



# Modelagem Hidrológica

**Camilo Daleles Rennó**

Coordenação de Observação da Terra

Divisão de Processamento de Imagens

camilo@dpi.inpe.br

<http://www.dpi.inpe.br/~camilo>



# Hidrologia

---

Definição: é a ciência que estuda a distribuição, circulação e comportamento da água no sistema terrestre. Também estuda suas propriedades físico-químicas e sua interação com o meio ambiente (biótico e abiótico).

Hidrometeorologia - estudo da água na atmosfera

Oceanografia - estudo dos oceanos

Limnologia - estudo de águas interiores (lagos e reservatórios)

Fluviologia - estudo de rios e cursos d'água

Glaciologia - estudo da água na forma de neve e gelo

Hidrogeologia - estudo das águas subterrâneas

# Hidrologia e Processos Hidrológicos

---

- Aplicações

- » Planejamento, construção e operação de projetos de aproveitamento de recursos hídricos (usinas hidrelétricas, controle de cheias, abastecimento de água, navegação, irrigação, etc.)
- » Entendimento dos impactos das mudanças no uso e ocupação da terra
- » Entendimento dos impactos das mudanças climáticas
- » Alertas de eventos extremos
- » Ecohidrologia

- Ferramentas

- » Observações - medições *in situ* e dados derivados de sensores remotos
- » Modelagem hidrológica - várias escalas de entendimento e previsão dos processos

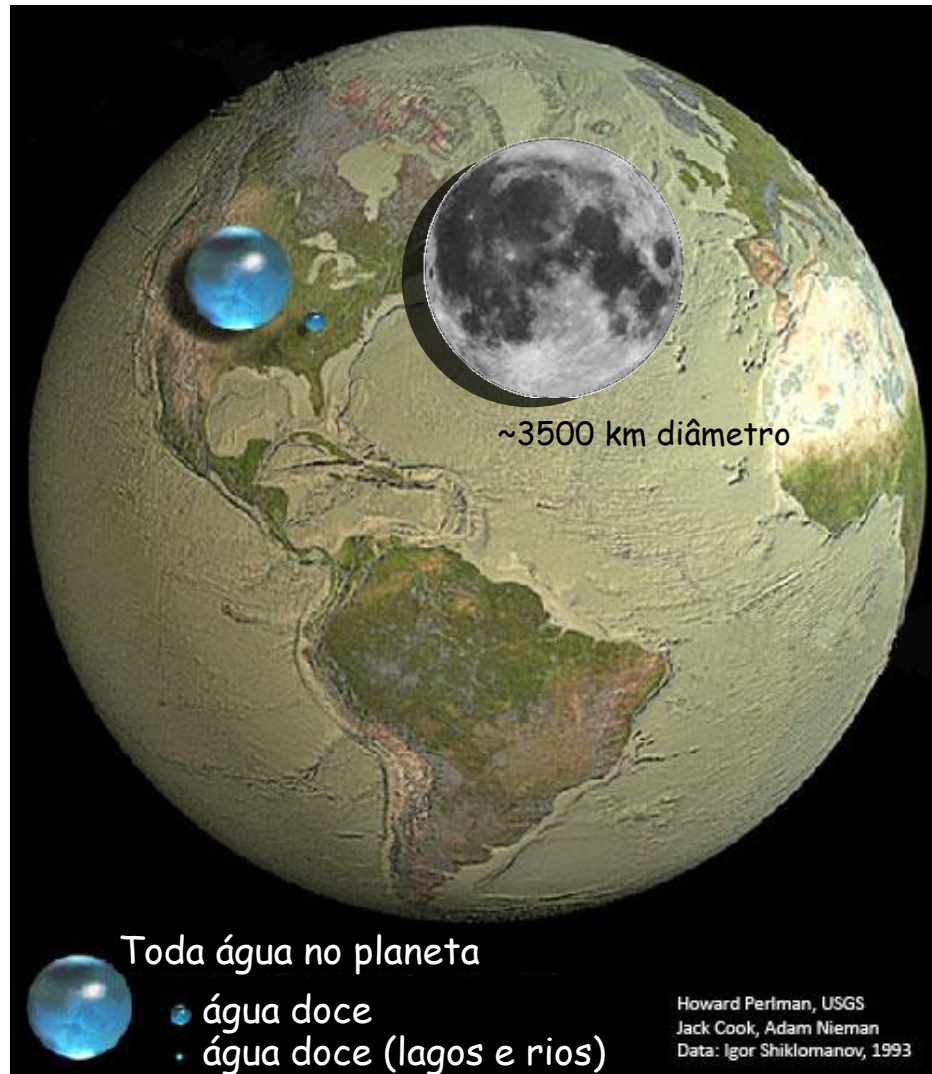
# Multidisciplinaridade da Hidrologia

---

- Precipitação e evaporação - Meteorologia
- Infiltração e percolação - Ciência dos Solos
- Água subterrânea - Geologia
- Escoamento superficial - Geomorfologia
- Vazão de rios - Mecânica de Fluidos
- Qualidade de água - Química/Biologia
- Abastecimento/Saneamento - Engenharia Civil
- Energia, Irrigação, Navegação, etc...



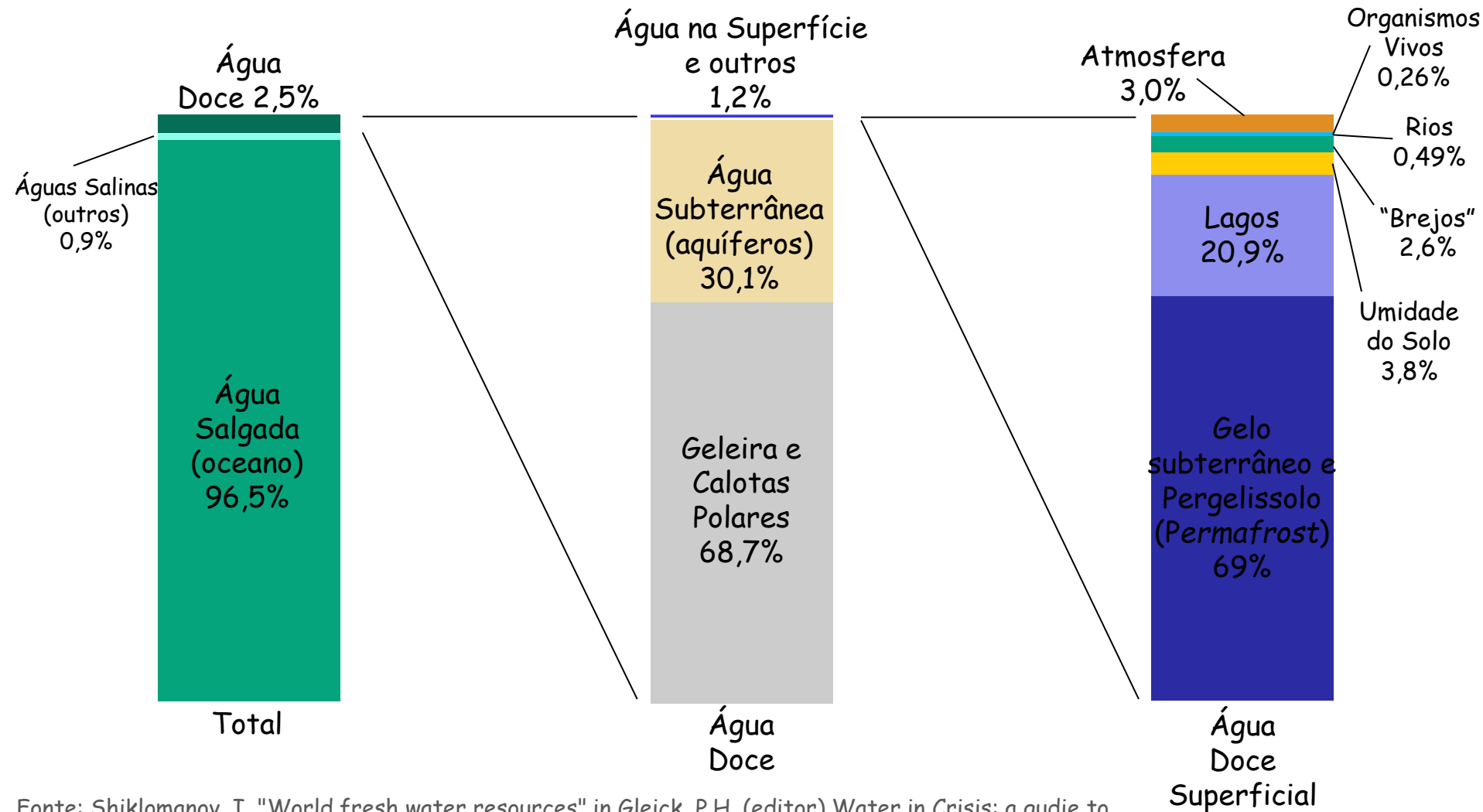
# Distribuição da Água no Mundo



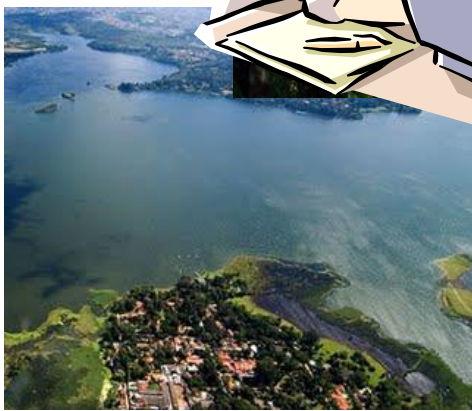
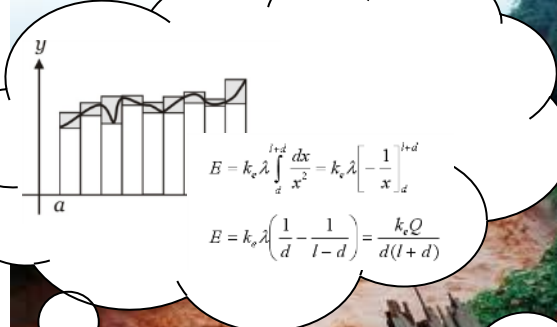
Diâmetro da Terra: ~12700 km

- » Toda a água do mundo:  
~1400 km diâmetro
- » Água doce no solo, lagos,  
áreas alagáveis e rios:  
~270 km diâmetro
- » Água doce em lagos e rios:  
~ 56 km - diâmetro

# Distribuição da Água no Mundo



# Modelando um fenômeno...



# Modelagem

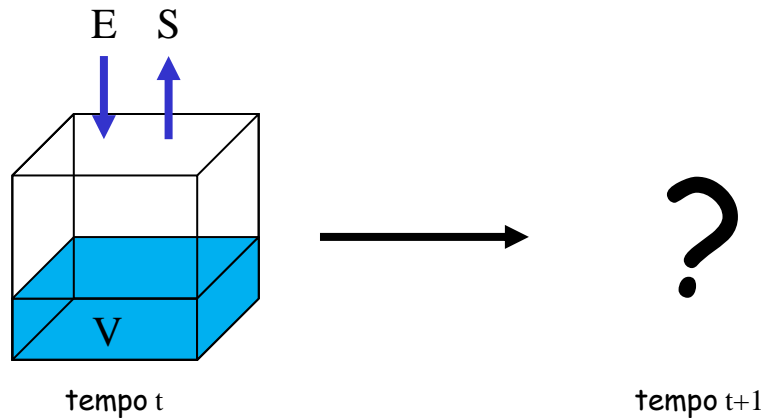
## O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
- » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado  
Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

### Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + \Delta V$$

$$\Delta V = E - S$$



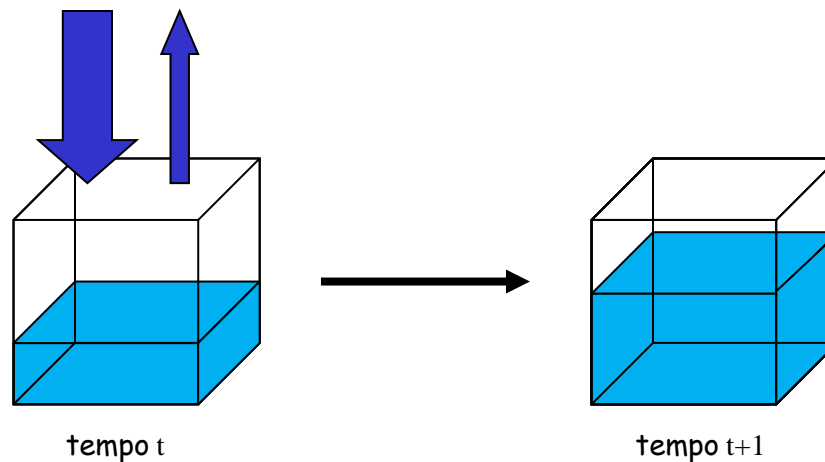
# Modelagem

## O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
  - » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado
- Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

### Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + E_t - S_t$$



# Modelagem

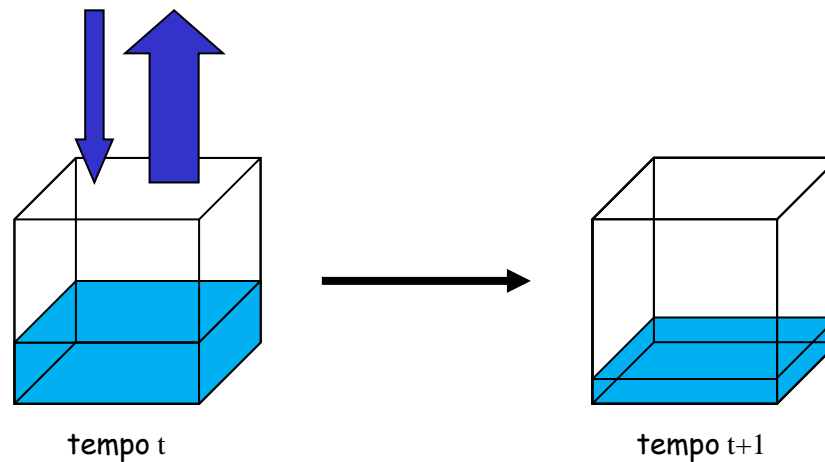
---

## O que é um modelo?

- » É uma representação conceitual/matemática de um fenômeno
- » Tipicamente o modelo irá tratar apenas de alguns aspectos do fenômeno estudado  
Um modelo é sempre uma simplificação da realidade!

