

ACA0324 - Meteorologia Física I (Microfísica de Nuvens)

Profa. Rachel Ifanger Albrecht
(sala 346, rachel.albrecht@iag.usp.br)

SUMÁRIO

Aula 1 – Formação das gotas de nuvem

Aula 2 – Crescimento de gotas por difusão de vapor

Aula 3 – Crescimento de gotas por colisão-coalescência

Aula 4 – Formação e crescimento de cristais de gelo

Aula 5 – Distribuição de tamanho de hidrometeoros

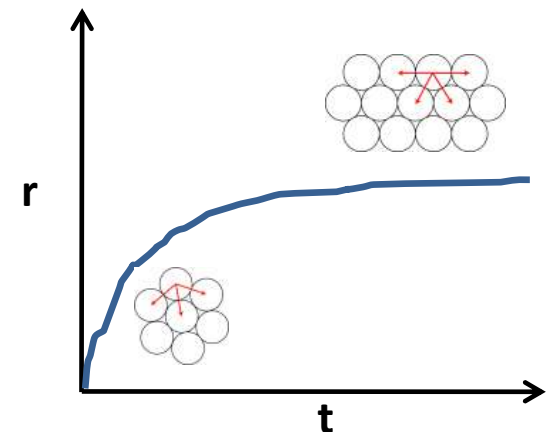
Aula 6 – Modelo de Nuvens

Crescimento de gotas por colisão-coalescência

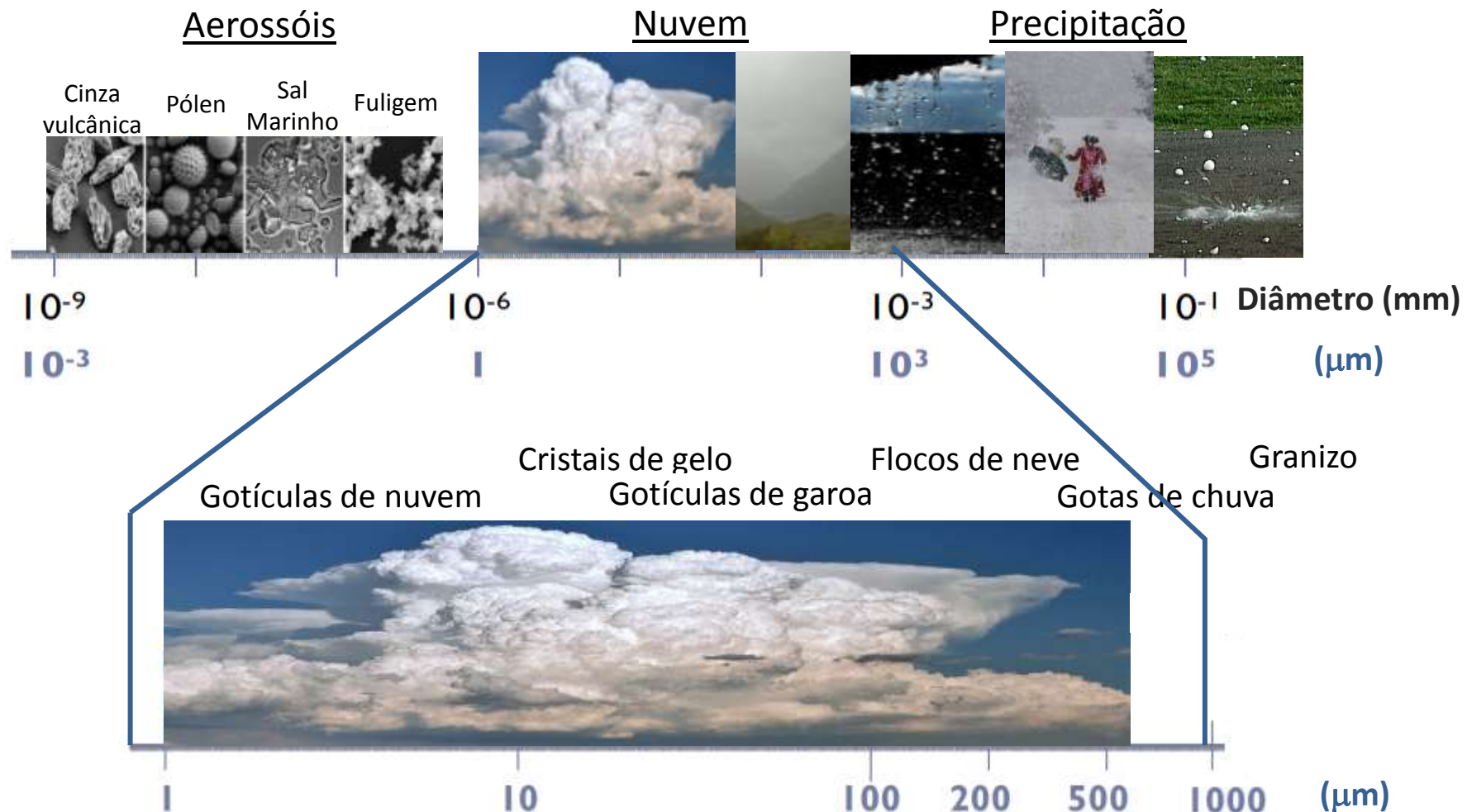
- O crescimento por difusão de vapor de gotículas é eficiente da nucleação do CCN até a gota atingir $\sim 20 \mu\text{m}$. A partir deste tamanho, a gota cresce mais lentamente por difusão:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S - 1)}{F_K + F_D} \quad r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2 \xi t} \quad \longrightarrow \quad \text{equação parabólica de crescimento}$$

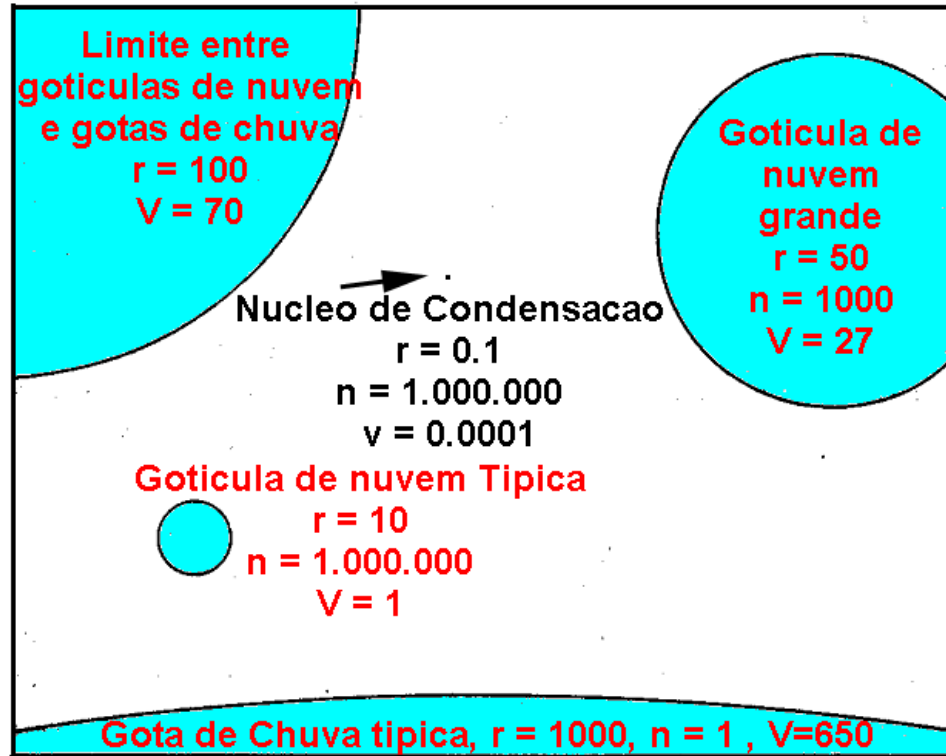
- Exercício crescimento por difusão de vapor:
 - De $10 \mu\text{m}$ para $20 \mu\text{m}$: $t = 1,87 \text{ min}$
 - De $20 \mu\text{m}$ para $100 \mu\text{m}$: $t = 56 \text{ min}$
 - De $20 \mu\text{m}$ para $1000 \mu\text{m}$ (gota chuva): $t = 4,8 \text{ dias!!!}$



- O objetivo principal da física da precipitação é explicar **como** as gotas de chuva (~ 1 mm) são geradas em intervalos de tempo curtos de até **20 minutos**...

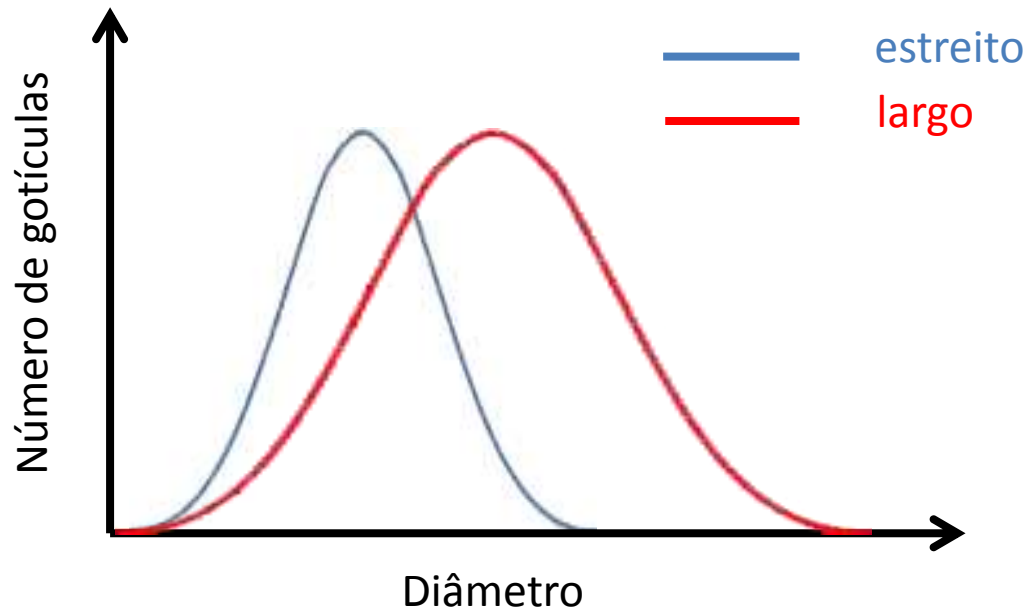


- Tipicamente, durante este período (**~20 minutos**), uma população de gotículas nucleadas da ordem de **1.000.000 gotículas/m³ com 10 µm** de raio evolui para uma população de **1 gotículas/m³ com diâmetros típicos de 1 mm**:



- Assim, o processo de colisão e coalescência entre as gotículas de nuvem é o responsável por esse aumento de 1.000 vezes no raio das partículas de nuvem (10 µm → 1 mm) em dezenas de minutos, sendo fundamental para o desenvolvimento da precipitação.
- Uma gota típica de chuva de **1 mm** pode ser resultado da ordem de **10⁵ colisões!**

- Porém, o número de colisões entre gotículas de nuvem só é significativo somente após o espectro (distribuição de tamanhos) de gotas obter uma **amplitude de tamanhos variados (distribuição larga)** com algumas gotículas de tamanhos variados e superiores a $20\ \mu\text{m}$.
 - Exemplos de espectros estreito e largo de gotículas:



- *É necessário apenas 1 gotícula grande ($> 20\ \mu\text{m}$) em cada 10^5 gotículas, ou uma gotícula por litro de nuvem, para o processo de colisão-coalescência começar.*

- Mas como obter o *alargamento do espectro de gotículas*? (i.e., obter algumas gotículas de tamanho maiores)
 - **CCN gigantes**:
 - São CCNs com tamanhos maiores que 2 μm .
 - Eles são poucos numerosos na natureza.
 - Fontes: Poeira, pólen, esporos, sal marinho.
 - Não são encontrados em todos ambientes

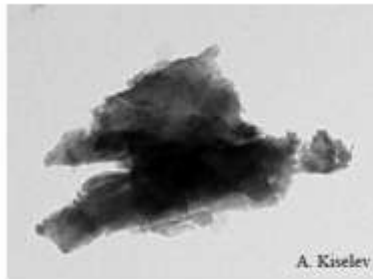


Fig. 1.28 Dust particle



Fig. 1.29 Sahara dust transport

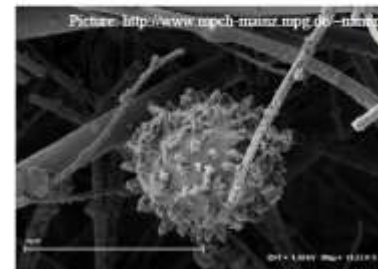
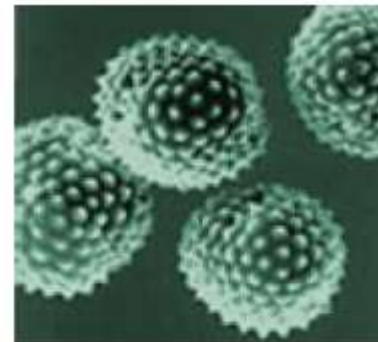
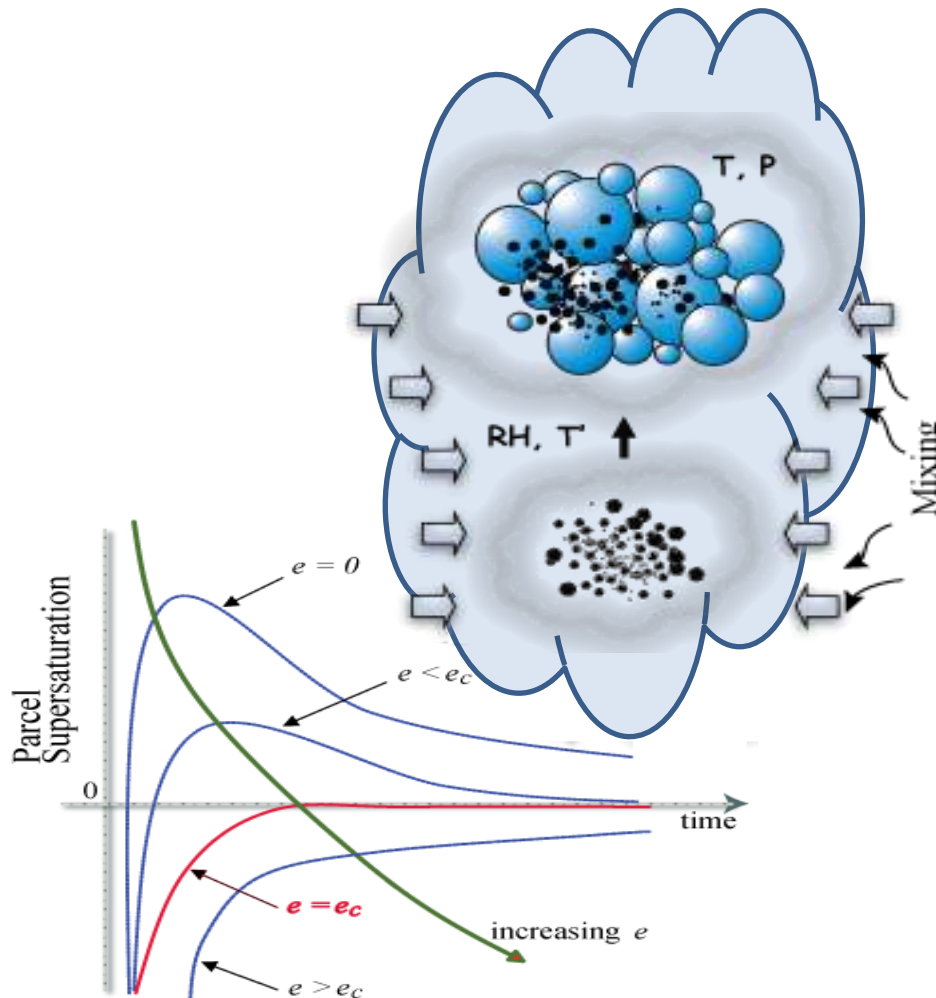


