



# **Dinâmica 17/09/2019 a 11/10/2019**

## **Equações diferenciais**

---

**MET-576-4**

**Modelagem Numérica da Atmosfera**

**Dr. Silvio Nilo Figueroa Rivero & 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)**

September						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					
6:☉ 14:☉ 21:☉ 28:☿						

October						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		
5:☉ 13:☉ 21:☉ 28:☿						

November						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
4:☉ 12:☉ 19:☉ 26:☿						

**Dinâmica 17/09/2019 a  
11/10/2019**

**Arrasto de Onda de  
Gravidade 12/10/2019  
a 18/10/2019**

**Radiação 22/10/2019 a  
25/10/2019**

**Superfície 29/10/2019 a  
1/11/2019**

**Camada Limite 5/11/2019 a  
8/11/2019**

**Convecção Profunda 12/11/2019  
a 15/11/2019**

**Convecção Rasa 19 a 22**

**Microfísica 26 a 29**



## **Superfície:**

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



## Development of the land surface scheme

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



**Dinâmica 17/09/2019 a 11/10/2019**

**Development of the land surface scheme**

---

**Conceito Basico 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.**



**3 Water Body model 27**

- 3.1 Energy balance at water surface . . . . . 28
- 3.2 Albedo and radiation budget . . . . . 29
- 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes . . . . . 30
- 3.4 Prognostic variables and their governing equations . . . . . 32
- 3.5 Numerical solution of prognostic equations . . . . . 33



### 3- Water Body model

Neste capítulo, o modelo de massa de água a ser usado como submodelo do esquema da superfície terrestre é formulado com base no modelo de restauração de força.

Um conjunto de dados do sistema de medição de fluxo do Projeto Lake Biwa () é usado para o desenvolvimento e validação do modelo de massa de água.

Variáveis e parâmetros usados neste capítulo estão listados na Tabela 3.1. As constantes físicas estão listadas na Tabela A.1 no Apêndice A.



### 3- Water Body model

Apesar de muita energia radiativa líquida, o calor latente (evaporação) não é tão grande do início da primavera ao final do verão.

Por outro lado, o calor latente (evaporação) é grande (ainda maior que a radiação líquida) durante o outono e o inverno.





### 3- Water Body model

O que quero dizer aqui é que existe um atraso de fase entre o ciclo sazonal de radiação líquida ( $R_n$ ), o calor latente ( $\lambda E$ ) e o calor sensível ( $H$ ).

Isso significa que parte significativa da energia não é usada (ou liberada) em um ciclo diurno de balanço de energia sendo entregue em um ciclo sazonal.

Esse tipo de dinâmica sazonal do balanço energético é peculiar ao corpo d'água, especialmente em lago profundo.