### Modelo de Balanço de Água no Solo

$$V_{t+1} = V_t + E_t - S_t$$

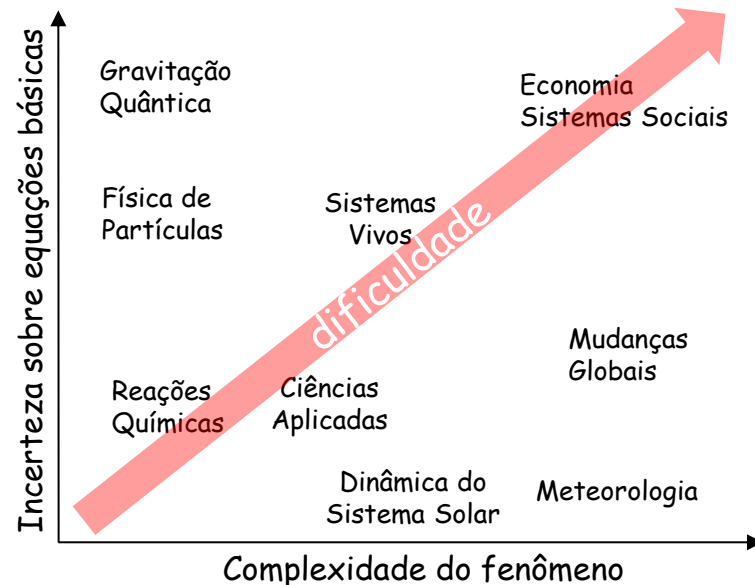


# Modelagem

## E para que modelar?

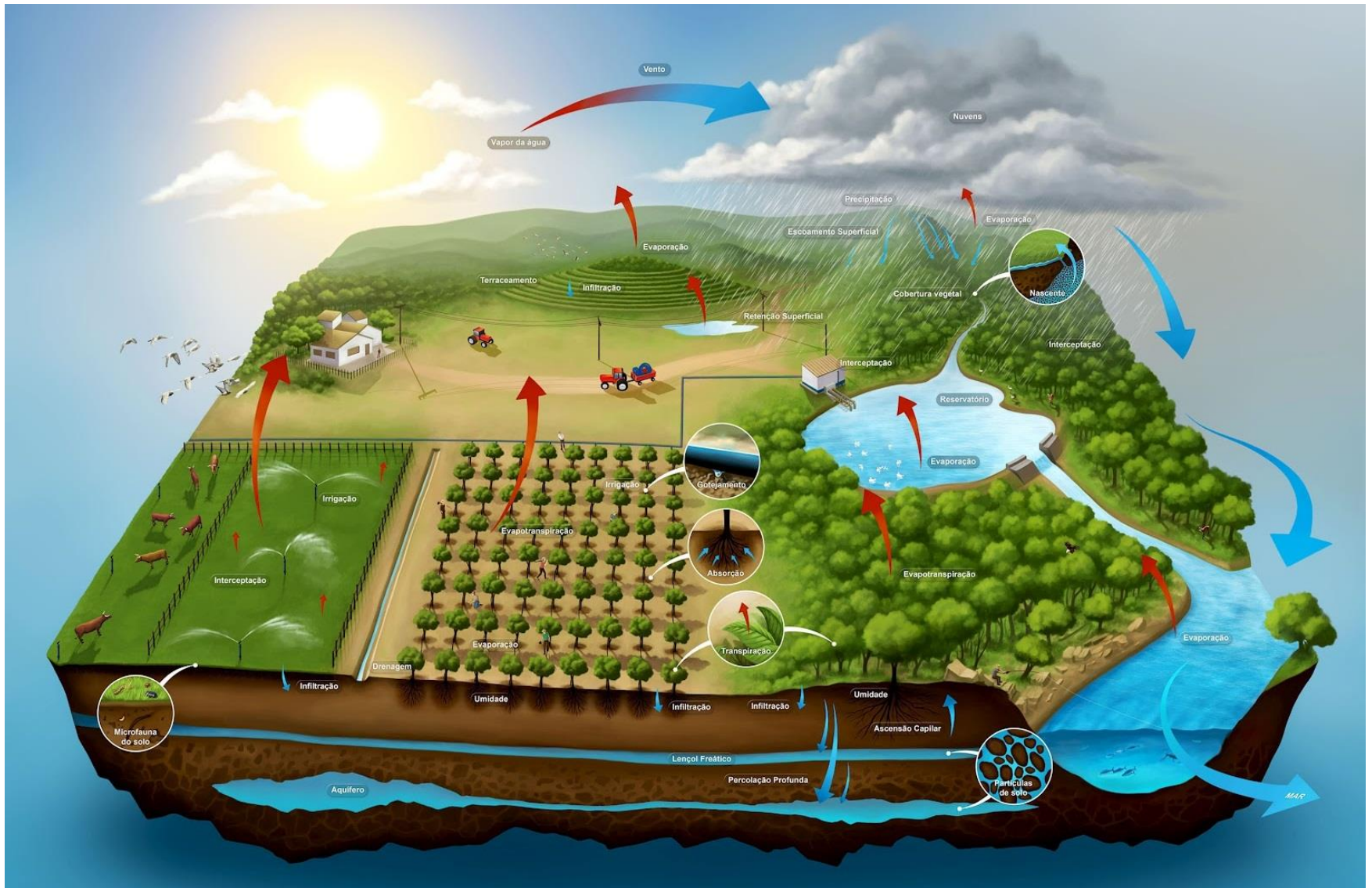
- » Explicitar hipóteses  $\uparrow$  impermeabilização  $\rightarrow$   $\uparrow$  enchentes?
- » Avaliar diferentes combinações de eventos  $\uparrow$  desmatamento e  $\downarrow$  chuvas  $\rightarrow$  ?
- » Simular condições inexistentes ou muito raras  $\uparrow$  consumo d'água e seca  $>$  5 meses  $\rightarrow$  ?

## Há limites para se modelar um fenômeno?





# Modelagem Hidrológica



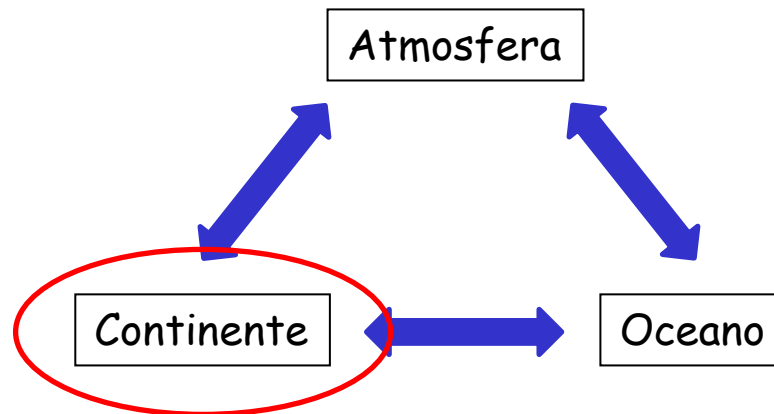


# O Ciclo Hidrológico

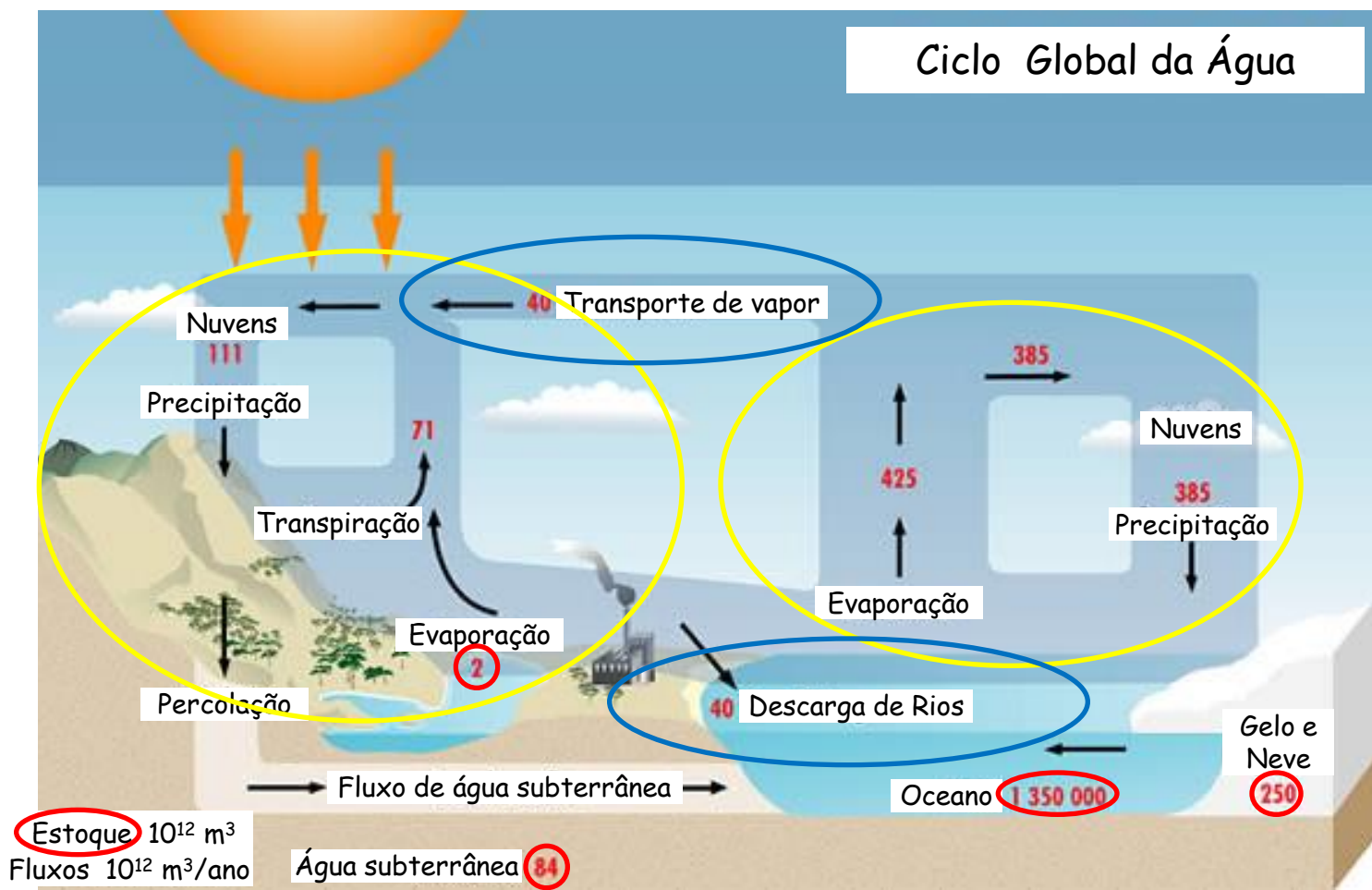
---

O ciclo hidrológico é um fenômeno global de circulação da água em suas 3 fases: gasosa (vapor), líquida (chuva e escoamento) e sólida (gelo e neve).

