

Capítulo II

2. Categoria e Polaridade de Descargas para o Chão (Ground Flashes)

Existem 2 tipos de descargas elétricas para o chão : os naturais ou iniciados artificialmente:

- Natural: ocorre naturalmente a partir da eletrificação do meio ambiente e sem a ajuda de alguma estrutura feita pelo homem bem como a sua intervenção;
- Artificial: incluem descargas sobre estruturas altas, aviões e foguetes.

Berger em 1977 criou uma subdivisão para as descargas elétricas para o chão. Esta subdivisão baseia-se na direção de propagação e polaridade da carga transportada da nuvem para a terra, e é ilustrado na figura 8.

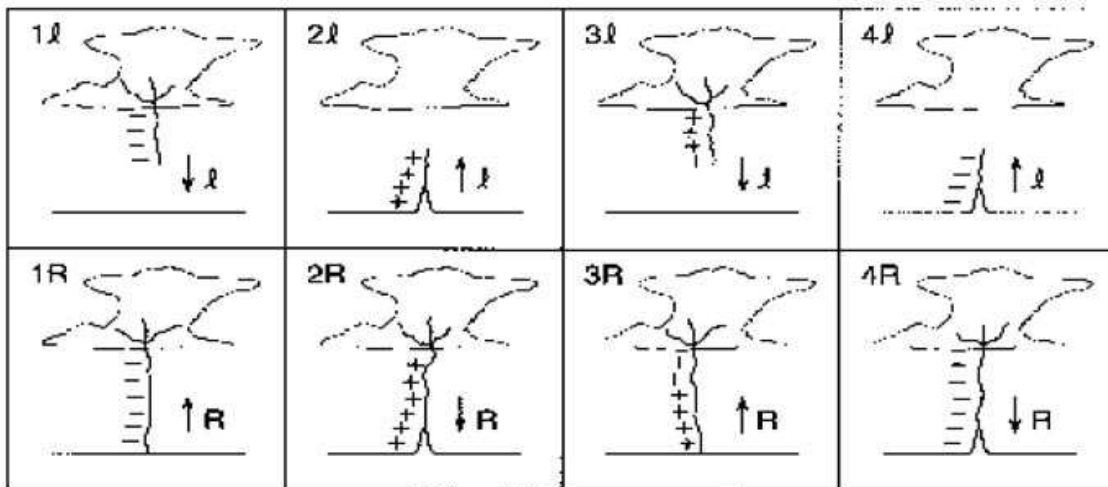


Figura 8. Categorias de descargas elétricas para o chão (ground flashes) de acordo com a classificação feita por Berger em 1977.

Tipo 1 – O mais comum. Propagação para baixo de um líder com Q^- , seguido de um return stroke se propagando para cima; O resultado final é o de transferir Q^- da nuvem para terra.

Tipo 2 – Propagação para cima de um líder com Q^+ e seguida de uma propagação para baixo de um return stroke de Q^- . Este raio é característico de iniciados artificialmente. Também transfere Q^- da nuvem para a terra.

Tipo 3 – Propagação para baixo de um líder com Q^+ seguido de um return stroke com descarrega Q^+ para a terra. São observados em tempestades severas.

Tipo 4 - Um ground-flash positivo Iniciado artificialmente composto de um líder negativo se propagando para cima seguido de um return stroke positivo para baixo. Este tipo é observado em estruturas altas.

2.1 Localização da origem dos relâmpagos

A maioria dos estudos para identificar a região de origem dos relâmpagos se concentra em medidas feitas por sensores de 3-D em VHF (Very High Frequency).