### 3- Water Body model

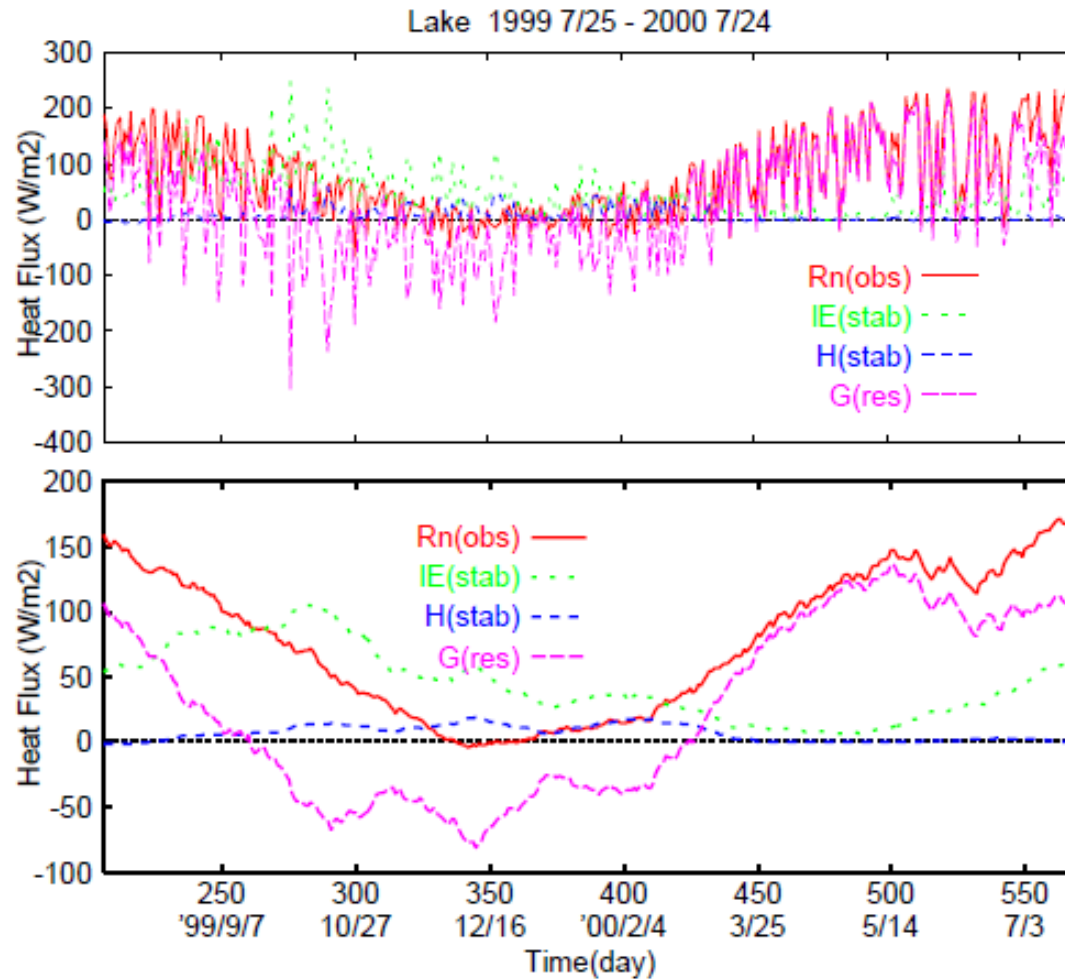


Figure 3.1: Seasonal variation of energy budget at the north part of the Lake Biwa (1999/7/25-



### 3.2 Albedo and radiation budget

A Figura 3.2 mostra a variação sazonal do albedo da superfície do lago de 25 de julho de 1999 a 24 de julho de 2000 pela média móvel de 15 dias.

Albedo torna-se grande no inverno e pequeno no verão.

Isso está profundamente relacionado à mudança no ângulo do zênite solar.

A Figura 3.3 mostra a relação entre o albedo ( $\alpha$ ) e o cosseno do ângulo do zênite da radiação solar incidente ( $\mu$ ).

Nesta figura, os dados são selecionados de acordo com os seguintes critérios para ver claramente essa dependência.



### 3.2 Albedo and radiation budget

Nesta figura, os dados são selecionados de acordo com os seguintes critérios para ver claramente essa dependência.

$$S^{\downarrow} \geq 0.75 \times S_{top} \quad S^{\downarrow} \geq 50 \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad \mu \geq 0.1$$

onde

$S^{\downarrow}$  = downward short-wave radiation observed at the surface

$S_{top}$  = downward short-wave radiation at the top of atmosphere (theoretical value)

### 3.2 Albedo and radiation budget

A Figura 3.3 mostra a relação entre o albedo ( $\alpha$ ) e o cosseno do ângulo do zênite da radiação solar incidente ( $\mu$ ).