Fig. 1.27 Pollen

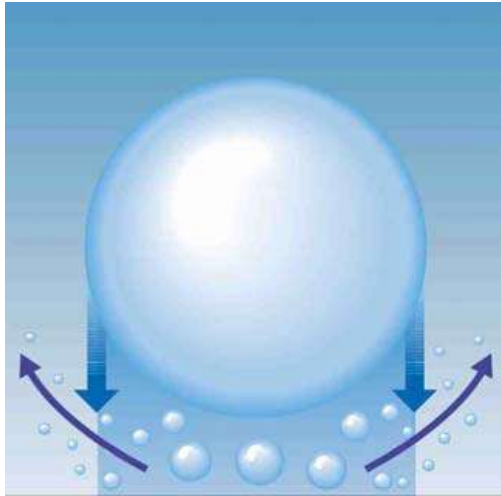
- Mas como obter o *alargamento do espectro de gotículas*? (i.e., obter algumas gotículas de tamanho maiores)

— Mistura com ar ambiente:



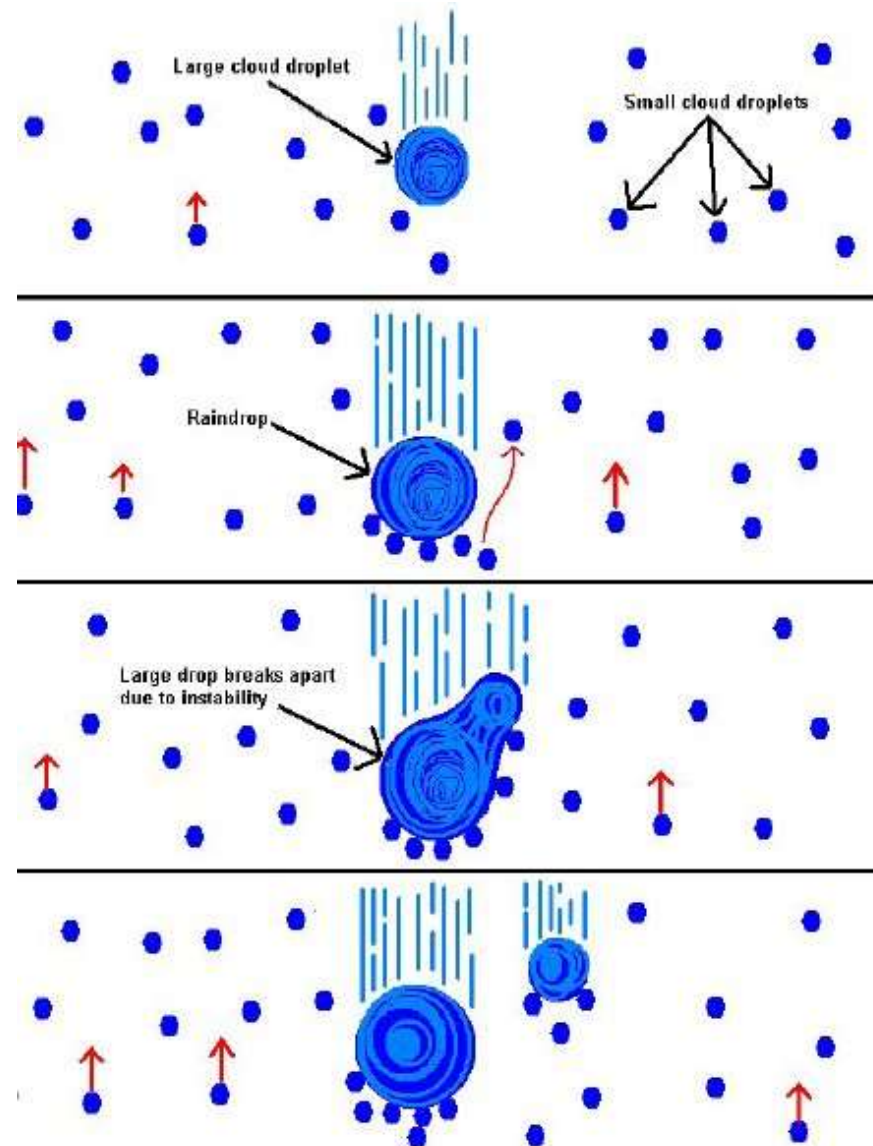
- O ar ambiente mais seco é entranhado em uma da nuvem.
- Como o ar entranhado é mais seco, há evaporação de algumas gotículas para que a mistura de ar atinja a saturação novamente.
- Como houve evaporação, essa parcela de mistura de ar se resfria, sua razão de saturação aumenta e ela descende na nuvem.
- Com a saturação aumentada, essa mistura de ar tem um número menor de gotas com uma saturação crítica maior, logo essas gotículas crescerão mais do que as gotículas menores no resto da nuvem.
- Esse processo ocorre com mais eficiência no topo da nuvem, permitindo que algumas gotículas cresçam mais, alargando assim o espectro de gotas da nuvem

- **Colisões** podem ocorrer a partir de diferentes respostas das gotículas com as forças: gravitacional, elétrica e aerodinâmica.
- O *efeito gravitacional* predomina nas nuvens: gotas grandes caem mais rápido que as pequenas, logo passando e capturando uma fração das gotículas que ficam ao longo do seu caminho.
- O *efeito elétrico* e *turbulento* necessários para produzir um número comparável de colisões por efeito gravitacional são ordens de grandeza muito maiores do que aqueles usualmente existentes na natureza. Porém, campos elétricos muito intensos em tempestades possam criar efeitos localizados e significativos.



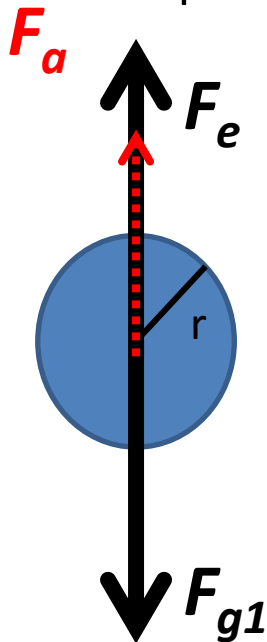
- Uma vez que a gota cai, ela irá colidir com somente uma fração das gotículas em seu caminho, porque algumas gotículas (em geral as menores) serão expelidas pelo fluxo de ar em volta da gota.
- Dessa maneira, podemos definir a **eficiência de colisão** como *a razão entre as gotículas que estão na rota de colisão da gota coletora e aquelas que realmente colidiram com ela.*
- A eficiência de colisão depende da razão entre o tamanho da gota coletora e o tamanho das gotículas a serem coletadas.

- A colisão não garante coalescência, pois quando um par de gotas colidem várias interações são possíveis:
 - 1 – Elas podem simplesmente se rebater e se separar, retendo suas identidades iniciais;
 - 2 – Elas podem coalescer e permanecer unidas;
 - 3 – Elas podem coalescer temporariamente e se separar, aparentemente retendo suas identidades iniciais;
 - 4 – Elas podem coalescer temporariamente e se quebrar em várias gotículas menores.
- Para tamanhos menores que $100\ \mu\text{m}$ em raio as interações (1) e (2) são as mais importantes. Em gotas grandes ($>0,5\ \text{mm}$), a interação (4) é importante.



- **Velocidade terminal**

- A **velocidade terminal** (v_T) de uma gota é aquela quando as forças de arrasto (F_a), a força de gravidade (F_g) e força de empuxo (F_e) estão em equilíbrio:



$$F_g = F_a + F_e$$

$$F_g = \rho_l Vg \quad \text{e} \quad F_e = \rho_{ar} Vg$$

onde:

- η é a viscosidade, ρ_l e ρ_{ar} são as densidades do líquido e do ar, r é o raio da gota, e V é o volume da gota.

- Para gotas pequenas com $r < 30 \mu\text{m}$:

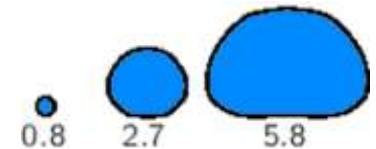
$r (\mu\text{m})$	$V_T (\text{cm/s})$
1	0,012
10	1,2
30	10,9
50	30,2

$$v_T = \frac{2}{9} r^2 \frac{\rho_l}{\eta} g$$

$$v_T = k_1 r^2, \quad k_1 = 1,19 \times 10^6 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

- Para gotas com $40 \mu\text{m} < r < 0,6 \text{ mm}$ (não esféricas):

$$v_T = k_3 r, \quad k_3 = 8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$



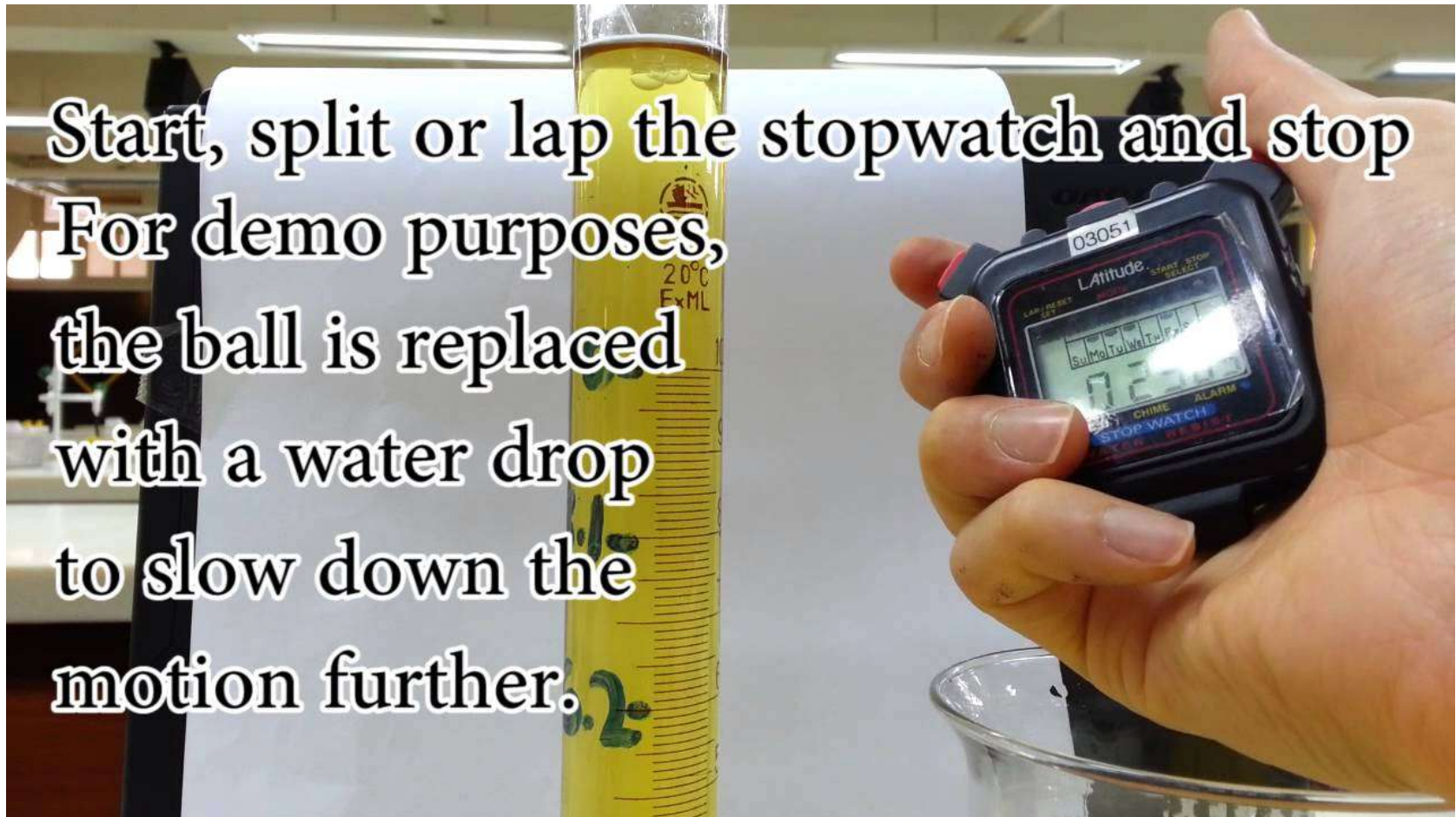
- Para gotas $0,6 \text{ mm} < r < 2 \text{ mm}$ (não esféricas):