- Rust et al. 1985: (Oklahoma) 4 tempestades

Distribuição bimodal com a altura. 1) 7 km ~ $T = -14\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 2) 10 km ~ $T = -38\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- Proctor (1991) (Africa do Sul) 13 tempestades

Tendem a se agrupar em regiões horizontais de alguns quilômetros
2 regiões na vertical (1) 5.3 km ~ $T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 2) 9.2 km ~ $T = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$
> 90% dos flashes estão próximos (~ 300 m) de regiões com $Z = 20\text{ dBZ}$ naquelas

alturas

Os flashes aconteciam nos buracos da refletividade, que poderia representar uma
discontinuidade na densidade de carga o qual poderia preferencialmente
iniciar

uma descarga. Estes buracos tinham tamanhos entre 250 – 1000 m.

- Morales 2001:

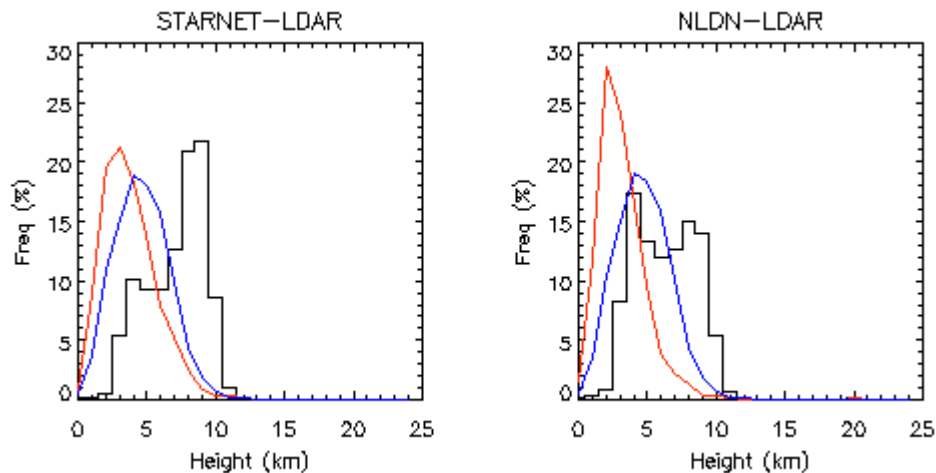


Figure 9. Distribuição de frequência em altura do LDAR/VHF quando observados simultaneamente com o STARNET/VLF ou NLDN (vermelho) e ou não (azul). Lado esquerdo para a rede STARNET e direito NLDN. As linhas vermelha e azul representam o valor mínimo de altura enquanto que a preta o valor médio.