$$S^{\downarrow} \geq 0.75 \times S_{top} \quad S^{\downarrow} \geq 50 \quad (\text{Wm}^{-2}) \quad \mu \geq 0.1$$

$$\alpha_b = a\mu^b$$

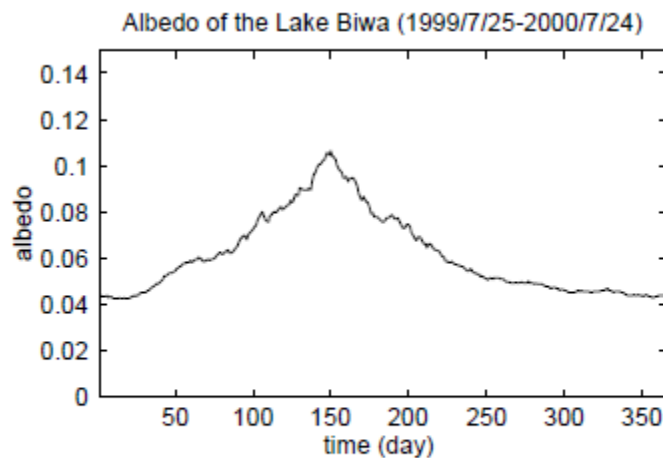


Figure 3.2: Albedo of the Lake Biwa (moving average of 15 days, 1999/7/25-2000/7/24)

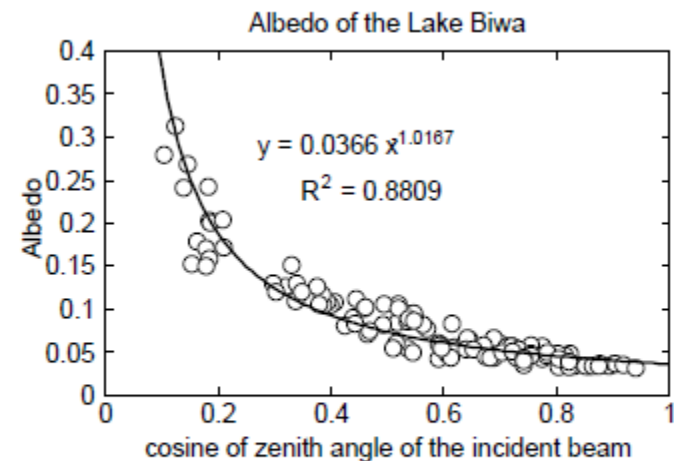


Figure 3.3: Dependency of albedo ( $\alpha$ ) on cosine of zenith angle of incident beam ( $\mu$ )



### 3.2 Albedo and radiation budget

A Figura 3.3 mostra a relação entre o albedo ( $\alpha$ ) e o cosseno do ângulo do zênite da radiação solar incidente ( $\mu$ ).

Quando o céu está nublado ou parcialmente nublado, a proporção da componente do feixe de radiação direto se torna menor que a do componente difuso.

Nesse caso, albedo mostra a fraca dependência do ângulo do zênite solar.

De qualquer forma, a refletância da superfície da água depende fortemente de  $\mu$  para o componente de feixe direto.



### 3.2 Albedo and radiation budget

A Figura 3.3 mostra a relação entre o albedo ( $\alpha$ ) e o cosseno do ângulo do zênite da radiação solar incidente ( $\mu$ ).

No modelo, seguindo Goudriaan (1971), a radiação de ondas curtas descendente é dividida em quatro componentes:

$F_{vb}$  (feixe visível),

$F_{vd}$  (difuso visível),

$F_{nb}$  (feixe infravermelho próximo)

$F_{nd}$  (difuso infravermelho próximo)

Então, podemos tratar o componente de feixe direto e o componente difuso separadamente.



### 3.2 Albedo and radiation budget

O Balanço de radiação para a superfície da água pode ser escrito da seguinte maneira.

$$\alpha_b = a\mu^b \quad (3.1)$$

$$Rn_{wb} = (F_{vb} + F_{nb})(1 - \alpha_b) + (F_{vd} + F_{nd})(1 - \alpha_d) + F_{td} - \varepsilon_w \sigma T_{wb}^4 \quad (3.2)$$

Onde,  $\alpha_b$  e  $\alpha_d$  são refletâncias para componente de feixe direto e componente difuso, respectivamente.

