



MET-576-4

Modelagem Numérica da Atmosfera

Dr. Paulo Yoshio Kubota

Os métodos numéricos, formulação e parametrizações utilizados nos modelos atmosféricos serão descritos em detalhe.

**3 Meses
24 Aulas (2 horas cada)**



Superfície:

Métodos numéricos utilizados para resolução de problemas relacionados a parametrização de superfície.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental



- ✓ **1 Basic concept of the Surface model .**
- ✓ **2 Urban Canopy model.**
- ✓ **3 Water Body model.**
- ✓ **4 Green area model.**



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

- 1 Conceitos básicos de um modelo de 5 geração
 - 1.1 O **balanço de Energia** em diferentes condições de superfície.
 - 1.2 **Heterogeneidade da superfície continental** e mosaico approach .
 - 1.3 **Elementos de Superfície** e áreas fracionadas.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Conceito Básico de um modelo LSM

A **energia radiativa absorvida** pelo solo e pela atmosfera é dividida em fluxos de:

calor sensível,

calor latente,

calor no solo.

Essa partição (redistribuição da energia absorvida) **depende fortemente das características:**

Cobertura da terra

Regime hidrológico.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental



- Quando a superfície está **úmida**:
 - como é comum em áreas agrícolas irrigadas.
 - eventos de chuva.
- A **radiação** recebida é usada principalmente para:
 - **Evapotranspiração.**

Nesse caso:

O fluxo de **calor sensível** e o fluxo de **calor do solo** são geralmente **muito menores** que o fluxo de **calor latente**.

E a **razão de Bowen** é próxima de zero.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

- Em uma superfície seca:

A absorção da radiação recebida induz a um forte aquecimento da superfície:

Geralmente gera um forte fluxo de:

- **Calor sensível**
- **Turbulento e um**
- **Grande fluxo de calor no solo.**

Nesse caso,
não há evaporação e a razão de Bowen é infinita.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

- Quando a **superfície é coberta por uma vegetação densa**:

A água é **extraída** principalmente da **zona da raiz** da planta por **transpiração**.

Assim, o **fluxo de calor latente** é **dominante**, mesmo que a superfície do solo esteja seca.

Somente no caso de:

Houver água suficiente disponível na zona da raiz e as plantas não estiverem sob condições de estresse.



- **No caso da corpos de água:**

Parte significativa da energia absorvida não é usada em um ciclo diurno de balanço de energia e entregue em um ciclo sazonal.

A variação diurna do balanço de energia e da temperatura da superfície tende a ser pequena.

Portanto, os componentes do balanço de energia em corpos de água apresentam um atraso sazonal em comparação aos de outras superfícies.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

- **No caso da área urbana, a superfície é coberta por pavimentos impermeáveis que não permitem a evaporação da umidade do solo.**

Então, **ocorre um forte aquecimento da superfície**, como é o caso do solo descoberto.

Devido à **complexa estrutura geométrica** do dossel urbano, as características do **processo de transferência turbulenta** e do processo de **absorção e troca de radiação** são muito **diferentes de outras superfícies**.

Além disso, o **calor artificial** é liberado como energia adicional como resultado da **atividade humana**.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental



- No caso da área urbana, a superfície é coberta por pavimentos impermeáveis que não permitem a evaporação da umidade do solo.

O ambiente térmico urbano depende não apenas da diferença de propriedades físicas, como refletância e capacidade de calor, mas também da estrutura geométrica.

Devido aos múltiplos efeitos de dispersão no desfiladeiro (entre rua e muro, entre paredes), o albedo da área urbana se torna menor que a superfície plana (Aida, 1978).

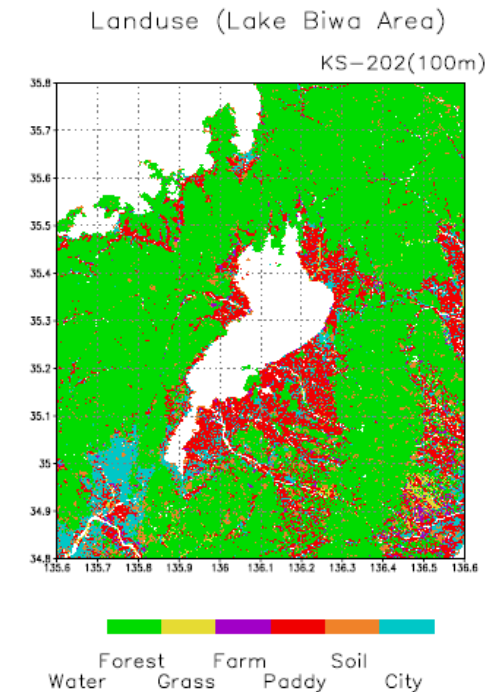
À medida que o desfiladeiro da rua se torna mais profundo, o fator de visão do céu da parede e da estrada se torna pequeno e a promoção da energia radiativa de ondas longas preso dentro do canyon se torna maior.



1.2 Heterogeneidade da superfície da continental e abordagem de "mosaico"

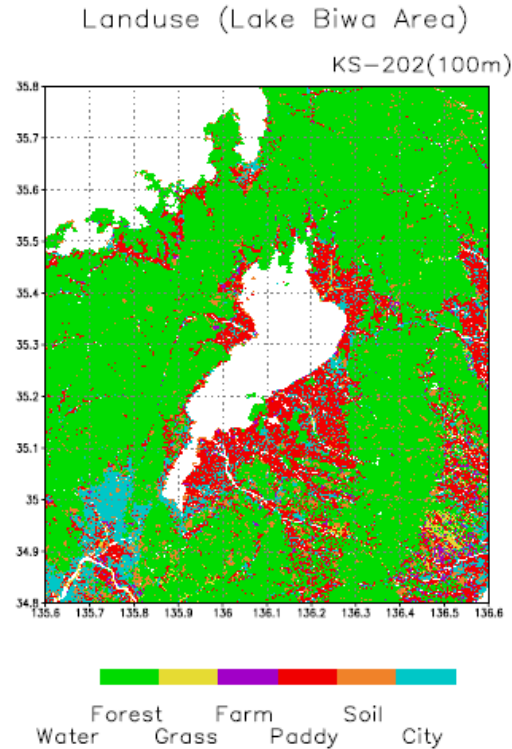
Na resolução da grade dos modelos atmosféricos: as superfícies terrestres são muito heterogêneas.

Isso pode ser **facilmente entendido olhando mapas** de solo, vegetação, topografia, padrões de uso da terra etc.





1.2 Heterogeneidade da superfície da continental e abordagem de "mosaico"



A Figura 1.1 mostra um mapa de uso da terra da Bacia do Lago Biwa, Japão. O domínio desta área é 1 grau × 1 grau.

A superfície da água e a área urbanizada são mostradas nas cores branca e azul, respectivamente.



1.2 Heterogeneidade da superfície da continental e abordagem de "mosaico"

No modelo de **PNT**, o número de elemento da grade é geralmente decidido a partir da **necessidade** de **alta precisão** e **alta eficiência computacional**.

Se o **tamanho da grade** que for selecionado para tratar a heterogeneidade da superfície, **for pequeno**, ou o **domínio se tornará extremamente pequeno** ou o **número de elementos de grade vai se tornar enorme**.

Portanto, **o problema da heterogeneidade, é claro**, deve ser tratado no LSS (Land-Surface Scheme).



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.2 Heterogeneidade da superfície continental e abordagem de "mosaico"

- Uma solução é encontrar parâmetros eficazes para gerar valores representativos de todo o quadrado da grade.
- Uma grande quantidade de trabalho já foram realizados em **pesquisas de agregação de parâmetro físicos** (Michaud e Shuttleworth, 1997).
- Às vezes, essa agregação de parâmetro **não é possível** devido **à alta não linearidade entre o parâmetro e os fluxos resultantes.**



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.2 Heterogeneidade da superfície continental e abordagem de "mosaico"

Outra maneira é aplicar uma parametrização do tipo "mosaico" (Avissar e Pielke, 1989; Kimura, 1989).

Essa abordagem acopla independentemente cada trecho de uso da terra do elemento da grade à atmosfera.

Os fluxos de superfície médios da grade são obtidos pela média dos fluxos de superfície sobre cada uso do solo ponderado por sua área fracionária.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.3 Elementos de superfície e área fracionária

O modelo LSM apresentado aqui usa a **abordagem "mosaico"** para incorporar todo tipo de uso da terra no LSS.

No modelo SiBUC, a superfície de cada área da grade é dividida em três categorias de uso da terra e cinco componentes.

1. **área verde** (cobertura da vegetação (c), solo (g))
2. **área urbana** (cobertura urbana (uc), solo urbano (ug))
3. **massa de água** (wb)



1.3 Elementos de superfície e área fracionária

Boundary Condition : $T_m, e, m, u, m, F_{\lambda, \mu}(0), F_{\tau, d}(0), P$

● Z_m (Reference Height)

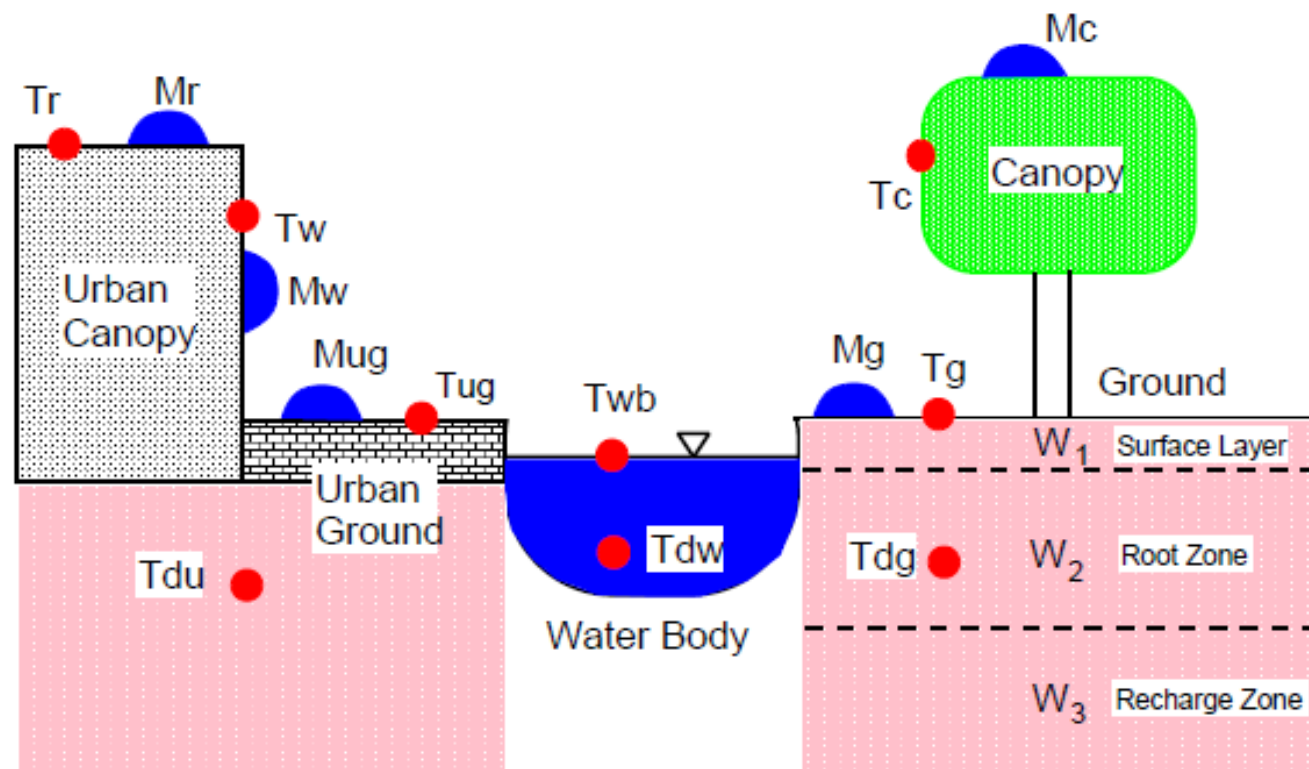


Figure 1.2: Schematic image of surface elements in SiBUC.



1.3 Elementos de superfície e área fracionária

A imagem esquemática na Figura 1.2. 1.

1. **a área verde é uma superfície natural da terra** (floresta, pastagem, solo descoberto etc.), e geralmente é tratada na maioria dos LSS.
2. **área urbana é uma superfície artificial impermeável** (edifícios, casas, calçadas, etc.).
3. **O corpo de água é uma superfície da água interior** (lagoas, rios, lagos) ou superfície do oceano.



1.3 Elementos de superfície e área fracionária

Embora a *superfície da bacia real seja uma mistura de muito mais constituintes*, **todos os elementos da superfície devem ser classificados em qualquer um deles.**

Todos os elementos de superfície incluídos na mesma categoria são agrupados e tratados como “quadriculas unitárias”.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.3 Elementos de superfície e área fracionária

Cada caixa de grade especifica-se **frações fixas desses três tipo de uso do solo** (V_{ga}, V_{ua}, V_{wb} , respectivamente).

Também são especificadas **frações de cobertura dentro da área verde e da área urbana** (V_c, V_{uc} , respectivamente).

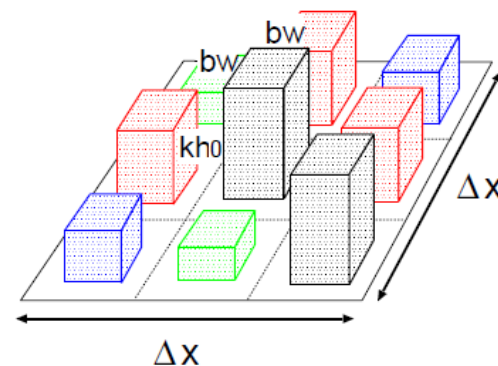


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

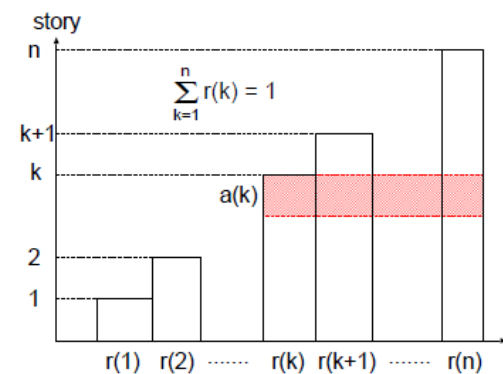


Figure 2.5: Roof height distribution

$$V_{ga} + V_{ua} + V_{wb} = 1 \quad , \quad V_{ga} \geq 0, \quad V_{ua} \geq 0, \quad V_{wb} \geq 0 \quad (1.1)$$

$$0 \leq V_c \leq 1 \quad , \quad 0 \leq V_{uc} \leq 1 \quad (1.2)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.3 Elementos de superfície e área fracionária

O calor sensível, o calor latente e os fluxos de momento são calculados separadamente por cada submodelo

(área verde $[F]_{ga}$, cobertura urbana $[F]_{ua}$, massa de água $[F]_{wb}$).

E os fluxos médios de superfície da grade são obtidos pela média dos fluxos de superfície sobre cada tipo de uso do solo ponderado por sua área fracionária.

$$[F]_{total} = \sum_i [F]_i V_i = [F]_{ga} V_{ga} + [F]_{ua} V_{ua} + [F]_{wb} V_{wb} \quad (1.3)$$



1.3 Elementos de superfície e área fracionária

- **área verde**

Para o esquema de vegetação, é adotado o SiB (Sellers et al., 1986).

Alguma modificação (simplificação) do SiB original foi feita.

O SiB2 (Sellers et al., 1994) também pode ser usado como modelo de área verde (de acordo com a opção do usuário).



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.3 Elementos de superfície e área fracionária

- **área urbana**

Um novo esquema de dossel urbano com **estrutura complexa da geometria de cânion urbano**.

Na área urbana, cada **elemento de rugosidade é expresso por um prisma quadrado**.

Presume-se que todos os prismas tenham a mesma largura e sejam espaçados de maneira uniforme, enquanto eles têm suas próprias alturas de teto.

Esta **descrição do dossel urbano é usada nos modelos para transferência turbulenta**. O processo de radiação é descrito precisamente com base no "fator de visualização do céu".



