidad edilicia, altura media de los edificios, orientación, altura sobre el nivel del mar y nubosidad; el acceso al viento cuyas variables que lo caracterizan son: rugosidad de las superficies, orientación respecto al sentido de las brisas locales, velocidad de viento y el tránsito vehicular caracterizado por la variable: ancho del canal vial.

Finalmente es importante destacar que a partir de los resultados obtenidos se concluye que cualquier propuesta sustentable de diseño de los espacios urbanos dentro del AMM que tenga la pretensión de disminuir la isla de calor de la ciudad de Mendoza deberá minimizar la masa de acumulación y trabajar sobre las propiedades térmicas de los materiales presentes en los mismos con el objetivo de reducir la absorptividad de los espacios, proteger las fachadas durante las horas de insolación y despejar la visión de bóveda de los espacios con el objeto de aprovechar el potencial de enfriamiento radiativo nocturno. Además de los resultados se desprende que no debe sorprender que la ciudad de Mendoza presente una isla de calor urbana cuya máxima excede los 10 °C (Correa, 2006) pues sus recintos urbanos presentan características morfológicas opuestas.

En el futuro con el objeto de vincular mejor el fenómeno físico y los factores resultantes del análisis que explican el fenómeno, se piensa correr el análisis por componentes principales correlacionando los números adimensionales que resultan de la ecuación de transferencia de calor para la ciudad.

REFERENCIAS

- Bogren, J (1991). Screening effects on road surface temperature and road slipperiness. *J. Theoretical Appl. Climatol.*, 43:91-99
- Correa, E.N (2006). Tesis Doctoral. Isla de Calor Urbana. El Caso del Área Metropolitana de Mendoza. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas.
- Oke, T. R (1976). The Distance Between Canopy And Boundary –Layer Urban Heat Island. *Atmosphere*. 14 (4) 268-277.
- Shao, J., Swanson, J.C., Patterson, R. (1997). Variation of winter road surface temperature due to topography and application of thermal mapping. *Meteorol. Appl.*, 4: 131-137
- Tabony, R.C. (1985). Relations between minimum temperature and topography in Great Britain. *J. Climatol.*, 5: 503-520

ABSTRACT: The temperature in an urban canyon is affected by a great number of variables, which not always are independent from each other; it is therefore necessary to determine the interrelationship between these variables and the weight that each of them has on the urban heat island phenomenon. To this purpose, an analysis, of the main components has been made (PCA) with the intention of determining a minimal number of variables that allow to explain the phenomenon. The correlated data indicate that the representation of the phenomenon in four axes could explain until an 88% of the variability of the observed data. The four axes show that exists one constricted relation between the air temperature and the thermal properties of the materials that compose the evaluated space, mainly their capacity to absorb and to accumulate heat, also the air temperature into an urban canyon are determined by the access conditions to the sun and the wind and finally for the intensity of vehicular circulation.

Keywords: urban heat island, statistical analysis, principal components analysis (PCA), sustainable urban design.