Infelizmente, o componente de feixe direto e o componente difusa não foram observados separadamente, não foi possível corrigir diretamente a relação da eq. (3.1). Na verdade, é impossível medir a proporção do feixe direto refletido e da radiação difusa refletida.

Portanto, supõe-se que  $\alpha_b$  e  $\alpha_d$  sejam iguais, e os parâmetros na relação entre refletância e  $\mu$  (eq. (3.3)) são decididos através da comparação de valores simulados e observados.





### 3.2 Albedo and radiation budget

O Balanço de radiação para a superfície da água pode ser escrito da seguinte maneira.

$$\alpha_b = a\mu^b \quad (3.1)$$

$$Rn_{wb} = (F_{vb} + F_{nb})(1 - \alpha_b) + (F_{vd} + F_{nd})(1 - \alpha_d) + F_{td} - \varepsilon_w \sigma T_{wb}^4 \quad (3.2)$$

Portanto, supõe-se que  $\alpha_b$  e  $\alpha_d$  sejam iguais, e os parâmetros na relação entre refletância e  $\mu$  (eq. (3.3)) são decididos através da comparação de valores simulados e observados.

$$\alpha_b = \alpha_d = \alpha_1 \mu^{\alpha_2} \quad (3.3)$$



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

O processo de transferência turbulenta é muito simples para o caso de corpos d'água.

Basicamente, o perfil de vento, temperatura do ar e pressão de vapor são expressos pela lei log-linear em uma atmosfera está em condição neutra.

De acordo com a similaridade de Monin-Obukov, a resistência aerodinâmica é calculada considerando a estabilidade atmosférica.



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

Seguindo Kondo (???), a rugosidade é expressa por uma função da velocidade de atrito (eq. (3.4)). A velocidade de atrito é uma função da estabilidade atmosférica.

A estabilidade é definida como uma função da velocidade de atrito e do fluxo superficial (eq. (3.7)).

E o próprio fluxo de superfície é uma função da estabilidade.

### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

Portanto, esses valores são determinados pelo procedimento de iteração a partir de uma estimativa inicial.

Imposição inicial

$$u_* = 0.001 \text{ (m s}^{-1}\text{)}, \quad \text{neutral condition } (\zeta = 0)$$

- rugosidade e velocidade de atrito (1º)

$$u_{*c} = 100 \times u_*$$

$$z_{0c} = a \times u_{*c}^b \quad (3.4)$$

$$z_0 = 0.01 \times z_{0c}$$

$$u_* = \kappa u_m / \ln(z_m / z_0) \quad (3.5)$$

when  $u_{*c} \leq 6.89 \text{ (cm)}$

$$a = 1.69 \times 10^{-2} \quad b = -1.0$$

when  $u_{*c} > 6.89 \text{ (cm)}$

$$a = 1.65 \times 10^{-4} \quad b = 1.4$$

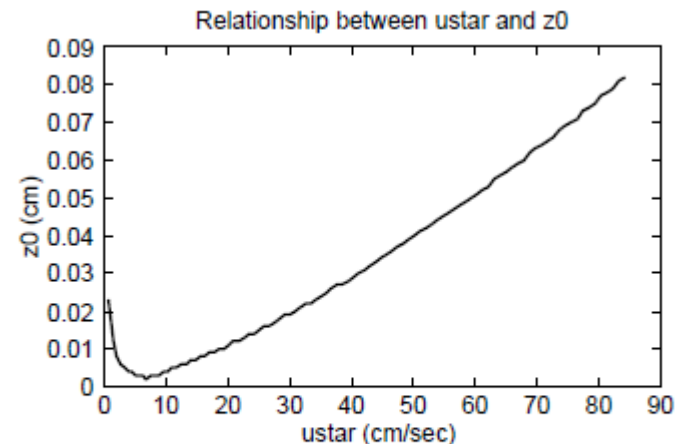


Figure 3.4: Relationship between friction velocity and roughness



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

Onde  $z_{0c}$  e  $u_{*c}$  são expressos em um unidade de (cm) e  $z_0$  e  $u_*$  estão em (m).