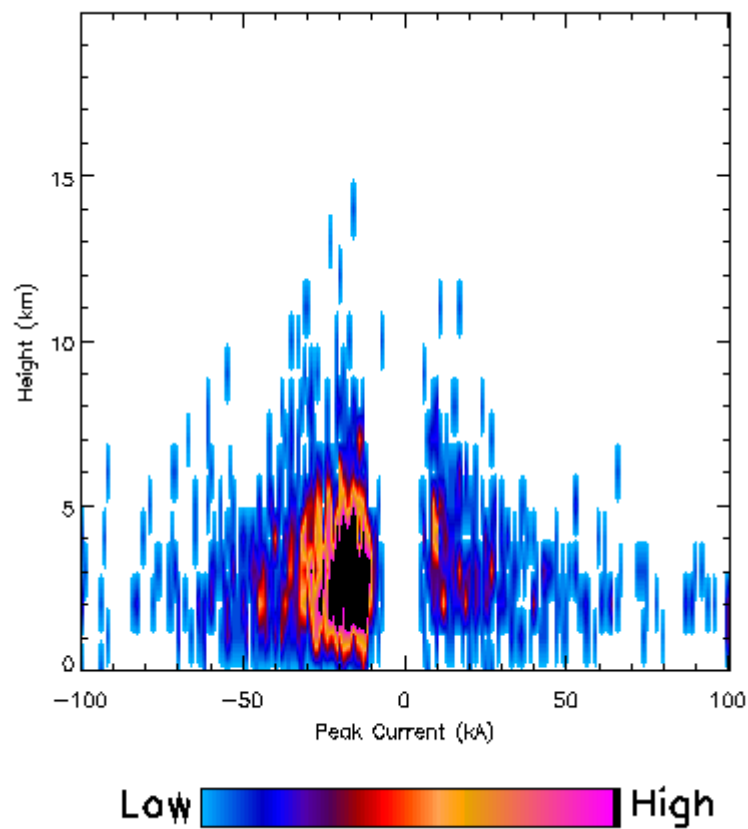


Figure 10. Distribuição de freqüência de altura da descarga elétrica em função da sua polaridade da descarga elétrica. Utilizaram-se os dados de NLDN para definir a polaridade e LDAR para a altura.

2.2 Medidas de velocidade dos Return Strokes (descarga de retorno)

A maioria das medidas de velocidade de propagação das descargas de retorno foram feitas por câmaras fotográficas de alta-velocidade.

As medidas de velocidade parecem ter uma função com o comprimento do canal medido. Isto é verdade para os return strokes, já que a velocidade não é necessariamente constante com a altura, e em outros processos de descargas.

- Orville (1982) analisou 63 strokes:
 - comprimento ≤ 1300 m, exceto um de 2000 m;
 - Todos tinha $V_{med} = 1.1 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$;
 - A moda da distribuição tinha $v \sim 0.9 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$;
 - A velocidade do return stroke diminuía a medida que o canal se propagava para cima;

Introdução à Eletricidade Atmosférica
Capítulo 2: Propriedades dos Raios

Tendo uma redução de 25%, com V_{med} decrescendo de $1.4 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ próximo ao chão à $1.1 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ acima;

- Idone e Orville (1982)

Indicam que a redução da velocidade com a altura se deve a manifestações de se

usar velocidade de 2 dimensões;

Com as mudanças tortuosas com a altura, o comprimento superior pode ser

sub-estimado. (Entretanto as mudanças tortuosas com a altura não mudam

sistematicamente (Idone e Orville 1988);

2.3 Métodos físicos simples para caracterizar os raios Leaders:

a) *Modelo de carga-fonte:*

Proposto inicialmente por Schonland (1938) e remodelado por Uman (1987)

Um raio Leader uni-direcional emana a partir de uma região de carga, e uma carga unipolar se propaga a partir da fonte para o canal do Leader, e se distribui uniformemente ao longo do canal.

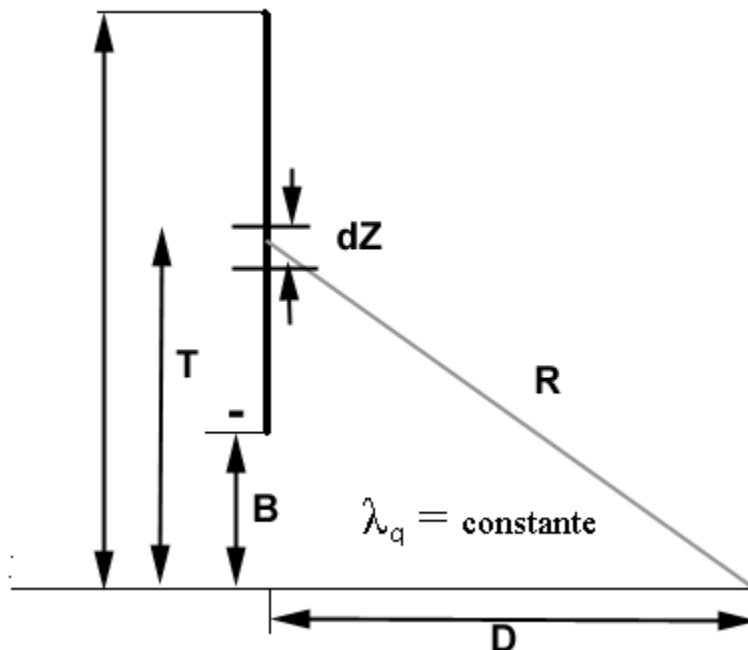


Figura 11. Distribuição unipolar do modelo carga-fonte.