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

1.3 Elementos de superfície e área fracionária

- **corpo de água**

O esquema da massa de água é desenvolvido com base no **modelo de força-restauração.**

Os ciclos de temperatura diurnos e sazonais são reproduzidos por este modelo.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental



Table 1.1: Prognostic variables and boundary conditions for SiBUC

Prognostic Variables		
green area		
T_c	temperature for vegetation canopy	K
T_g	temperature for soil surface	K
T_d	temperature for deep soil in green area (daily mean of T_g)	K
M_c	interception water stored on canopy	m
M_g	interception water puddled on the ground	m
W_1	soil moisture wetness for surface layer	—
W_2	soil moisture wetness for root zone	—
W_3	soil moisture wetness for recharge layer	—
urban area		
T_r	temperature for building roof	K
T_w	temperature for building wall	K
T_{ug}	temperature for road	K
T_{du}	temperature for deep soil in urban area (daily mean of T_{ug})	K
M_r	interception water stored on building roof	m
M_w	interception water stored on building wall	m
M_{ug}	interception water puddled on the road	m
water body		
T_{wb}	temperature for water surface	K
T_{dw}	temperature for deep water (daily mean of T_{wb})	K
Boundary Conditions		
z_m	reference height	m
T_m	air temperature at z_m	K
e_m	vapor pressure at z_m	mb
u_m	wind speed at z_m	m s^{-1}
$S \downarrow$	downward short-wave radiation	W m^{-2}
$L \downarrow$	downward long-wave radiation	W m^{-2}
P	precipitation rate	m s^{-1}



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

Devido à complexidade e diversidade da área urbana, o modelo é formulado para ser o mais geral possível para representar qualquer tipo de cidade.

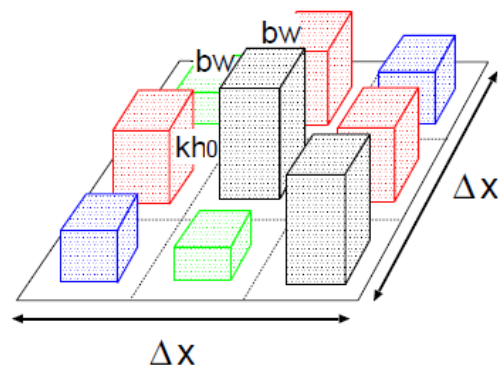


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

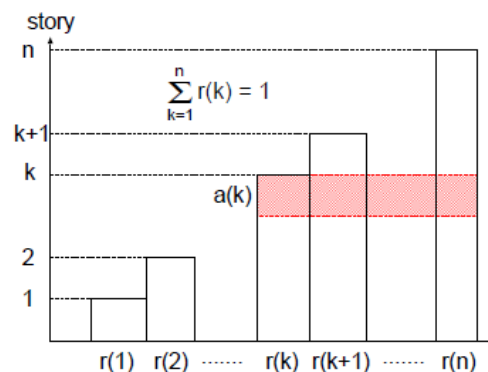


Figure 2.5: Roof height distribution

Masson (2000) também apresentou um esquema de dossel urbano baseado na geometria do cânion. O modelo apresentado aqui é diferente no tratamento da estrutura do canyon.

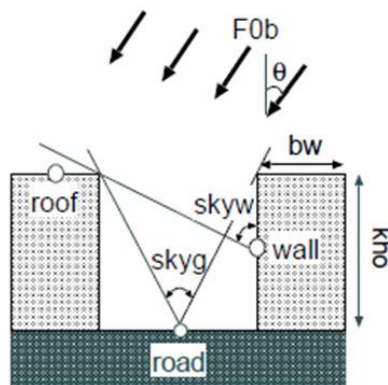


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

O modelo permite a **existência de elementos de construção de diferentes alturas**.

O processo de **radiação e transferência turbulenta** na área urbana, onde **várias profundidades de desfiladeiros** são misturados, e numericamente formulado e modelados .

2.2.1 partition of incident radiation

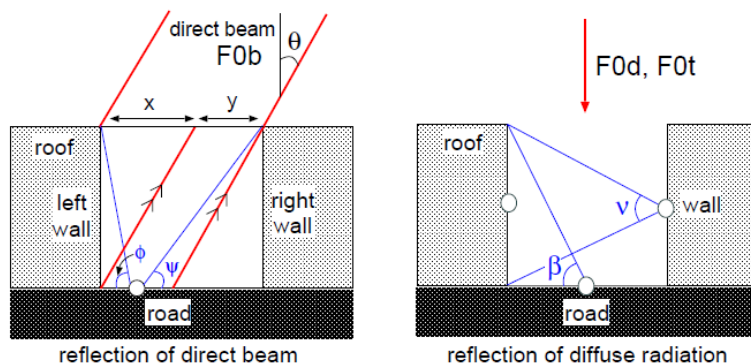


Figure 2.3: reflection to wall surface

Em seguida, são discutidos os **efeitos da estrutura geométrica** dos elementos da cidade no ambiente de energia e radiação na área urbana.



Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício de k-andares)

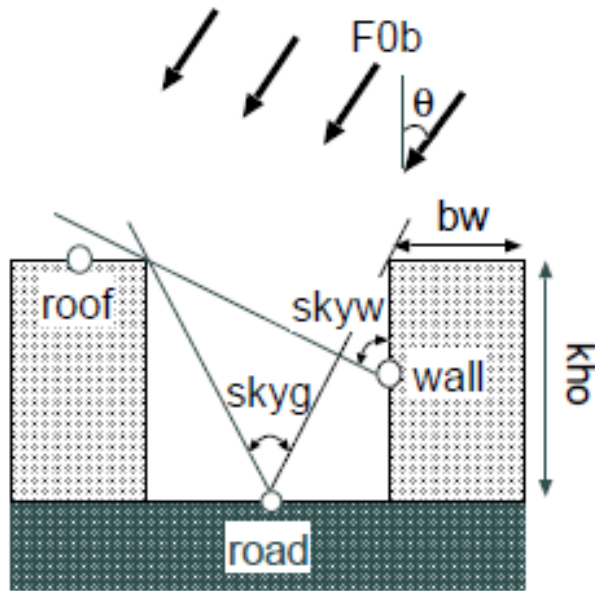


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

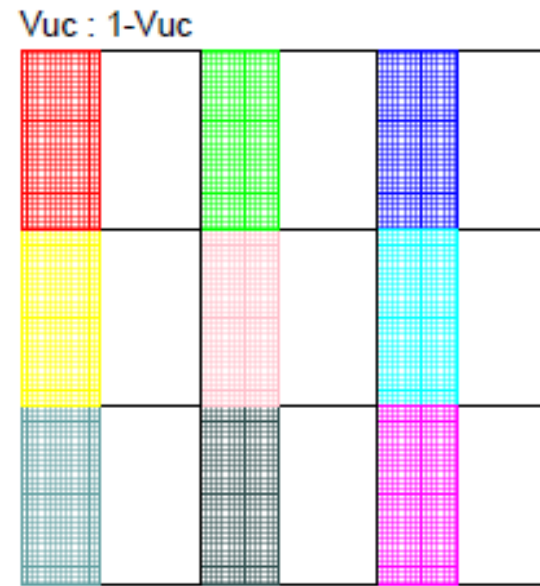


Figure 2.2: arrangement of street canyon (overlook from the sky)

O conceito de canyon, desenvolvido por climatologistas urbanos (por exemplo, Oke (1987)), usa essa estrutura:

considera uma estrada única, cercada por prédios.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício com k-andares)

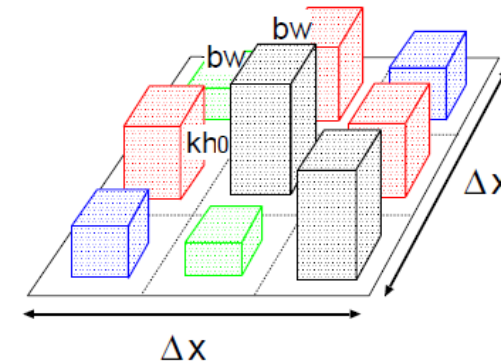


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

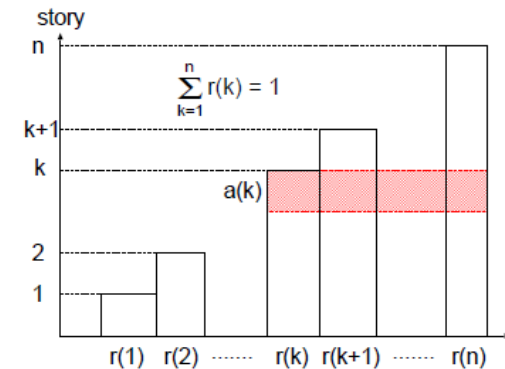


Figure 2.5: Roof height distribution

A Figura 2.1 mostra a **imagem esquemática do desfiladeiro da rua**, que é um componente básico no modelo do dossel urbano.

Nesta figura, o canyon da rua consiste em construção (b_w é largura, kh_0 é altura (k-andares) e a estrada.

Se considerarmos a **situação real da cidade**, a orientação da estrada (e também a orientação da parede do edifício) são misturada.



Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício de k-andares)

2.2.1 partition of incident radiation

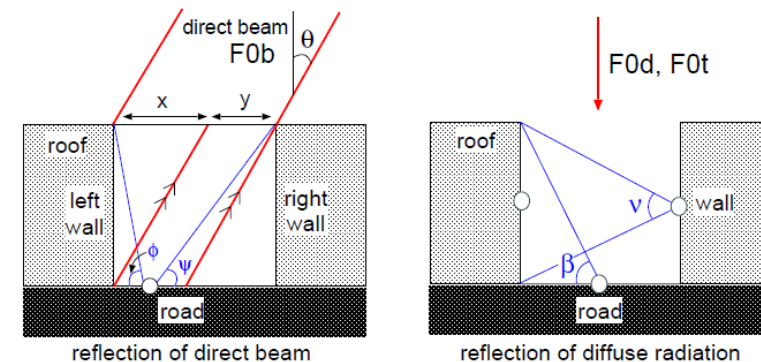


Figure 2.3: reflection to wall surface

Se tivermos **informações detalhadas sobre a orientação individual e a localização de cada edifício e estrada**, pode ser **possível calcular o balanço de energia e radiação** para todos os elementos individuais.

Mas, no caso usual, **essas informações são difíceis de obter**. **Embora o padrão das ruas seja relativamente regular, as direções da radiação solar e do vento estão mudando com o tempo.**

Portanto, **abandona-se a descrição das orientações individuais** de cada desfiladeiro.



Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício da k-história)

No cálculo do **balanço de radiação**, supõe-se que a rua seja sempre **perpendicular à radiação do feixe solar** (veja a Figura 2.1)

e os **edifícios estejam localizados ao longo de estradas** idênticas, cujo comprimento é considerado muito maior que a sua largura (veja a Figura 2.2)

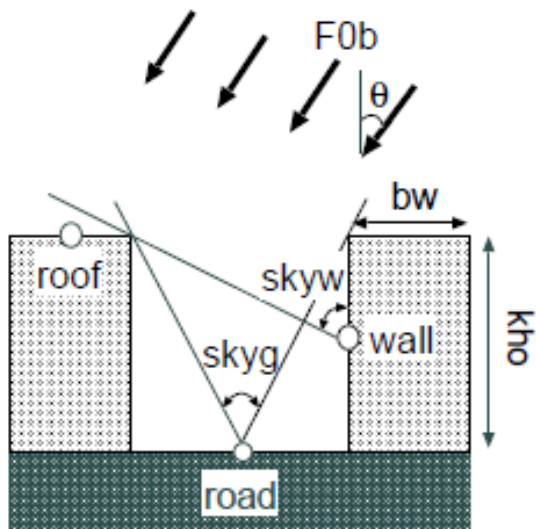


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

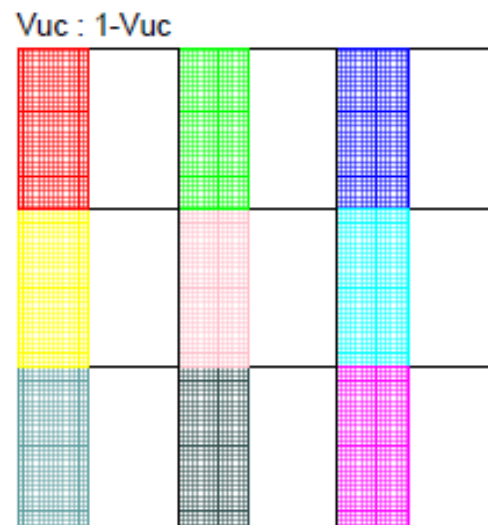


Figure 2.2: arrangement of street canyon (overlook from the sky)



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício da k-história)

E também "**fator de visão do céu**" é definido como o ângulo de visão desses pontos centrais.

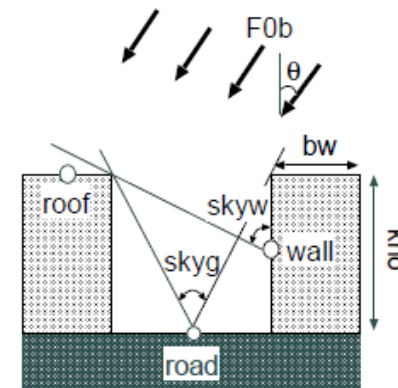


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

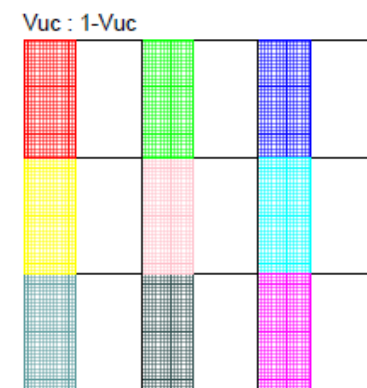


Figure 2.2: arrangement of street canyon (overlook from the sky)

Basicamente, **supõe-se que a energia de radiação seja emitida a partir do ponto central de cada componente (teto, parede, estrada).**

Usando a cobertura do edifício (ou **densidade da área planejada**) (Vuc), a largura do espaço aéreo do canyon é expressa como $\frac{bw (1 - Vuc)}{Vuc}$.

Portanto, o **fator de visualização do céu para parede** ($skyw$) e **estrada** ($skyg$) em um desfiladeiro de **k andar** (k-story) é expresso da seguinte maneira.



Modelo Canopy Urbano

2.1 Geometria do desfiladeiro da rua (edifício da k-história)

Portanto, o fator de visualização do céu para parede ($skyw$) e estrada ($skyg$) em um desfiladeiro do andar k (k-story) é expresso da seguinte maneira.

$$skyw = \arccos \frac{kh_0}{2\sqrt{\left(\frac{kh_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}}\right)^2}} \quad (2.1)$$

$$skyg = 2 \arccos \frac{kh_0}{\sqrt{(kh_0)^2 + \left(\frac{b_w(1 - V_{uc})}{2V_{uc}}\right)^2}} \quad (2.2)$$

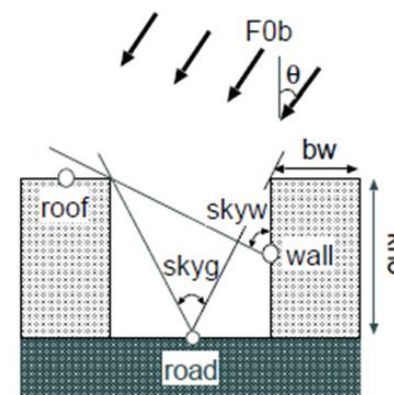


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

Componente de feixe direto de radiação incidentes de ondas curtas (F_{0b}) no desfiladeiro com ângulo de zênite θ .

Componente difuso de radiação incidente hemisfericamente de ondas curtas e ondas longas.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2 Processo de transferência de radiação

2.2.1 partition of incident radiation

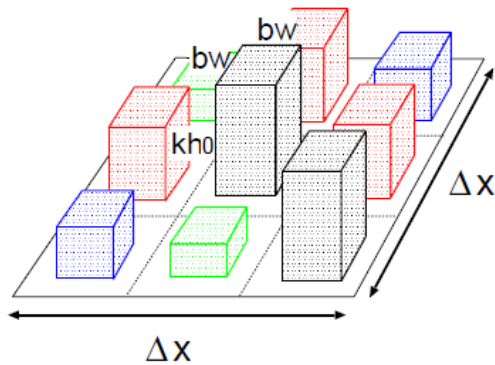


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

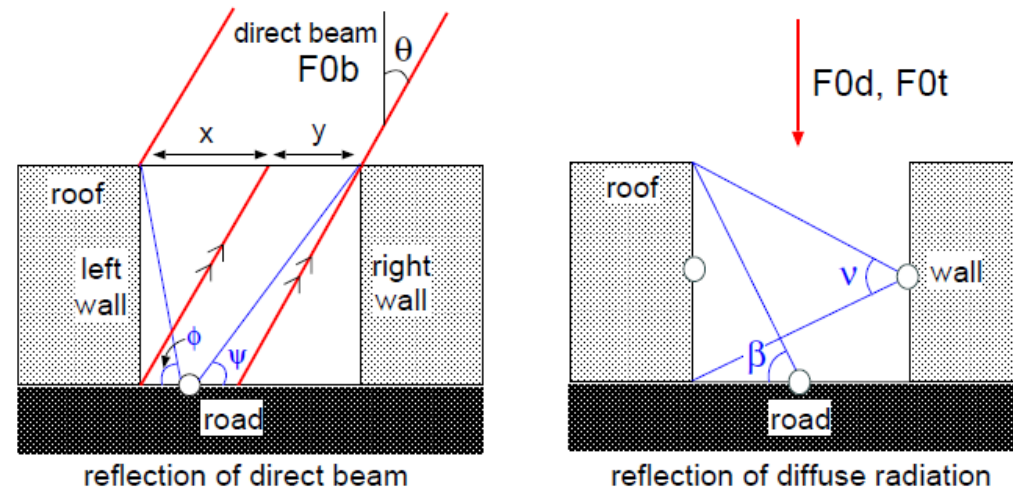


Figure 2.3: reflection to wall surface

Neste modelo, **três componentes (teto, parede, estrada)** são considerados no cálculo da radiação líquida.