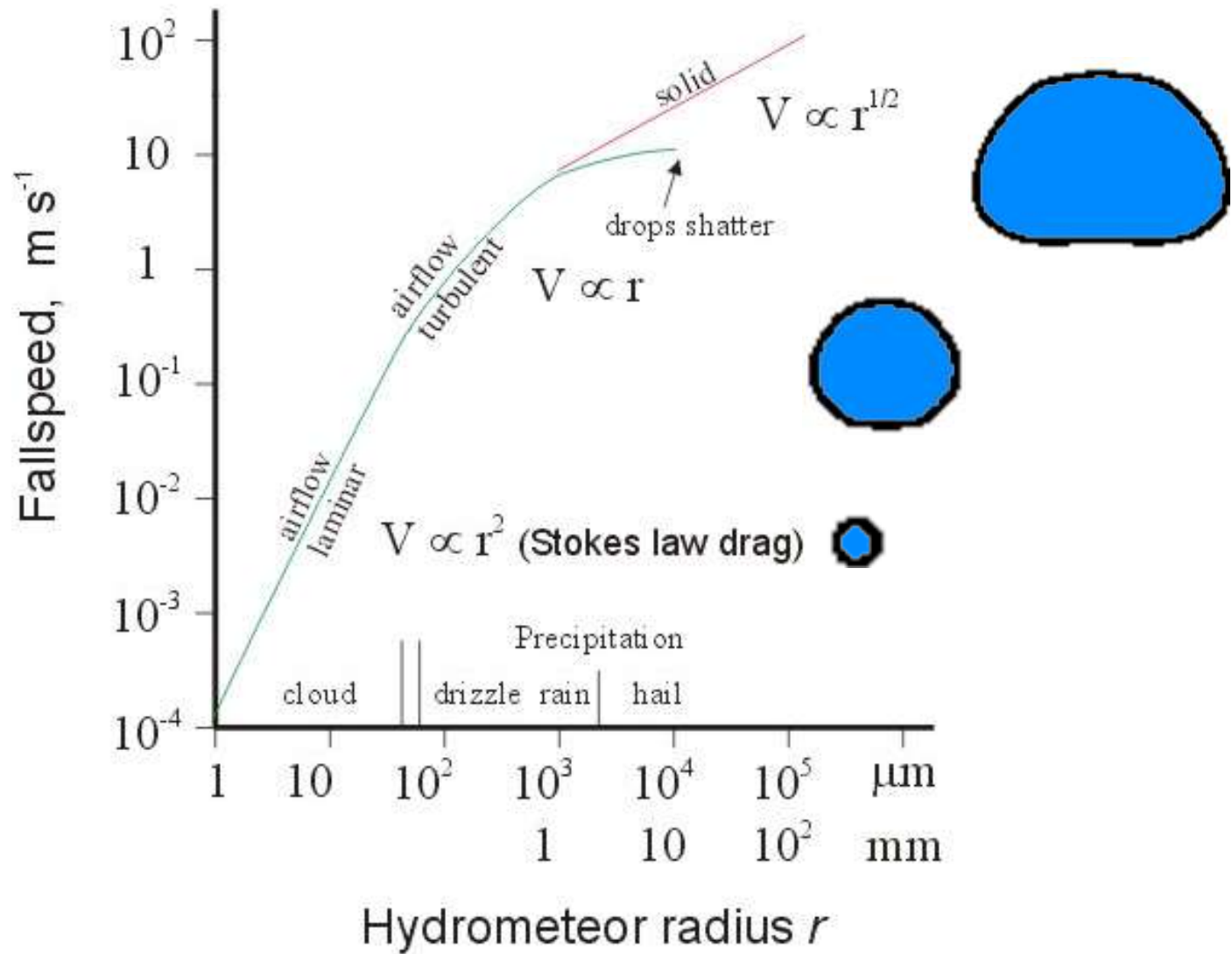
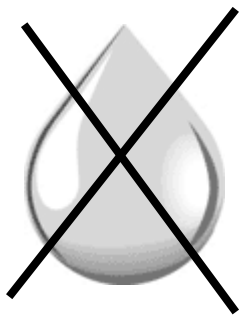
$$v_T = k_2 r^{1/2}, \quad k_2 = 2,2 \times 10^3 \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2} \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}$$

- onde ρ é a densidade do ar e $\rho_0 = 1,20 \text{ kg/m}^3$ à $p = 1013 \text{ hPa}$ e $T = 20^\circ\text{C}$

(Vide notas de aula para a derivação dessas equações)

- Lembram de Lab. de Física (experimento de viscosidade e v_T da bolinha no tubo de óleo)??? ☺





Adapted from McIlveen (1992)

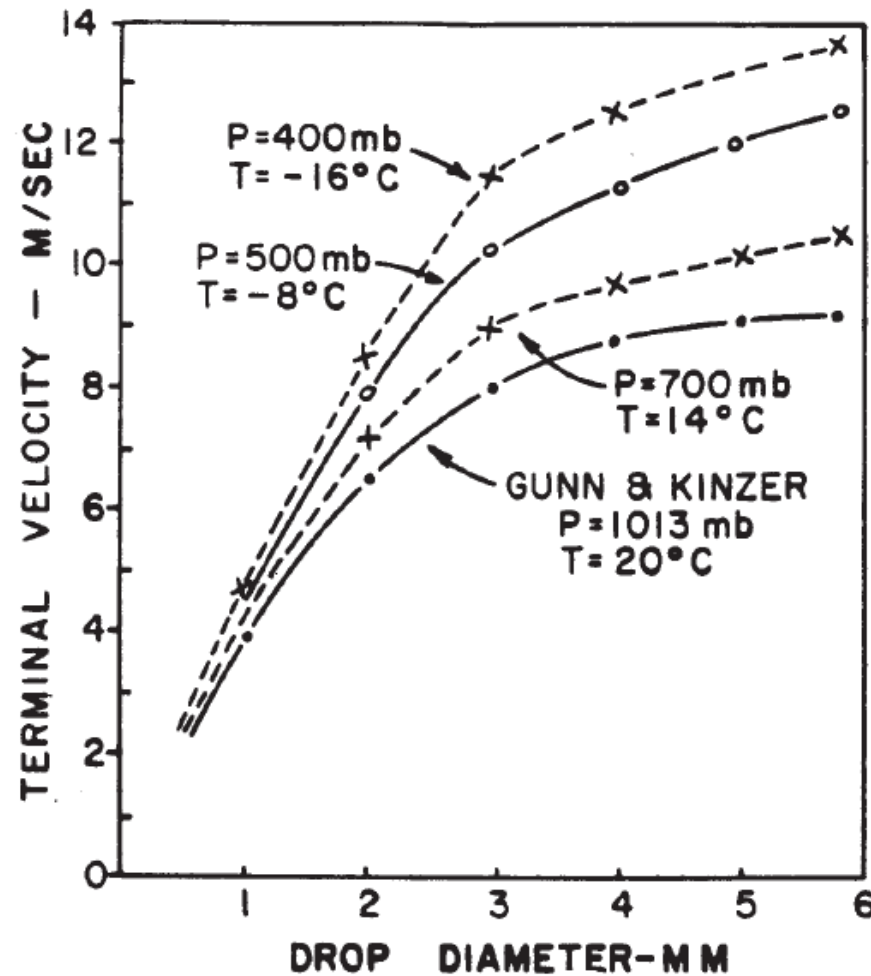


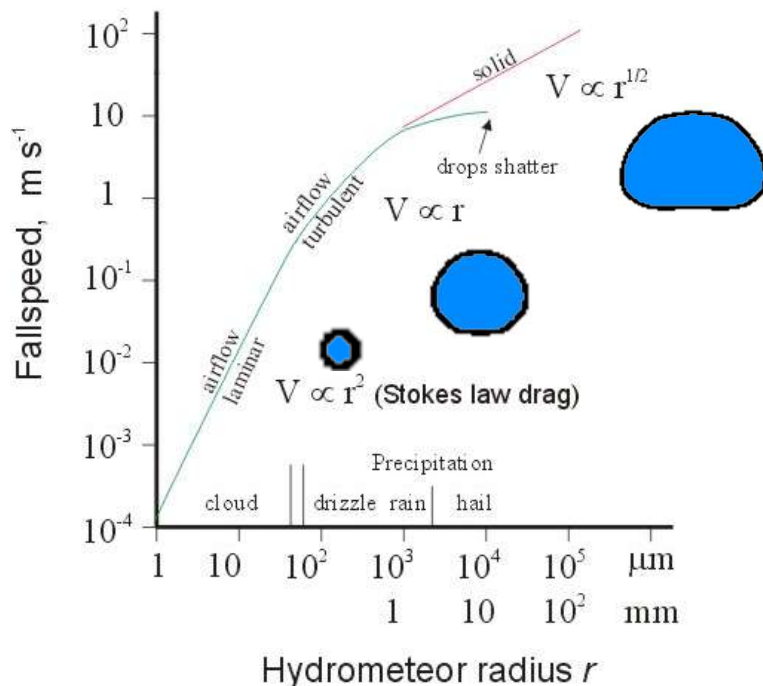
Figure 7.20: Terminal velocities of water drops of various sizes as a function of pressure and temperature. The Gunn-Kinzer curve is based on measurements. The other curves were calculated by Battan (1964), following the procedure proposed by McDonald (1960).

TABLE 8.1. *Terminal Fall Speed as a Function of Drop Size (equivalent spherical diameter) (From Gunn and Kinzer, 1949)*

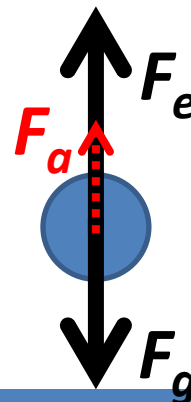
	Diam. (mm)	Fall speed (m/s)		Diam. (mm)	Fall speed (m/s)	
gotículas de nuvem	0.1	0.27	0.97 km/h	2.6	7.57	27.2 km/h
	0.2	0.72		2.8	7.82	
	0.3	1.17		3.0	8.06	
	0.4	1.62	10.3 km/h	3.2	8.26	
	0.5	2.06		3.4	8.44	
	0.6	2.47		3.6	8.60	
	0.7	2.87		3.8	8.72	
	0.8	3.27		4.0	8.83	
	0.9	3.67		4.2	8.92	
gotas de chuva	1.0	4.03	14.5 km/h	4.4	8.98	32.0 km/h
	1.2	4.64		4.6	9.03	
	1.4	5.17		4.8	9.07	
	1.6	5.65	23.4 km/h	5.0	9.09	33.9 km/h
	1.8	6.09		5.2	9.12	
	2.0	6.49		5.4	9.14	
	2.2	6.90		5.6	9.16	
	2.4	7.27		5.8	9.17	

Rogers & Yau (1989)

- **Colisões** podem ocorrer a partir de diferentes respostas das gotículas com as forças: gravitacional, elétrica e aerodinâmica.
- O **efeito elétrico** e **turbulento** necessários para produzir um número comparável de colisões por efeito gravitacional são ordens de grandeza muito maiores do que aqueles usualmente existentes na natureza. Porém, campos elétricos muito intensos em tempestades possam criar efeitos localizados e significativos.



- O **efeito gravitacional** predomina nas nuvens: gotas grandes caem mais rápido que as pequenas, logo passando e capturando uma fração das gotículas que ficam ao longo do seu caminho.



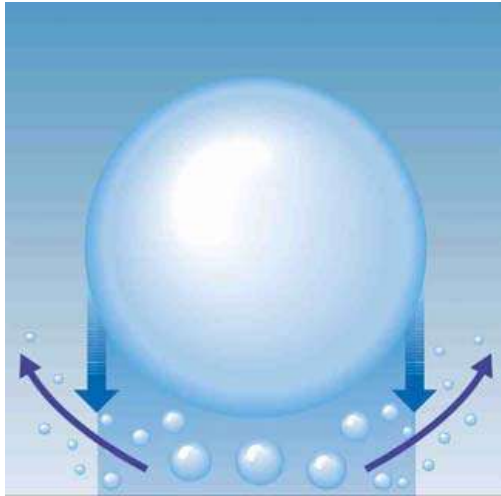
$$F_g = F_a + F_e$$

$$F_g = \rho_l Vg \quad \text{e} \quad F_e = \rho_{ar} Vg$$

$$v_T = k_1 r^2, \quad k_1 = 1,19 \times 10^6 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$v_T = k_3 r, \quad k_3 = 8 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

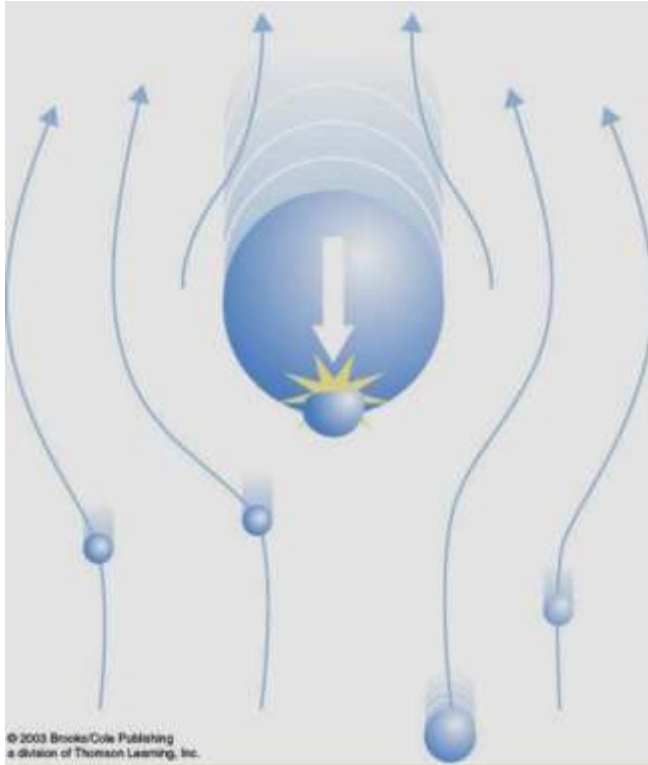
$$v_T = k_2 r^{1/2}, \quad k_2 = 2,2 \times 10^3 \left(\frac{\rho_0}{\rho} \right)^{1/2} \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}$$



- Uma vez que a gota cai, ela irá colidir com somente uma fração das gotículas em seu caminho, porque algumas gotículas (em geral as menores) serão expelidas pelo fluxo de ar em volta da gota.
- Dessa maneira, podemos definir a **eficiência de colisão** como *a razão entre as gotículas que estão na rota de colisão da gota coletora e aquelas que realmente colidiram com ela.*
- A eficiência de colisão depende da razão entre o tamanho da gota coletora e o tamanho das gotículas a serem coletadas.