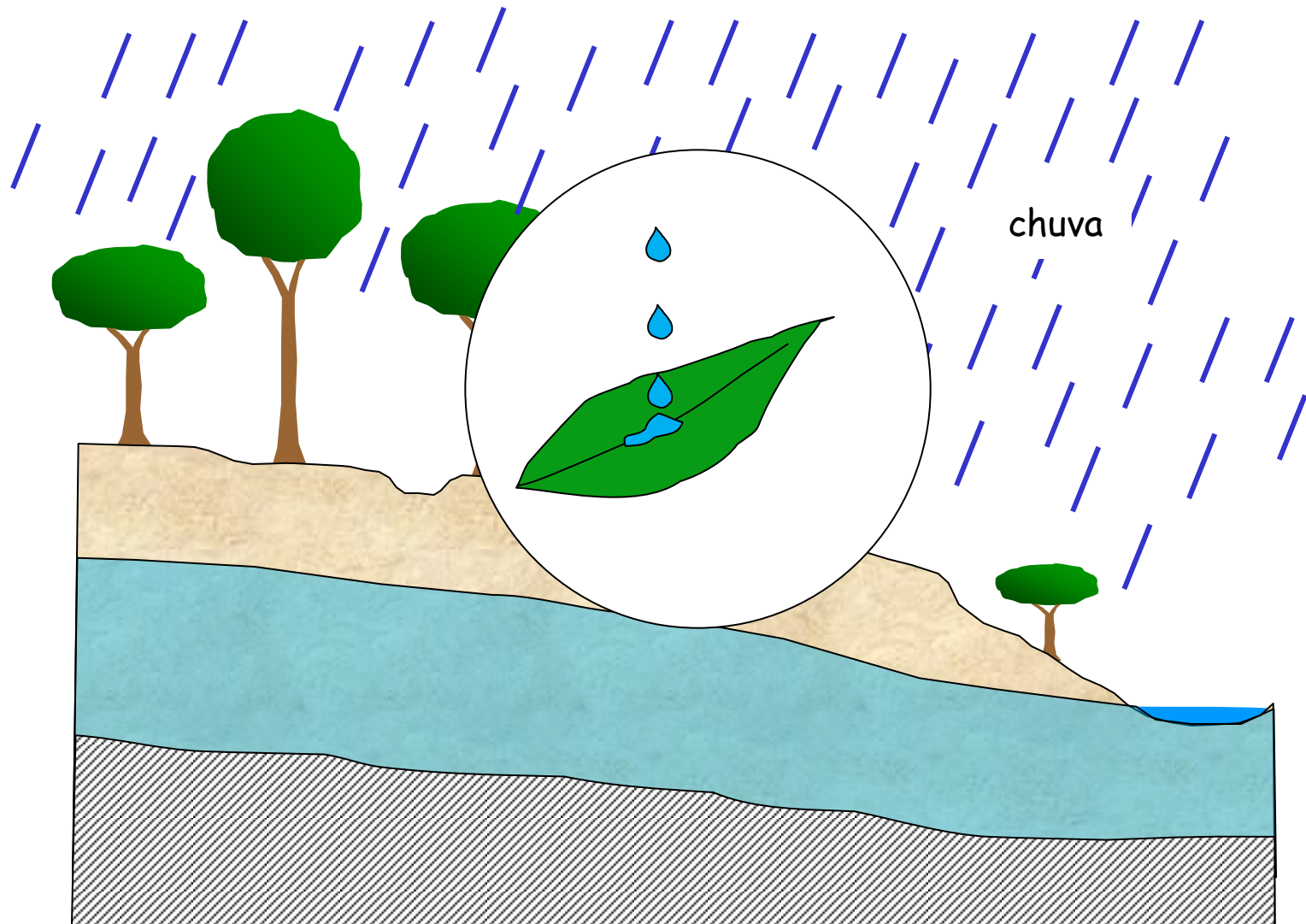
É um sistema fechado apenas em nível global.