Embora **existam várias alturas** de desfiladeiro na área urbana, **todos os desfiladeiros com a mesma altura (k-story)** são tratados juntos.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2 Processo de transferência de radiação

Este é um conceito básico do processo de radiação no modelo de copa urbana.

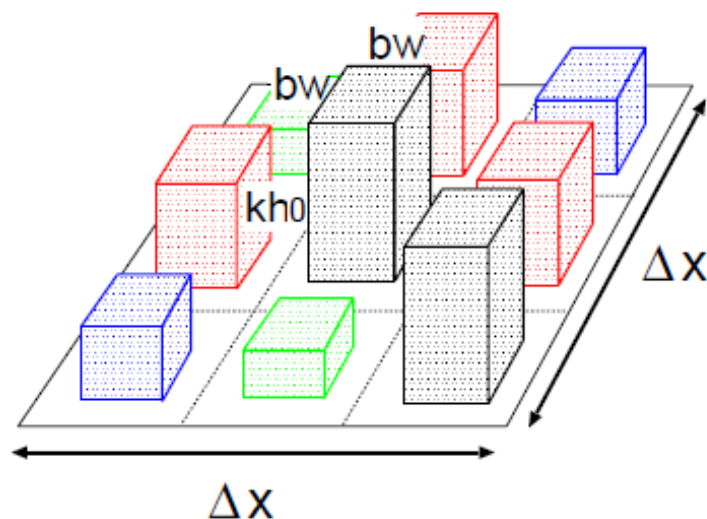


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

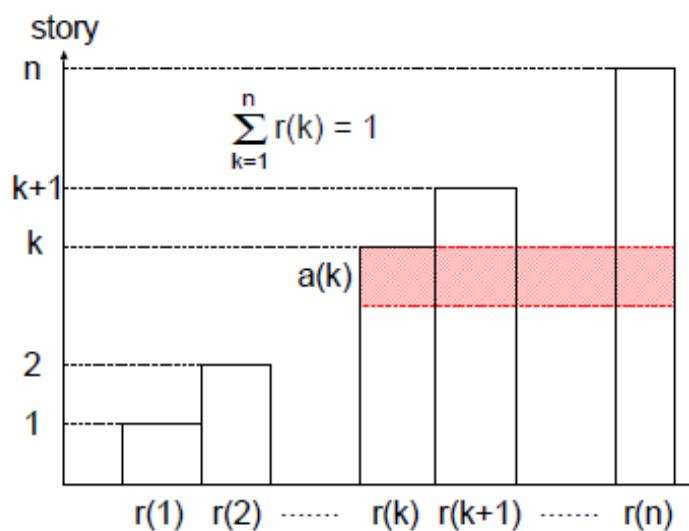


Figure 2.5: Roof height distribution

Assumindo a situação do **canyon de k-story**, o balanço de radiação é calculado.

Em seguida, a **energia radiativa total líquida para telhado, parede e estrada** é calculada integrando-se à função de distribuição da altura do telhado ($r(k)$).



Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

Primeiramente, é descrita a partição do incidente de radiação de ondas longas e ondas curtas para cada elemento.

2.2.1 partition of incident radiation

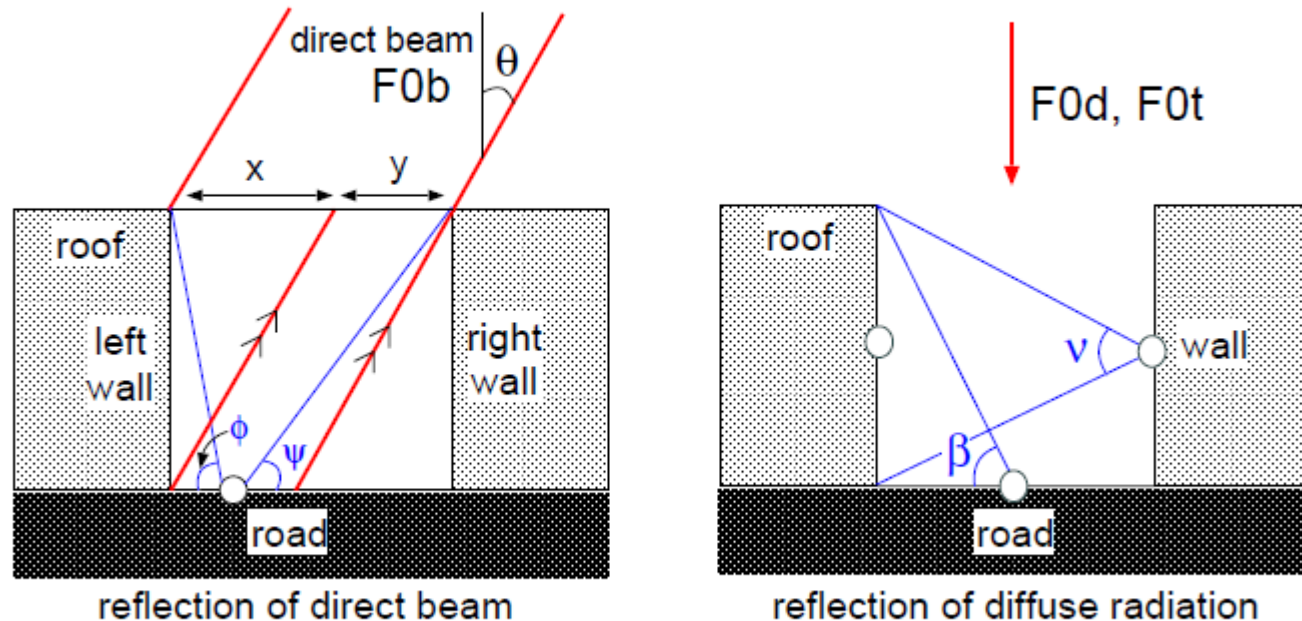


Figure 2.3: reflection to wall surface



Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

2.2.1 partition of incident radiation

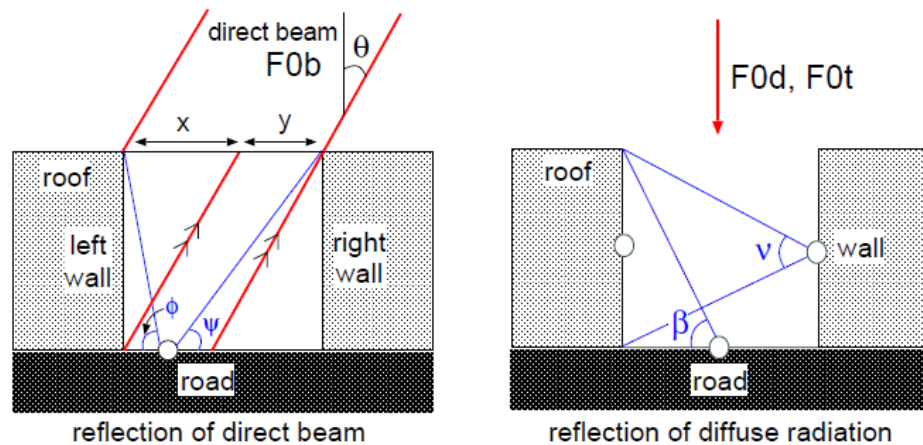


Figure 2.3: reflection to wall surface

A fração da radiação direta do feixe incidente no telhado é igual à cobertura do edifício (V_{uc}).

Quanto à parede e à estrada, a radiação é particionada de acordo com o ângulo de zênite incidente (θ).

Esta partição é $x:y$ na Figura 2.3 acima . Onde,



Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

$$x = kh_0 \tan(\theta)$$

$$y = \frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}} - kh_0 \tan(\theta)$$

2.2.1 partition of incident radiation

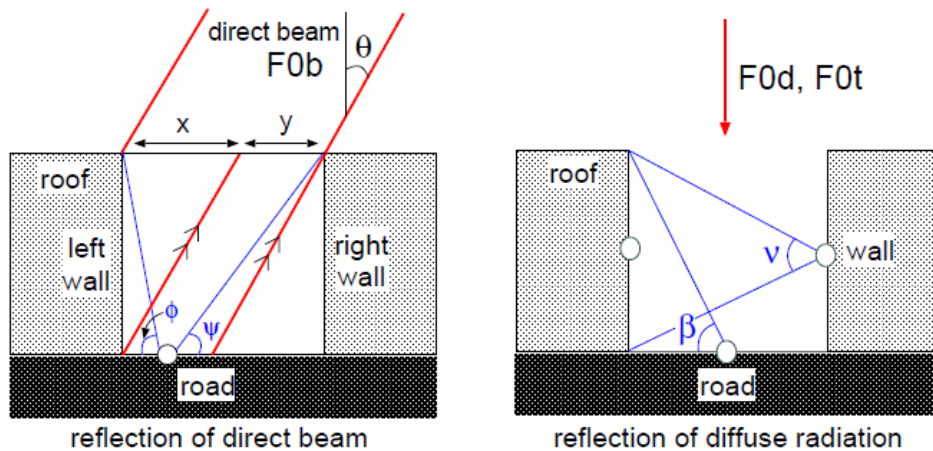


Figure 2.3: reflection to wall surface

$$x : y = kh_0 \tan \theta : \frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}} - kh_0 \tan \theta \quad (2.3)$$



Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

A energia da **radiação é particionada de acordo com a situação** em que a radiação do feixe incide ou não na estrada.

$$\text{when } \cos \theta \geq \frac{kh_0}{\sqrt{(kh_0)^2 + \left(\frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}}\right)^2}}$$

$$F_{0br} = F_{0b} \times V_{uc} \quad F_{0bw} = F_{0b} V_{uc} \left(\frac{h_0}{b_w}\right) k \tan \theta \quad F_{0bg} = F_{0b}(1 - V_{uc}) - F_{0bw} \quad (2.4)$$

2.2.1 partition of incident radiation

$$\text{when } \cos \theta \leq \frac{kh_0}{\sqrt{(kh_0)^2 + \left(\frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}}\right)^2}}$$

$$F_{0br} = F_{0b} \times V_{uc} \quad F_{0bw} = F_{0b} \times (1 - V_{uc}) \quad F_{0bg} = 0$$

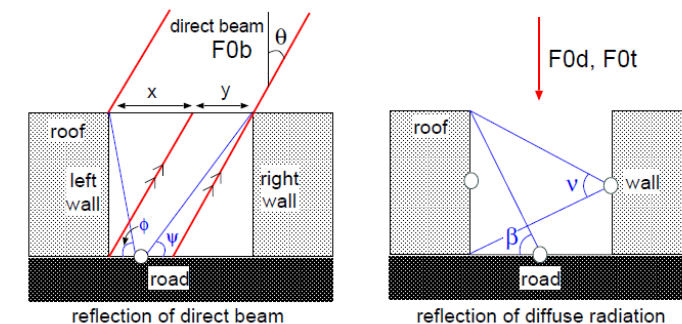


Figure 2.3: reflection to wall surface

(2.5)



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

Embora **componente difusa da radiação de ondas curtas e radiação de ondas longas incida hemisféricamente no desfiladeiro da rua.**

As radiações são **particionadas de acordo** com a **fração vista do alto do céu** (veja Figura 2.2).

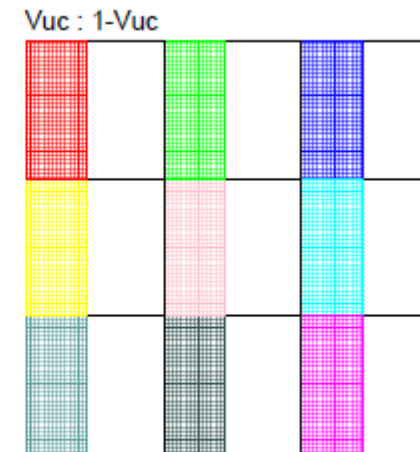
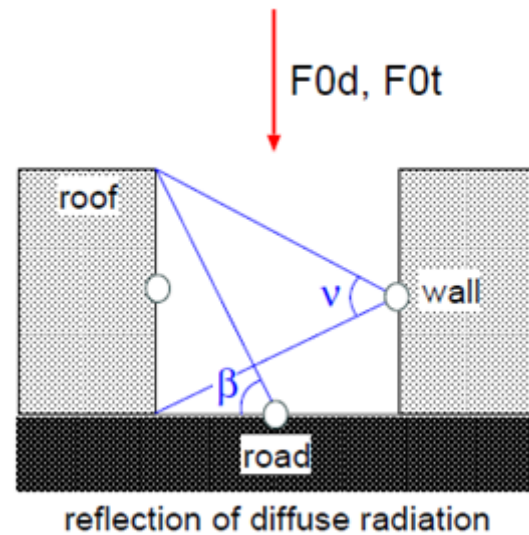


Figure 2.2: arrangement of street canyon (overlook from the sky)

Portanto, **nenhum componente de radiação difusa é atribuído à parede.**



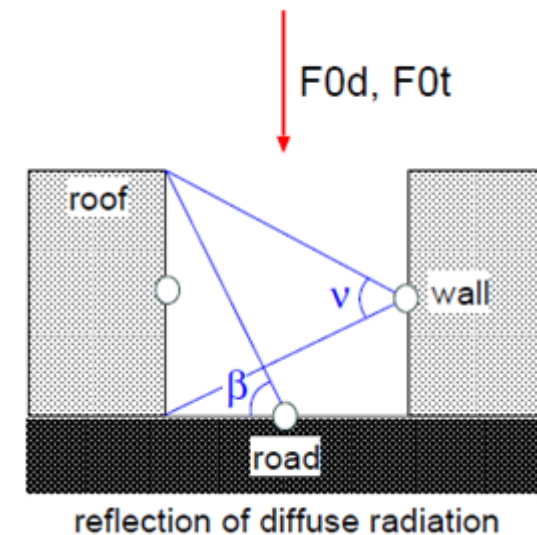
Modelo Canopy Urbano

2.2.1 partition of incident radiation

Portanto, **nenhum componente de radiação difusa é atribuído à parede.**

$$F_{0dr} = F_{0d} \times V_{uc} \quad F_{0dw} = 0 \quad F_{0dg} = F_{0d}(1 - V_{uc}) \quad (2.6)$$

$$F_{0tr} = F_{0t} \times V_{uc} \quad F_{0tw} = 0 \quad F_{0tg} = F_{0t}(1 - V_{uc}) \quad (2.7)$$





Modelo Canopy Urbano

2.2.2 Balanço de Radiação na superfície do telhado

2.2.1 partition of incident radiation

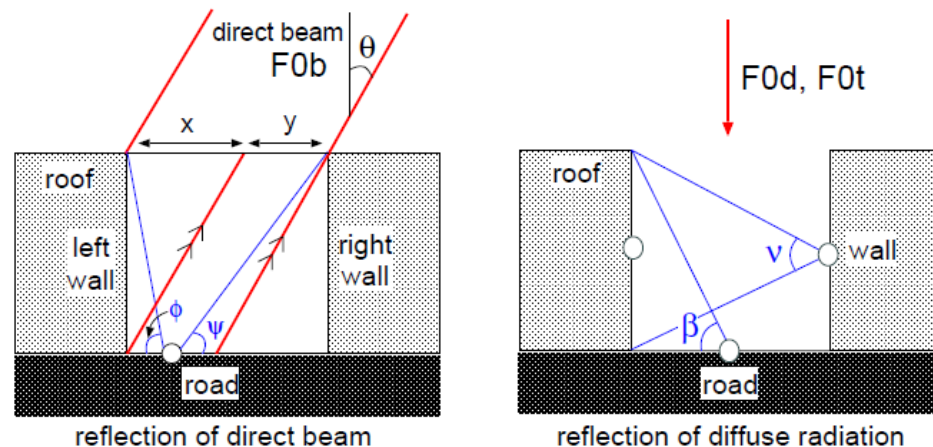


Figure 2.3: reflection to wall surface

De fato, o **telhado pode obter um pouco de radiação** de edifícios vizinhos.

Mas **não se usa as informações detalhadas** sobre o arranjo de ruas e edifícios individuais.

Em seguida, **a interação direta da radiação entre cada desfiladeiro** é omitida no modelo.