- **Eficiências de colisão, coalescência e coleta:**

- Definindo:



- **Eficiência de colisão:**

$$E_{colisão} = \frac{\text{número de colisões}}{\text{número de gotículas no volume de varredura}}$$

- **Eficiência de coalescência:**

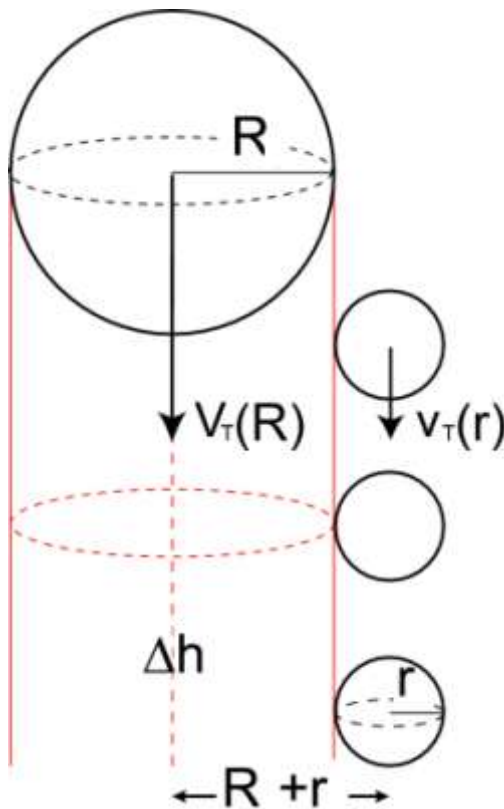
$$E_{coalescência} = \frac{\text{número de gotículas coalescidas}}{\text{número de colisões}}$$

- **Eficiência de coleta:**

$$E_{coleta} = \frac{\text{número de gotículas coalescidas}}{\text{número de gotículas no volume de varredura}}$$

$$E_{coleta} = E_{colisão} \times E_{coalescência}$$

- Considere uma gota coletora de raio R em queda ao longo de um caminho com gotículas menores de raio r :
 - As gotículas que irão colidir com a gota coletora devem estar à uma distância máxima de $R+r$:

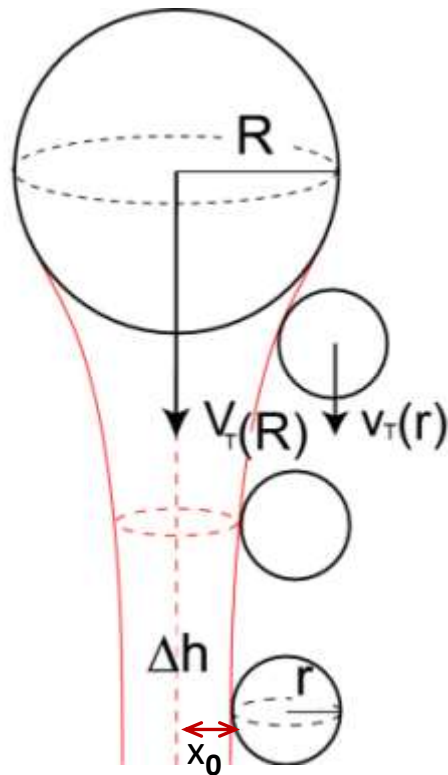


$v_T(R)$ = velocidade terminal da gota coletora

$v_T(r)$ = velocidade terminal das gotículas

$\pi R^2 \Delta h$ = volume varrido durante um intervalo de tempo Δt .

- *Devido à hidrodinâmica, o ar flui ao redor da gota coletora. Se as gotículas não tivessem inércia, elas seriam desviadas com o fluxo ao redor da gotícula e não colidiriam com a gota coletora.*



- Para valores dados de R e r , existe uma distância crítica x_0 na qual a colisão é garantida e fora desta distância a gotícula é defletida para fora do caminho da gota coletora.
- Os resultados são apresentados em forma de **eficiências de colisão** $E(R, r)$:

$$E(R, r) = \frac{\pi x_0^2}{\pi (R + r)^2} = \frac{x_0^2}{(R + r)^2}$$

- Portanto, a *eficiência de colisão* $E(R,r)$ é igual a fração das gotículas com raio r que são varridas pela gota coletora de raio R .
- Por outro lado, $E(R,r)$ pode ser interpretado como sendo a probabilidade de colisão de uma gotícula se ela estivesse em um volume cheio de gotículas aglutinadas.
- $E(R,r)$ é dependente de r/R :
 - $E(R,r)$ é pequena para pequenos valores de r/R (*gotículas a serem coletadas muito menores do que a coletora*). Neste caso, as gotas a serem coletadas são pequenas e tem pouca inércia e são facilmente defletidas pelo fluxo ao redor da gota coletora.
 - A inércia das gotículas aumenta com o aumento de r/R , levando ao aumento na eficiência de colisão até $r/R = 0,6$.
 - Acima de 0,6, a diferença relativa entre as velocidades das gotas aumenta o tempo de interação e a gota a ser coletada pode ser desviada ao redor da gota coletora.
 - Para $r/R \sim 1$, algumas gotículas pequenas podem ser “sugadas” acima da gota coletora aumentando a $E(R,r)$, e $E(R,r)$ pode ser até superior a 1.

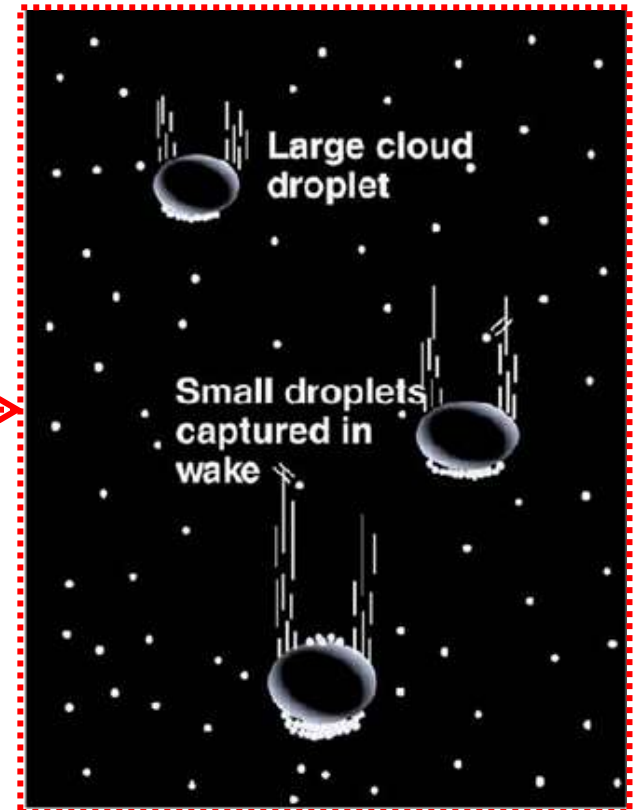
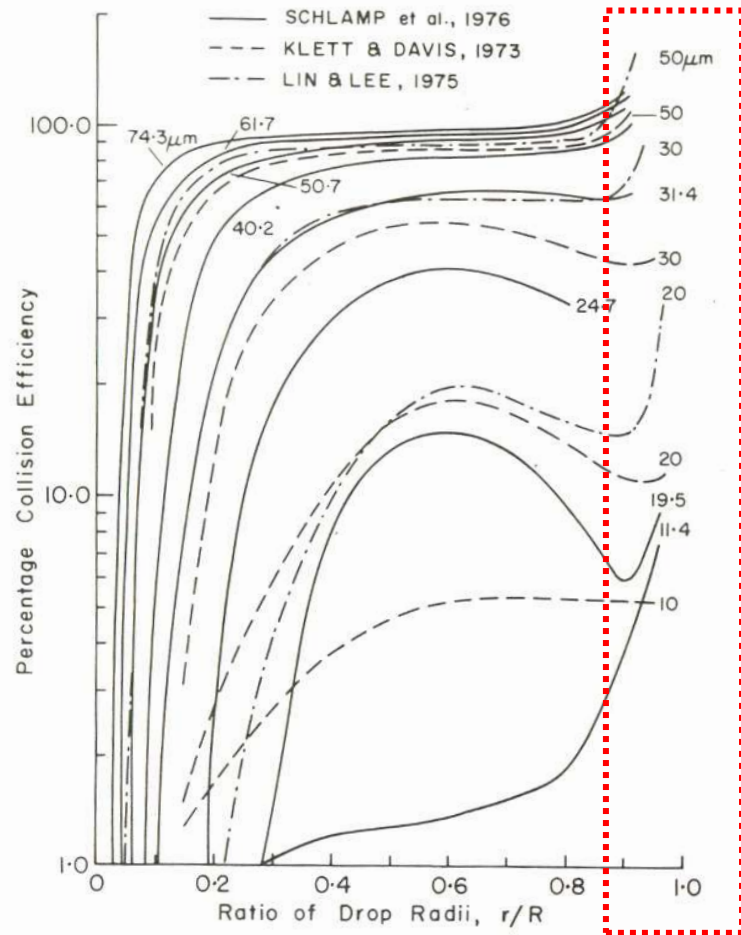


FIG. 8.2. Computed collision efficiencies for pairs of drops as a function of the ratio of their radii. Curves are labeled according to the radius R of the larger drop.

TABLE 8.2. Collision Efficiency E for Drops of Radius R Colliding with Droplets of Radius r . (Data for $R < 50 \mu\text{m}$ adapted from Klett and Davis, 1973; for $50 \mu\text{m} \leq R \leq 500 \mu\text{m}$ from Beard and Ochs, 1984; for $R > 500 \mu\text{m}$ from Mason, 1971)

$R (\mu\text{m})$	$r (\mu\text{m})$ (a serem coletadas)								
	2	3	4	6	8	10	15	20	25
10	0.017	0.027	0.037	0.052	0.052				
20	*	0.016	0.027	0.060	0.12	0.17	0.17		
30	*	*	0.020	0.13	0.28	0.37	0.54	0.55	0.47
40	*	*	0.020	0.23	0.40	0.55	0.70	0.75	0.75
50	—	—	0.030	0.30	0.40	0.58	0.73	0.75	0.79
60	—	0.010	0.13	0.38	0.57	0.68	0.80	0.86	0.91
80	—	0.085	0.23	0.52	0.68	0.76	0.86	0.92	0.95
100	—	0.14	0.32	0.60	0.73	0.81	0.90	0.94	0.96
150	0.025	0.25	0.43	0.66	0.78	0.83	0.92	0.95	0.96
200	0.039	0.30	0.46	0.69	0.81	0.87	0.93	0.95	0.96
300	0.095	0.33	0.51	0.72	0.82	0.87	0.93	0.96	0.97
400	0.098	0.36	0.51	0.73	0.83	0.88	0.93	0.96	0.97
500	0.10	0.36	0.52	0.74	0.83	0.88	0.93	0.96	0.97
600	0.17	0.40	0.54	0.72	0.83	0.88	0.94	0.98	†
1000	0.15	0.37	0.52	0.74	0.82	0.88	0.94	0.98	†
1400	0.11	0.34	0.49	0.71	0.83	0.88	0.94	0.95	†
1800	0.08	0.29	0.45	0.68	0.80	0.86	0.96	0.94	†
2400	0.04	0.22	0.39	0.62	0.75	0.83	0.92	0.96	†
3000	0.02	0.16	0.33	0.55	0.71	0.81	0.90	0.94	†

— Collision efficiency less than 0.01.

* Value cannot be determined accurately from available data.

† Value close to one.

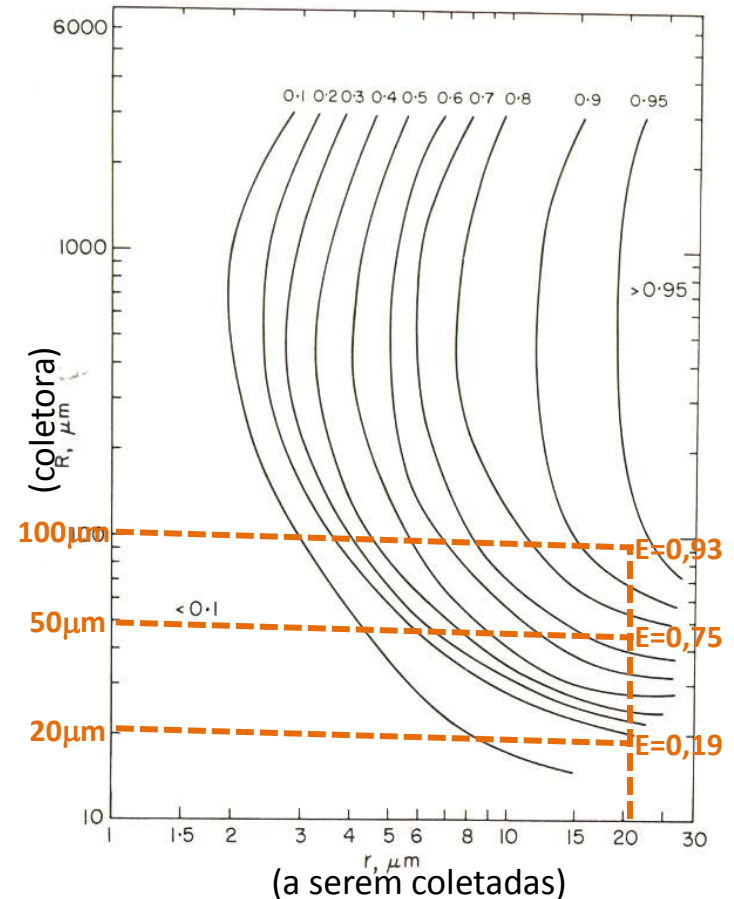
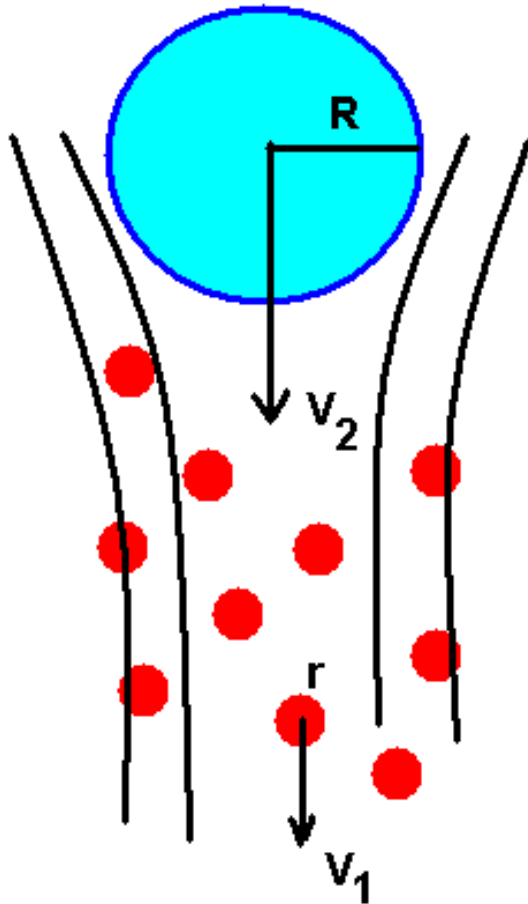


FIG. 8.3. Field of $E(R, r)$ based on data in Table 8.2.