Introdução à Eletricidade Atmosférica
Capítulo 2: Propriedades dos Raios

O incremento do campo elétrico (\vec{E}) medido no chão, que é assumido como um condutor plano, a partir de um elemento de carga ao longo de um incremento do canal de comprimento (dz), acima é:

$$dE = -2\lambda_q(z) \frac{zdz}{4\pi\epsilon(z^2 + D^2)^{3/2}} \quad (\text{eq. 1})$$

onde “2” resulta do método de carga de imagens. λ_q é a distribuição ou densidade de carga, e nesta equação assume-se como constante.

Na equação 1, a polaridade do Leader é designada por λ_q , se o leader for negativo, então dE é positivo.

Com o Leader se propaga para baixo, existe uma diminuição de cargas na região fonte. Logo, estas diminuições também contribuem para mudanças na intensidade do \vec{E} medida no chão.

Portanto, a mudança total do campo produzida pelo Leader negativo que se propaga para baixo e diminuindo as cargas na fonte é:

$$\Delta E = -\frac{\lambda_q}{2\pi\epsilon} \left[\frac{1}{(H_B^2 + D^2)^{1/2}} \frac{1}{(H_T^2 + D^2)^{1/2}} - \frac{(H_T - H_B)H_T}{(H_T^2 + D^2)^{3/2}} \right] \quad (\text{eq. 2})$$

Os dois termos da esquerda são provenientes da carga do Leader, enquanto que o da direita é o fator de decrescimento da fonte de carga.

b) Modelo de Leader Bi-direcional

Modelos eletrostáticos de Leader bi-direcional com carga resultante zero foram propostos inicialmente por Kasemir (1950 e 1960). Este modelo foi esquecido até 1980, que medidas das interações de relâmpagos com aviões foram feitas.

Nestas medidas foram observados que os “flashes” começam simultaneamente, ou seja, com leaders se propagando em lados opostos. Medidas com aviões e radares no chão mostraram uma propagação bi-direcional de “streamers” positivos e negativos que se originavam em extremidades opostas do avião. (Mazur et al. 1984, Mazur 1989).

Mazur (1989) também comparou medidas de flashes induzidas por aviões com os CC ocorridos naturalmente e conclui que eles eram similares.

Introdução à Eletricidade Atmosférica
Capítulo 2: Propriedades dos Raios

Em 1993 Mazur e Ruhnke revisaram a teoria eletrostática de desenvolvimento de relâmpagos e comparou com o modelo de carga-fonte e o modelo de leader-bi-direcional.

No modelo bi-direcional, o Leader é bi-polar com partes positivas e negativas se movendo em direções opostas a partir da origem na altura H_T .

