



EFEITO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM MODELO REDUZIDO DE UM ARRANJO URBANO SOB CONDIÇÕES DESÉRTICAS

(1) E.L. Krüger, (2) D. Pearlmutter, (2) P. Berliner

(1) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Departamento de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - E-mail: ekruger@utfpr.edu.br

(2) J. Blaustein Institute for Desert Research, Ben-Gurion University of the Negev, Sede-Boqer Campus Israel – E-mail: davidp@bgumail.bgu.ac.il

RESUMO

Analisou-se a influência da geometria urbana no microclima com um modelo em escala. Esse modelo consiste de uma malha de prédios e ruas, construída sobre uma área aberta. O sítio experimental está localizado em um local árido, Sede Boqer (latitude 30.8°N e altitude de 480m acima do nível do mar), Campus da Universidade de Ben-Gurion, Deserto do Negev, em Israel. Considerando que uma das principais vantagens do modelo em escala é poder-se controlar variáveis que afetam o microclima, pretende-se aqui avaliar o impacto de adicionar umidade às “ruas” entre “fileiras de prédios” no balanço energético global da superfície do modelo em escala. Este artigo apresenta a análise do efeito da adição parcial de umidade na temperatura do ar nos cânions. Para que se pudesse avaliar este efeito, são descritos dois aspectos: 1) comparações entre predições (modelo semi-empírico) e dados medidos de temperatura no cânion, para situações nas quais variou-se a área molhada da rua; e 2) efeito da exposição solar e aos ventos nas temperaturas no cânion e nas taxas de evaporação, medidas nos cânions por meio de painéis de evaporação.

ABSTRACT

The influence of urban geometry on microclimate was studied using a scale-model which consists of an extensive urban building/street array, constructed at an open site. The experimental site is located in the arid Negev region of Israel, at Sede Boqer (latitude 30.8°N and elevation 480 m above sea level). Considering that one of the main advantages of using the scale-model facility is to be able to control factors affecting microclimate, it is intended here to evaluate the impact of partial wetting of the “streets” between the “building rows” on the overall surface energy balance of the scale-model. This paper presents the analysis of the effect of partial wetting on canyon temperatures. In order to assess such effect, two aspects are described: 1) comparisons between predicted and measured canyon temperatures for cases in which different areas of the streets were wetted; and 2) effects of solar and wind exposure on canyon temperatures and evaporation rates as measured in the street canyon by means of evaporation pans.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho se insere numa pesquisa maior, desenvolvida como tema de projeto de pós-doutorado realizado junto ao *Department of Man in the Desert, Ben-Gurion University of the Negev*, Israel. Esse projeto envolveu diversas etapas e teve como finalidade analisar os efeitos de alterações da configuração urbana no consumo de energia para condicionamento térmico de edificações. A etapa aqui descrita consistiu na avaliação do efeito da adição parcial de umidade na temperatura do ar em cânions de um modelo reduzido de uma malha urbana. Pearlmutter et al. (2003) apresentaram essa nova abordagem para modelagem física de estruturas urbanas sob condições microclimáticas, baseada em um modelo reduzido em espaço aberto de uma superfície urbana (*Open-Air Scaled Urban Surface - OASUS*). Essa abordagem é considerada mais flexível que observações feitas em escala real em sítios urbanos, onde a possibilidade de se generalizar sobre resultados é limitada devido à complexidade das cidades reais, enquanto que a modelagem matemática ou em laboratório tende a isolar e simplificar demasiadamente processos climáticos essenciais.

Experimentos previamente realizados com o modelo em escala reduzida estiveram limitados à análise de trocas de energia ao nível do pedestre e ao balanço energético acima da cobertura urbana, ambos os casos, porém com insignificantes trocas de calor latente. Considerando que uma das principais vantagens do modelo em escala é poder-se controlar variáveis que afetam o microclima, pretende-se aqui avaliar o impacto de adicionar umidade às “ruas” entre “fileiras de prédios” no balanço térmico em um dos cânions do modelo. A adição de umidade à malha urbana sob a forma de painéis evaporativos (canaletas de metal fechadas lateralmente, preenchidas com lâmina d’água e inseridas entre as fileiras de blocos) pode ser correlacionada com a área de espaços gramados. Sendo assim, a análise do efeito da adição parcial de umidade na temperatura do ar nos cânions representa o potencial de redução da carga térmica em espaços abertos (em cânions urbanos), na presença de espaços gramados. Para que se pudesse avaliar este efeito, são descritos dois aspectos: 1) comparações entre predições (modelo semi-empírico) e dados medidos de temperatura no cânion, para situações nas quais variou-se a área molhada da rua; e 2) efeito da exposição solar e aos ventos nas temperaturas no cânion e nas taxas de evaporação, medidas nos cânions por meio de painéis de evaporação.