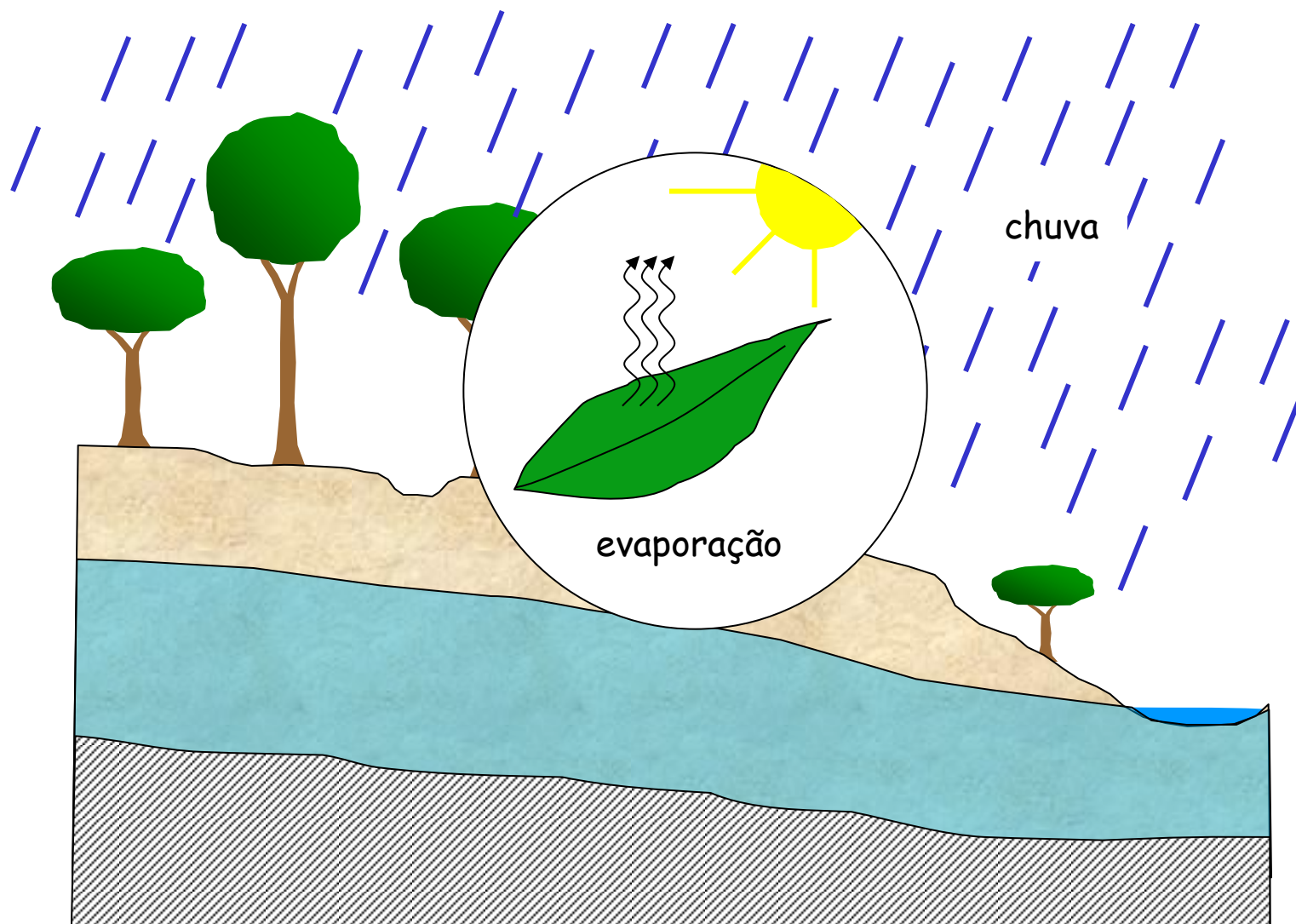
# O Ciclo Hidrológico Global



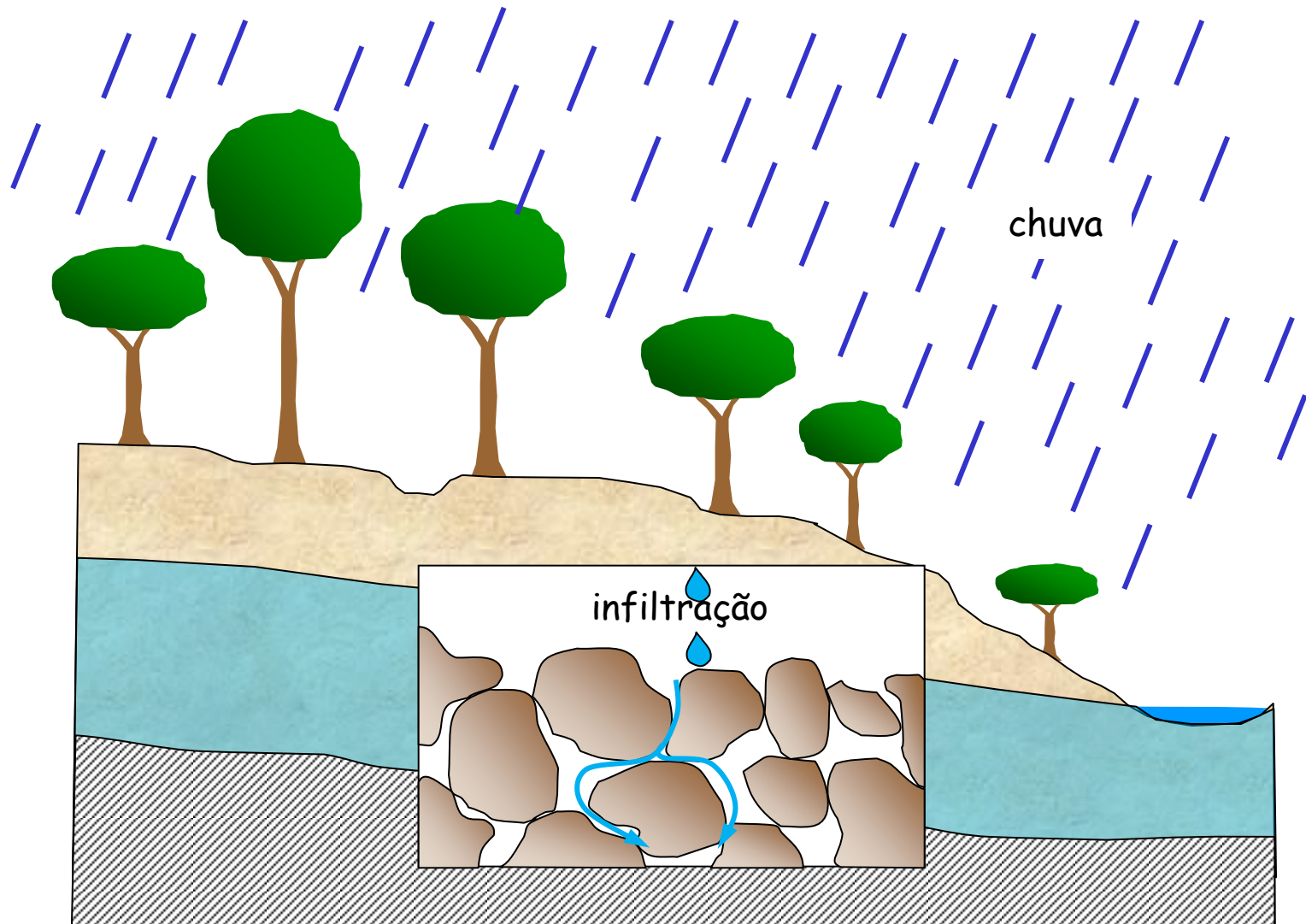
# Componentes do Ciclo Hidrológico



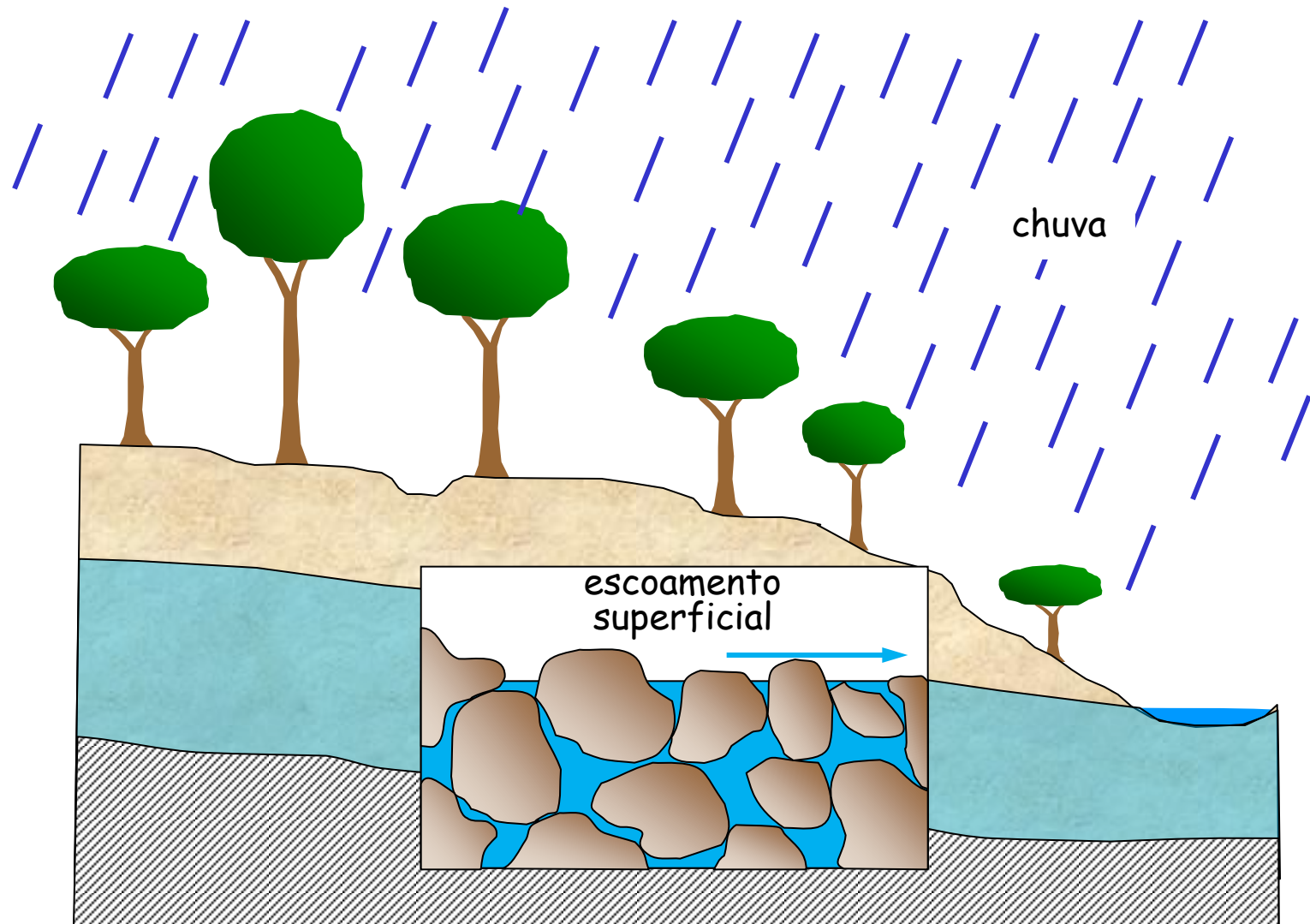
# Componentes do Ciclo Hidrológico



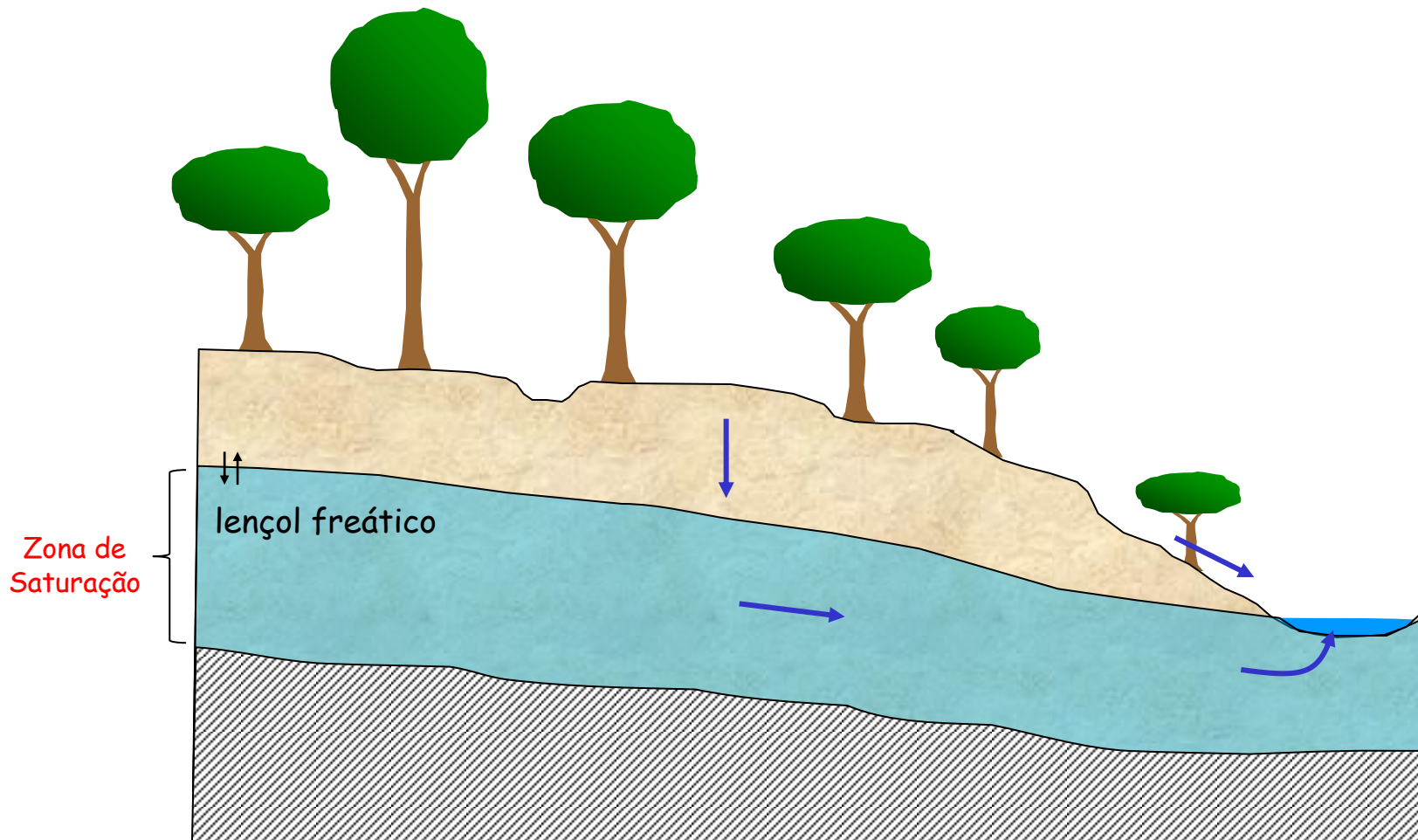
# Componentes do Ciclo Hidrológico



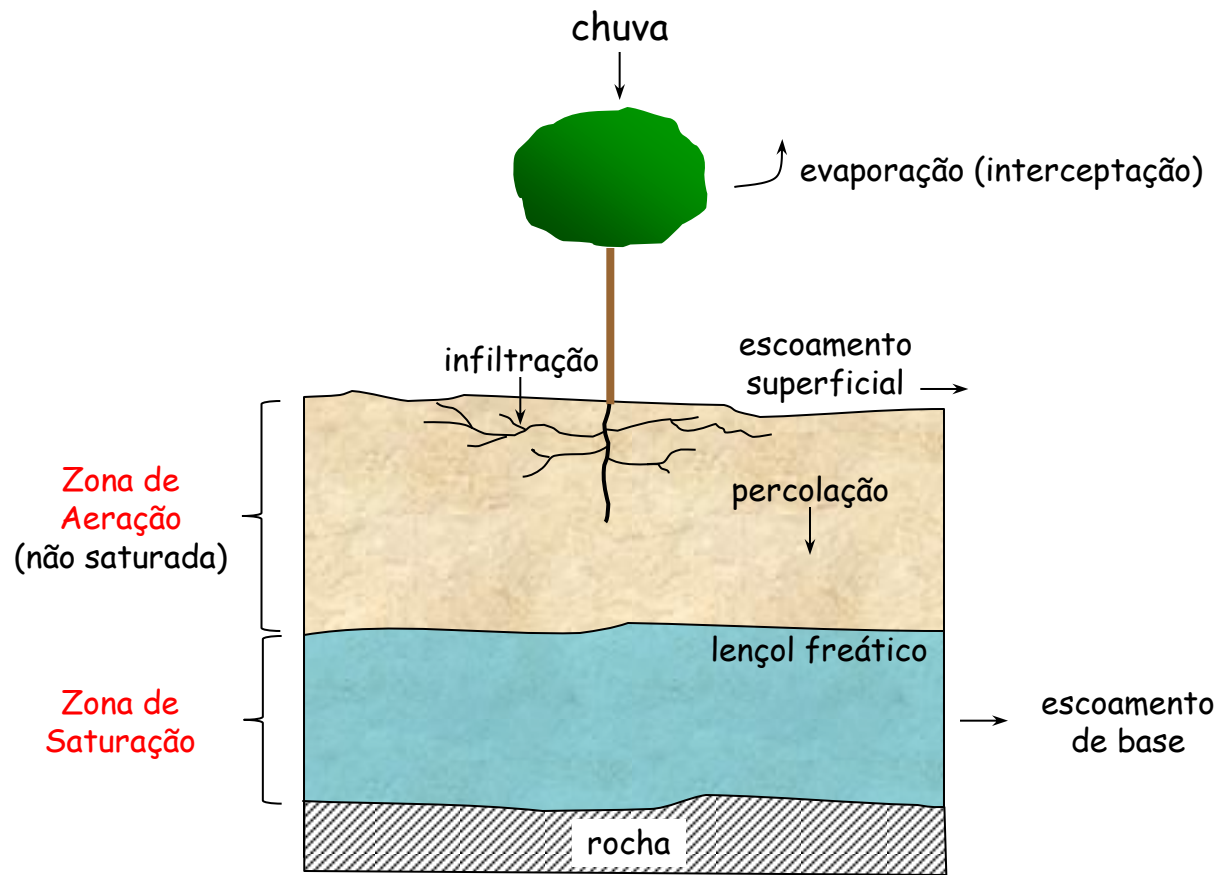
# Componentes do Ciclo Hidrológico



# Componentes do Ciclo Hidrológico

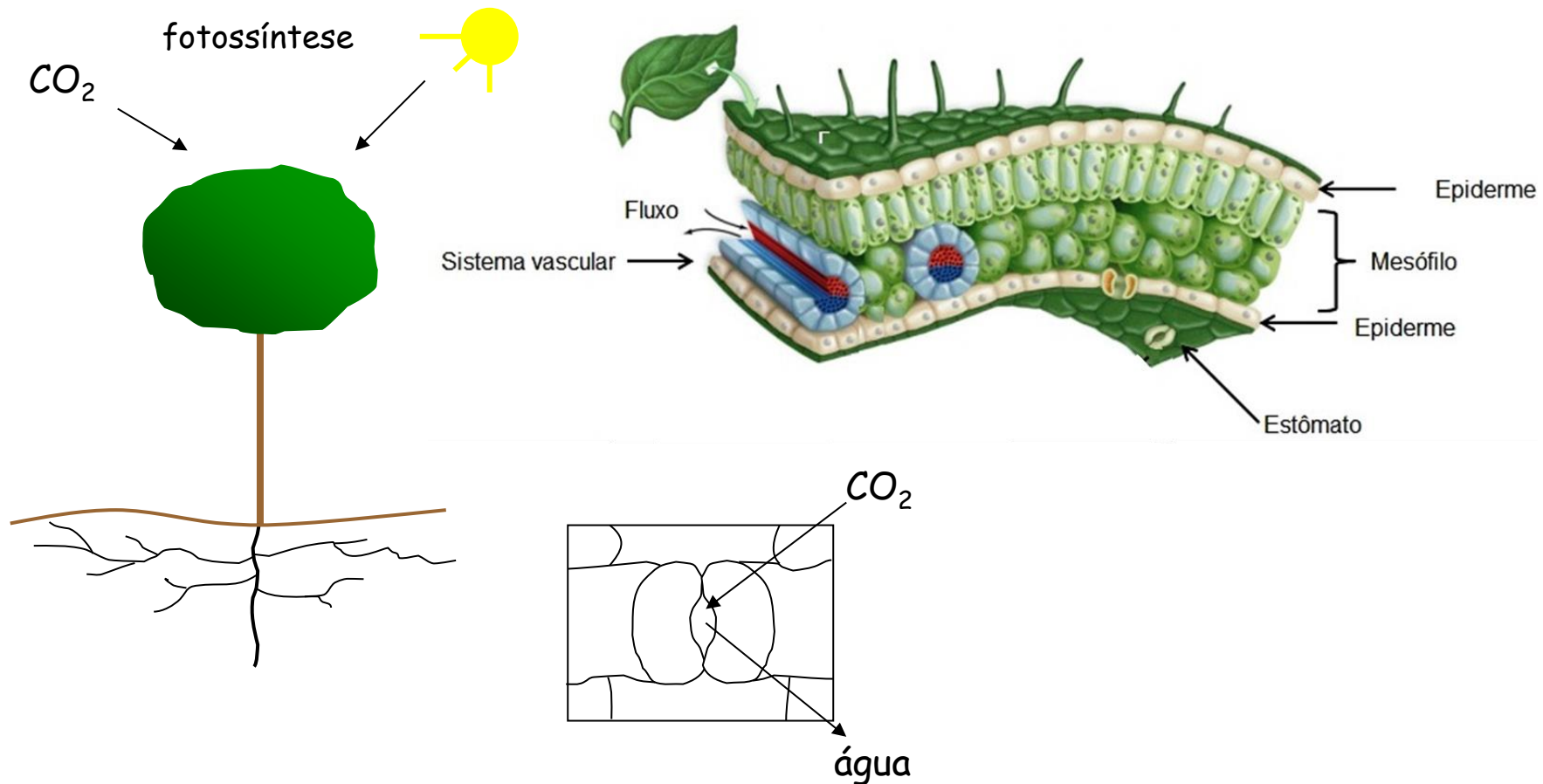


# Componentes do Ciclo Hidrológico

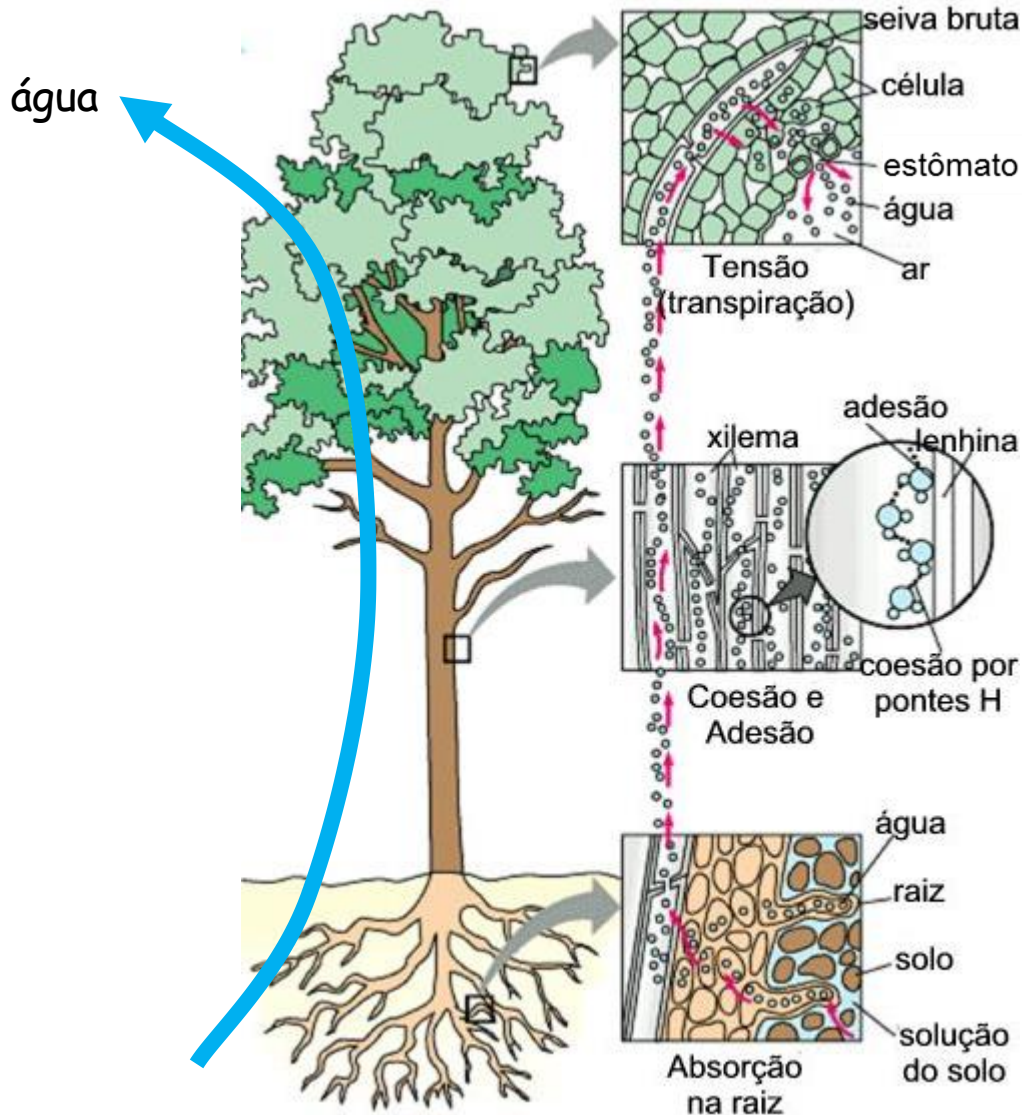




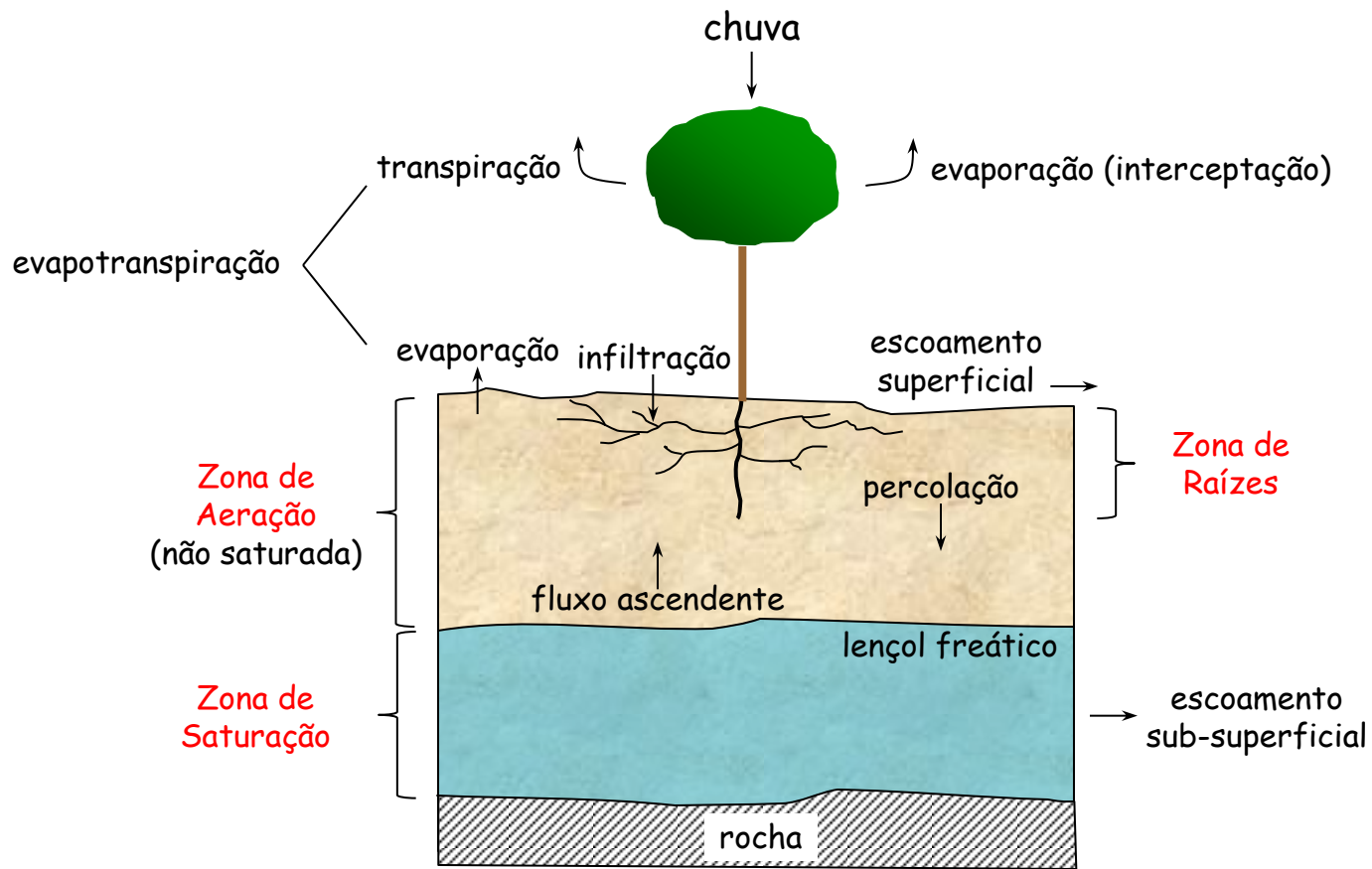
# O Papel da Vegetação no Ciclo Hidrológico



# O Papel da Vegetação no Ciclo Hidrológico



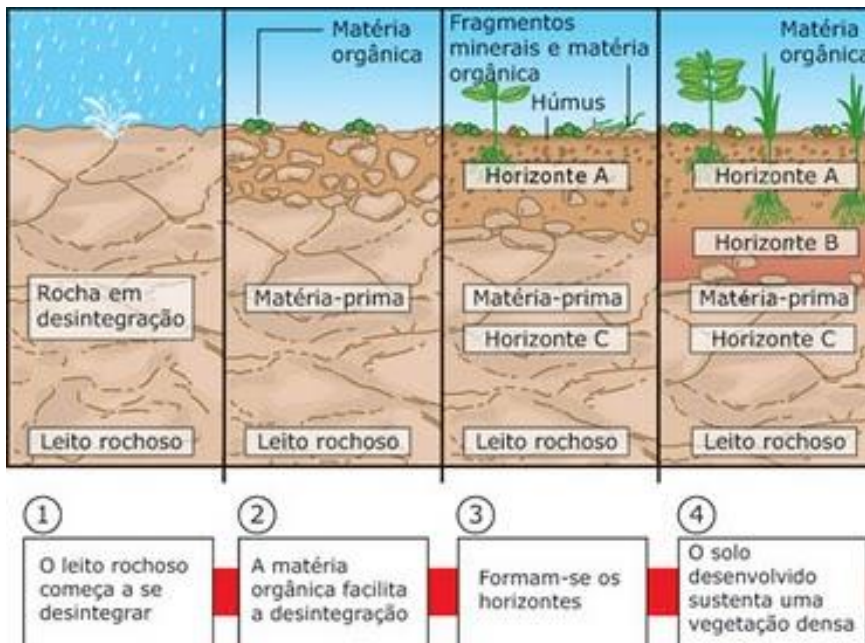
# Componentes do Ciclo Hidrológico



# O Papel do Solo no Ciclo Hidrológico

O termo solo se refere à camada superficial da crosta terrestre, que se encontra intemperizada e fragmentada e é constituída por partículas minerais, matéria orgânica, água, ar e organismos vivos.

Origina-se da rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer do tempo, em material poroso de características peculiares.