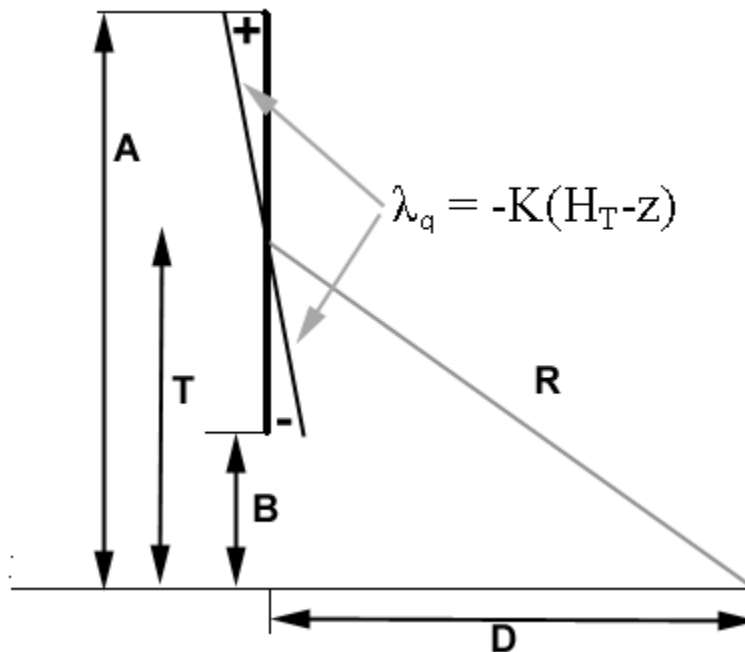


Figura 12. Distribuição bi-polar do modelo líder bi-direcional.

Apesar da carga total resultante do Leader bi-polar ser ZERO, a distribuição de cargas no leader é determinada pela distribuição do potencial ambiente.

Em uma simples configuração podemos assumir que o \vec{E} ambiente é constante. Então temos que as linhas de densidade de carga negativa se movem para baixo e cargas positivas se movem para cima, sendo que podemos descrever este processo como:

$$\lambda q(z) = -K(H_T - z) \quad (\text{eq. 3})$$

O dE a partir de um elemento da linha de carga é descrito pela eq.(1), e a densidade de carga da linha varia linearmente com uma razão K , que é governada pelo \vec{E} ambiente.

Mazur e Ruhnke (1993) assumiram que partes positivas e negativas do leader se moviam com a mesma velocidade. Então, a mudança do campo elétrico total dos “ground flashes” negativos pode ser obtido a partir da integração da equação (1) assumindo uma densidade de carga descrito pela equação (3).

$$\Delta E = -\frac{K}{2\pi\epsilon} \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_A - H_T}{(H_A^2 + D^2)^{1/2}} + \frac{H_T - H_B}{(H_B^2 + D^2)^{1/2}} \\ -\ln[H_A + (H_A^2 + D^2)^{1/2}] \\ +\ln[H_B + (H_B^2 + D^2)^{1/2}] \end{array} \right\} \quad (\text{eq. 4})$$

Quando o Leader se conecta com o chão, $H_B = 0$, e $H_A = 2H_T$, ΔE se torna:

$$\Delta E = -\frac{K}{2\pi\epsilon} \left\{ \begin{array}{l} \frac{H_T}{(4H_T^2 + D^2)^{1/2}} + \frac{H_T}{D} \\ -\ln[2H_T + (4H_T^2 + D^2)^{1/2}] + \ln D \end{array} \right\} \quad (\text{eq. 5})$$

As figuras abaixo (Fig. 5.8) mostram as mudanças do campo elétrico para os dois modelos descritos acima (unidimensional e bidimensional).