Modelo Canopy Urbano

2.2.2 Balanço de Radiação na superfície do telhado

2.2.1 partition of incident radiation

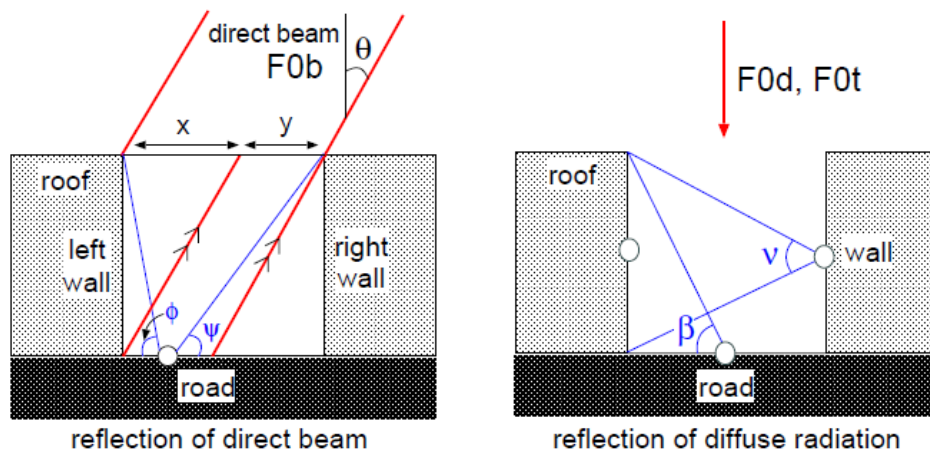


Figure 2.3: reflection to wall surface

Para a **superfície do telhado**, a formulação do balanço de radiação se torna muito simples, porque **não é necessário considerar** a radiação que é refletida ou emitida por **outro elemento**.



Modelo Canopy Urbano

2.2.2 Balanço de Radiação na superfície do telhado

$$dS_r = F_{0br} + F_{0dr} \quad uS_r = \alpha_r (F_{0br} + F_{0dr}) \quad (2.8)$$

$$dL_r = F_{0tr} \quad uL_r = \sigma \epsilon_r T_r^4 V_{uc} \quad (2.9)$$

$$Rn_r = dS_r + dL_r - uS_r - uL_r \quad (2.10)$$

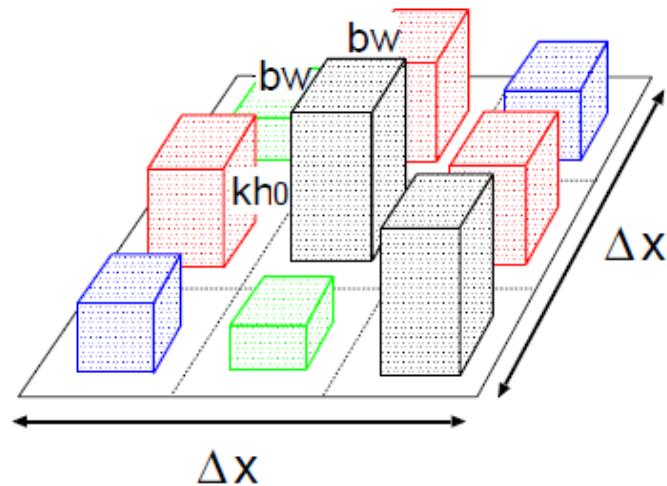


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

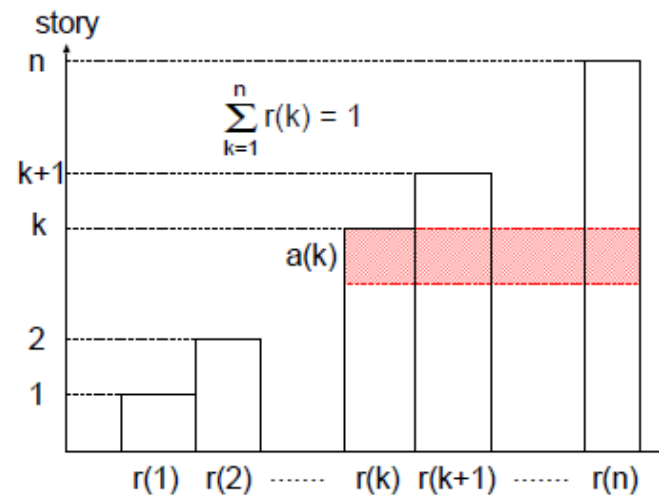


Figure 2.5: Roof height distribution



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental



Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

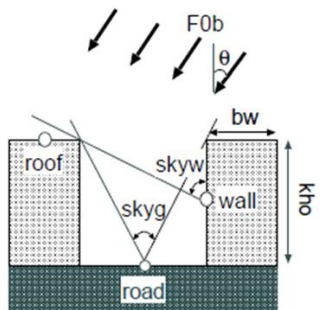


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

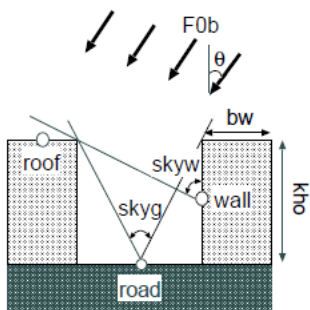


Figure 2.1: schematic image of street canyon, direct beam radiation, and sky-view factor

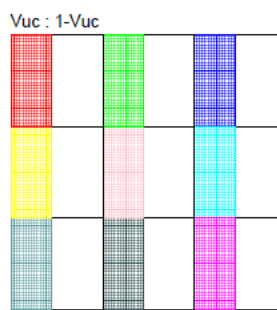


Figure 2.2: arrangement of street canyon (overlook from the sky)

2.2.1 partition of incident radiation

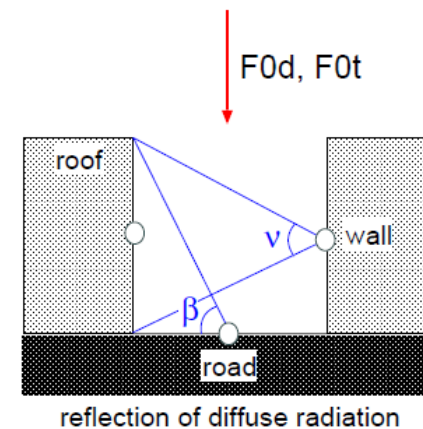
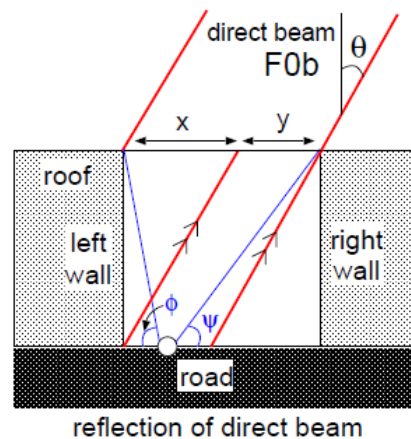


Figure 2.3: reflection to wall surface

No caso de **superfície da parede**, a **radiação dispersa na parede e na estrada** é considerada (**apenas dispersão única**).

Nesse modelo, **a direção do desfiladeiro não é considerada** e é **descrita bidimensionalmente** (consulte a Figura 2.1, 2.2).

E **a parede que recebe o feixe direto** é **tratada como parede "esquerda"** (parede direita é sombra). De fato, a parede e a rua estão voltadas para todas as direções.

Quando o **sol se move**, **parte da parede voltada para o sol recebe o raio direto e outras não**. **Essa parede receptora de feixe direto é chamada de parede "esquerda"**.



Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

A **radiação incidente** na parede esquerda (dS_{lw}) consiste em feixe direto do sol e radiação refletida na estrada (a reflexão da parede direita é omitida (dispersão dupla)).

No cálculo da reflexão da estrada: são usados (veja a Figura 2.3).

- ϕ ângulo de **visão do ponto central** da **zona de recepção** de feixe direto
- β ângulo de **visão do ponto central** da **zona de recepção** de radiação difusa

2.2.1 partition of incident radiation

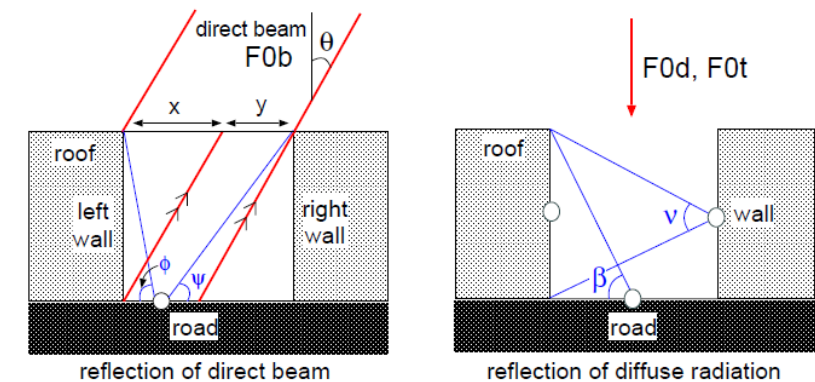


Figure 2.3: reflection to wall surface

Esses ângulos (ϕ e β na Figura 2.3) são expressos da seguinte maneira.

$$\phi = \arctan \frac{2kh_0}{\frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}} - kh_0 \tan \theta}, \quad \beta = \frac{\pi - \text{skyg}}{2} \quad (2.11)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

A **radiação incidente na parede direita** (dS_{rw}) **consiste na radiação refletida da parede esquerda e da estrada.**

No cálculo da reflexão da estrada e da parede, **é utilizado o ângulo de visão do ponto central da zona de recepção de feixe direto ψ e da parede esquerda ν** (veja a Figura 2.3).

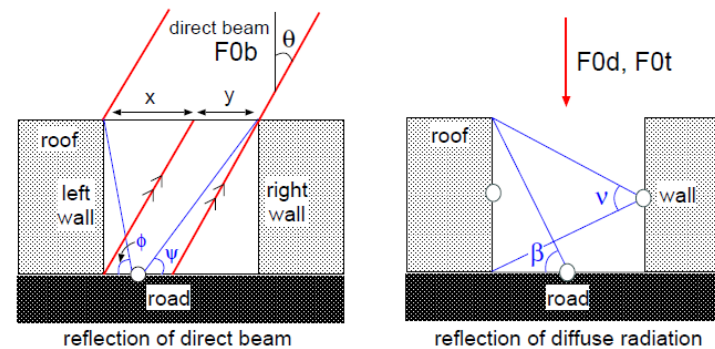


Figure 2.3: reflection to wall surface

Esses ângulos (ψ e ν na Figura 2.3) são expressos da seguinte maneira.

$$\psi = \arctan \frac{2kh_0}{\frac{b_w(1 - V_{uc})}{V_{uc}} + kh_0 \tan \theta}, \quad \nu = \pi - 2\text{skyw} \quad (2.12)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

A reflexão na parede e na estrada é expressa por refletância (α_w , α_g), e apenas a dispersão única é tratada.

$$dS_{lw} = F_{0bw} + F_{0dw} + \alpha_w F_{0dw} \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} + \alpha_g F_{0bg} \left(\frac{\phi}{\pi} \right) + \alpha_g F_{0dg} \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} \quad (2.13)$$

$$uS_{lw} = \alpha_w (F_{0bw} + F_{0dw}) \quad (2.14)$$

$$dS_{rw} = F_{0dw} + \alpha_w (F_{0bw} + F_{0dw}) \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} + \alpha_g F_{0bg} \left(\frac{\psi}{\pi} \right) + \alpha_g F_{0dg} \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} \quad (2.15)$$

$$uS_{rw} = \alpha_w F_{0dw} \quad (2.16)$$



Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

$$dS_{lw} = F_{0bw} + F_{0dw} + \alpha_w F_{0dw} \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} + \alpha_g F_{0bg} \left(\frac{\phi}{\pi}\right) + \alpha_g F_{0dg} \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} \quad (2.13)$$

$$uS_{lw} = \alpha_w (F_{0bw} + F_{0dw}) \quad (2.14)$$

$$dS_{rw} = F_{0dw} + \alpha_w (F_{0bw} + F_{0dw}) \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} + \alpha_g F_{0bg} \left(\frac{\psi}{\pi}\right) + \alpha_g F_{0dg} \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} \quad (2.15)$$

$$uS_{rw} = \alpha_w F_{0dw} \quad (2.16)$$

Observe que F_{0dw} nas equações acima é **assumido como zero**.

left wall

1. direct beam \Rightarrow left wall
2. direct beam \Rightarrow road (ϕ) \Rightarrow left wall
3. diffuse \Rightarrow road (β) \Rightarrow left wall

right wall

1. direct beam \Rightarrow left wall (ν) \Rightarrow right wall
2. direct beam \Rightarrow road (ψ) \Rightarrow right wall
3. diffuse \Rightarrow road (β) \Rightarrow right wall



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

No **caso de parede**, nenhuma **radiação de ondas longa** é recebida diretamente do céu.

A **radiação de ondas longa** emitida da **estrada** e da **parede** da frente é recebida de **acordo com o ângulo de visão** (β e ν).

Nesse caso, as **paredes esquerda e direita** são tratadas da **mesma** maneira.



Modelo Canopy Urbano

2.2.3 Balanço de radiação na superfície da parede

Quanto à **emissão da parede**, a relação da área da parede com a área da estrada é multiplicada.

$$dL_w = \sigma \epsilon_{ug} T_{ug}^4 \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} (1 - V_{uc}) + \sigma \epsilon_w T_w^4 \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} (1 - V_{uc}) \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} \quad (2.17)$$

$$uL_w = \sigma \epsilon_w T_w^4 (1 - V_{uc}) \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} \quad (2.18)$$

$$Rn_w = dS_{lw} + dS_{rw} + 2dL_w - uS_{lw} - uS_{rw} - 2uL_w \quad (2.19)$$



Modelo Canopy Urbano

2.2.4 Balanço de radiação na superfície da estrada

Existem dois casos em que a radiação direta do feixe incide na estrada ou não, dependendo do ângulo solar.

$$dS_{ug} = F_{0bg} + F_{0dg} + \alpha_w(F_{0bw} + 2F_{0dw})\frac{\text{skyw}}{\pi} \quad (2.20)$$

$$uS_{ug} = \alpha_{ug}(F_{0bg} + F_{0dg}) \quad (2.21)$$

Quando não há raio direto na estrada, $F_{0bg} = 0$ nas eq. (2.20), (2.21) se torna zero.

$$dS_{ug} = F_{0dg} + \alpha_w(F_{0bw} + 2F_{0dw})\frac{\text{skyw}}{\pi}$$

$$uS_{ug} = \alpha_{ug}(F_{0dg})$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.4 Balanço de radiação na superfície da estrada

Quanto à fração da radiação refletida na parede, o ângulo de visão é do ponto central da parede.

Observe que o feixe direto não incide na parede esquerda, F_{0bw} na eq. (2.20) é apenas para a parede esquerda.

A radiação de onda curta refletida e a radiação de onda longa emitida são descritas da mesma maneira mencionada acima.

$$dS_{ug} = F_{0bg} + F_{0dg} + \alpha_w(F_{0bw} + 2F_{0dw})\frac{\text{skyw}}{\pi} \quad (2.20)$$

$$uS_{ug} = \alpha_{ug}(F_{0bg} + F_{0dg}) \quad (2.21)$$

$$dL_{ug} = F_{0tg} + 2\sigma\epsilon_w T_w^4 \frac{\text{skyw}}{\pi} (1 - V_{uc}) \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} \quad (2.22)$$

$$uL_{ug} = \sigma\epsilon_{ug} T_{ug}^4 (1 - V_{uc}) \quad (2.23)$$

$$Rn_{ug} = dS_{ug} + dL_{ug} - uS_{ug} - uL_{ug} \quad (2.24)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.5 Radiação ascendente do desfiladeiro da rua

Parte da radiação incidente é refletida pela **refletância (α)**.

E, como mencionado acima, parte **da radiação refletida da parede e da estrada será recebida novamente por outro elemento**, e o restante da radiação refletida retornará ao céu.

A partição dessas radiações é descrita em 2.2.3 e 2.2.4.

O **total dessas radiações retornadas é radiação de ondas curtas para cima**, do **desfiladeiro** da rua para o céu (uS_m).

$$uL_{ug} = \sigma \varepsilon_{ug} T_{ug}^4 (1 - V_{uc}) \quad (2.23)$$

$$Rn_{ug} = dS_{ug} + dL_{ug} - uS_{ug} - uL_{ug} \quad (2.24)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.5 Radiação ascendente do desfiladeiro da rua

A taxa de (uS_m), em relação à radiação incidente (acima do nível do telhado) é o albedo global do sistema desfiladeiro – rua (união telhado-parede-estrada).

$$uS_m = uS_r + (uS_{lw} + uS_{rw}) \frac{\text{skyw}}{\pi} + \alpha_{ug} F_{0dg} \frac{\text{skyg}}{\pi} + \alpha_{ug} F_{0bg} \left(1 - \frac{\phi + \psi}{\pi} \right) \quad (2.25)$$

Toda a radiação emitida por ondas longas do telhado retornará ao céu.