- estabilidade (1º)

$$H = \rho C_p (T_{wb} - T_m) \kappa u_* / \ln(z_m / z_{0h}), \quad E = \rho C_p (q_{wb} - q_m) \kappa u_* / \ln(z_m / z_{0h}) \quad (3.6)$$

$$L = -\rho C_p T_m u_*^3 / (\kappa g H_v), \quad H_v = H + 0.61(1 + 0.61 q_m) T_m C_p E \quad (3.7)$$

$$\zeta = z_m / L, \quad \zeta_0 = z_0 / L \quad (3.8)$$

Em geral, a rugosidade da temperatura e umidade é maior que a do momento no caso da superfície da água. Neste modelo, assume-se que seja igual a  $z_{0h} = 3z_0$ .

### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

- função universal integrada

when  $\zeta < 0$

$$\Psi_M = \ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right) + \ln\frac{(x_0^2 + 1)(x_0 + 1)^2}{(x^2 + 1)(x + 1)^2} + 2(\tan^{-1} x - \tan^{-1} x_0) \quad (3.9)$$

$$\Psi_H = \ln\left(\frac{z_m}{z_{0h}}\right) + 2 \ln\left(\frac{y_0 + 1}{y + 1}\right) \quad (3.10)$$

$$x = (1 - 16\zeta)^{1/4}, \quad x_0 = (1 - 16\zeta_0)^{1/4}, \quad y = (1 - 16\zeta)^{1/2}, \quad y_0 = (1 - 16\zeta_0)^{1/2} \quad (3.11)$$

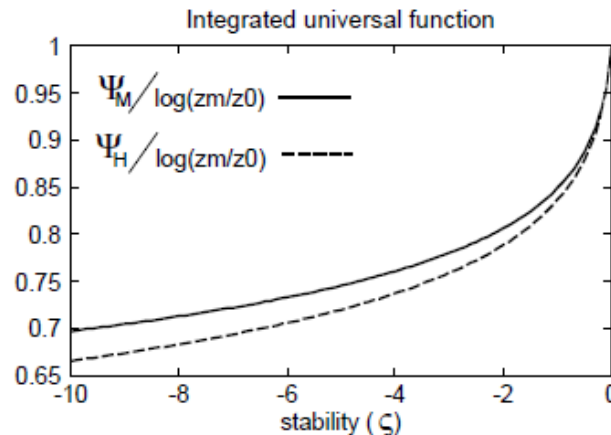


Figure 3.5: Relationship between stability and universal function (unstable)

### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

- função universal integrada

when  $\zeta \geq 0$

$$\Psi_M = \ln\left(\frac{z_m}{z_0}\right) + \frac{7}{3} \ln \frac{1 + 3\zeta + 10\zeta^3}{1 + 3\zeta_0 + 10\zeta_0^3} \quad (3.12)$$

$$\Psi_H = \ln\left(\frac{z_m}{z_{0h}}\right) + 400 \ln \frac{1 + 7/400\zeta + 0.005\zeta^2}{1 + 7/400\zeta_0 + 0.005\zeta_0^2} \quad (3.13)$$

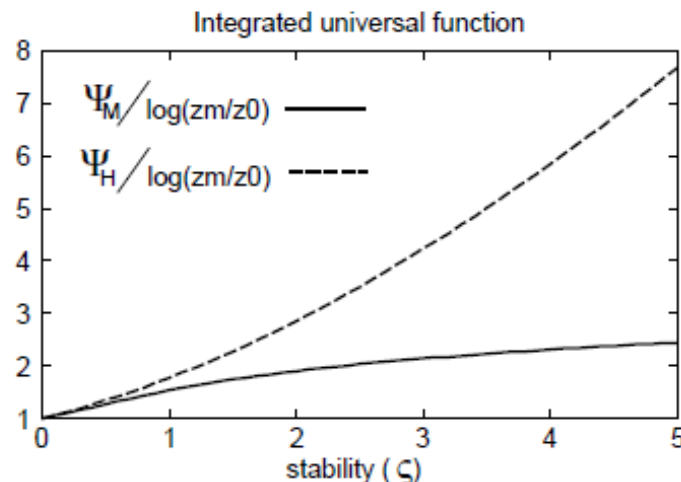


Figure 3.6: Relationship between stability and universal function (stable)