• Equação de crescimento por colisão-coalescência:



- Suponha uma **gota coletora** de raio R e velocidade terminal v_2 , caindo em uma população uniforme de **gotículas menores** com raio r e velocidade terminal v_1 .
- A equação de crescimento por colisão-coalescência é:

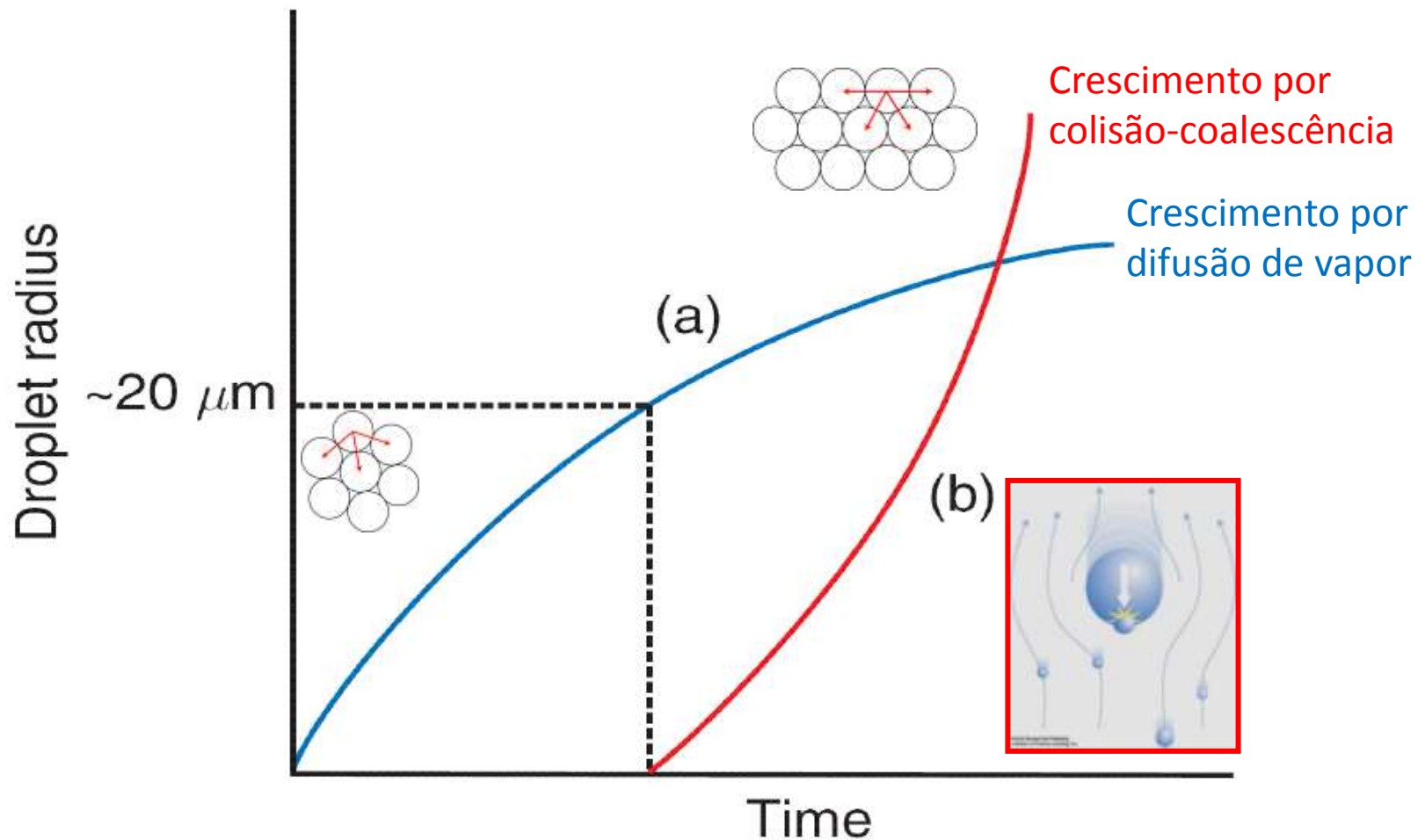
$$\frac{dR}{dt} = \frac{\bar{E} W_l}{4 \rho_l} v_2$$

Equação de Crescimento por colisão-coalescência
(Modelo de Bowen)

- onde $\bar{E}$ é um valor médio da eficiência de colisão e W_l é conteúdo de água líquida das gotículas a serem coletadas por unidade de volume.

(Vide notas de aula para a derivação dessas equações)

- Comparando as equações do **crescimento por difusão de vapor** e do **crescimento por colisão-coalescência**:



Crescimento de gotas por colisão-coalescência

- Porém se queremos saber qual o tamanho que uma gota coletora atravessa nuvem e sai ela sua base como precipitação, temos que derivar que analisar a variação do raio com a altura (dR/dz). Temos que a equação do crescimento por colisão-coalescência é dada por:

$$\left[\frac{dR}{dt} \times \frac{dz}{dz} \right] \rightarrow \frac{dR}{dz} = \frac{\overline{E} W_l}{4 \rho_l} \frac{v_2}{u - v_2}$$

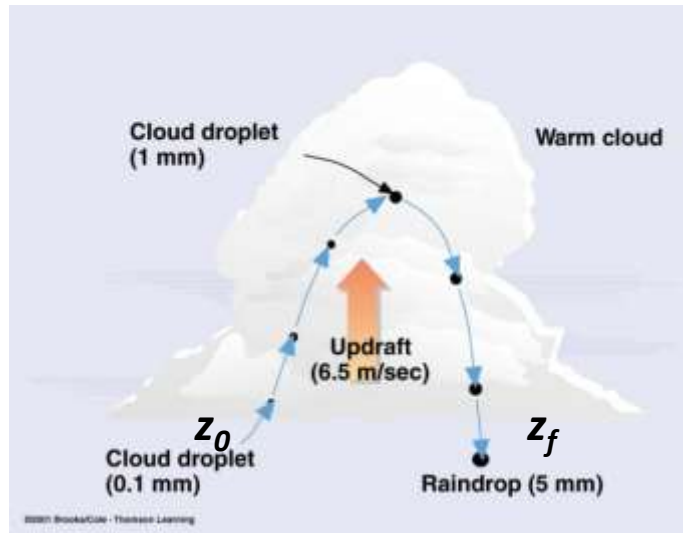
e integrando de R_0 até R_f , o que implica em uma altura z_0 a z_f , e assumindo que a gota sai da base, vai até o topo e sai pela base novamente:

$$\int_{R_0}^{R_f} \frac{4 \rho_l (u - v_2)}{v_2 \overline{E}} dR = 0$$

$$R_f = R_0 + u \int_{R_0}^{R_f} \frac{1}{v_2} dR$$

e como v_2 é função somente de R , o R_f será dependente da corrente da nuvem e do raio inicial R_0 .

(Vide notas de aula para a derivação dessas equações)



- EXERCÍCIO EM SALA DE AULA:

- Uma gota com raio inicial $R_0 = 100 \mu\text{m}$ cai através de uma nuvem que contém um total de $100 \text{ gotículas cm}^{-3}$ (N_T) de raio de $10 \mu\text{m}$. A eficiência de coleta é constante e igual à 1,0. Quanto tempo vai levar para a gota maior atingir um raio de 1 mm (gota de chuva), assumindo que há somente crescimento por colisão-coalescência?

Considere a velocidade terminal da gota coletora como $v_T = 8 \times 10^3 R$ (para R em cm, v_T em cm s^{-1}) e que a velocidade da corrente ascendente é nula.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{\overline{E} W_l}{4 \rho_l} v_T$$

Dica: $N_T = \frac{\text{número de gotículas}}{\text{volume de ar}}$, $W_l = \frac{\text{massa de água líquida}}{\text{volume de ar}}$

Exemplos de simulações:

- Fig. 8.4 (Rogers & Yau): Uma gotícula coletora (curva sólida (c)) dentro de uma nuvem com gotículas menores (curva tracejada (b)) com corrente ascendente de 100 cm/s (curva sólida (a))

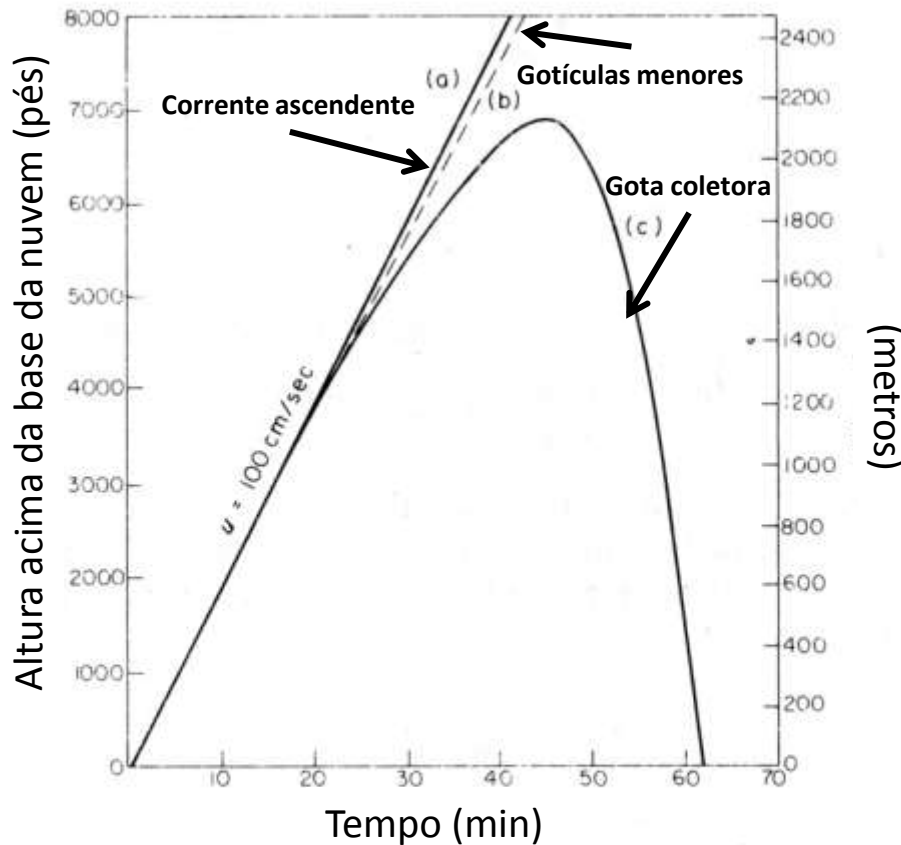


FIG. 8.4. Bowen's calculated trajectories of (a) the air, (b) cloud droplets, initially $10\ \mu\text{m}$ in radius, and (c) drops which have initially twice the mass of the cloud droplets. Updraft speed $1\ \text{m/sec}$, cloud water content $M = 1\ \text{g/m}^3$. (From Fletcher, 1962.)

- Este gráfico descreve a altura que a gota coletora e as gotículas alcançaram dentro da nuvem em função do tempo.
- O crescimento por coalescência é pequeno no início, da mesma ordem do crescimento por condensação.
- Porém, a eficiência de colisão (E) aumenta rapidamente com o aumento do tamanho da gota coletora e a coalescência ultrapassa a condensação rapidamente ($E_{\text{máx}}$ qdo $r/R \sim 0,6$).
- As gotículas menores (b) são carregadas pela corrente ascendente, acima de 2400 m da base da nuvem.
- A gota coletora (c) é carregada pela corrente ascendente até $\sim 2200\ \text{m}$, **quando fica grande o suficiente e sua velocidade terminal é maior que corrente ascendente, e então ela começa a precipitar.**

Exemplos de simulações:

- Figs. 8.5 e 8.6 (Rogers & Yau): Simulações de uma gota coletora ($R_0=20\mu\text{m}$) em uma nuvem com gotículas menores ($r_0=10\mu\text{m}$) e várias intensidades de correntes ascendentes, de 10 à 200 cm/s.

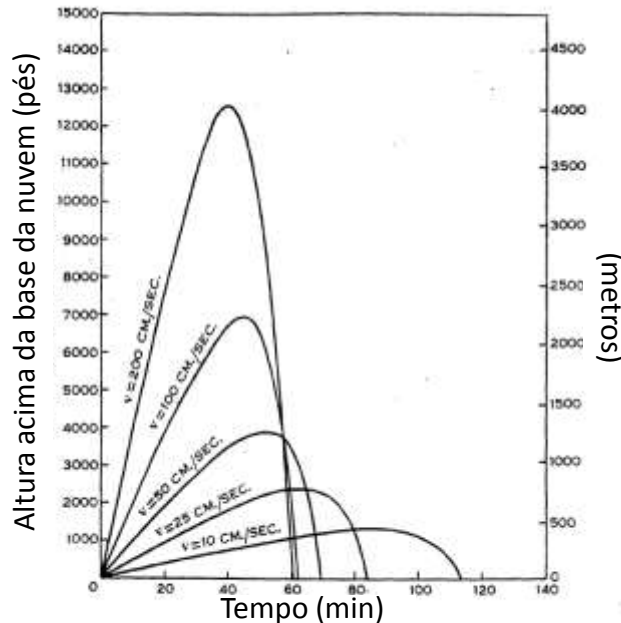


Fig. 3.—The trajectories of drops which grow by coalescence in cloud having a range of vertical air velocities from 10 to 200 cm./sec.