A radiação de ondas longas emitida pela parede e pela estrada retornará ao céu de acordo com o fator de visualização do céu (skyw , skyg).

O total dessas radiações retornadas é radiação de ondas longas ascendentes do canyon da rua para o céu (uL_m).

$$uL_m = uL_r + 2uL_w \frac{\text{skyw}}{\pi} + uL_{ug} \frac{\text{skyg}}{\pi} \quad (2.26)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.2.6 Total net radiation and upward radiation

Os componentes de radiação apresentados acima são os do canyon da rua do k-andares (K-story).

Se considerarmos as várias alturas do canyon, a **radiação total absorvida pelo telhado**, **parede** e **estrada** e a **radiação total ascendente do sistema do canyon** devem ser integradas usando a distribuição da altura do telhado (área fracionária de cada canyon).

$$Rn_{r,total} = \sum_{k=1}^n Rn_{r,k}r(k) \quad Rn_{w,total} = \sum_{k=1}^n Rn_{w,k}r(k) \quad Rn_{ug,total} = \sum_{k=1}^n Rn_{ug,k}r(k) \quad (2.27)$$

$$uS_{m,total} = \sum_{k=1}^n uS_{m,k}r(k) \quad uL_{m,total} = \sum_{k=1}^n uL_{m,k}r(k) \quad (2.28)$$

where

$$\sum_{k=1}^n r(k) = 1 \quad (2.29)$$



Modelo Canopy Urbano

2.3 Processo de transferência turbulenta

Nesta seção, as resistências aerodinâmicas são formuladas considerando o arranjo, assumido do **elemento de rugosidade (edifícios)** e a **teoria de transferência turbulenta**.

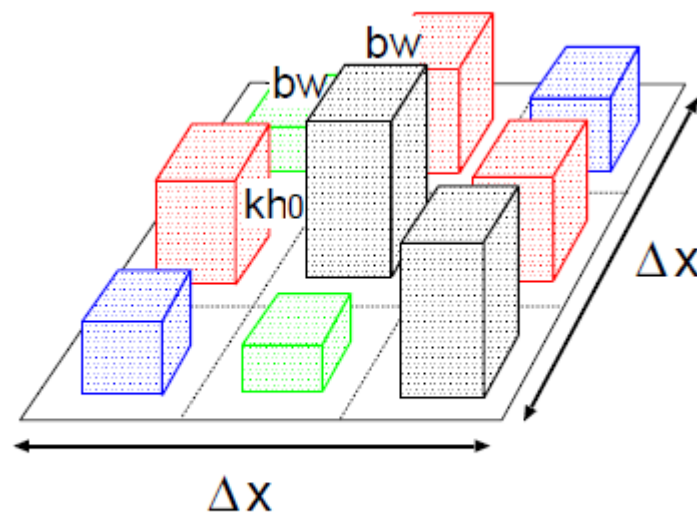


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

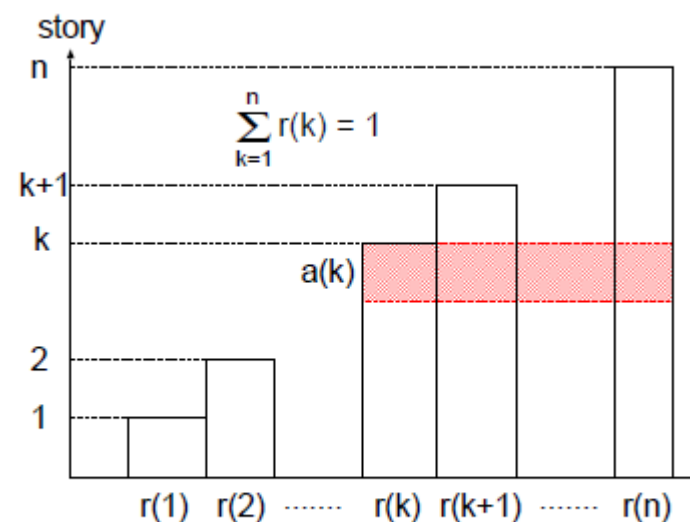


Figure 2.5: Roof height distribution



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3 Processo de transferência turbulenta

No cálculo do processo de transferência turbulenta, *cada elemento de rugosidade é expresso por um prisma quadrado* (ver Figura 2.4).

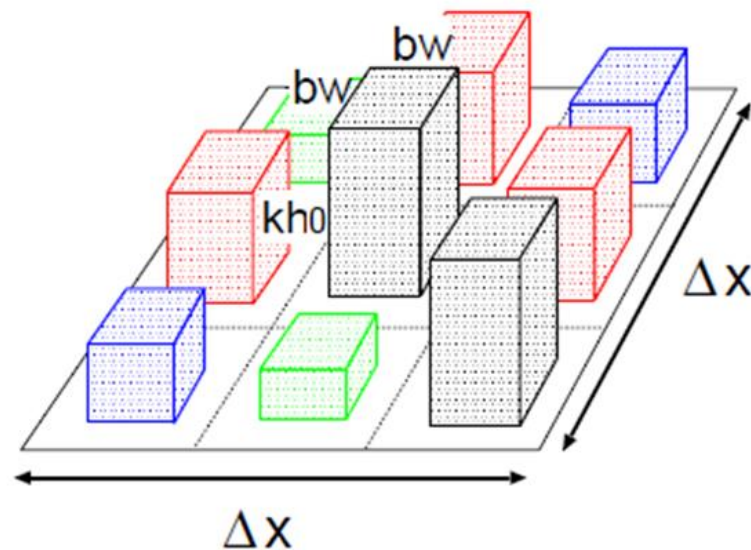


Figure 2.4: Arrangement of roughness element

Presume-se que **todos os prismas tenham a mesma largura (b_w)** e **estejam espaçados de maneira uniforme**, enquanto **cada elemento possui suas próprias alturas de teto** (kh_0 para construção de andares k). Paulo Yoshio Kubota



Modelo Canopy Urbano

2.3 Processo de transferência turbulenta

Por uma questão de simplicidade, $a(k)$ é definido como o total da distribuição da altura do telhado ($r(k)$) de k -andares para a parte superior (n andares). E também A_b é definido como um total da distribuição da altura do teto ($r(k)$) multiplicada pela altura (k).

$$a(k) = \sum_{i=k}^n r(i) \quad (2.30)$$

$$A_b = \sum_{k=1}^n r(k) k \quad (2.31)$$

Onde, $r(k)$ é uma fração do edifício da k -andares.

$$\sum_{k=1}^n r(k) = 1 \quad (2.32)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3 Processo de transferência turbulenta

Se a **escala horizontal de uma área de grade é Δx** , a **área total do telhado dos edifícios de k - andar é $V_{uc}r(k) \Delta x^2$** . Enquanto a **área do telhado de um edifício é b_w^2** .

Então, o **número de construções de k andares é $V_{uc}r(k) \left(\frac{\Delta x^2}{b_w^2}\right)$** . Portanto, a área frontal total do edifício por área de unidade (S_s) e a área total da superfície do edifício por área de unidade (S_r) são expressas da seguinte forma.

$$S_s = \sum_{k=1}^n b_w k h_0 V_{uc}r(k) \left(\frac{\Delta x}{b_w}\right)^2 / (\Delta x)^2 = \left(\frac{h_0}{b_w}\right) V_{uc} A_b \quad (2.33)$$

$$S_r = V_{uc} + 4 S_s \quad (2.34)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3 Processo de transferência turbulenta

$$S_s = \sum_{k=1}^n b_w k h_0 V_{uc} r(k) \left(\frac{\Delta x}{b_w} \right)^2 / (\Delta x)^2 = \left(\frac{h_0}{b_w} \right) V_{uc} A_b \quad (2.33)$$

$$S_r = V_{uc} + 4 S_s \quad (2.34)$$

A densidade da área frontal do edifício na camada do andar k por unidade de área ($A_s(k)$) é

$$A_s(k) = \sum_{i=k}^n b_w h_0 V_{uc} r(k) \left(\frac{\Delta x}{b_w} \right)^2 / (\Delta x)^2 = \left(\frac{h_0}{b_w} \right) V_{uc} a(k) \quad (2.35)$$



Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

À medida que a densidade dos elementos de rugosidade aumenta, o mesmo ocorre com a rugosidade (z_0) da superfície.

Mas chega um momento em que a adição de novos elementos serve apenas para reduzir o atrito efetivo daqueles que já estão presentes devido ao agrupamento mútuo.

Como observam Shaw e Pereira (1982), neste momento o aumento no arrasto é compensado por um aumento no deslocamento no plano zero (d_0) (Grimmond et al. (1999)).



Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

A dependência de z_0 e d_0 :
no tamanho, forma, densidade e distribuição dos elementos de superfície foi estudada usando túneis de vento, investigações analíticas e campo.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

Neste modelo, **usamos uma formulação de z_0 e d_0 seguindo Macdonald et al. (1998).**

Em sua fórmula, **são consideradas a fração horizontal do elemento de rugosidade** (densidade da área planejada) e a seção vertical (densidade da área frontal).

Em nosso modelo, **substituímos a densidade da área frontal pela área frontal total do edifício por unidade de área (S_s)** e a **altura da rugosidade pela altura média do edifício (z_{ave}).**

$$z_{ave} = A_b h_0 \quad (2.36)$$

$$d_0 = z_{ave} \left[1 + 4.43^{-V_{uc}} (V_{uc} - 1) \right] \quad (2.37)$$

$$z_0 = (z_{ave} - d_0) \exp \left(- \left[0.5 \frac{C_d}{\kappa^2} \left(1 - \frac{d_0}{z_{ave}} \right) S_s \right]^{-0.5} \right) \quad (2.38)$$



Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

Supondo que o **perfil de velocidade do vento** no espaço aéreo do dossel siga a **função exponencial com um coeficiente de atenuação** a_w , a velocidade do vento na camada do andar k ($u(k)$) é expressa da seguinte maneira.

$$u(k) = u_2 \exp \left[-a_w \left(1 - \frac{k}{n} \right) \right] \quad (2.39)$$

Onde u_2 é a velocidade do vento no topo do dossel ($z = z_2 = nh_0$). Segundo Macdonald (2000),
o a_w pode ser aproximado por uma relação linear com a densidade da área frontal ($a_w = 9.6S_s$).



Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

Como primeira hipótese, **assumimos uma condição neutra para descrever o perfil log-linear da velocidade do vento acima do dossel urbano.**

Então, uma velocidade de atrito (u^*) e u_2 são obtidas de u_m .

$$u_* = \frac{\kappa u_m}{\ln \left(\frac{z_m - d_0}{z_0} \right)} \quad (2.40)$$

$$u_2 = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_2 - d_0}{z_0} \right) \quad (2.41)$$



Modelo Canopy Urbano

2.3.1 Wind profile and momentum flux

Quanto ao perfil de **difusividade vertical de eddy (K_m)**, é proporcional à altura na região log-linear (acima do dossel).

E o K_m é proporcional à velocidade do vento local dentro do dossel.

$$K_m(k) = \kappa u_* (kh_0 - d_0) \quad (k \geq n) \quad (2.42)$$

$$K_m(k) = \eta u(k) \quad (k \leq n) \quad (2.43)$$

n é o numero total de andares

η é obtido a partir da continuidade de K_m na altura superior do dossel ($k = n$).

$$\eta = \frac{\kappa u_* (nh_0 - d_0)}{u_2} \quad (2.44)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

Agora as resistências aerodinâmicas (r_r , r_w , r_{du} e r_{au}) podem ser calculadas usando os perfis de u e K_m .

As direções de transferência de calor sensível e latente no modelo de cobertura urbana são mostradas na Figura 2.6 e Figura 2.7.

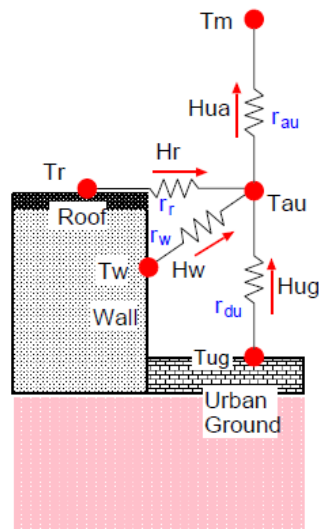


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

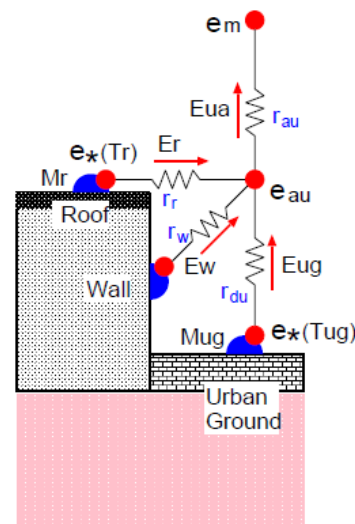


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

1. do telhado ao espaço aéreo do canyon (r_r)

2. da parede ao espaço aéreo do canyon (r_w)

3. da estrada para o espaço aéreo do canyon (r_{du})

4. do espaço aéreo do canyon ao nível de referência (r_{au})

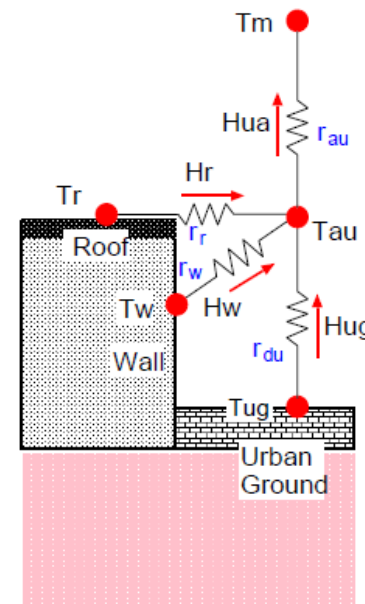


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

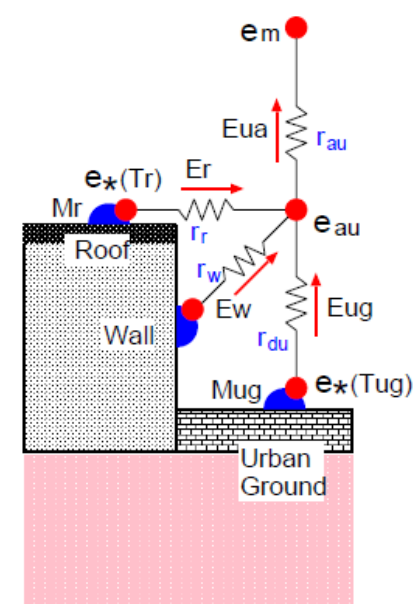


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

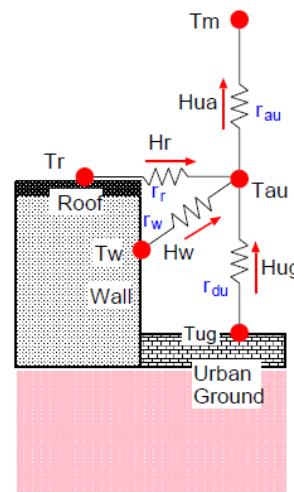


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

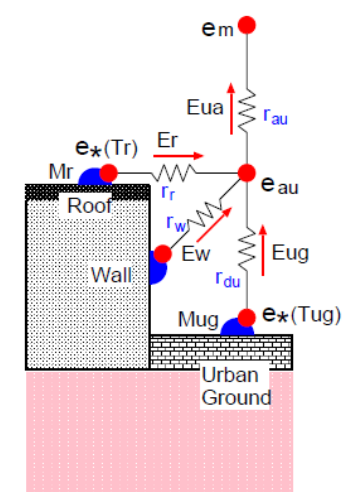


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

No caso do dossel urbano, a parede (área frontal) é *importante para a absorção do momento*

No caso do **teto (área da superfície)** é **importante para a transferência escalar** (calor e vapor de água).

No caso do **dossel da vegetação**, a **folha** é importante tanto para o momento quanto para a **transferência escalar**.

Essa é uma diferença fundamental entre o dossel urbano e o dossel da vegetação.



Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

Assim, no cálculo das resistências aerodinâmicas global do telhado e da parede, **são utilizadas densidades da área superficial ($A_{rr}(k)$, $A_{rw}(k)$) em vez da densidade da área frontal ($A_s(k)$)**.