2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DO MODELO EM ESCALA

O desenvolvimento da metodologia do modelo em escala de uma superfície urbana, denominado *Open-Air Scaled Urban Surface – OASUS*, seguiu-se a uma série de estudos sistemáticos, tendo como estudo inicial o monitoramento realizado em uma vila sob condições de clima árido, Dimona, Deserto do Negev, Israel (latitude 31°N, elevação 600m) (PEARLMUTTER et al., 1999). Os resultados dessas medições em escala real serviram para balizar resultados encontrados posteriormente em OASUS, especificamente sob a forma de um **modelo de balanço energético de um pedestre em um cânion urbano**, englobando trocas radiantes e convectivas e posteriormente também as trocas evaporativas existentes (PEARLMUTTER et al., 2006).

De modo a ampliar a possibilidade de análise de situações diversas encontráveis em uma malha urbana, mas de forma controlada, elaborou-se o modelo OASUS, em escala 1:15 de um arranjo urbano. O modelo consiste de uma malha de prédios e ruas, construída sobre uma área aberta. As fileiras de prédios são compostas por blocos de concreto vazados de 0.2×0.2×0.4m e apresentam características análogas aos materiais encontrados em construções da região do Negev. O sítio experimental está localizado em um local árido, Sede Boqer (latitude 30.8°N e altitude de 480m acima do nível do mar), Campus da Universidade de Ben-Gurion, Deserto do Negev, em Israel.



Figura 1: O modelo reduzido (*Open-Air Scaled Urban Surface - OASUS*)

Na Figura 1 observa-se uma série de fileiras repetidas, na qual um mastro para monitoramento de diversas variáveis foi inserido a sotavento, seguido por uma disposição desordenada de fileiras, em diversas orientações. As fileiras repetidas são dispostas perpendicularmente ao vento dominante (noroeste), enquanto que as demais simulam situações diversas: cânions paralelos ao vento dominante e em disposição leste-oeste e norte-sul. O distanciamento entre as fileiras e sua altura também proporcionam resultados em termos de relações H/W (altura da fileira por largura entre fileiras). Para cada situação, tomou-se medições nos respectivos cânions, desenvolvendo-se os resultados no referido modelo de balanço energético de um pedestre em um cânion urbano. Os resultados foram então transformados através de um procedimento escalar e comparados com situações em escala real.

Uma outra análise possível com o modelo OASUS se refere ao estudo do **balanço energético de superfície**, acima da malha urbana (PEARLMUTTER et al., 2005). Nesta situação, pôde-se avaliar a distribuição dos fluxos energéticos para diferentes rugosidades do terreno segundo a equação básica:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

Na qual Q^* é a radiação líquida obtida para todos os comprimentos de onda, Q_F é o calor antropogênico, Q_H é calor sensível, Q_E é calor latente, ΔQ_S é o fluxo devido ao armazenamento de calor na malha urbana e ΔQ_A é um termo referente à movimentação convectiva horizontal ou advecção. Para o modelo em escala, considera-se a advecção como desprezível e o calor antropogênico como inexistente.

2.1 Adição de umidade ao modelo OASUS

Experimentos anteriores limitaram-se ao balanço energético de um pedestre em um cânion urbano e ao balanço energético acima da malha urbana com trocas de calor latente desprezíveis, considerando-se o clima desértico e a inexistência de fontes de água no modelo. Na presente etapa, procurou-se inserir quantidades significativas de superfícies molhadas no modelo, de modo a aumentar o efeito da evapotranspiração (a parcela Q_E da equação 1). O monitoramento dessa parcela envolveu a adoção de dois procedimentos: a pesagem numa base horária de painéis evaporativos, com balança digital, e o método da covariância, explicado mais adiante, utilizando um analisador de gás (GRIMMOND & OKE, 1999).