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

- velocidade de atrito e estabilidade (2º)

$$u_{*,2} = \frac{\kappa u_m}{\Psi_M} \quad (3.14)$$

$$H = \rho C_p (T_{wb} - T_m) \kappa u_{*,2} / \Psi_H, \quad E = \rho C_p (q_{wb} - q_m) \kappa u_{*,2} / \Psi_H$$

$$L = -\rho C_p T_m u_{*,2}^3 / (\kappa g H_v), \quad H_v = H + 0.61(1 + 0.61 q_m) T_m C_p E$$

$$\zeta_2 = z_m / L$$





### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

- condição de convergência

$$|\zeta - \zeta_2| < 0.01 \quad |(u_* - u_{*,2})/u_{*,2}| < 0.01$$

O conjunto de equações acima é calculado iterativamente até que a condição de convergência seja obtida



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

Finalmente, o fluxo de momento ( $\tau_{wb}$ ) e a resistência aerodinâmica ( $r_{aw}$ ) entre a superfície da água e a altura de referência ( $z_m$ ) são calculados a partir do resultado da velocidade de atrito e da função universal integrada.

$$\tau_{wb} = \rho u_*^2 \quad (3.15)$$

$$r_{aw} = \frac{\Psi_H}{\kappa u_*} = \frac{\Psi_M \Psi_H}{\kappa^2 u_m} \quad (3.16)$$



### 3.3 Turbulent transfer and surface fluxes

No caso da massa de água, o calor sensível e os fluxos de calor latentes vêm apenas da superfície da água.

Embora os fluxos de superfície já tenham sido calculados no processo de iteração acima: Os fluxos são reescritos em uma formulação de resistência.

Observe que esses fluxos e radiação líquida (eq. (3.2)) dependem apenas de  $T_{wb}$ .

$$H_{wb} = \rho C_p \frac{T_{wb} - T_m}{r_{aw}} = A(T_{wb} - T_m) \quad (3.17)$$

$$\lambda E_{wb} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e_*(T_{wb}) - e_m}{r_{aw}} = D[e_*(T_{wb}) - e_m] \quad (3.18)$$

$$Rn_{wb} = (F_{vb} + F_{nb})(1 - \alpha_b) + (F_{vd} + F_{nd})(1 - \alpha_d) + F_{td} - \varepsilon_w \sigma T_{wb}^4 \quad (3.2)$$



### 3.4 Prognostic variables and their governing equations

O modelo de massa de água é expresso pelo modelo de força-restauração, e as variáveis prognósticas do estado físico são de apenas duas temperaturas.

Uma é a temperatura da superfície da água ( $T_{wb}$ ), outra é a temperatura da água profunda ( $T_{dw}$ ), que é definida como o valor médio diário de  $T_{wb}$ . A  $T_{wb}$  mostra ciclo diurno e  $T_{dw}$  mostra ciclo sazonal.

A maior parte da radiação de ondas curtas absorvida pelo corpo de água penetra no interior, e apenas uma pequena parte é absorvida e usada pela camada superficial da pele.

Então, a amplitude da variação diurna da temperatura da superfície da água é muito menor do que a de outras superfícies.

Embora toda a radiação de ondas longas possa ser trocada com a superfície da água.



### 3.4 Prognostic variables and their governing equations

A energia de ondas curtas absorvidas é armazenada e usada sazonalmente. O corpo de água absorve muita energia na primavera e no verão, e essa energia é liberada como calor latente (evaporação) na temporada de outono e inverno.