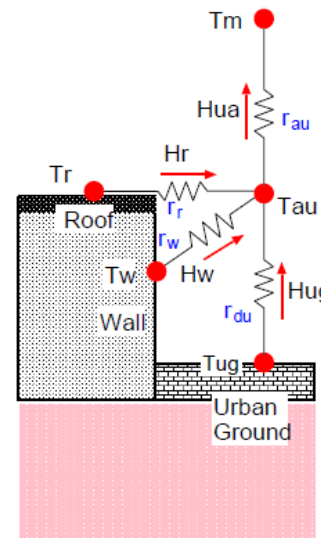


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

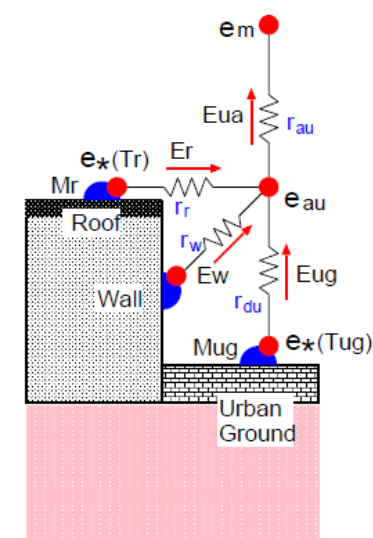


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

$$\frac{1}{r_r} = \sum_{k=1}^n \frac{A_{rr}(k) \sqrt{U(k)}}{p_s C_s} h_0 = \frac{V_{uc}}{p_s C_s} \sum_{k=1}^n \left(r(k) \sqrt{U(k)} \right) \quad (2.45)$$

$$\frac{1}{r_w} = \sum_{k=1}^n \frac{A_{rw}(k) \sqrt{U(k)}}{p_s C_s} h_0 = \frac{4V_{uc}}{p_s C_s} \left(\frac{h_0}{b_w} \right) \sum_{k=1}^n \left(a(k) \sqrt{U(k)} \right) \quad (2.46)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

A extensão em que o arrasto nos elementos de rugosidade individuais é reduzido pela presença de vizinhos foi expresso por Thom (1971) em termos de um *fator de abrigo*.

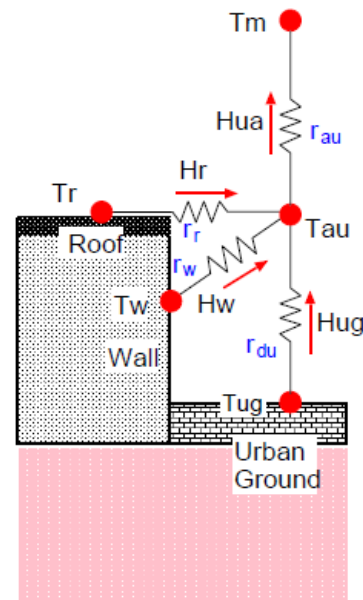


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

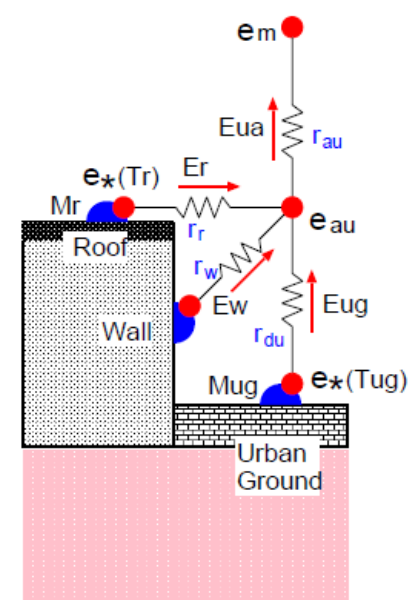


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

Mas o ***fator de abrigo***(p_s) ainda não está bem entendido.

Isso explica a observação de que o coeficiente de arrasto de um conjunto de elementos de rugosidade é menor que a soma de seus coeficientes de arrasto individuais, presumivelmente devido a efeitos de proteção mútua.



Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

Usando o mesmo relacionamento que o dossel da vegetação, o **fator de abrigo** p_s é expresso pela função de potência, exceto que a densidade da área foliar é substituída pela densidade da área frontal.

$$p_s = 1 + \left(\frac{S_s}{nh_0} \right)^{0.6} = 1 + \left(\frac{V_{uc} A_b}{nb_w} \right)^{0.6} \quad (2.47)$$

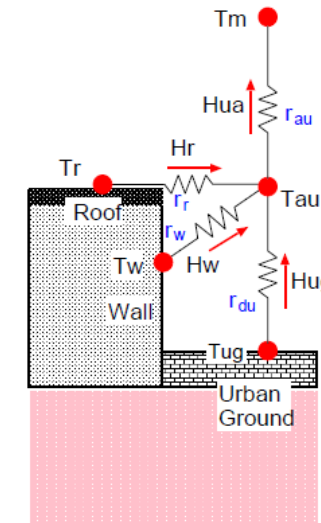


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

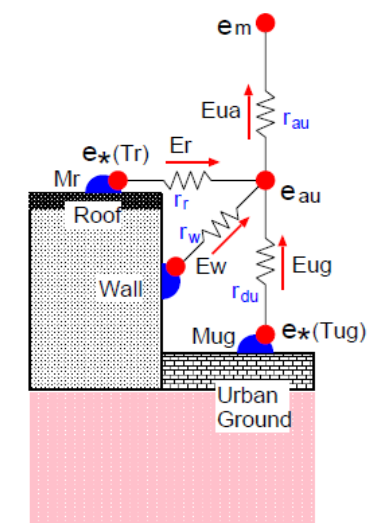


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

Essa relação deve ser investigada para a matriz de diferentes alturas de elementos de rugosidade.

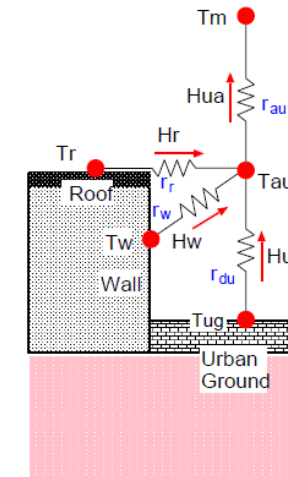


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

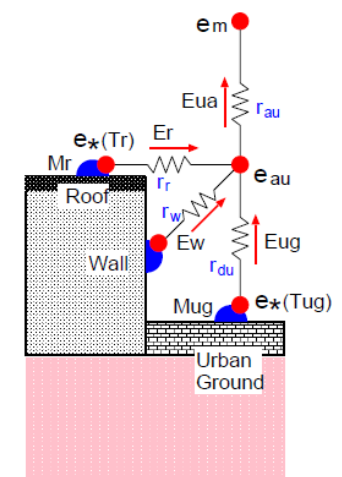


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

O caminho para a resistência do espaço aéreo no dossel (r_{du}) é definido da seguinte maneira.

$$r_{du} = \int_0^{h_a} \frac{1}{K_m} dz = \sum_{k=1}^{k_{ha}} \frac{h_0}{K_m(k)} \quad (2.48)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

A altura da fonte do dossel ($h_a = k_{h_a} h_0$) é assumida como sendo igual ao centro de ação de r_r e r_w dentro do dossel,

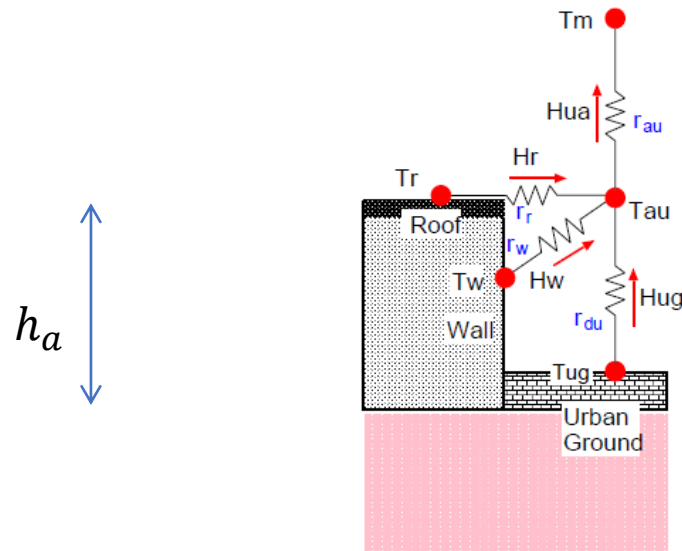


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

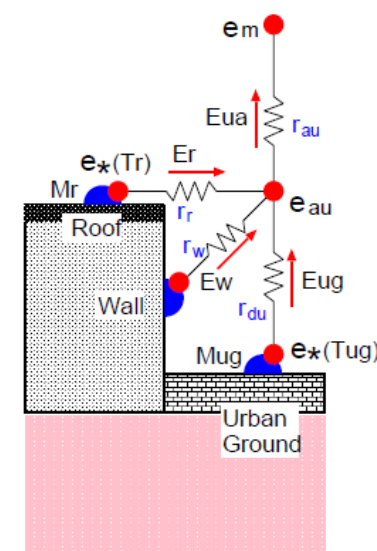


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

Obten-se a solução

$$\sum_{k=1}^{k_{ha}} \left(r(k) + 4 \left(\frac{h_0}{b_w} \right) a(k) \right) \sqrt{U(k)} \simeq \sum_{k=k_{ha}}^n \left(r(k) + 4 \left(\frac{h_0}{b_w} \right) a(k) \right) \sqrt{U(k)} \quad (2.49)$$



Modelo Canopy Urbano

2.3.2 Aerodynamic resistance

A **resistência entre o espaço aéreo do dossel** e a altura de referência (r_{au}) pode ser descrita pela integração de K_m pela distância de h_a a z_m .

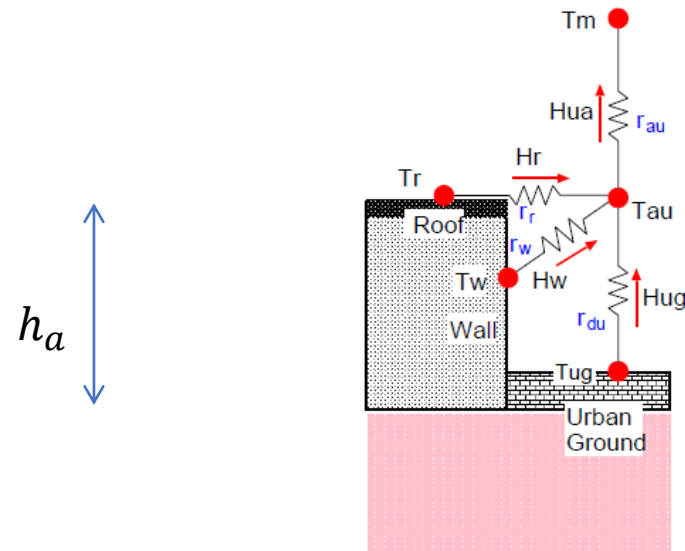


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

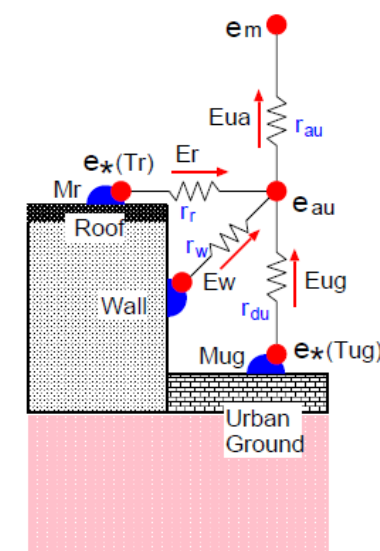


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

A formulação é baseada na condição neutra

$$r_{au} = \int_{h_a}^{nh_0} \frac{1}{K_m} dz + \int_{nh_0}^{z_m} \frac{1}{K_m} dz = \sum_{k=k_{ha}}^n \frac{h_0}{K_m(k)} + \frac{1}{\kappa u_*} \ln \left(\frac{z_m - d_0}{nh_0 - d_0} \right) \quad (2.50)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

Se **não assumirmos armazenamento de calor em nenhuma das junções da rede de resistência** mostrada na Figura 2.6.

Pode-se escrever os **fluxos de calor sensíveis** da área média **do telhado**, **parede** e **estrada** da seguinte maneira.

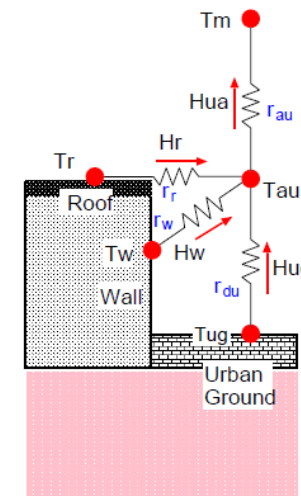


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

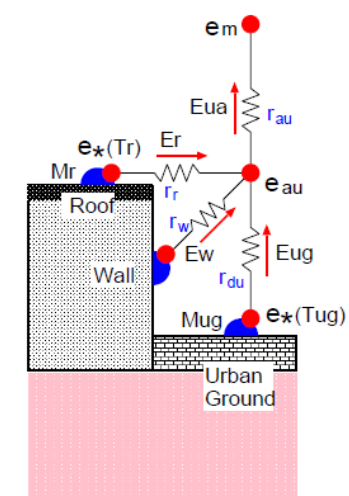


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances

$$H_r = A(T_r - T_{au}),$$

$$H_w = B(T_w - T_{au}),$$

$$H_{ug} = C(T_{ug} - T_{au}),$$

$$H_r + H_w + H_{ug} = D(T_{au} - T_m),$$

$$A = \rho_a C_p / r_r \quad (2.51)$$

$$B = \rho_a C_p / r_w \quad (2.52)$$

$$C = \rho_a C_p / r_{du} \quad (2.53)$$

$$D = \rho_a C_p / r_{au} \quad (2.54)$$



Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

A **temperatura do espaço aéreo do Canyon (T_{au})** pode ser eliminada assumindo que os fluxos de energia do telhado, parede e estrada são transferidos para a camada limite atmosférica, ou seja, nenhuma energia é armazenada no espaço aéreo do dossel.

$$T_{au} = \frac{A \cdot T_r + B \cdot T_w + C \cdot T_{ug} + D \cdot T_m}{A + B + C + D} \quad (2.55)$$

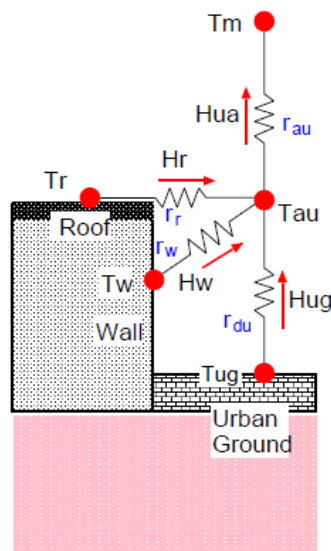


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

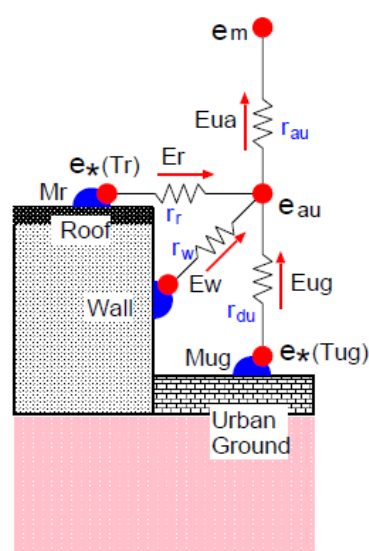


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

Agora a **estabilidade atmosférica** pode ser calculada a partir da diferença de temperatura entre o espaço aéreo do canyon e a altura de referência ($T_{au} - T_m$).

$$H = \rho_a C_p (T_{au} - T_m) \kappa u_* / \Psi_H \quad (2.56)$$

$$L = -\rho_a C_p T_m u_*^3 / \kappa g H \quad (2.57)$$

$$\zeta = z_m / L \quad (2.58)$$

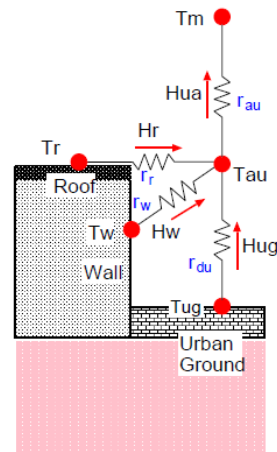


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

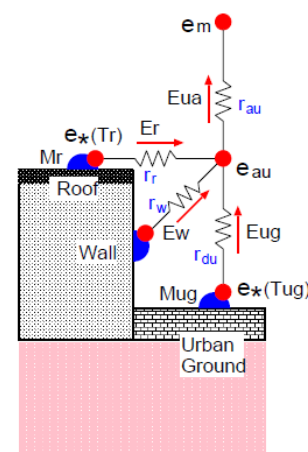


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

Na área urbana, o **fluxo de calor sensível é geralmente dominante sobre o fluxo de calor latente**. Portanto, apenas o fluxo de calor sensível é considerado na eq. (2.57).