3. MONITORAMENTO CLIMÁTICO NO MODELO OASUS

3.1 Clima local

O modelo em escala está localizado no Campus de Sede Boqer da Ben-Gurion University. A localidade situa-se na região alta do deserto do Negev, aproximadamente a 480 m acima do nível do mar. O clima é caracterizado por grande variação térmica diária e sazonal, ar seco e céu claro com radiação solar intensa. No verão, a média das temperaturas máximas situa-se em torno de 32°C com média diária de 17°C. A radiação global tem um valor médio diário de 7.7kWh/m² em junho e julho. O vento dominante vem consistentemente do noroeste e torna-se mais forte ao final da tarde e nas primeiras horas da noite (BITAN & RUBIN, 1991).

3.2 Arranjo experimental

Painéis evaporativos (2.0 m × 0.10 m, com 3 cm de profundidade) foram confeccionados a partir de canaletas de metal e, entre algumas fileiras no modelo em escala, pequenos painéis foram montados para pesagem por meio de uma balança digital, de forma a se estimar a quantidade de água evaporada em determinadas fileiras. Acima do modelo em escala, fixados ao mastro, diversos instrumentos foram instalados para análise do balanço energético de superfície (*SEB: surface energy balance*), sendo conectados a estações Campbell. Para tanto, a radiação líquida foi medida a aproximadamente 1.5m (radiação global incidente e refletida) e a 0.9 m um anemômetro sônico e um analisador de gás foram utilizados para medir os fluxos de calor sensível e latente.

3.3 Radiação Líquida (Q*)

Q* foi medida com um radiômetro (Radiation and Energy Balance Systems –REBS, modelo Q7-1), instalado a 1.5 m de forma que o albedo no entorno se tornasse homogêneo.

3.4 Temperatura do ar, velocidade e direção do vento acima da malha

Para medição da velocidade do vento, utilizou-se um anemômetro sônico tridimensional (Young, modelo 81000). O cálculo posterior dos três vetores de velocidade proporciona a direção do vento. Adicionalmente, a temperatura do ar foi também monitorada pelo anemômetro sônico.

3.5 Temperatura do ar no cânion

Em uma das fileiras repetidas, posicionou-se um termopar para medição da temperatura do ar, acoplado à estação Campbell.

3.6 Fluxos de Calor Latente (Q_E) e Sensível (Q_H)

Com um analisador de gás (*Open Path CO₂/H₂O Analyzer* LI-COR, modelo LI-7500) programado para medir em consonância com o anemômetro sônico, obteve-se Q_E pelo método da covariância. A cada décimo de segundo, medições sincronizadas do analisador de gás e do anemômetro sônico eram armazenadas pela estação Campbell. De 5 em 5 minutos, a covariância de ambas as séries de dados (concentração de vapor d'água e velocidade do ar na direção vertical) era utilizada de modo a se computar Q_E. O mesmo procedimento foi adotado para cálculo de Q_H usando como variáveis a velocidade do vento e a temperatura do ar, medidas pelo anemômetro sônico.

3.7 Fluxo de Calor Armazenado (ΔQ_s)

Para o cálculo de ΔQ_s , empregou-se placas de fluxo de calor nas paredes laterais e no topo das fileiras e no solo, no cânion.



Figure 2: Mastro de monitoramento no OASUS



Figura 3: Anemômetro sônico tridimensional (à esquerda) e analisador de gás acoplado a um anemômetro sônico unidirecional

3.8 Configurações

De forma a se considerar diversas condições de área molhada no modelo em escala, os painéis foram adicionados em etapas, para o arranjo com as fileiras com altura correspondente a um

bloco e a dois blocos de concreto (um andar e dois andares, respectivamente). Os diferentes modos analisados foram os seguintes:

- a) modo seco 1: 2 andares sem área molhada
- b) modo molhado 1: 2 andares com painéis dispostos junto às paredes voltadas para o noroeste (vento dominante)
- c) modo molhado 2: 2 andares com painéis dispostos junto às duas paredes dos cânions
- d) modo molhado 3: 1 andar com painéis dispostos junto às duas paredes dos cânions
- e) modo molhado 4: 1 andar com painéis dispostos junto às paredes voltadas para o noroeste (vento dominante)
- f) modo seco 2: 1 andar sem área molhada