Por exemplo, são necessários 10.000 anos para a formação de 1 cm de solo a partir de uma rocha granítica!



# Características Morfológicas dos Solos

Espessura e transição  
entre horizontes

Cor

Textura

Estrutura e Porosidade

Consistência

Cerosidade

Presença de nódulos e  
concreções



Estes atributos são utilizados para classificar os solos

# Textura do Solo

Diz respeito a distribuição de tamanho das partículas do solo

## Classificação granulométrica

Fração	Diâmetro
Matacões	> 20 cm
Calhaus	20 mm a 20cm
Cascalhos	2 a 20 mm
Areia Grossa	0,2 a 2 mm
Areia Fina	0,05 a 0,2 mm
Silte	0,002 a 0,05 mm
Argila	< 0,002 mm

O conhecimento da textura é importante pois fornece informação sobre o solo a respeito de:

- sua capacidade em permitir a movimentação da água (condutividade hidráulica),
- sua capacidade em reter/armazenar água,
- seu potencial de fertilidade e,
- sua capacidade mecânica

areia



silte



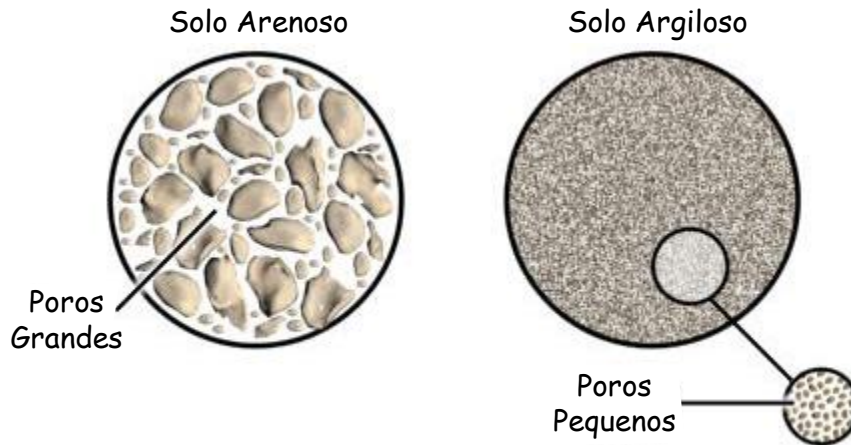
argila



# Estrutura e Porosidade

Estrutura é o arranjo das partículas primárias do solo formando agregados (torrões). Este arranjo é geralmente bastante complexo.