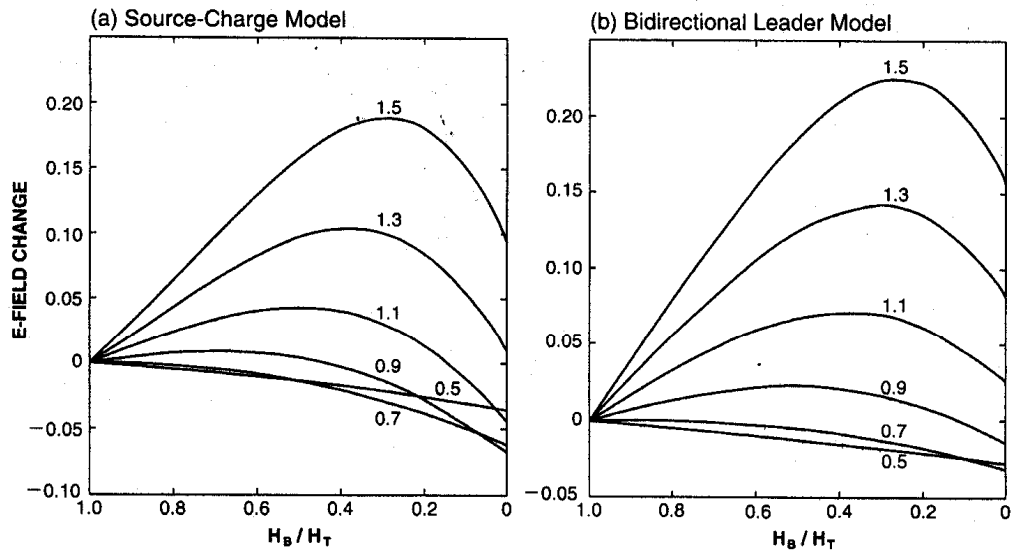


Fig. 5.8. Electric field change per unit charge for (a) source charge model with a downward moving negative leader and (b) bidirectional leader model with the downward half of the leader being negative. Each curve is labeled with its value of H_T/D . In both panels, H_b is the height of the lower tip of leader, and H_T is the top of bidirectional leader or initiation height. (After Mazur and Ruhnke, 1993: American Geophysical Union, with permission.)

Figura 13. Mudança do campo elétrico em função da altura da ponta do raio líder (H_b) e do líder bi-direcional (H_t). (a) – esquerdo, assumindo um modelo de carga fonte; (b) – direito, assumindo um modelo líder bi-direcional.

Mazur e Ruhnke (1993) calcularam a razão entre a altura/distância para que o $\Delta E_o = 0$. Para o modelo de carga-fonte $H_T/D = 1.27$ e o $H_T/D = 0.98$ para o bi-direcional.

Então para o mesmo ΔE e D , o cálculo da altura de iniciação, H_T , para um flash é 30% mais alto para o modelo de carga-fonte do que o bi-direcional.

c) Combinando os efeitos de um Leader e um Return Stroke

Este modelo foi proposto inicialmente por Malan (1963), aonde o return stroke descarregava as cargas ao longo do canal do leader. Ele assumiu que a mudança do campo a partir do stroke era da mesma magnitude, mas de polaridade oposta do leader.

Para obtermos a expressão resultante da mudança do campo sobre o chão para o processo inteiro, adiciona-se uma expressão do return stroke na equação do leader (eq. 2) com os apropriados sinais.

$$\Delta E_{L+RS} = -\frac{Q}{2\pi\epsilon} \frac{H_T}{(H_T^2 + D^2)^{3/2}} \quad (\text{eq. 6})$$

onde a carga total $Q = \lambda q H_T$.

Esta equação é equivalente a equação (1) se considerassemos um “ground stroke” depositando um ponto de cargas positivas dentro da nuvem e assim neutralizando a parte da fonte-de-carga do leader.

No modelo leader bi-direcional, a mudança de campo do return stroke é produzida por uma onda de potencial do chão que se move do chão para o topo do leader (H_A)

Para um caso de um ground flash negativo, Mazur e Ruhnke (1993) visualizaram um efeito aonde o return stroke neutralizava a carga negativa na parte de baixo do leader, e isso dobrava (2X) a quantidade de carga positiva na parte superior do leader.

Então o stroke negativo coloca um carga positiva $Q = KH_T^2$ no canal do leader. Assumindo velocidades de propagação igual para o leader, então $H_A = 2H_T$,

$$\Delta E = -\frac{Q}{4\pi\epsilon H_T^2} \left\{ \frac{-2H_T}{(4H_T^2 + D^2)^{1/2}} + \ln[2H_T + (4H_T^2 + D^2)^{1/2}] - \ln D \right\} \quad (\text{eq. 7})$$

Apesar de que ambos os modelos, bi-direcional e fonte-carga, produzirem formas de onda do campo elétrico realistas, Mazur e Ruhnke (1993) concluíram que o conceito bi-direcional faz mais sentido físico, enquanto que o unipolar não. Por exemplo, o modelo de fonte-carga viola o requerimento que um condutor sob um campo elétrico terá uma indução na distribuição de cargas ditada pela distribuição do potencial ambiente.