Figura 4: Configurações: b) 2 andares com painéis dispostos junto às paredes voltadas para o noroeste (vento dominante) e c) 2 andares com painéis dispostos junto às duas paredes dos cânions

4. COMPARAÇÕES ENTRE PREDIÇÕES (MODELO SEMI-EMPÍRICO) E DADOS MEDIDOS DE TEMPERATURA NO CÂNION

4.1 Modelo semi-empírico para predição de temperaturas em cânions urbanos

O modelo semi-empírico foi desenvolvido para prever o balanço energético em cânions de determinada geometria com base nas condições existentes acima da superfície urbana (PEARLMUTTER et al., 2006). O modelo aproxima-se de uma função do tipo “loop” similar ao modelo de histerese utilizado para descrever a relação não-linear entre armazenagem de calor e radiação líquida (GRIMMOND et al., 1991). Para a temperatura do ar no cânion a função foi adaptada da seguinte forma:

$$T_a = a_1 T_A + a_2 \frac{\partial T_A}{\partial t} + a_3 \quad (2)$$

na qual os coeficientes a_1 e a_3 se aplicam a uma equação linear e a_2 é o fator temporal responsável pela variação horária da temperatura de ar no cânion (T_a) em relação à temperatura do ar acima da malha (T_A). O modelo mostrou-se confiável e foi validado em etapas anteriores da pesquisa.

4.2 Comparações entre temperaturas preditas e medidas

Uma comparação foi feita entre temperaturas do ar medidas nos diversos modos descritos anteriormente para adição de umidade ao modelo e aquelas preditas pelo modelo semi-empírico

para um cânion perpendicular ao vento dominante (PERP), sob duas condições de altura. A relação H/W para ambos os casos foi 0.66 (2 andares) e 0.33 (1 andar). Os coeficientes adotados na equação 2 (Tabela 1), obtidos numa etapa anterior da pesquisa correspondem às duas situações “secas” (modo seco 1 e modo seco 2). A não correspondência entre dados preditos e dados medidos (Figura 5) reflete, assim, o potencial de resfriamento da adição de áreas molhadas em um cânion urbano.

Tabela 1: Coeficientes na função de histerese para PERP

	a_1	a_2	a_3
PERP 0.66	1.35	1.3	-7.85
PERP 0.33	1.41	0.9	-8.38

A temperatura referencial adotada para as predições (T_A) foi a medida pelo anemômetro sônico tridimensional, localizado por sobre a malha, numa altura de 0.9m. O termopar no cânion estava posicionado a 10 cm do solo. Uma comparação gráfica é apresentada na Figura 5.