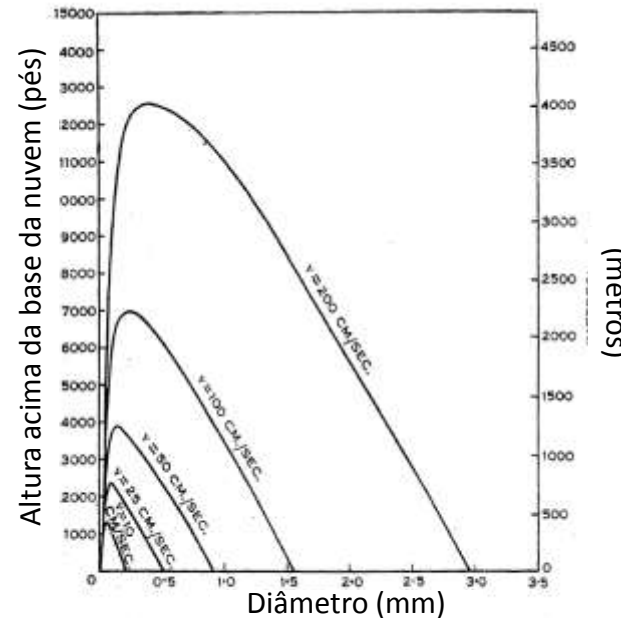


Fig. 4.—The change in drop diameter with height for a range of vertical air velocities.

- Estes gráficos descrevem:
- **(esquerda)** a altura que a gota coletora alcançou dentro da nuvem (eixo y é a altura acima da base da nuvem) em função do tempo, e
- **(direita)** o diâmetro que a gota coletora alcançou dentro da nuvem em função da altura acima da base da nuvem.

PERGUNTA – Nuvem com forte vs. fraca corrente ascendente:

- Qual o efeito da corrente ascendente?
- Qual o tempo necessário para produzir chuva?
- Qual a profundidade da nuvem (desenvolvimento vertical)?
- Qual o tamanho das gotas de chuva produzidas?

Exemplos de simulações:

- Figs. 8.5 e 8.6 (Rogers & Yau): Simulações de uma gota coletora ($R_0=20\mu\text{m}$) em uma nuvem com gotículas menores ($r_0=10\mu\text{m}$) e correntes ascendentes de 10 a 200 cm/s.

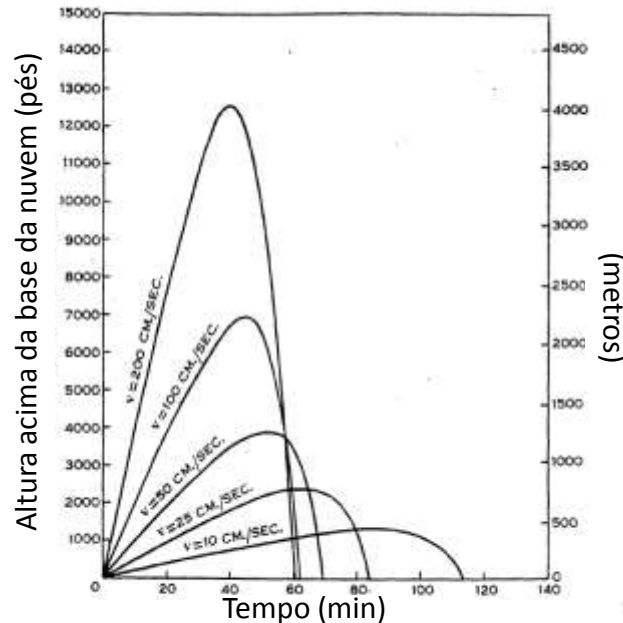


Fig. 3.—The trajectories of drops which grow by coalescence in cloud having a range of vertical air velocities from 10 to 200 cm./sec.

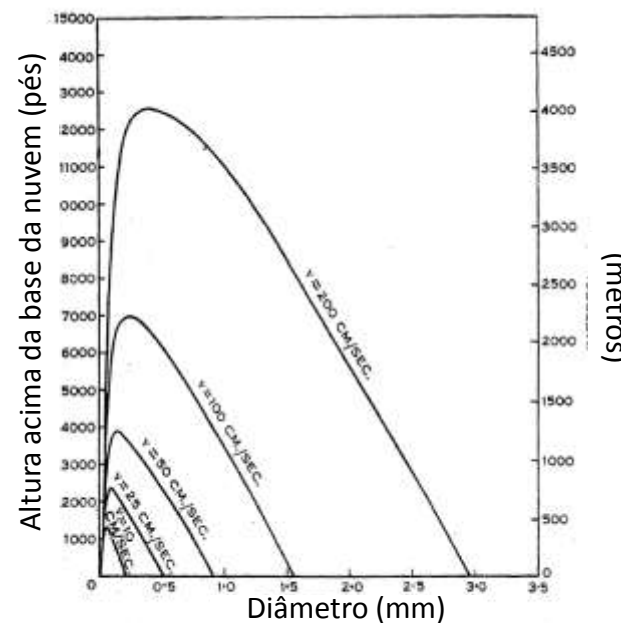


Fig. 4.—The change in drop diameter with height for a range of vertical air velocities.

- Estes gráficos descrevem:
- **(esquerda)** a altura que a gota coletora alcançou dentro da nuvem (eixo y é a altura acima da base da nuvem) em função do tempo, e
- **(direita)** o diâmetro que a gota coletora alcançou dentro da nuvem em função da altura acima da base da nuvem.

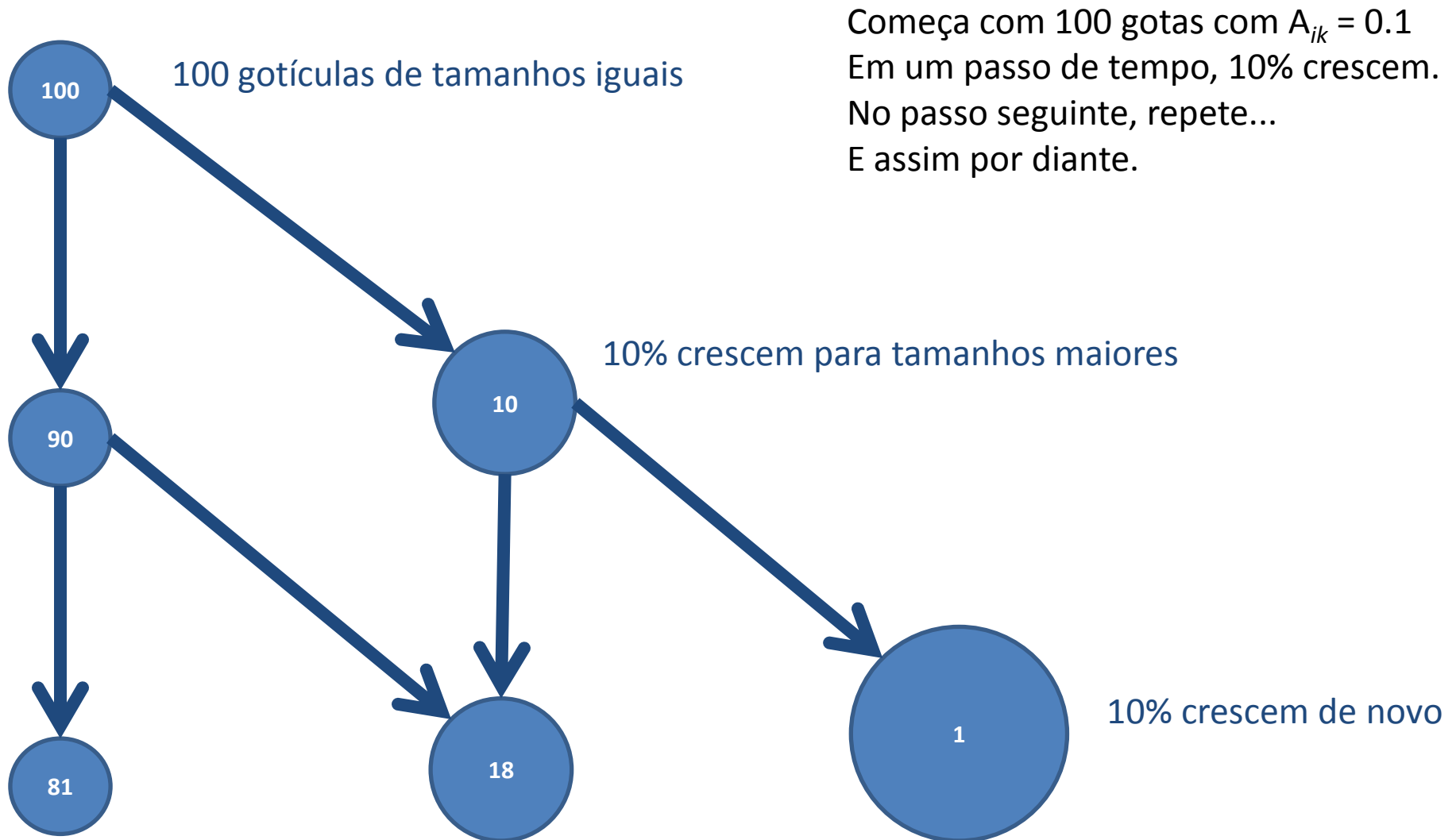
RESPOSTA – Nuvem com forte vs. fraca corrente ascendente:

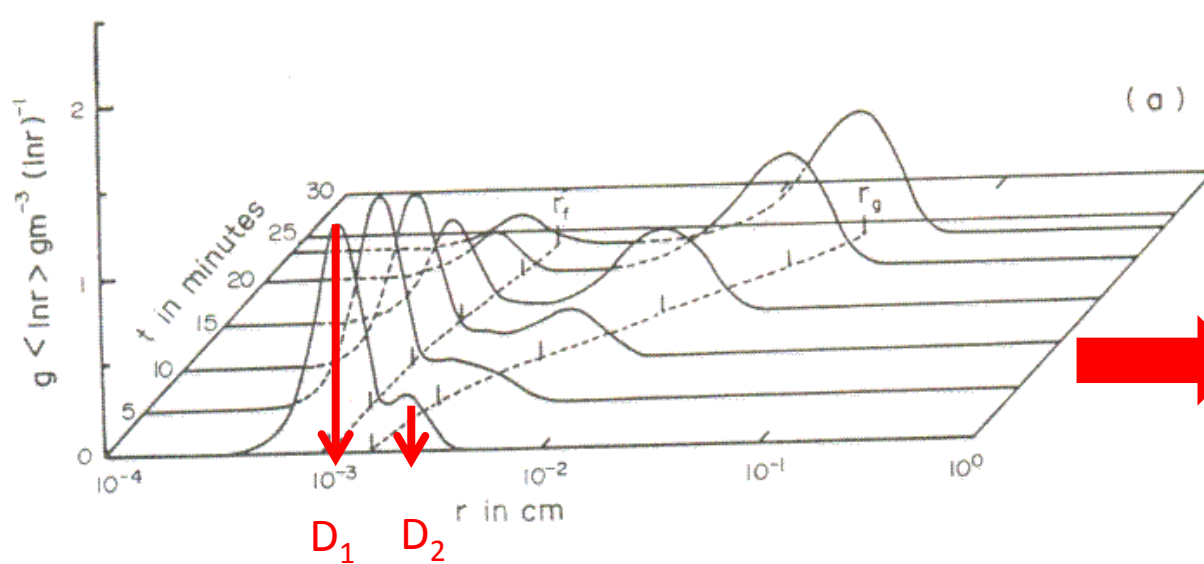
- Gota coletora alcança níveis mais altos e cresce mais quanto maior a corrente ascendente, pois a gota coletora tem que crescer mais para ter uma velocidade terminal maior do que a corrente ascendente.
- Se elas conseguirem precipitar, devem produzir chuva em um período de tempo menor do que nuvens com fracas correntes ascendentes.
- Logo, para precipitarem devem ter um desenvolvimento vertical considerável (4 km para $u=200\text{cm/s}$, gotas de chuva de 3 mm) do que nuvens com fracas correntes ascendentes (500 m para $u=10\text{cm/s}$, gotas de chuva de 0,25mm, porém essas tendem a evaporar antes de atingirem o solo)

- **Equação de crescimento estocástico:**
 - O crescimento previsto pela equação de crescimento por coalescência é na realidade muito maior que o observado na natureza.
 - Para levarmos em conta a natureza randômica deste processo, foi desenvolvida a equação do crescimento estocástico.
 - Considere:
 - $N_k = n_k V$ = número total de gotículas de tamanho k em uma nuvem de volume V ,
 - $A_{ik} \equiv K_{ik} V$ = probabilidade por unidade de tempo de coalescência de qualquer par de gotículas i e k .
 - K_{ik} = kernel de coleta

equação do crescimento estocástico é dada por:

$$\frac{dN_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} A_{i,k-1} N_i N_{k-1} - N_k \sum_{i=1}^{\infty} A_{ik} N_i$$

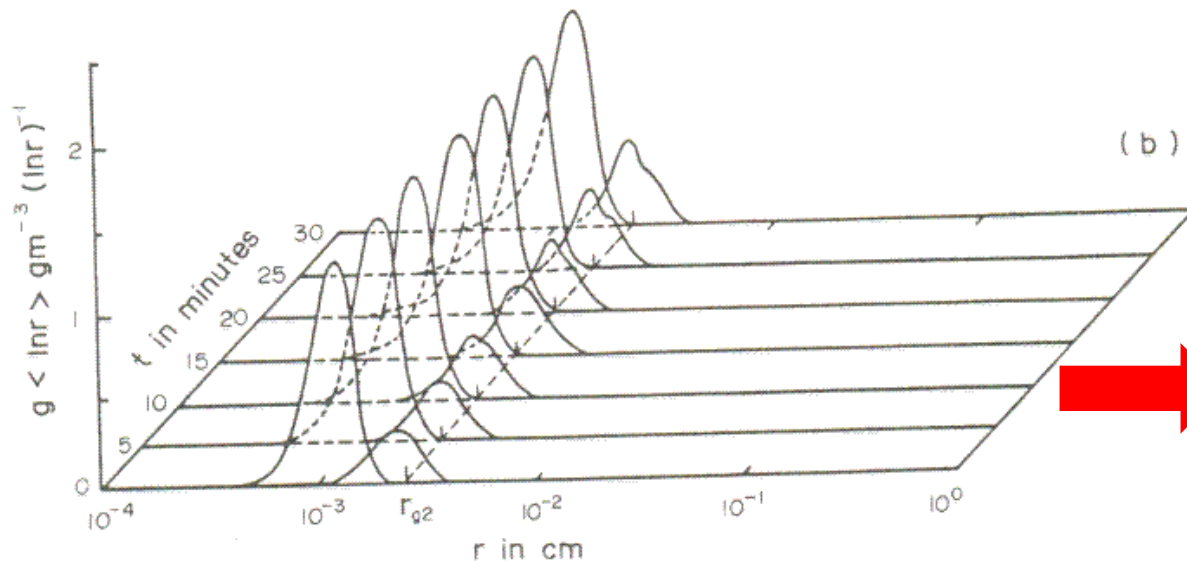




Distribuição de gotículas,
duas populações:

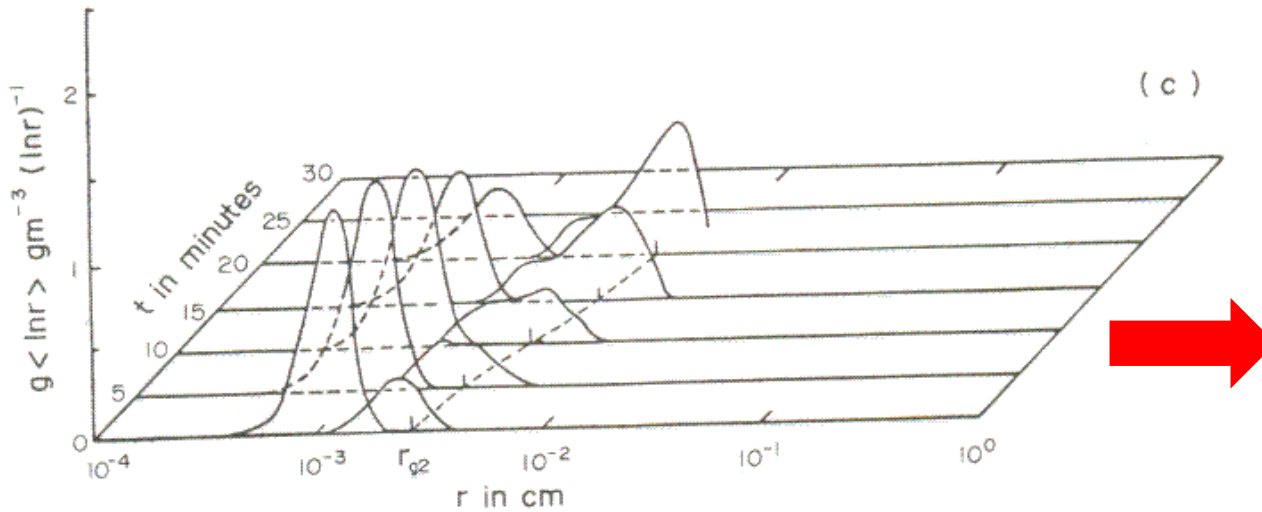
$$D_1 = 10 \mu\text{m} \quad D_2 = 20 \mu\text{m}$$

➔ (a) Todas as colisões possíveis

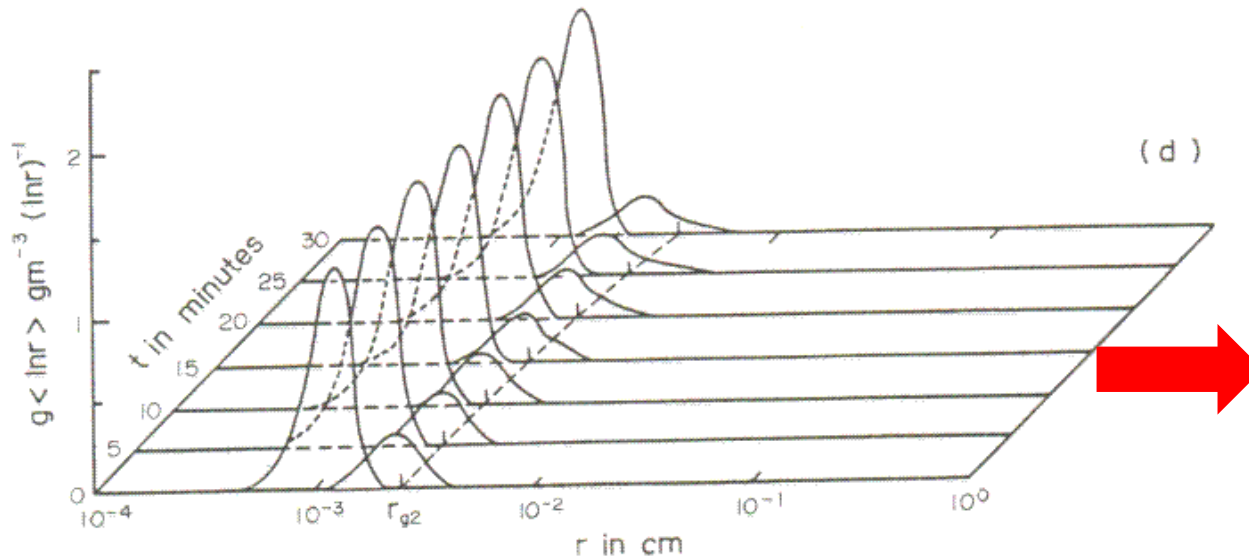


➔ (b) Somente colisões entre D_1

Fig. 8.11 – Rogers & Yau



(c) Somente colisões entre as gotículas D_1 e D_2

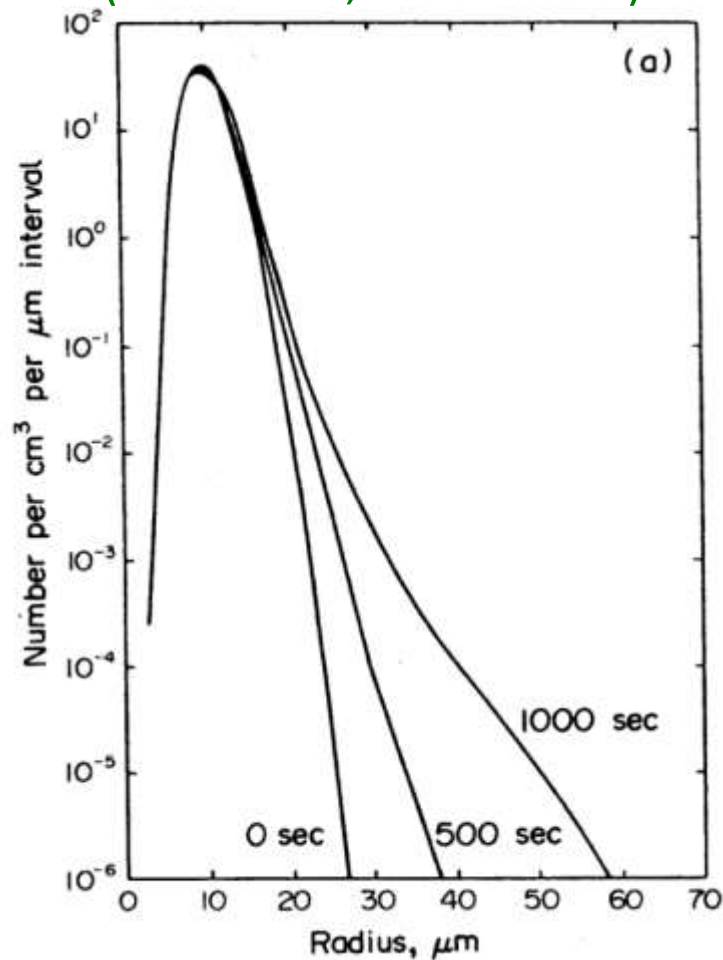


(d) Somente colisões entre as gotículas D_2

Fig. 8.11 – Rogers & Yau

Somente crescimento
estocástico

(- eficiente, = tamanhos)



Crescimento estocástico +
difusão vapor

(+ eficiente, $\neq$ tamanhos)

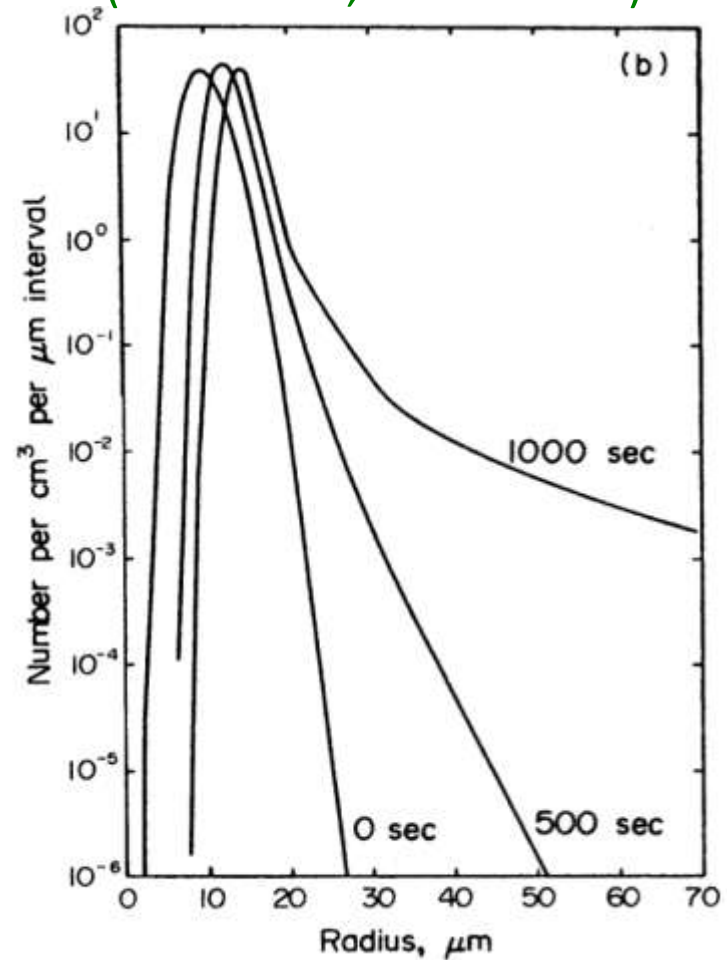
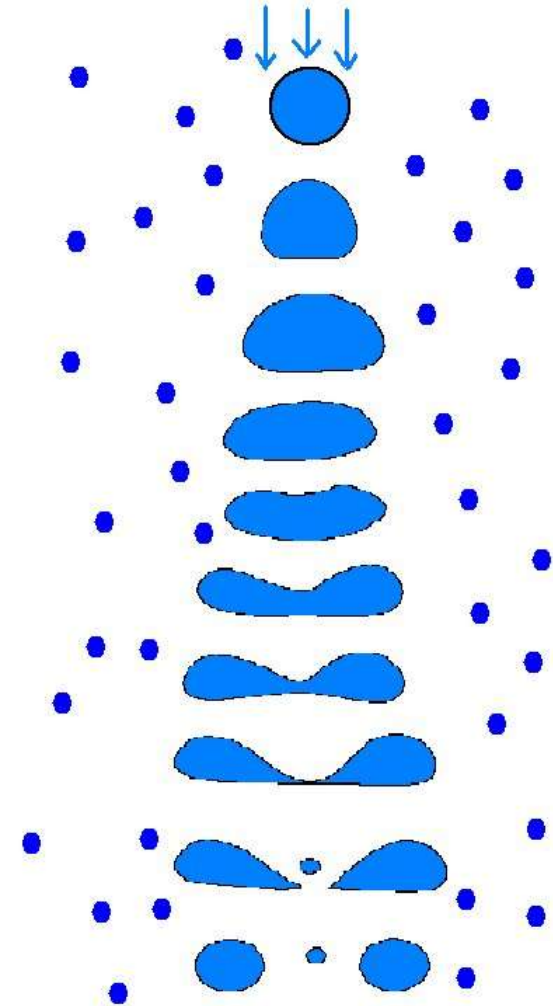
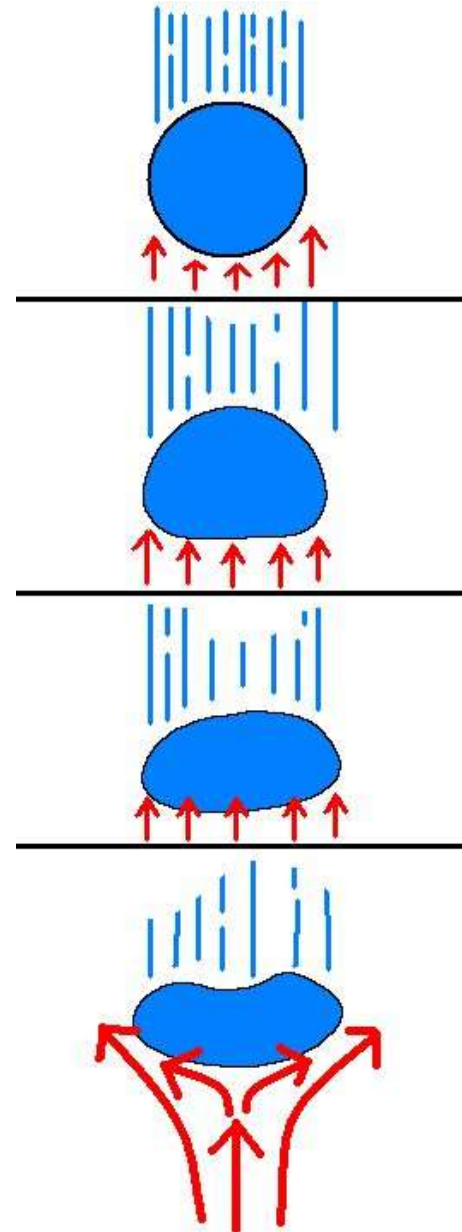


Fig. 8.12 – Rogers & Yau

- **Quebra hidrodinâmica**
(espontânea)