Então, as equações que regem as temperaturas no corpo d'água são ligeiramente diferentes das da área verde.

Neste modelo, introduzimos um parâmetro  $\beta$ . É definida como a proporção da energia radiativa de ondas curtas que é absorvida pelo corpo d'água e penetra na camada profunda.

Na equação prognóstica da temperatura da superfície (eq. (3.19)), essa proporção de energia de ondas curtas absorvida é subtraída da radiação líquida ( $Rn_{wb}$ ).



### 3.4 Prognostic variables and their governing equations

As equações que regem as temperaturas são expressas da seguinte forma.

$$C_{wb} \frac{\partial T_{wb}}{\partial t} = Rn_{wb} - \beta F_{s,wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} - \omega C_{wb}(T_{wb} - T_{dw}) \quad (3.19)$$

$$C_{dw} \frac{\partial T_{dw}}{\partial t} = Rn_{wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} \quad (3.20)$$

Além das propriedades térmicas, como calor específico ( $c_w$ ) e condutividade térmica ( $k_w$ ):

Quatro parâmetros são preparados para reproduzir adequadamente as características do balanço de energia e radiação.

- effective depth ( $Z_s$ )
- short-wave radiation penetration factor ( $\beta$ )
- minimum albedo ( $\alpha_1$ )
- factor of albedo and  $\mu$  relationship ( $\alpha_2$ )



### 3.4 Prognostic variables and their governing equations

A amplitude e a fase do ciclo sazonal de temperatura são altamente dependentes da profundidade do corpo d'água.

Para levar em conta o efeito da profundidade da água, a profundidade efetiva ( $Z_s$ ) é introduzida no cálculo da capacidade térmica efetiva (eq. (3.21))  $Z_s$  não significa a profundidade real da massa de água.

Se olharmos para a eq. (3.22),  $Z_s$  deve ser igual ou menor que  $\frac{1}{\sqrt{365}}$  da profundidade média da água.

$$C_{wb} = c_w Z_s + \sqrt{k_w c_w / 2\omega} \quad (3.21)$$

$$C_{dw} = \sqrt{365} C_{wb} \quad (3.22)$$

$k_w$	thermal conductivity (= 0.6)	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$c_w$	specific heat of water ( $= 4.18 \times 10^6$ )	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$
$\omega$	angular frequency of diurnal cycle ( $2\pi/86400$ )	$\text{s}^{-1}$



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

Os fluxos de energia são funções explícitas das condições de contorno atmosférico, variável prognóstica e resistência aerodinâmica. 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. Em seguida, as equações prognósticas são expressas na forma de diferenciação explícita backward e um conjunto de equações lineares simultâneas relacionadas às mudanças de temperatura ao longo de um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) é obtido.



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

Não apenas os fluxos de energia, mas também o termo de troca de calor (termo de restauração) dependem das temperaturas.

Agora, as equações prognósticas podem ser escritas em forma de tempo discreto.

$$C_{wb} \frac{\Delta T_{wb}}{\Delta t} = Rn_{wb} - \beta F_{s,wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} - \omega C_{wb}(T_{wb} - T_{dw})$$

$$+ \frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} - \frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} - \frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} - \omega C_{wb}(\Delta T_{wb} - \Delta T_{dw}) \quad (3.23)$$

$$C_{dw} \frac{\Delta T_{dw}}{\Delta t} = Rn_{wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} + \frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} - \frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} - \frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} \quad (3.24)$$



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

Se estiver escrito em forma de matriz,

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

$$K = \begin{bmatrix} \frac{C_{wb}}{\Delta t} - \frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} + \frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} + \frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} + \omega C_{wb} & \omega C_{wb} \\ -\frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} + \frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} + \frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} & \frac{C_{dw}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \Delta T_{wb} \\ \Delta T_{dw} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Rn_{wb} - \beta F_{s,wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} - \omega C_{wb}(T_{wb} - T_{dw}) \\ Rn_{wb} - H_{wb} - \lambda E_{wb} \end{bmatrix}$$



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

As equações acima podem ser resolvidas em termos de mudanças de temperatura ( $\Delta T_{wb}$ ,  $\Delta T_{dw}$ ).