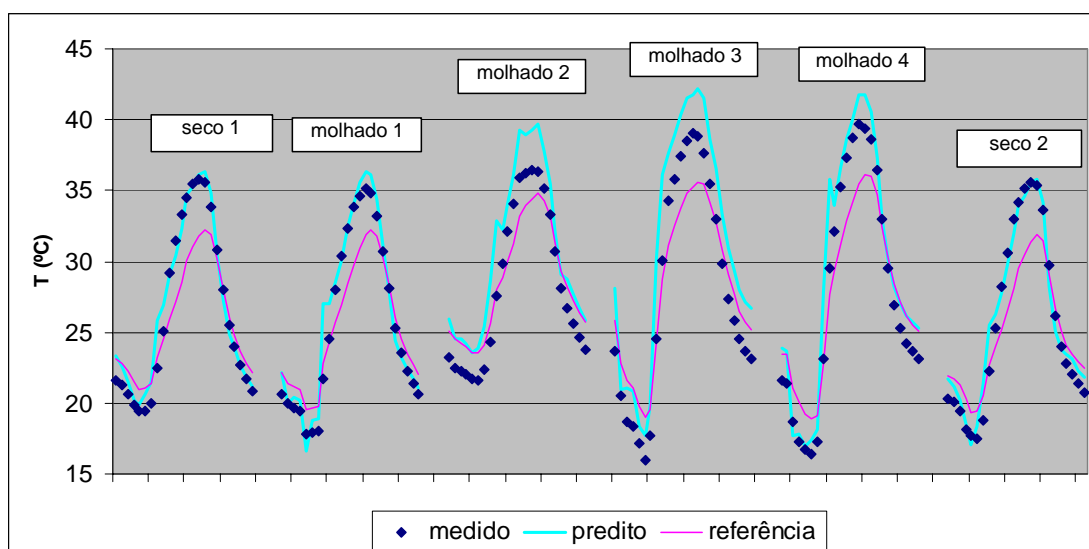


Figura 5: Dados medidos e predições para PERP 0.66 e PERP 0.33

Nota-se no gráfico que em ambos os modos secos a temperatura predita pelo modelo semi-empírico está em concordância com os dados medidos no cânion, com desvios inferiores a 0.5°C (Tabela 2). Nos modos molhados, no entanto, quando o efeito da evapotranspiração atua no resfriamento do ar, os dados medidos são significativamente inferiores aos resultados das predições. Como o modelo semi-empírico foi desenvolvido sob condições originalmente secas, as discrepâncias encontradas são esperadas e nos fornecem um indicativo do efeito das áreas molhadas na redução da temperatura em cânions urbanos.

A Figura 5 mostra que o efeito mais significativo de reduções térmicas deu-se nos modos molhados 2 e 3, chegando a 3°C ao meio-dia. Nestas duas situações, os painéis evaporativos chegam a 1/3 da área da superfície entre os blocos. Quando essa área se reduz a 1/6, a redução máxima se limita a 1 a 2°C. Tais reduções são devidas ao fato de parte dos ganhos radiantes no cânion ser dissipada por evaporação. Para os diversos modos, a Tabela 2 apresenta coeficientes de correlação, erros médios e desvios e o RMSE (*Root Mean Square Error*), uma medida da variação dos valores preditos ao redor dos valores medidos. Note-se que o erro médio observado

dá o grau de resfriamento obtido, partindo-se de uma “situação seca” para uma “situação molhada”.

Tabela 2: Comparações entre temperaturas previstas e medidas

Modo	R ²	Erro	Desvio padrão	RMSE
Seco 1	0.98	0.46	1.04	0.92
Molhado 1	0.96	0.68	1.26	1.11
Molhado 2	0.98	2.49	0.93	2.33
Molhado 3	0.98	3.19	1.19	3.16
Molhado 4	0.96	1.67	1.47	2.49
Seco 2	0.98	0.41	1.12	1.12

5. EFEITO DA EXPOSIÇÃO SOLAR E AOS VENTOS NAS TEMPERATURAS NO CÂNION E NAS TAXAS DE EVAPORAÇÃO

A adoção dos painéis de controle para pesagem da quantidade de água evaporada ao longo do dia e de um dia para o outro nos fornece uma informação da taxa evaporativa segundo o posicionamento do painel no cânion em escala e também quanto ao efeito resultante da rugosidade da malha urbana. A quantidade total de água evaporada nos dias escolhidos para a pesagem horária sofreu pouca variação, situando-se em torno de 10-12mm/dia. No entanto, observou-se o efeito significativo da exposição dos painéis em determinadas horas do dia, influenciando até mesmo seus totais diários (Figura 6).