A estrutura do solo é determinante para a porosidade do solo, ou seja, na distribuição e no tamanho dos poros. Afeta processos tais como germinação, crescimento de raízes, erosão, etc.

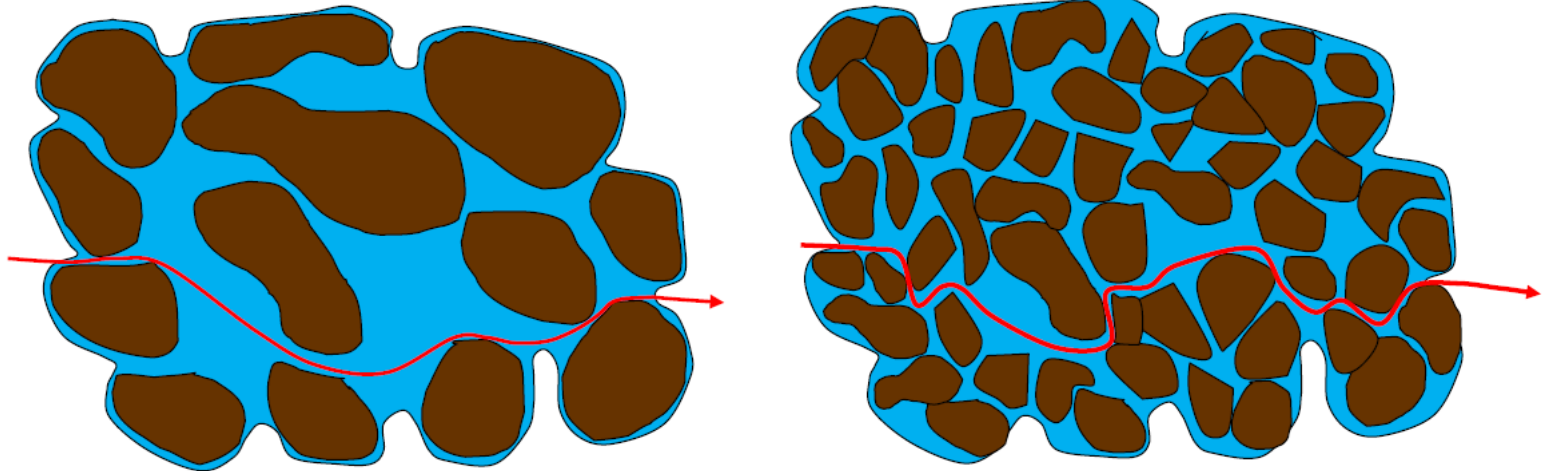


A porosidade influencia diretamente  
no movimento de água no solo  
(condutividade hidráulica)

A porosidade determina a capacidade  
de armazenamento de água no solo

# Movimento da água no solo saturado

A condutividade hidráulica é afetada pela estrutura e textura do solo, sendo maior em solos porosos (poros grandes), fraturados e bem estruturados (formação de torrões). Ou seja, não depende apenas da quantidade de poros, mas também do tamanho e da geometria desses poros (tortuosidade) por onde o fluido irá ser conduzido.



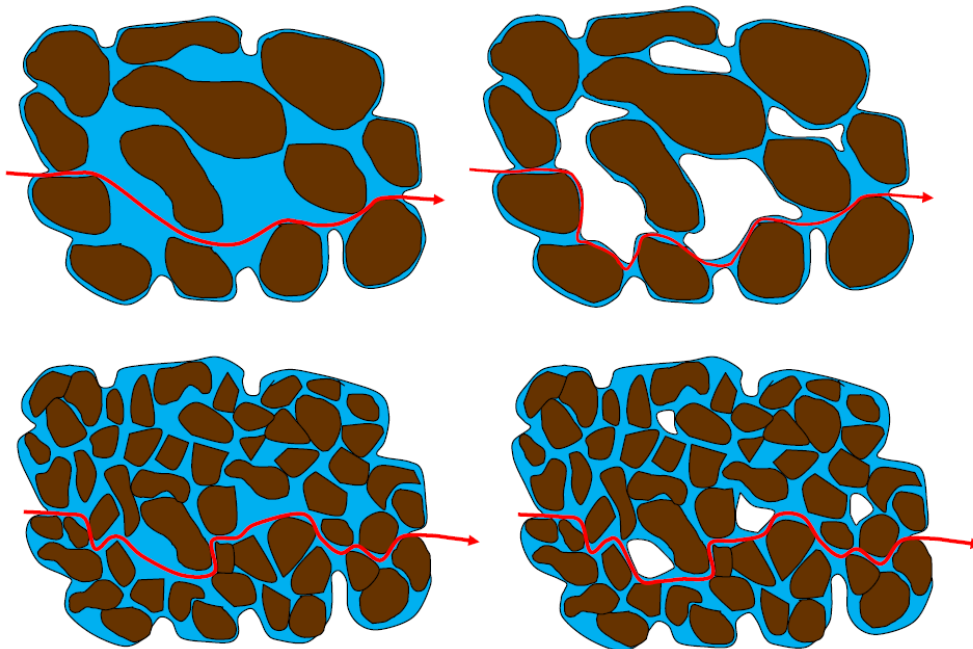
Por isso, em geral, solos **arenosos** apresentam condutividade hidráulica **maior** que solos **argilosos** quando **saturados**.



# Movimento da água no solo não saturado

Quando o solo não está saturado, alguns poros estão preenchidos também pelo ar, e a capacidade de transmitir água desse poro diminui.

A medida que a quantidade de água no solo se reduz, os poros maiores começam a se esvaziar, fazendo com que a água só possa fluir pelos poros menores.

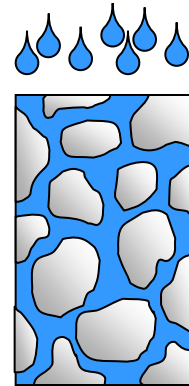


Por isso, em geral, solos **arenosos** apresentam condutividade hidráulica **menor** que solos **argilosos** quando **não saturados**.

# Água Disponível: CC e PMP

---

Após a chuva ou irrigação, a infiltração cessa e a água se redistribui dentro do perfil principalmente pela influência da gravidade.



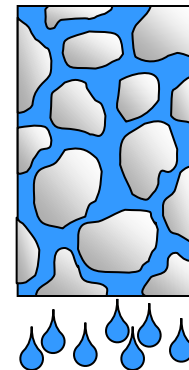
Saturação

Todos os poros estão cheios de água.

# Água Disponível: CC e PMP

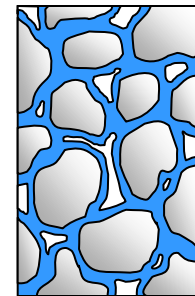
Após a chuva ou irrigação, a infiltração cessa e a água se redistribui dentro do perfil principalmente pela influência da gravidade.

A umidade do solo na qual a redistribuição praticamente cessa é denominada **capacidade de campo (CC)**, ou seja, é a umidade que o solo consegue sustentar sob a ação da gravidade.



Saturação

Todos os poros estão cheios de água.  
A água gravitacional é perdida.



Capacidade de Campo

Apenas os macroporos estão ocupados por ar.

# Água Disponível: CC e PMP

---

A água perdida pelas plantas por transpiração deve ser constantemente repostada pela extração da água do solo na zona radicular.

Quando a planta não consegue mais retirar a água do solo, as folhas perdem a turgidez e a planta murcha.



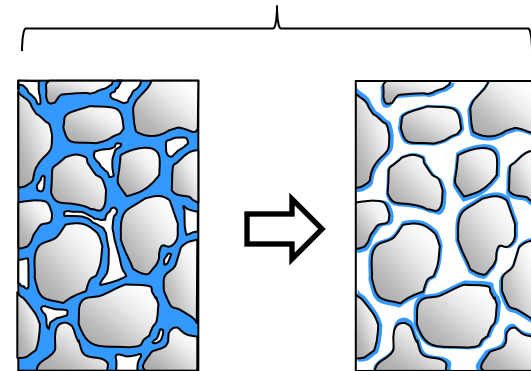
# Água Disponível: CC e PMP

A água perdida pelas plantas por transpiração deve ser constantemente reposta pela extração da água do solo na zona radicular.

Quando a planta não consegue mais retirar a água do solo, as folhas perdem a turgidez e a planta murcha.

O **ponto de murcha permanente** (PMP) é definido como a umidade do solo na qual uma planta não mais recupera a turgidez.

Água Disponível  
(CC - PMP)



Capacidade de Campo

Apenas os macroporos estão ocupados por ar.

Ponto de Murcha Permanente

Não há mais água disponível para as plantas (umidade residual)

# Fatores que afetam a Infiltração

---

Textura e estrutura do solo: porosidade, densidade e compactação do solo

maior quantidade de poros grandes → maior infiltração

maior compactação → maior densidade → menor infiltração

Condição antecedente de umidade do solo

mais úmido → menor infiltração

Atividade biológica e matéria orgânica

mais matéria orgânica → melhor estruturado é o solo → maior infiltração

Presença de cobertura morta e vegetação

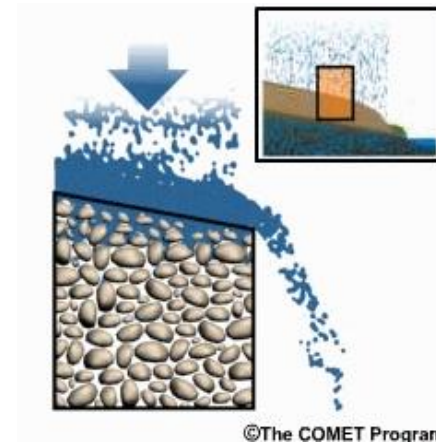
menor cobertura → maior desagregação das partículas → menor infiltração

**Menor infiltração → Maior escoamento superficial**

# Tipos de escoamento

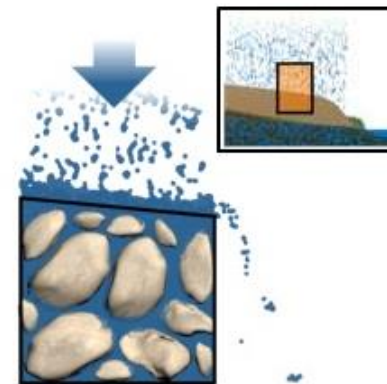
**Escoamento por excesso de infiltração**

*Mecanismo de Horton*



**Escoamento por excesso de saturação**

*Mecanismo de Dunne*



# Escoamento por excesso de infiltração

## Mecanismo de Horton

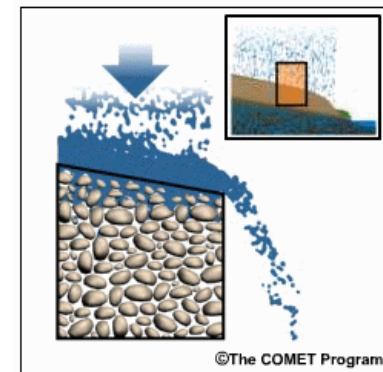
Ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração, podendo ocorrer mesmo com o solo seco

Associado a eventos intensos de precipitação de curta duração

Frequente em áreas pouco permeáveis: solos com elevado teor de argila (poros muito pequenos), solos compactados (ou pisoteados), áreas urbanas, solos sob ocorrência de fogo, e cobertura vegetal rala

Está intimamente associado ao fenômeno de erosão e transporte de sedimentos

Raramente ocorre em áreas de floresta natural





# Escoamento por excesso de saturação

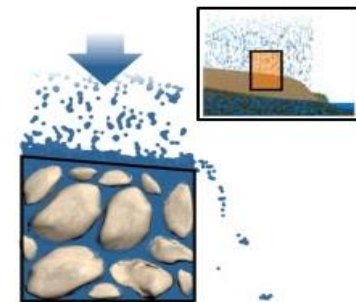
## Mecanismo de Dunne

Ocorre quando o solo está saturado - importância da umidade do solo antecedente

Associado a chuvas moderadas e de longa duração ou após sucessivos eventos de chuva