$$L = -\rho_a C_p T_m u_*^3 / \kappa g H \quad (2.57)$$

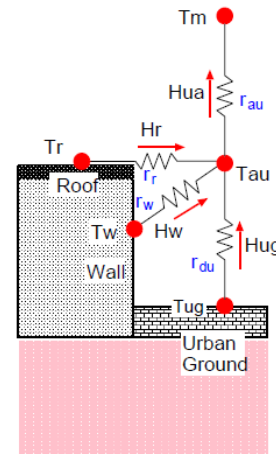


Figure 2.6: Transfer pathways of sensible heat flux and aerodynamic resistances

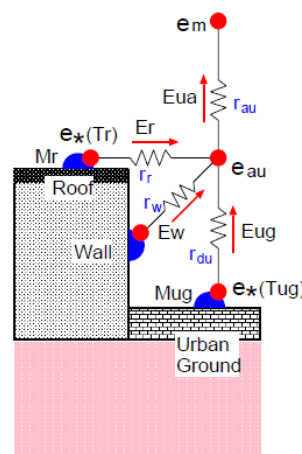


Figure 2.7: Transfer pathways of latent heat flux and aerodynamic resistances



Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

$$L = -\rho_a C_p T_m u_*^3 / \kappa g H \quad (2.57)$$

Se ζ não estiver próximo de zero, o perfil de vento usado na seção anterior deve ser modificado pela função universal integrada.

quando $\zeta < 0$ (instável)

$$\Psi_M = \ln \left(\frac{z_m - d_0}{z_0} \right) + \ln \frac{(x_0^2 + 1)(x_0 + 1)^2}{(x^2 + 1)(x + 1)^2} + 2(\tan^{-1} x - \tan^{-1} x_0) \quad (2.59)$$

$$\Psi_H = \ln \left(\frac{z_m - d_0}{z_0} \right) + 2 \ln \left(\frac{y_0 + 1}{y + 1} \right) \quad (2.60)$$

$$x = (1 - 16\zeta)^{1/4}, \quad x_0 = (1 - 16\zeta_0)^{1/4}, \quad y = (1 - 16\zeta)^{1/2}, \quad y_0 = (1 - 16\zeta_0)^{1/2} \quad (2.61)$$



Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

$$L = -\rho_a C_p T_m u_*^3 / \kappa g H \quad (2.57)$$

Se ζ não estiver próximo de zero, o perfil de vento usado na seção anterior deve ser modificado pela função universal integrada.

quando $\zeta \geq 0$ (estável)

$$\Psi_M = \ln \left(\frac{z_m - d_0}{z_0} \right) + \frac{7}{3} \ln \frac{1 + 3\zeta + 10\zeta^3}{1 + 3\zeta_0 + 10\zeta_0^3} \quad (2.62)$$

$$\Psi_H = \ln \left(\frac{z_m - d_0}{z_0} \right) + 400 \ln \frac{1 + 7/400\zeta + 0.005\zeta^2}{1 + 7/400\zeta_0 + 0.005\zeta_0^2} \quad (2.63)$$

$$u_* = \kappa u_m / \Psi_M \quad (2.64)$$



Modelo Canopy Urbano

2.4 Sensible heat flux

Agora u_* da eq. (2.40) (valor neutro) é substituído por u_* da eq. (2.64) (valor não neutro) e volta à eq. (2.41).

$$u_* = \frac{\kappa u_m}{\ln\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right)} \quad (2.40)$$

$$u_* = \kappa u_m / \Psi_M \quad (2.64)$$

$$u_2 = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_2 - d_0}{z_0}\right) \quad (2.41)$$

$$u_* = \frac{\kappa u_m}{\ln\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right)} \quad (2.40)$$

$$u_2 = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z_2 - d_0}{z_0}\right) \quad (2.41)$$

O procedimento acima é repetido até que a condição de convergência (em ζ) seja obtida. Observe que Ψ_H na eq. (2.56) é igual $\ln\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right)$ para a primeira etapa da iteração.

$$\Psi_H = \ln\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right) + 2 \ln\left(\frac{y_0 + 1}{y + 1}\right) \quad (2.60)$$

$$\Psi_H = \ln\left(\frac{z_m - d_0}{z_0}\right) + 400 \ln \frac{1 + 7/400\zeta + 0.005\zeta^2}{1 + 7/400\zeta_0 + 0.005\zeta_0^2} \quad (2.63)$$

$$H = \rho_a C_p (T_{au} - T_m) \kappa u_* / \Psi_H \quad (2.56)$$

$$H = \rho_a C_p (T_{au} - T_m) \kappa u_* / \Psi_H \quad (2.56)$$

$$L = -\rho_a C_p T_m u_*^3 / \kappa g H \quad (2.57)$$

$$\zeta = z_m / L \quad (2.58)$$



Modelo Canopy Urbano

2.5 Rainfall interception and interception loss

A interceptação de chuvas e evaporação da água interceptada é modelada de maneira muito simples.

Basicamente, **cada componente do modelo de cobertura urbana (teto, parede, estrada) é considerado impermeável.**

E, **diferente do caso da vegetação, o telhado é apenas uma camada (a área de interceptação é muito menor que a cobertura da vegetação).**

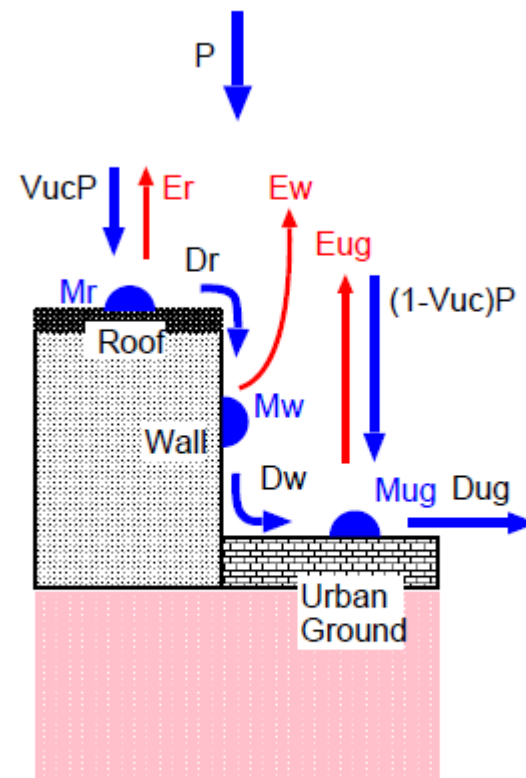


Figure 2.8: Rainfall interception model



Modelo Canopy Urbano

2.5 Rainfall interception and interception loss

Os valores máximos para armazenamento de água (S_i) são definidos para cada superfície.

Se a reserva de água (M_i) exceder o valor máximo, ocorre a drenagem (D_i).

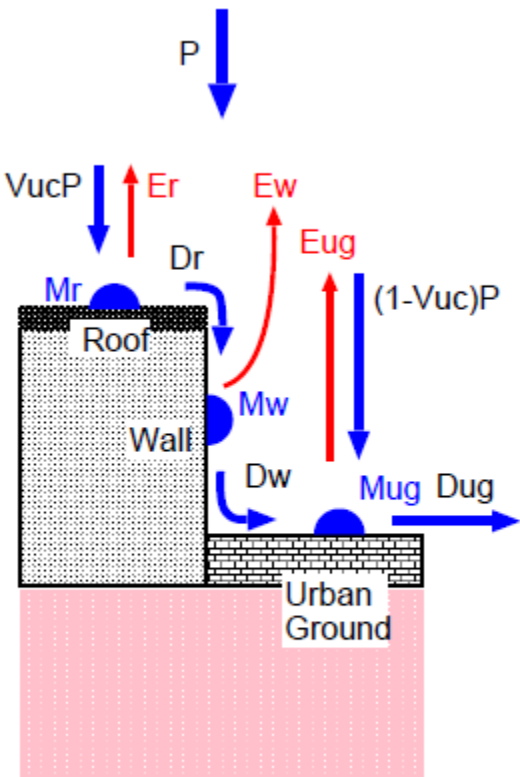


Figure 2.8: Rainfall interception model



Modelo Canopy Urbano

2.5 Rainfall interception and interception loss

$$P_r = P V_{uc} \quad (2.65)$$

$$D_r = \begin{cases} = 0 & \text{when } M_r < S_r \\ = P_r & \text{when } M_r = S_r \end{cases} \quad (2.66)$$

$$P_w = D_r \quad (2.67)$$

$$D_w = \begin{cases} = 0 & \text{when } M_w < S_w \\ = D_r & \text{when } M_w = S_w \end{cases} \quad (2.68)$$

$$P_{ug} = P (1 - V_{uc}) + D_w \quad (2.69)$$

$$D_{ug} = \begin{cases} = 0 & \text{when } M_{ug} < S_{ug} \\ = P_{ug} & \text{when } M_{ug} = S_{ug} \end{cases} \quad (2.70)$$

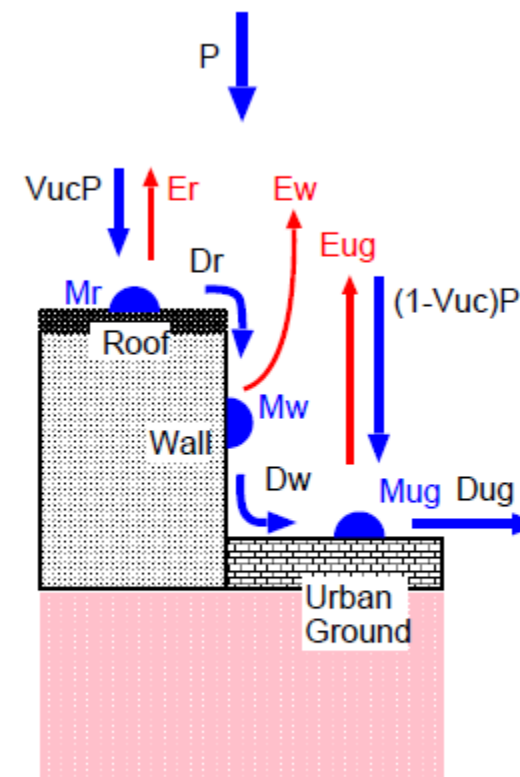


Figure 2.8: Rainfall interception model

D_{ug} é o escoamento superficial da área urbana. Ele fluirá para o corpo d'água, ou será usado como entrada do modelo de escoamento.



Modelo Canopy Urbano

2.5 Rainfall interception and interception loss

As **quantidades** M_r , M_w , M_g são usadas para **determinar as áreas fracionadas molhadas do telhado, parede e estrada** (W_r , W_w , W_{ug}).

Portanto, **as taxas de evaporação das partes úmidas do telhado, parede e estrada** são expressas da seguinte maneira.

$$\lambda E_r = E[e_*(T_r) - e_{au}], \quad E = \frac{\rho_a C_p W_r}{\gamma r_r} \quad (2.71)$$

$$\lambda E_w = F[e_*(T_w) - e_{au}], \quad F = \frac{\rho_a C_p W_w}{\gamma r_w} \quad (2.72)$$

$$\lambda E_{ug} = G[e_*(T_{ug}) - e_{au}], \quad G = \frac{\rho_a C_p W_{ug}}{\gamma r_{du}} \quad (2.73)$$

$$\lambda E_r + \lambda E_w + \lambda E_{ug} = H[e_*(e_{au}) - e_m], \quad H = \frac{\rho_a C_p W_r}{\gamma r_{au}} \quad (2.74)$$

$$(2.75)$$

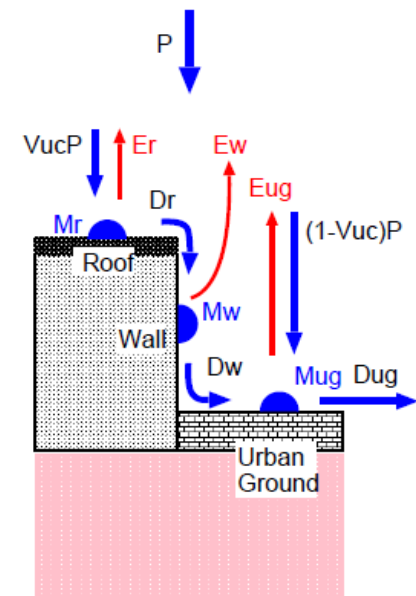


Figure 2.8: Rainfall interception model



Modelo Canopy Urbano

- e_{au} pode ser eliminado considerando que os fluxos de vapor de água do telhado, parede e estrada são todos transferidos para a camada limite atmosférica;

The diagram illustrates a building energy balance model. It shows a cross-section of a building with a roof and walls, situated on urban ground. Energy flows are represented by arrows with associated labels:

- Atmosphere:**
 - P : Downward blue arrow representing incoming solar radiation.
 - $VucP$: Downward blue arrow representing solar radiation absorbed by the roof.
 - Er : Upward red arrow representing roof emission.
 - Ew : Upward red arrow representing wall emission.
 - Eug : Upward red arrow representing ground emission.
 - $(1-Vuc)P$: Downward blue arrow representing solar radiation absorbed by the ground.
- Building Components:**
 - Roof:**
 - Mr : Blue arrow pointing from the roof to the atmosphere.
 - Dr : Blue arrow pointing from the roof to the wall.
 - Wall:**
 - Mw : Blue arrow pointing from the wall to the atmosphere.
 - Dw : Blue arrow pointing from the wall to the ground.
- Urban Ground:**
 - Mug : Blue arrow pointing from the ground to the atmosphere.
 - Dug : Blue arrow pointing from the ground to the right, representing heat conduction into the ground.

$$e_{au} = \frac{E \cdot e_*(T_r) + F \cdot e_*(T_w) + G \cdot e_*(T_{ug}) + H \cdot e_m}{E + F + G + H} \quad (2.76)$$

$$W_r = \begin{cases} = M_r/S_r & \text{when } e_*(T_r) > e_{au} \\ = 1 & \text{when } e_*(T_r) \leq e_{au} \end{cases} \quad (2.77)$$

$$W_w = \begin{cases} = M_w/S_w & \text{when } e_*(T_r) > e_{au} \\ = 1 & \text{when } e_*(T_r) \leq e_{au} \end{cases} \quad (2.78)$$

$$W_{ug} = \begin{cases} = M_{ug}/S_{ug} & \text{when } e_*(T_{ug}) > e_{au} \\ = 1 & \text{when } e_*(T_{ug}) \leq e_{au} \end{cases} \quad (2.79)$$

(2.80)



Modelo Canopy Urbano

2.5 Rainfall interception and interception loss

Supõe-se nas eq. (2.71), (2.72), (2.73) **que partes molhadas e secas da superfície estão na mesma temperatura.**

$$\lambda E_r = E[e_*(T_r) - e_{au}], \quad E = \frac{\rho_a C_p W_r}{\gamma r_r} \quad (2.71)$$

$$\lambda E_w = F[e_*(T_w) - e_{au}], \quad F = \frac{\rho_a C_p W_w}{\gamma r_w} \quad (2.72)$$

$$\lambda E_{ug} = G[e_*(T_{ug}) - e_{au}], \quad G = \frac{\rho_a C_p W_{ug}}{\gamma r_{du}} \quad (2.73)$$

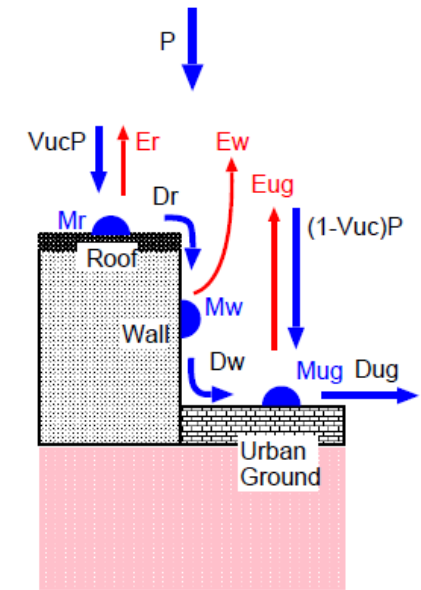


Figure 2.8: Rainfall interception model

Basicamente, **o armazenamento máximo de água é muito menor que o dossel da vegetação**, e o **tempo de duração da água presente na superfície é muito curto**, assim é **melhor usar a mesma temperatura para as partes úmidas e secas.**



Modelo Canopy Urbano

2.6 Prognostic variables and their governing equations

O modelo de cobertura urbana possui sete variáveis prognósticas do estado físico:

Quatro temperaturas (para telhado, T_r , para parede, T_w , para estrada T_{ug} , e para subsolo, T_{du});

Três para a interceptação de água (para telhado, M_r , para parede, M_w e para a estrada M_{ug}).

Onde T_{du} é definido como o valor médio de T_{ug} durante um dia.