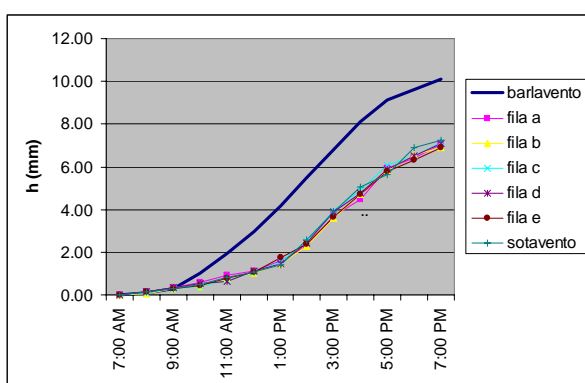


Figura 6_a: Total evaporado no painel de controle em mm - modo molhado 1

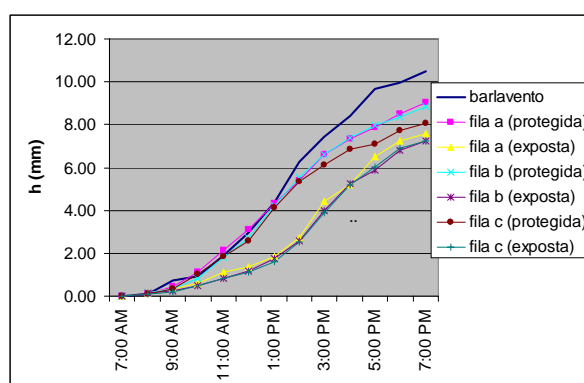


Figura 6_b: Total evaporado no painel de controle em mm - modo molhado 2

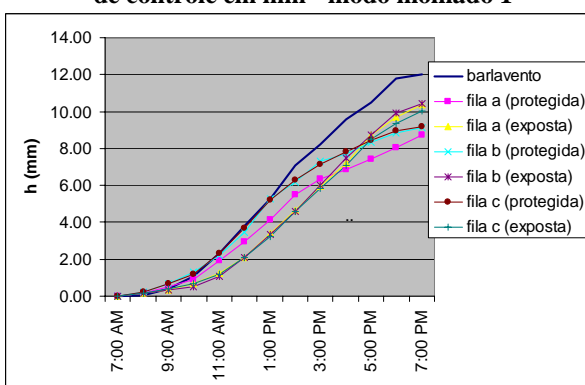


Figura 7_a: Total evaporado no painel de controle em mm - modo molhado 3

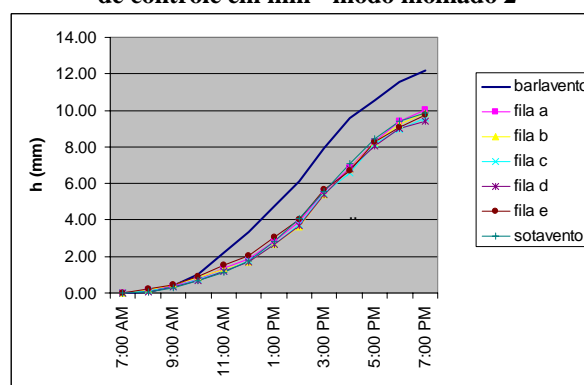


Figura 7_b: Total evaporado no painel de controle em mm - modo molhado 4

Nas Figuras, a situação a barlavento refere-se a um painel de controle fora da malha, à montante, e a situação a sotavento refere-se um painel adjacente ao mastro de monitoramento. A influência do vento nas taxas de evaporação, no entanto, não foi observada. Verificou-se que, mesmo com as fileiras se distanciando da situação denominada “barlavento”, as taxas de evaporação não se diferenciam significativamente. Isso é observado nitidamente nas Figuras 6_a e 7_b, onde todos as filas apresentam praticamente a mesma quantidade de água evaporada, em contraste com a situação barlavento. Por outro lado, considerando que as filas “expostas” e “protegidas” têm orientação noroeste (exposição ao vento dominante noroeste) e sudeste, respectivamente, verifica-se que uma orientação sudeste apresenta uma maior quantidade de horas de sol, e, portanto, maior potencial evaporativo. Sendo assim, não surpreende que as filas “protegidas” apresentem maior taxa de evaporação especialmente durante a manhã e ao início da tarde.

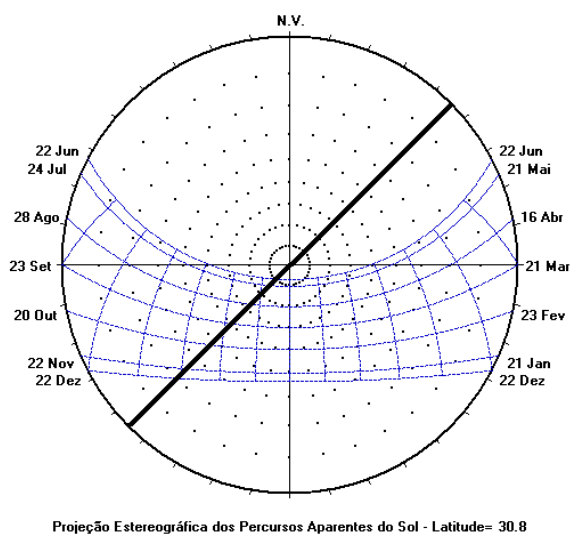


Figura 8: Carta Solar para Sede Boqer (Latitude 30.8°N), com marcação do cânion com eixo NE-SW (software Luz do Sol)