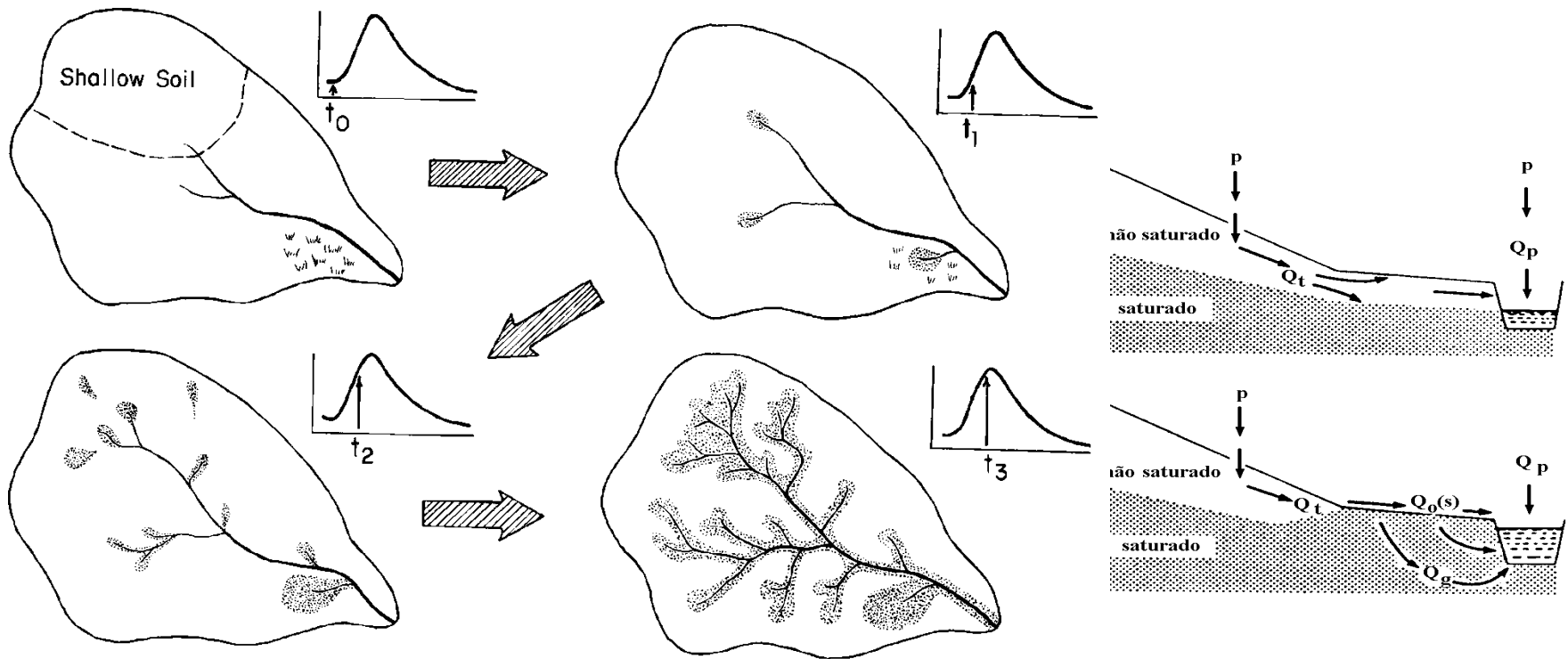
Frequente em clima úmido, áreas planas e terrenos pouco inclinados (áreas de várzea), próximos a cursos d'água (onde o lençol freático está próximo à superfície e é rapidamente saturado), depressões de vertentes (onde o fluxo subsuperficial ou subterrâneo convergem e retornam à superfície - fluxo de retorno), solos rasos ou com queda acentuada da condutividade hidráulica no subsolo, e pés das vertentes (áreas de fluxos convergentes)

É o principal mecanismo de escoamento em bacias de florestas tropicais



Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale. ©The COMET Program

# Área de contribuição variável



Com a continuação da precipitação, as áreas que originam o escoamento direto tendem a se expandir, não somente em decorrência da expansão da rede de drenagem, como também pelo fato de que as áreas saturadas e as áreas de solo raso passam também a participar da geração de escoamento direto. Este processo se reverte a medida que a precipitação diminui.

# Por que estudar o escoamento superficial?

---

- Estabilidade de encostas - Geotecnia
- Processos erosivos - Geomorfologia/Geografia
- Perda de produtividade do solo - Agronomia
- Fluxo de contaminantes - Geotecnia ambiental
- Previsão de enchentes - Eng. Civil/Hidrologia/Desastres Naturais
- Recarga de aquíferos - Hidrogeologia
- Produção hídrica - Hidrologia de superfície

# Fatores que influenciam o escoamento superficial

---

## **Fatores climáticos**

Intensidade da chuva

Duração da chuva

Umidade do solo antecedente

## **Fatores fisiográficos**

Área da bacia

Forma da bacia

Topografia (declividade da bacia)

Permeabilidade do solo

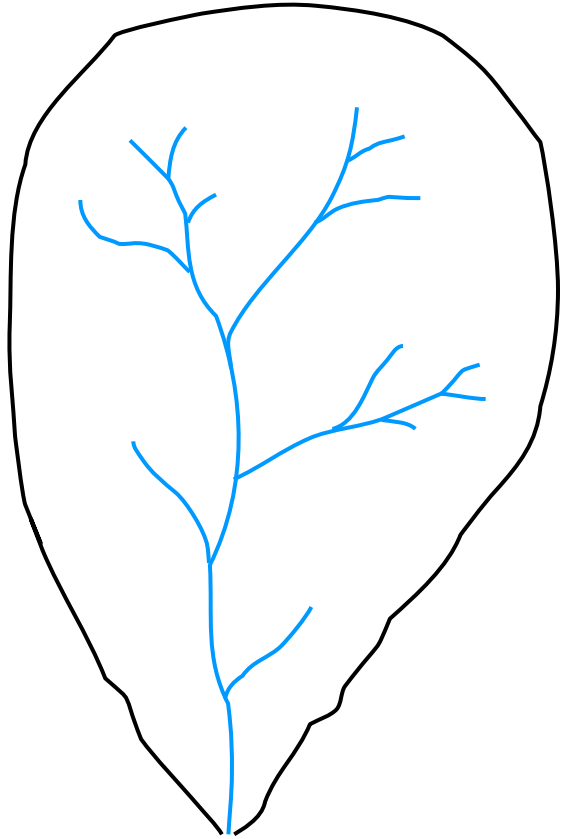
## **Uso da terra**

Superfícies vegetadas

Superfícies impermeáveis - solo compactado, estradas, estacionamentos, etc

# Bacia Hidrográfica

---



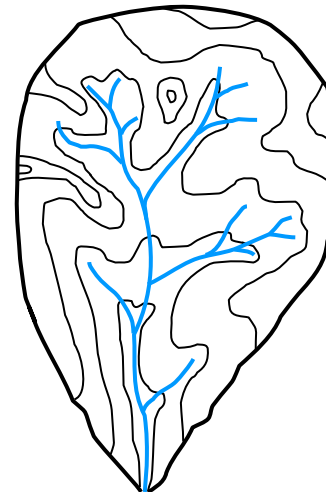
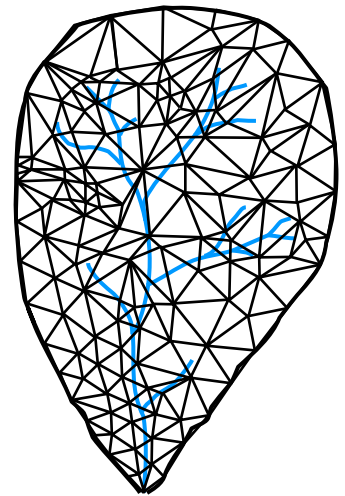
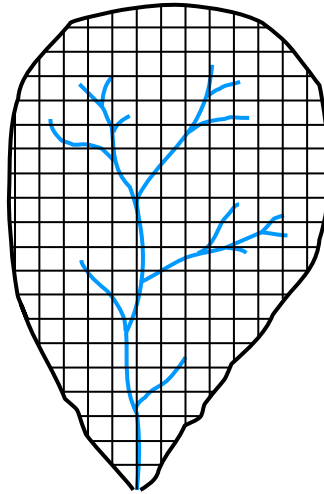
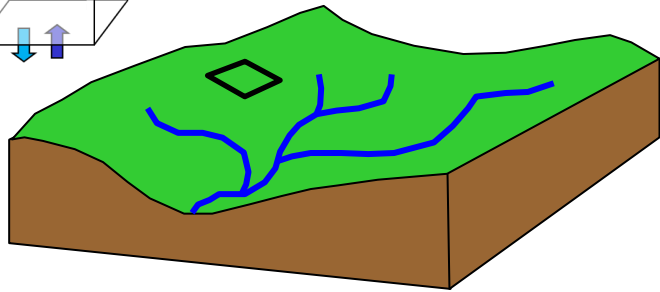
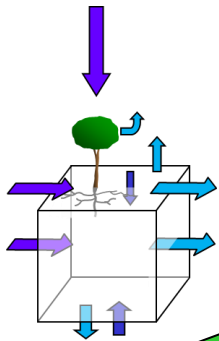
- \* unidade hidrológica
- \* delimitada pelos divisores de água
- \* supõe-se um único ponto de saída (exutório)

(divisores de água superficial = subsuperficial)

*mas como estudar os processos hidrológicos dentro de uma bacia?*

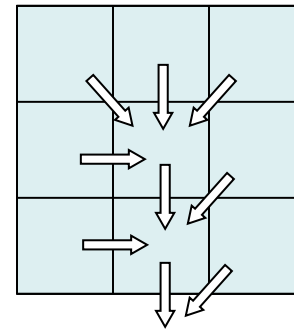
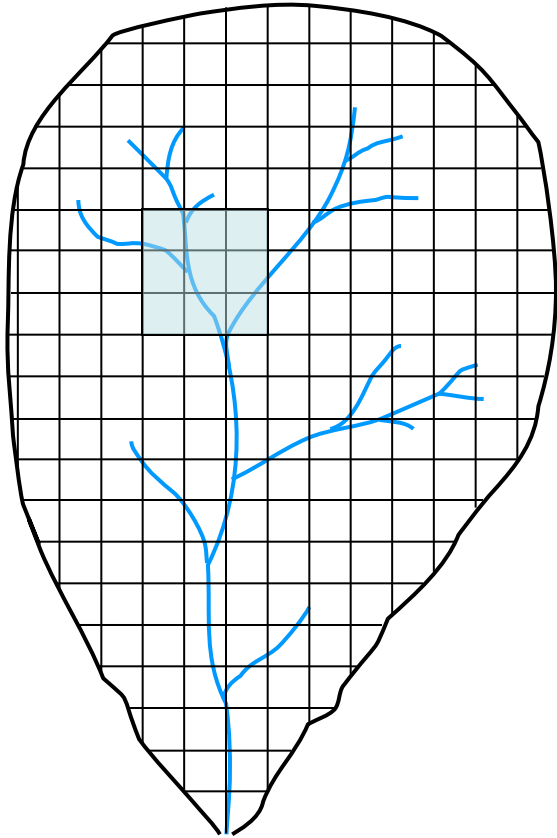
**Discretização Espacial**