Além disso, Kasemir (1983) notou que não há nenhuma lei física que faça com que a distribuição de cargas se concentre a partir de uma propagação em um canal do relâmpago. Por outro lado, ele mostrou que a energia armazenada na tempestade do campo elétrico induz carregamento do leader bi-direcional.

Introdução à Eletricidade Atmosférica
Capítulo 2: Propriedades dos Raios

Portanto Mazur e Ruhnke (1993) propuseram uma modificação nos tipos de classificação de raios da Fig. 8, da classificação de Berger (1977), a partir de medidas fotográficas com alta resolução temporal.

Tipo 2b: leader positivo inicialmente se move para cima em direção à nuvem; o dart leader se move para baixo a partir da nuvem para a terra; quando o dart leader alcança a terra, o return stroke ocorre. Este cenário descreveu o processo de um raio induzido por um foguete que envolve cargas negativas em tempestade de verão.

Tipo 4b: um leader positivo desce da nuvem em direção à terra e aciona um leader negativo para partir de estruturas altas ou foguetes; após os dois leader se encontrarem, um return stroke ocorre. Esta situação descreve os raios que ocorrem durante as tempestades de inverno que tem polaridade positiva acima.

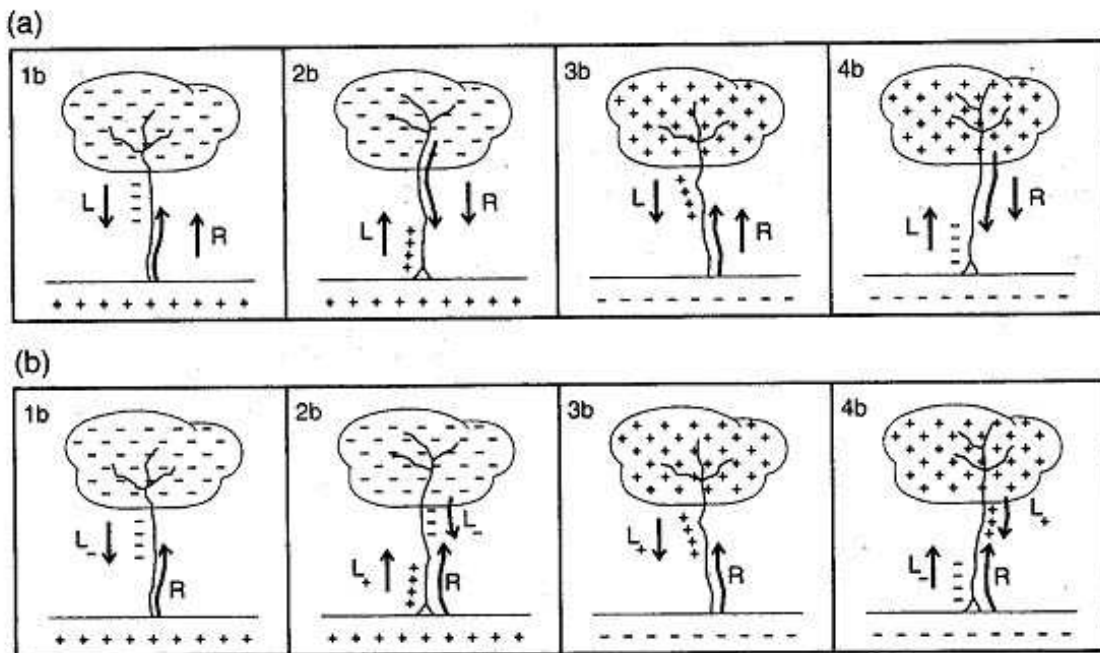


Figura 14. Modificação da classificação de Berger 1977 a partir de estudos de Mazur e Ruhnke (1993).