Outro efeito significativo é o da influência da altura do cânion na radiação que o adentra e que será responsável por maior ou menor grau de evaporação. Comparando-se as Figuras 6 e 7, nota-se a maior quantidade de água evaporada para as condições de $H/W=0.33$ (1 andar). Tais constatações podem nortear uma utilização mais racional de sistemas de irrigação de áreas vegetadas em climas desérticos, de forma que, por exemplo, uma vez que se comprove que mesmo com maior densificação determinado potencial evaporativo seja alcançável, possa haver menor dispêndio de água.

6. CONCLUSÕES

Utilizou-se nesta pesquisa de um modelo em escala reduzida de uma configuração urbana a fim de realizar experimentos analisando o impacto da adição de “superfícies molhadas” no balanço energético global da superfície do modelo (*SEB: surface energy balance*). No presente artigo, a análise se deu quanto ao efeito observado na temperatura do ar em “cânions molhados” comparativamente a condições “secas”. Para tanto, tomou-se uma fileira no modelo dotada de painéis evaporativos (em apenas um lado da fileira e, numa segunda etapa, em ambos os lados), variando-se também a altura do arranjo urbano (com um $H=0.20$ m ou dois blocos sobrepostos

H=0.40 m), para monitoramento contínuo da temperatura do ar a uma altura de 10 cm do solo. A comparação do efeito da adição de água às fileiras, a qual pode ser correlacionada com a quantidade de área gramada em espaços urbanos, foi observada de duas formas: 1) por meio de comparação com um modelo semi-empírico para predição da temperatura do ar no cânion, desenvolvido numa etapa anterior, para condições “secas”, na ausência dos painéis evaporativos; e 2) através da pesagem de painéis de controle em diversas fileiras do arranjo urbano.

Os resultados indicaram que há uma redução expressiva da temperatura do ar no cânion, na presença de painéis evaporativos em ambos os lados das fileiras. Essa redução é mais significativa no arranjo urbano com um bloco de altura (H=0.20). Entretanto, dado que essa redução da temperatura local é obtida por meio da adição de conteúdo de umidade sob condições desérticas, a verificação da quantidade de água evaporada nos indica que uma utilização mais racional de áreas vegetadas (dependentes de sistemas de irrigação: em Israel, os denominados *dripping systems*, computadorizados) poderia ocorrer com uma maior densificação da malha urbana.

7. AGRADECIMENTOS

Ao técnico Wolfgang Motzafi-Haller pela ajuda prestada quando da instalação e programação dos equipamentos de medição e à CAPES pela bolsa pós-doutoral.

8. REFERÊNCIAS

- BITAN, A.; RUBIN, S. (1991). **Climatic Atlas of Israel for Physical Planning and Design**. Israel Meteorological Service and Ministry of Energy and Infrastructure.
- GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A.; OKE, T.R. (1991). An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. **Atmospheric Environment** 25B:311–26.
- GRIMMOND, C.S.B.; OKE, T.R. (1999). Heat Storage in Urban Areas: Local-Scale Observations and Evaluation of a Simple Model. **Journal of Applied Meteorology** 38: 922-940.
- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P. and SHAVIV, E. (2003). **Development of a scale-modeling technique for urban microclimatic analysis**. In: Wibig J. and Gajda-Pijanowska I. (eds.) Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate - Lodz, Poland, September 2003.
- PEARLMUTTER, D., BITAN, A., BERLINER, P. (1999). Microclimatic analysis of ‘compact’ urban canyons in an arid zone. **Atmospheric Environment** 33: 4143–50.
- PEARLMUTTER, D., BERLINER, P. and SHAVIV, E. (2005). Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. **Journal of Applied Meteorology** 44(4):532–45.
- PEARLMUTTER D., BERLINER P. and SHAVIV E. (2006). Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. **Building & Environment** 41(6):783-795.