- Gotículas muito grandes
(raio $> 2,5$ mm)
- Em queda sofrem deformação e vibração ao coalescerem, o que eventualmente ocasiona a ruptura da gota



- Vídeo de várias colisões entre gotas:



<https://www.youtube.com/watch?v=AYg4Y3mZ8cg>

- RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS QUENTES:**

Crescimento por difusão de vapor e colisão-coalescência

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t} \quad + \quad R_f = R_0 + u \int_{R_0}^{R_f} \frac{1}{V_2} dR$$

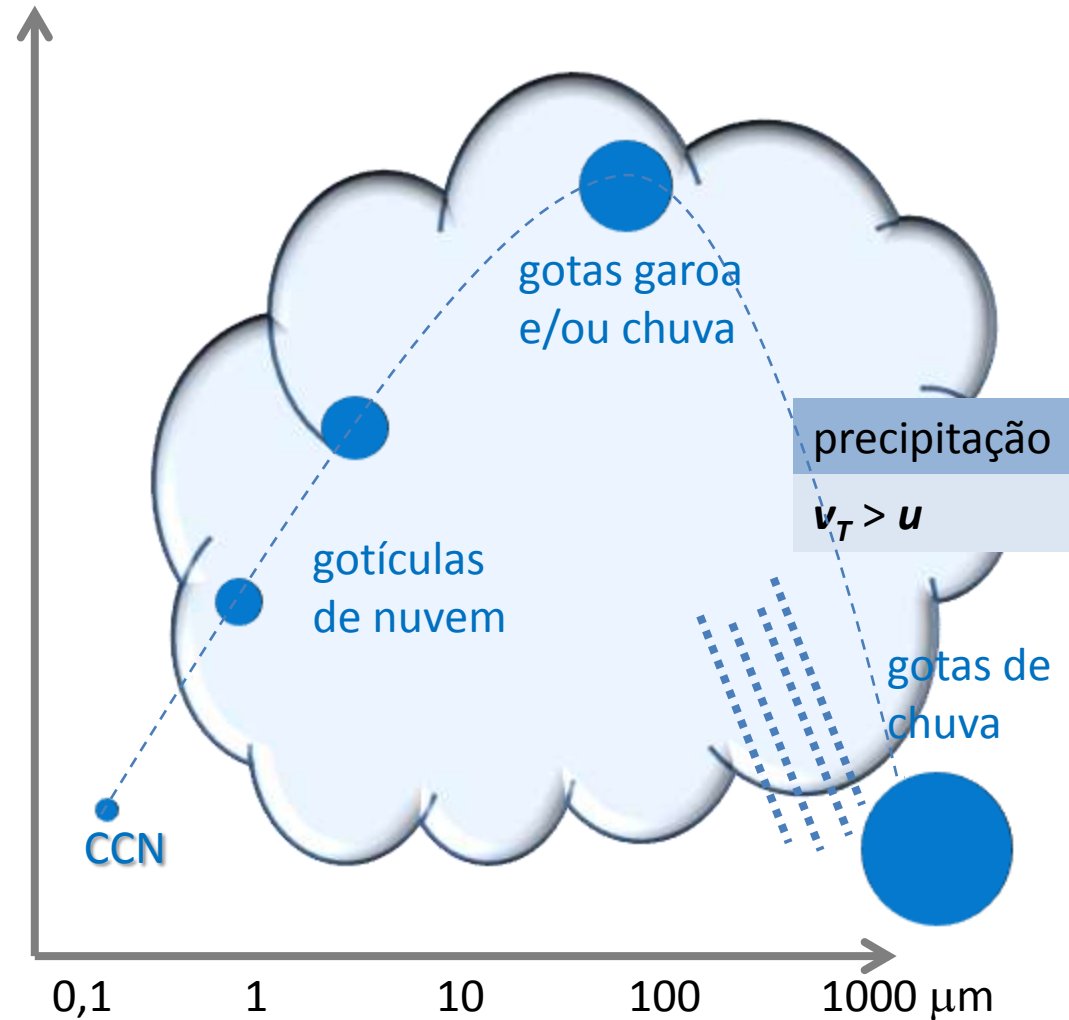
Crescimento por difusão de vapor

$$r(t) = \sqrt{r_0^2 + 2\xi t}$$

Ativação

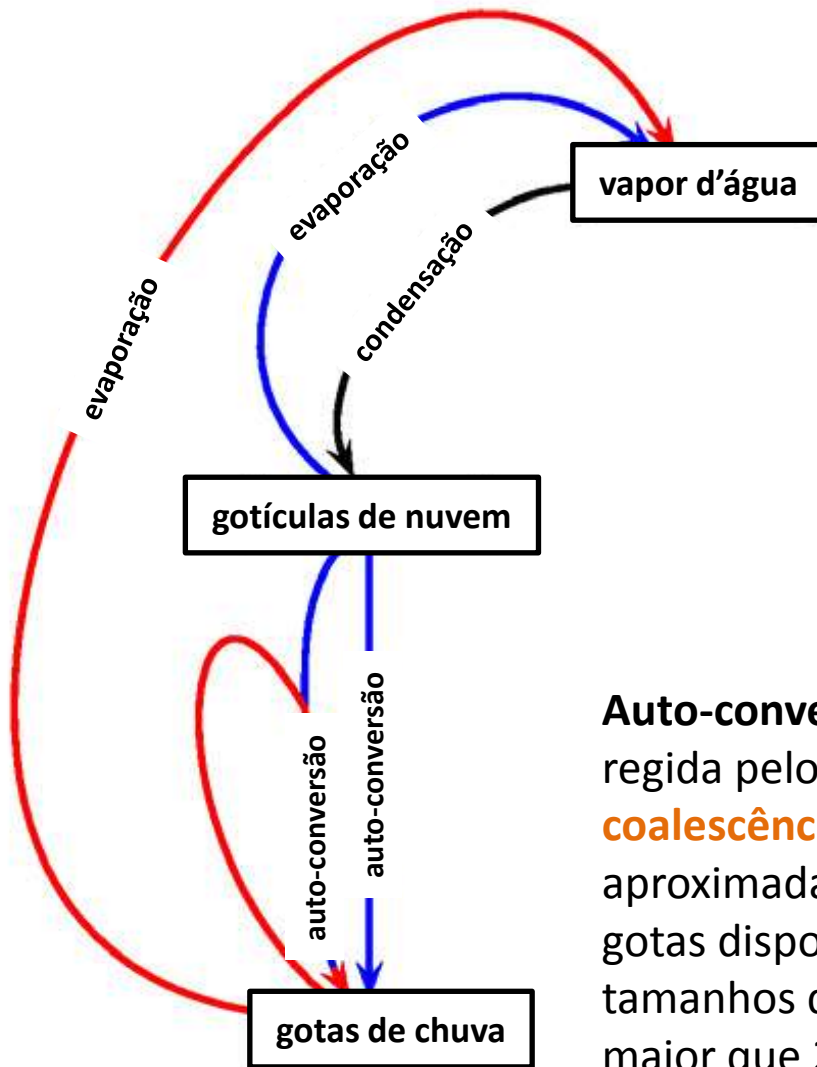
$$\text{CCN} \rightarrow N_c = C s^k$$

$$r_c = \sqrt{\frac{3b}{a}} \quad \text{e} \quad s_c = 1 + \sqrt{\frac{4a^3}{27b}}$$



- **RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS QUENTES:**
 1. Condensação depende de um núcleo, ou CCN.
 2. O crescimento inicial é um balanço entre a tensão superficial (Equação de Kelvin), composição e tamanho do CCN e saturação ambiente (Equação de Köhler).
 3. CCN é ativado quando o raio crítico é atingido. Neste ponto a gotícula cresce sem a necessidade de aumentar a S ambiente.
 4. A taxa de crescimento depende da taxa de transferência de vapor e dissipação de calor (Equação do crescimento por difusão de vapor).
 5. As gotículas formadas em CCN grandes crescem mais rápido, mas só no começo (todas tendem à um crescimento estacionário após $r \sim 20 \mu\text{m}$).
 6. Crescimento por colisão-coalescência começa a ser eficiente a partir de $r \sim 20 \mu\text{m}$.
 7. A taxa de colisão aumenta com o alargamento do espectro e é melhor quando $r/R \sim 0,6$.
 8. Quanto mais intensa a corrente ascendente, maior serão as gotas.
 9. Gotículas de nuvem crescem para tamanhos de gotas de chuva ($> 1\text{mm}$) e precipitam quando a velocidade terminal maior que a da velocidade corrente ascendente.

- **RESUMO – PROCESSO DE INICIAÇÃO DE CHUVA EM NUVENS QUENTES:**



RESUMO DAS TRANSFORMAÇÕES DAS 3 ESPÉCIES DE ÁGUAM DENTRO DA NUVEM

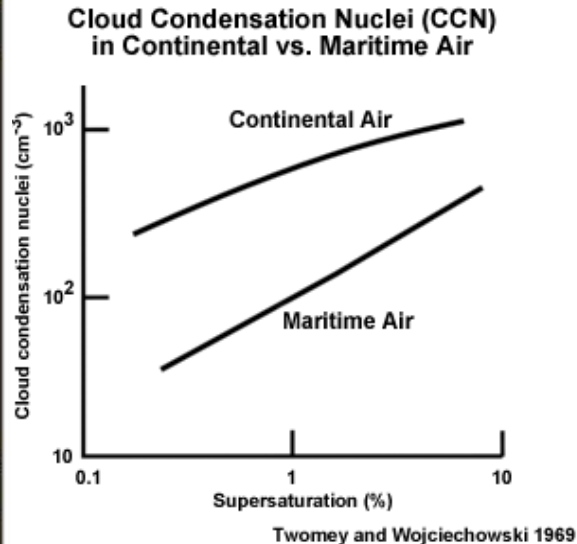
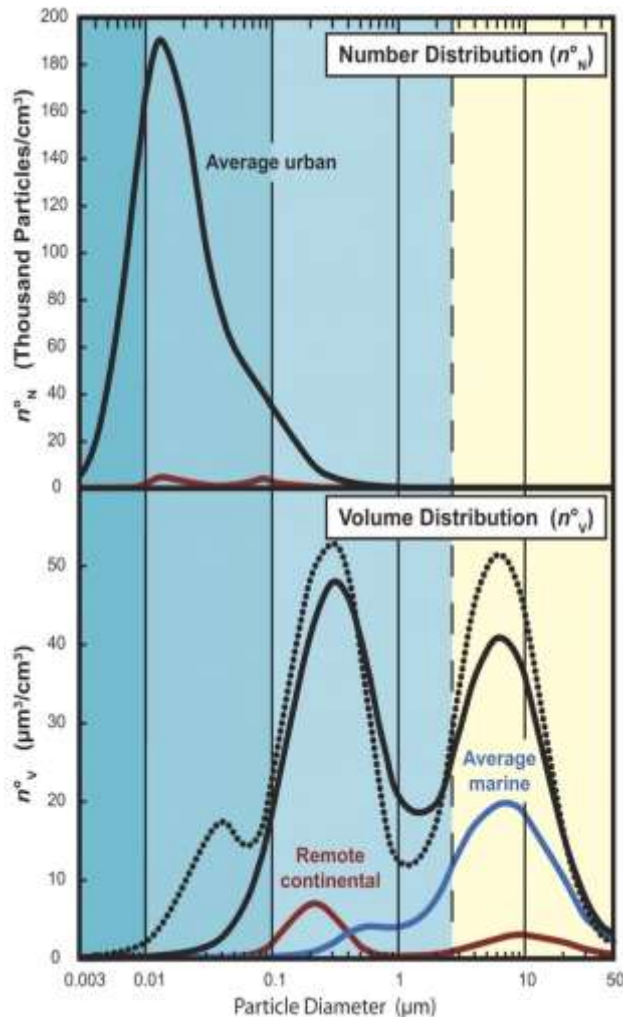
Evaporação e condensação de gotículas de nuvem são reguladas pela supersaturação pelo processo de **difusão de vapor**.

A ativação de um CCN em gotícula de nuvem ocorre após a gotícula atingir o raio crítico. O crescimento das gotículas por difusão de vapor é parabólico e ineficiente para gotículas grandes. A evaporação ocorre quando a saturação do ambiente diminui. Também há evaporação por entranhamento.

Auto-conversão de gotículas de nuvem em gotas de chuva é regida pelo processo de crescimento das gotas por **colisão-coalescência**. O crescimento das gotículas por coalescência é aproximadamente linear com o tempo enquanto houverem gotas disponíveis, mais eficiente se as gotas forem de tamanhos diferentes. Tipicamente uma gota de chuva é maior que 2 mm.

DISCUSSÃO EM GRUPO: Nuvem marítima vs. Continental (e.g., efeito da poluição)

Qual o impacto da concentração de CCN em ar marinho e continental na formação de gotículas de nuvem e gotas de chuva quente?



- i. Qual o número e tamanho das gotículas de nuvem formadas?
- ii. Qual o impacto na eficiência de colisão-coalescência?
- iii. Como será a evolução no tempo (t) do diâmetro (D) de uma gota coletora em cada nuvem? Esboce uma curva para cada nuvem em um gráfico $D \times t$.
- iv. Qual será a distribuição final da concentração de gotas ($N(D)$) por diâmetro (D)? Esboce uma curva para cada nuvem em um gráfico $N(D) \times D$.
- v. Qual nuvem chove primeiro?
- vi. BÔNUS: Qual nuvem reflete mais radiação solar e qual o impacto no balanço de radiação da Terra?

REFERÊNCIAS

- Capítulo 8 - Rogers, R. R. e M. K. Yau (1989): A short course in cloud physics. Third edition. Oxford, UK.. 290 p.p.
- Capítulo 6 - Wallace, J. M. e P. V. Hobbs (2006): Atmospheric Science. Second edition. Academic Press. 504 p.p.
- Vídeo colisões entre gotas:
<https://www.youtube.com/watch?v=AYg4Y3mZ8cg>
- Artigos científicos:
 - Grobéty et al. (2010): Airborne Particles in the Urban Environment. Elements, vol. 6, 229-234. [<https://doi.org/10.2113/gselements.6.4.229>]
 - Twomey e Wojciechowski (1969): Observations of Geographical Variation of Cloud Nuclei. J. Atmos. Sci., 26, 684-688. [[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1969\)26%3C648:OOTGVO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1969)26%3C648:OOTGVO%3E2.0.CO;2)]