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  $t_0 + \Delta t$ ).

$$Rn'_{wb} = Rn_{wb} + \frac{1}{2} \frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} \quad (3.25)$$

$$H'_{wb} = H_{wb} + \frac{1}{2} \frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} \quad (3.26)$$

$$\lambda E'_{wb} = \lambda E_{wb} + \frac{1}{2} \frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} \Delta T_{wb} \quad (3.27)$$



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

De acordo com a eq. (3.2), (3.17), (3.18), derivadas parciais dos fluxos de energia são expressas da seguinte forma.

$$\frac{\partial Rn_{wb}}{\partial T_{wb}} = -4\sigma\epsilon_w T_{wb}^3 \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial H_{wb}}{\partial T_{wb}} = \frac{\rho_a C_p}{r_{aw}} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial \lambda E_{wb}}{\partial T_{wb}} = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{e'_*(T_{wb})}{r_{aw}} \quad (3.30)$$



### 3.5 Numerical solution of prognostic equations

De acordo com a eq. (3.2), (3.17), (3.18), derivadas parciais dos fluxos de energia são expressas da seguinte forma.

Table A.1: List of physical constants

symbol	definition	unit
$\lambda$	latent heat of vaporization	$\text{J kg}^{-1}$
$c_w$	specific heat of water ( $= 4.18 \times 10^6$ )	$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$
$k_w$	thermal conductivity ( $= 0.6$ )	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\varepsilon_w$	emissivity of water ( $= 0.97$ )	
$\sigma$	Stephan-Boltsman constant ( $= 5.6698 \times 10^{-8}$ )	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
$\rho$	density of air ( $= 1.2$ )	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_w$	density of water ( $= 1000$ )	$\text{kg m}^{-3}$
$C_p$	specific heat of air ( $= 1010$ )	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$\gamma$	psychrometric constant ( $= 0.662$ )	$\text{mb K}^{-1}$
$\omega$	angular frequency of diurnal cycle ( $2\pi/86400$ )	$\text{s}^{-1}$
$\kappa$	von Karman's constant ( $= 0.4$ )	
$g$	gravity accerelation ( $= 9.8$ )	$\text{m s}^{-2}$



## Development of the land surface scheme

---

### 4 Green area model 35

4.1 Brief description of SiB model . . . . .	37
4.1.1 Model philosophy . . . . .	37
4.1.2 Structure of the SiB . . . . .	37
4.1.3 Atmospheric boundary conditions for SiB . . . . .	38
4.1.4 Prognostic physical-state variables of SiB . . . . .	39
4.2 Structure of the green area model . . . . .	39
4.3 Prognostic equations of the green area model . . . . .	41
4.3.1 Governing equations for temperatures . . . . .	41
4.3.2 Governing equations for intercepted water . . . . .	42
4.3.3 Governing equations for soil moisture stores . . . . .	43
4.4 Radiative transfer (two-stream approximation) . . . . .	44
4.5 Turbulent transfer and aerodynamic resistances . . . . .	47
4.5.1 Above the transition layer ( $z_t \leq z \leq z_m$ ) . . . . .	47
4.5.2 Within the transition layer ( $z_2 \leq z \leq z_t$ ) . . . . .	48
4.5.3 Within the canopy air space (CAS) ( $z_1 \leq z \leq z_2$ ) . . . . .	48
4.5.4 Below the canopy ( $z_s \leq z \leq z_1$ ) . . . . .	49
4.5.5 Solution of momentum transfer equation set . . . . .	49
4.5.6 Aerodynamic resistances . . . . .	50
4.6 Surface resistances . . . . .	51
4.7 Sensible and latent heat fluxes . . . . .	52
4.8 Numerical solution of prognostic equations . . . . .	54