Modelo Canopy Urbano

2.6.1 Governing equations for temperatures

As **equações que governam as quatro temperaturas** são baseadas no método de força-restauração (Bhumralkar, 1975; Blackadar, 1976).

A aproximação força-restauração baseia-se na **solução analítica da equação de condução de calor sob forçamento periódico**, que é usado para parametrizar o fluxo diário quase periódico de calor no solo.

Dessa maneira, é possível obter uma descrição muito simples e eficiente, mas razoavelmente precisa da dinâmica da temperatura.

Neste modelo, a equação prognóstica para a temperatura da superfície **incorpora o fluxo de energia da superfície (termo de forçamento atmosférico) e o fluxo de calor do solo (termo de restauração) para reproduzir realisticamente a variação diurna da temperatura da superfície.**



Modelo Canopy Urbano

2.6.1 Governing equations for temperatures

No caso do modelo de cobertura urbana, **são previstas três temperaturas de superfície (T_r , T_w , T_{ug})**.

Quanto ao **termo de restauração para T_r e T_w** , **é usada uma temperatura interna do edifício (T_{bi})**, que pode ser controlada ou mantida pela atividade humana.

Além disso, **fonte de calor artificial (Q_m^1)**, que é resultado da atividade humana, **é adicionada ao termo forçante**.



Modelo Canopy Urbano

2.6.1 Governing equations for temperatures

Assim, **as equações prognósticas para temperaturas** no modelo de copa urbana são expressas da seguinte forma.

$$C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = Rn_r - H_r - \lambda E_r - \omega C_r (T_r - T_{bi}) + Q_m V_{uc} \quad (2.81)$$

$$C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = Rn_w - H_w - \lambda E_w - \omega C_w (T_w - T_{bi}) + Q_m A_w \quad (2.82)$$

$$C_{ug} \frac{\partial T_{ug}}{\partial t} = Rn_{ug} - H_{ug} - \lambda E_{ug} - \omega C_{ug} (T_{ug} - T_{du}) + Q_m (1 - V_{uc}) \quad (2.83)$$

$$C_{du} \frac{\partial T_{du}}{\partial t} = Rn_{ug} - H_{ug} - \lambda E_{ug} - \omega C_{du} (T_{du} - T_{bi}) + Q_m (1 - V_{uc}) \quad (2.84)$$

As **capacidades térmicas efetivas** (C_r , C_w , C_{ug} , C_{du}) são definidas teoricamente usando condutividade térmica e calor específico específico.



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.6.1 Governing equations for temperatures

As capacidades térmicas efetivas (C_r , C_w , C_{ug} , C_{du}) são definidas teoricamente usando condutividade térmica e calor específico específico.

$$C_i = \left(\frac{c_i k_i}{2\omega} \right)^{1/2} \quad (i=r,w,ug) \quad (2.85)$$

$$C_{du} = \sqrt{365} C_{ug} \quad (2.86)$$

Q_m = anthropogenic heat source (Wm^{-2})

$C_i (i = r, w, ug, du)$ = effective heat capacity ($\text{J m}^{-2}\text{K}^{-1}$)

Quanto à eq. (2,86), **a capacidade térmica é proporcional a uma raiz quadrada do ciclo.** T_{du} **é definido como o valor médio de T_{ug} ao longo de um dia**, e **espera-se que T_{du} tenha ciclo sazonal (um ano).**



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.6.1 Governing equations for temperatures

A **capacidade efetiva de calor** é importante para a **reprodução da amplitude** e **fase do ciclo diurno**.

$$C_i = \left(\frac{c_i k_i}{2\omega} \right)^{1/2} \quad (i=r,w,ug) \quad (2.85)$$

$$C_{du} = \sqrt{365} C_{ug} \quad (2.86)$$

Basicamente, **os valores reais das propriedades térmicas (c_i , k_i)** dependem do material (concreto, asfalto, telha, etc.).

Na prática, **esses parâmetros são ajustados para reproduzir o ciclo diurno**, uma vez que o **dossel urbano consiste em diferentes tipos de materiais**.



Modelo Canopy Urbano

2.6.2 Governing equations for intercepted water

As equações que regem as três variáveis de água armazenada por interceptação são expressas na mesma fórmula.

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} = P_i - D_i - \frac{E_i}{\rho_w} \quad (i = r, w, ug) \quad (2.87)$$

Esta é uma equação simples do balanço da água para o armazenamento de água. No cálculo do balanço de água (M_i), a evaporação (E_i) é modificada se a eq. (2,87) produz um valor negativo de M_i .



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Na solução numérica das equações prognósticas para temperaturas (T_r , T_w , T_{ug}), utilizamos o fato de que os termos de armazenamento, envolvendo C_i ($i = r, w, ug$), são pequenos em relação aos fluxos de energia Rn_i , λE_i e H_i ($i = r, w, ug$).

Esses valores tornam a eq. (2,81), (2,82), (2,83) equações de resposta rápida, de modo que alterações em (T_r , T_w , T_{ug}), mesmo em um intervalo de tempo tão curto quanto uma hora, possam ter um feedback significativo sobre a magnitude dos fluxos de energia.

Os fluxos de energia são funções explícitas das condições de contorno atmosférico, (variáveis prognósticas e resistências aerodinâmicas).



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

As equações prognósticas são resolvidas por **um método implícito backward**, usando derivadas parciais de cada termo.

Primeiro, considerando que os fluxos de energia nas equações prognósticas são funções da temperatura, as derivadas parciais são calculadas na sub-rotina parcial.

Em seguida, as equações prognósticas são expressas na forma de diferenciação inversa explícita e um conjunto de equações simultâneas lineares relacionadas às mudanças de temperatura ao longo de um intervalo de tempo (Δt) é obtido.



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Não apenas os fluxos de energia, mas **também os termos de troca de calor dependem das temperaturas**. Agora, as equações prognósticas podem ser escritas em forma de tempo discreto.

$$\begin{aligned} C_r \frac{\Delta T_r}{\Delta t} = & Rn_r - H_r - \lambda E_r - \omega C_r (T_r - T_{bi}) + Q_m V_{uc} \\ & + \frac{\partial Rn_r}{\partial T_r} \Delta T_r - \left(\frac{\partial H_r}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_r}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial H_r}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \\ & - \left(\frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) - \omega C_r \Delta T_r \end{aligned} \quad (2.88)$$

$$\begin{aligned} C_w \frac{\Delta T_w}{\Delta t} = & Rn_w - H_w - \lambda E_w - \omega C_w (T_w - T_{bi}) + Q_m A_w \\ & + \left(\frac{\partial Rn_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial Rn_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) - \left(\frac{\partial H_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial H_w}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \\ & - \left(\frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) - \omega C_w \Delta T_w \end{aligned} \quad (2.89)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Não apenas os fluxos de energia, mas **também os termos de troca de calor dependem das temperaturas**.
Agora, as equações prognósticas podem ser escritas em forma de tempo discreto.

$$\begin{aligned} C_{ug} \frac{\Delta T_{ug}}{\Delta t} = & Rn_{ug} - H_{ug} - \lambda E_{ug} - \omega C_{ug}(T_{ug} - T_{du}) + Q_m(1 - V_{uc}) \\ & + \left(\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) - \left(\frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) \\ & - \left(\frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) - \omega C_{ug}(\Delta T_{ug} - \Delta T_{du}) \end{aligned} \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} C_{du} \frac{\Delta T_{du}}{\Delta t} = & Rn_{ug} - H_{ug} - \lambda E_{ug} + \omega C_{du}(T_{bi} - T_{du}) + Q_m(1 - V_{uc}) \\ & + \left(\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) - \left(\frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) \\ & - \left(\frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w \right) - \omega C_{du} \Delta T_{du} \end{aligned} \quad (2.91)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Se estiver escrito em forma de matriz,

$$KX = Y \quad \longrightarrow \quad X = K^{-1}Y$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & K_{1,3} & K_{1,4} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & K_{2,4} \\ K_{3,1} & K_{3,2} & K_{3,3} & K_{3,4} \\ K_{4,1} & K_{4,2} & K_{4,3} & K_{4,4} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \Delta T_r \\ \Delta T_w \\ \Delta T_{ug} \\ \Delta T_{du} \end{bmatrix}$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

$$\begin{aligned}
 K_{1,1} &= \frac{C_r}{\Delta t} - \frac{\partial Rn_r}{\partial T_r} + \frac{\partial H_r}{\partial T_r} + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_r} + \omega C_r & K_{1,2} &= \frac{\partial H_r}{\partial T_w} + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_w} \\
 K_{1,3} &= \frac{\partial H_r}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_{ug}} & K_{1,4} &= 0 \\
 K_{2,1} &= \frac{\partial H_w}{\partial T_r} + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_r} & K_{2,2} &= \frac{C_w}{\Delta t} - \frac{\partial Rn_w}{\partial T_w} + \frac{\partial H_w}{\partial T_w} + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_w} + \omega C_w \\
 K_{2,3} &= -\frac{\partial Rn_w}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial H_w}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_{ug}} & K_{2,4} &= 0 \\
 K_{3,1} &= \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} & K_{3,2} &= -\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_w} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} \\
 K_{3,3} &= \frac{C_{ug}}{\Delta t} - \frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} + \omega C_{ug} & K_{3,4} &= -\omega C_g \\
 K_{4,1} &= \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} & K_{4,2} &= -\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_w} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} \\
 K_{4,3} &= -\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} & K_{4,4} &= \frac{C_{du}}{\Delta t} + \omega C_{du}
 \end{aligned}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Rn_r - H_r - \lambda E_r - \omega C_r(T_r - T_{bi}) + Q_m V_{uc} \\ Rn_w - H_w - \lambda E_w - \omega C_w(T_w - T_{bi}) + Q_m A_w \\ Rn_g - H_{ug} - \lambda E_{ug} - \omega C_{ug}(T_{ug} - T_{du}) + Q_m(1 - V_{uc}) \\ Rn_g - H_{ug} - \lambda E_{ug} + \omega C_{du}(T_{bi} - T_{du}) + Q_m(1 - V_{uc}) \end{bmatrix}$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

As equações acima **podem ser resolvidas em termos de mudanças de temperatura** (ΔT_r , ΔT_w , ΔT_{ug} , ΔT_{du}).

Cada temperatura é atualizada para o valor no tempo $t_0 + \Delta t$ adicionando alterações de temperatura ao valor inicial no tempo t_0 .

Além disso, os fluxos de energia são modificados para mostrar os valores médios ao longo de um intervalo de tempo (entre o tempo t_0 e o tempo $t_0 + \Delta t$).



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

$$Rn'_r = Rn_r + \frac{1}{2} \frac{\partial Rn_r}{\partial T_r} \Delta T_r \quad (2.92)$$

$$Rn'_w = Rn_w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Rn_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial Rn_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.93)$$

$$Rn'_g = Rn_g + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial Rn_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.94)$$

$$H'_r = H_r + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H_r}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_r}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial H_r}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.95)$$

$$H'_w = H_w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H_w}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial H_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.96)$$

$$H'_g = H_g + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.97)$$

$$\lambda E'_r = \lambda E_r + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.98)$$

$$\lambda E'_w = \lambda E_w + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.99)$$

$$\lambda E'_{ug} = \lambda E_{ug} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} \Delta T_r + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} \Delta T_{ug} \right) \quad (2.100)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Seguindo a Seção 2.2, cinco derivadas parciais dos fluxos líquidos de radiação (R_{nr} , R_{nw} , R_{nug}) são obtidas da seguinte maneira.

$$\frac{\partial R_{nr}}{\partial T_r} = -4\sigma\epsilon_r T_r^3 V_{uc} \quad (2.101)$$

$$\frac{\partial R_{nw}}{\partial T_w} = 4\sigma\epsilon_w T_w^3 \frac{\pi - 2\text{skyw}}{\pi} (1 - V_{uc}) \sum_{k=1}^n \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} - 4\sigma\epsilon_w T_w^3 (1 - V_{uc}) \sum_{k=1}^n \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} \quad (2.102)$$

$$\frac{\partial R_{nw}}{\partial T_g} = 4\sigma\epsilon_g T_g^3 \frac{\pi - \text{skyg}}{2\pi} (1 - V_{uc}) \quad (2.103)$$

$$\frac{\partial R_{nug}}{\partial T_{ug}} = -4\sigma\epsilon_{ug} T_{ug}^3 (1 - V_{uc}) \quad (2.104)$$

$$\frac{\partial R_{nug}}{\partial T_w} = 8\sigma\epsilon_w T_w^3 \frac{\text{skyw}}{\pi} (1 - V_{uc}) \sum_{k=1}^n \frac{kh_0}{b_w \frac{(1-V_{uc})}{V_{uc}}} \quad (2.105)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Após a Seção 2.4, são obtidas nove derivadas parciais de fluxos de calor sensíveis (H_r , H_w , H_{ug}) do seguinte modo.

$$H_r = A(T_r - T_{au}), \quad A = \rho_a C_p / r_r \quad (2.51)$$

$$H_w = B(T_w - T_{au}), \quad B = \rho_a C_p / r_w \quad (2.52)$$

$$H_{ug} = C(T_{ug} - T_{au}), \quad C = \rho_a C_p / r_{du} \quad (2.53)$$

$$H_r + H_w + H_{ug} = D(T_{au} - T_m), \quad D = \rho_a C_p / r_{au} \quad (2.54)$$

$$T_{au} = \frac{A \cdot T_r + B \cdot T_w + C \cdot T_{ug} + D \cdot T_m}{A + B + C + D} \quad (2.55)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Após a Seção 2.4, são obtidas nove derivadas parciais de fluxos de calor sensíveis (H_r , H_w , H_{ug}) do seguinte modo.

$$T_{au} = \frac{A \cdot T_r + B \cdot T_w + C \cdot T_{ug} + D \cdot T_m}{A + B + C + D} \quad (2.106)$$

$$\frac{\partial H_r}{\partial T_r} = \frac{A(B + C + D)}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_r}{\partial T_w} = \frac{-AB}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_r}{\partial T_{ug}} = \frac{-AC}{A + B + C + D} \quad (2.107)$$

$$\frac{\partial H_w}{\partial T_w} = \frac{B(A + C + D)}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_w}{\partial T_r} = \frac{-AB}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_w}{\partial T_{ug}} = \frac{-BC}{A + B + C + D} \quad (2.108)$$

$$\frac{\partial H_{ug}}{\partial T_{ug}} = \frac{C(A + B + D)}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_r} = \frac{-AC}{A + B + C + D}, \quad \frac{\partial H_{ug}}{\partial T_w} = \frac{-BC}{A + B + C + D} \quad (2.109)$$



Desenvolvimento de um esquema de superfície continental

Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Após a Seção 2.4, são obtidas nove derivadas parciais de fluxos de calor sensíveis (H_r , H_w , H_{ug}) do seguinte modo.

$$\lambda E_r = E[e_*(T_r) - e_{au}], \quad E = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \frac{W_r}{r_r} \quad (2.71)$$

$$\lambda E_w = F[e_*(T_w) - e_{au}], \quad F = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \frac{W_w}{r_w} \quad (2.72)$$

$$\lambda E_{ug} = G[e_*(T_{ug}) - e_{au}], \quad G = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \frac{W_{ug}}{r_{du}} \quad (2.73)$$

$$\lambda E_r + \lambda E_w + \lambda E_{ug} = H[e_*(e_{au}) - e_m], \quad H = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \frac{W_r}{r_{au}} \quad (2.74)$$

$$(2.75)$$



Modelo Canopy Urbano

2.7 Numerical solution of prognostic equations

Seguindo a Seção 2.5, nove derivadas parciais de fluxos de calor latentes (λE_r , λE_w , λE_{ug}) são obtidas da seguinte maneira. Onde, $e'_*(T_i)$ é uma inclinação da curva de pressão de vapor de saturação em T_i .

$$e_{au} = \frac{E \cdot e_*(T_r) + F \cdot e_*(T_w) + G \cdot e_*(T_{ug}) + H \cdot e_m}{E + F + G + H} \quad (2.110)$$

$$\frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_r} = \frac{e'_*(T_r)E(F + G + H)}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_w} = \frac{-e'_*(T_w)EF}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_r}{\partial T_{ug}} = \frac{-e'_*(T_{ug})EG}{E + F + G + H} \quad (2.111)$$

$$\frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_w} = \frac{e'_*(T_w)F(E + G + H)}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_r} = \frac{-e'_*(T_r)EF}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_w}{\partial T_{ug}} = \frac{-e'_*(T_{ug})FG}{E + F + G + H} \quad (2.112)$$

$$\frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_{ug}} = \frac{e'_*(T_{ug})G(E + F + H)}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_r} = \frac{-e'_*(T_r)EG}{E + F + G + H}, \quad \frac{\partial \lambda E_{ug}}{\partial T_w} = \frac{-e'_*(T_w)FG}{E + F + G + H} \quad (2.113)$$