# Modelos Digitais de Elevação (MDE)

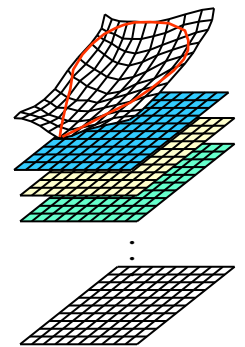


Simplificação da realidade

# MDE Grade Regular



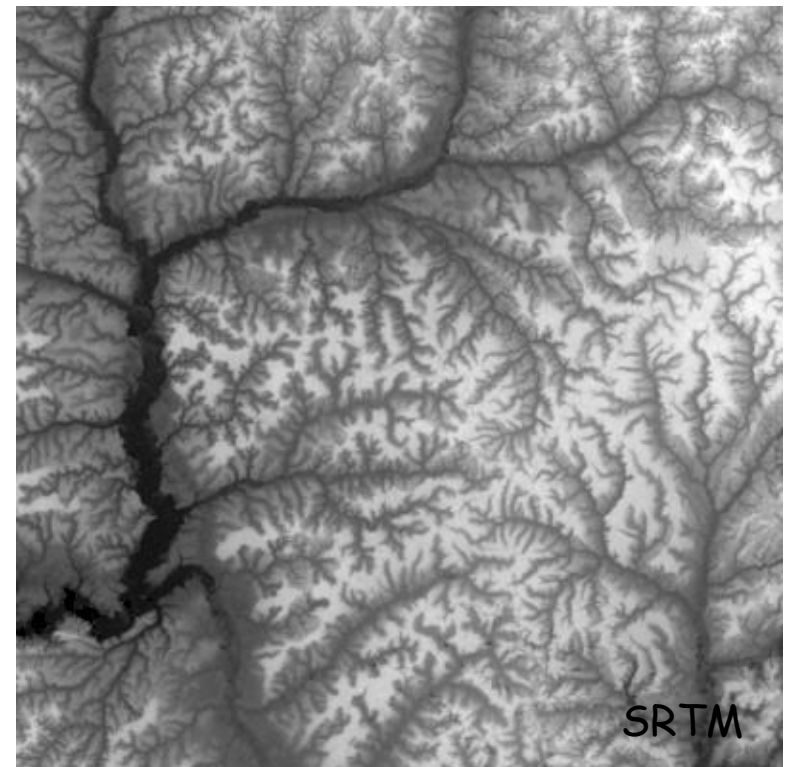
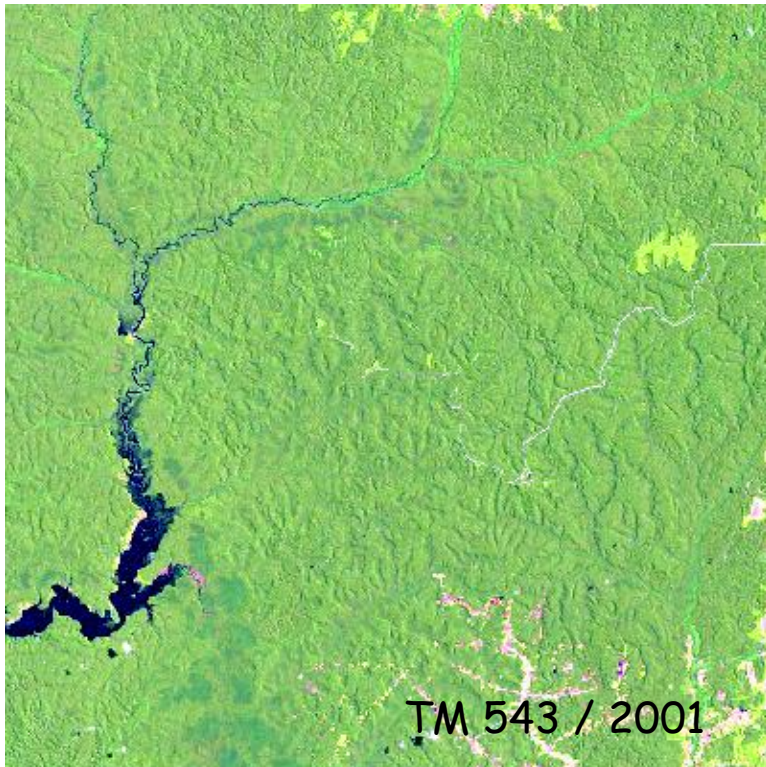
- ✓ fácil representação e manipulação
- ✓ topologia implícita
- ✓ correspondência com dados matriciais





# MDE SRTM

---



região próxima a Manaus/AM

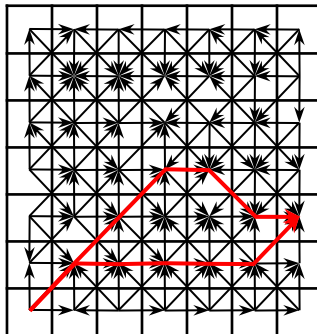
# MDE hidrológicamente consistente

- determinação dos caminhos "hidrológicos"
- direção de escoamento uni e multidirecional

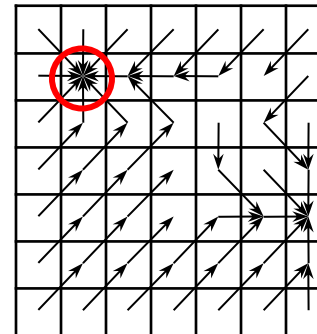
MDE  
(Modelo Digital de Elevação)

56	55	56	59	62	68	70
59	52	53	55	58	66	71
67	60	56	55	58	63	66
72	68	59	56	54	55	54
72	70	67	58	54	53	50
71	70	69	65	60	55	53
72	71	72	70	67	61	57

Direções  
Múltiplas de  
Escoamento



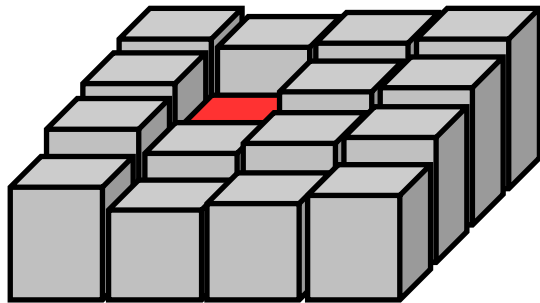
LDD  
(Local Drain Direction)



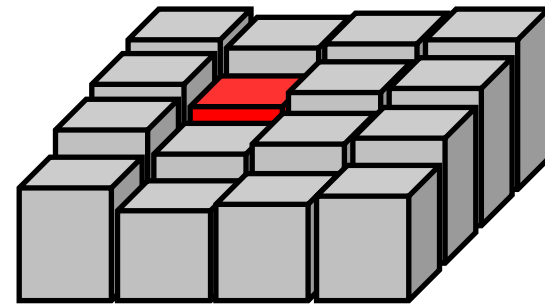
sumidouros

# Eliminação dos Sumidouros

Pode ser feita escavando-se uma saída ou preenchendo a depressão

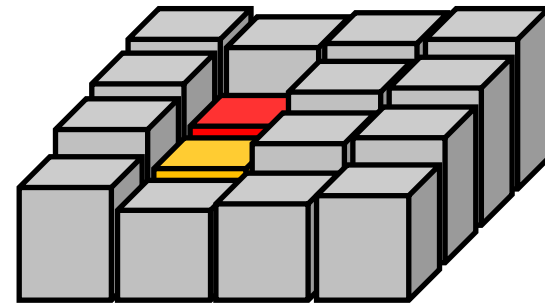


preenchendo



Modelos hidrológicamente consistentes

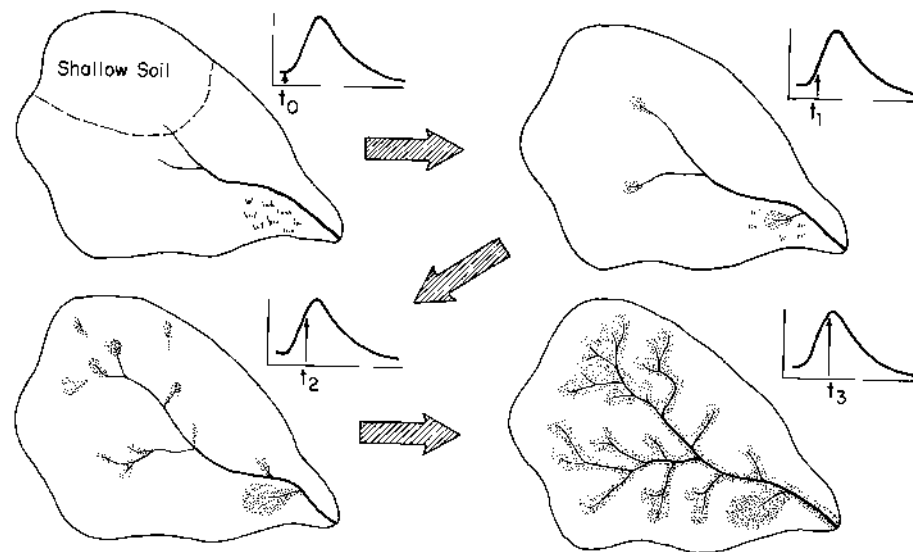
escavando



# Extração Automática da Rede de Drenagem

O que representa a rede de drenagem?

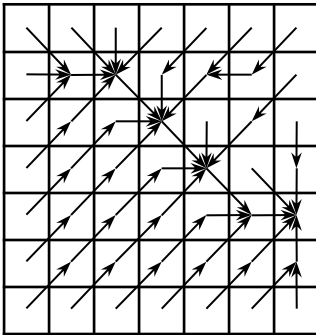
- considera canais intermitentes e perenes, áreas saturadas (lençol freático superficial)?
- a largura do canal é importante (representação por linhas e polígonos)?
- a hierarquia da rede deve ser considerada (ordem)?
- como definir os inícios da rede (nascentes)?



# Extração Automática da Rede de Drenagem

## Método Clássico

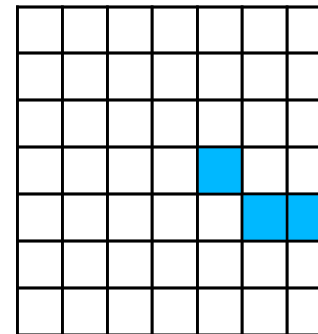
Direção de Fluxo



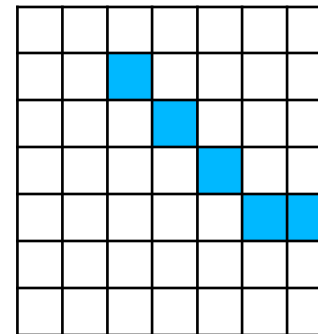
Área de Contribuição

1	1	1	1	1	1	1
1	4	10	2	4	2	1
1	2	3	23	1	2	1
1	2	3	4	34	1	2
1	2	3	3	3	40	49
1	2	2	2	2	2	3
1	1	1	1	1	1	1

Drenagem

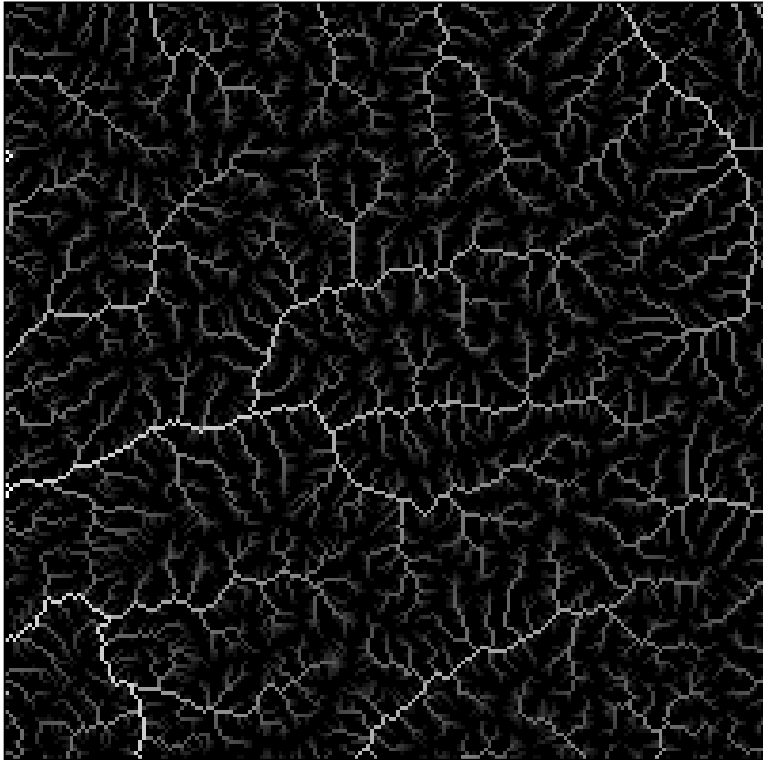


limiar = 30

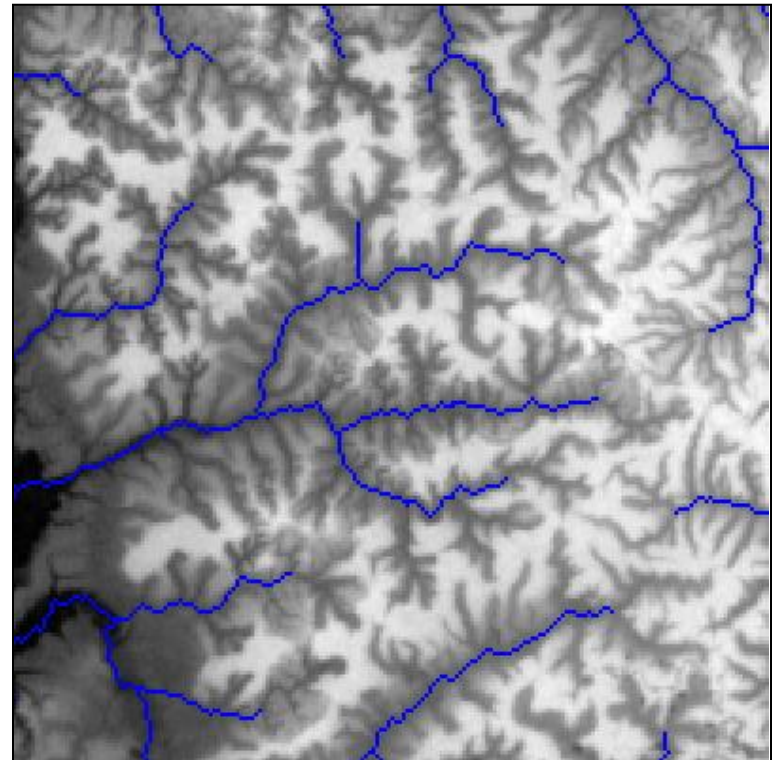


limiar = 10

# Extração Automática da Rede de Drenagem



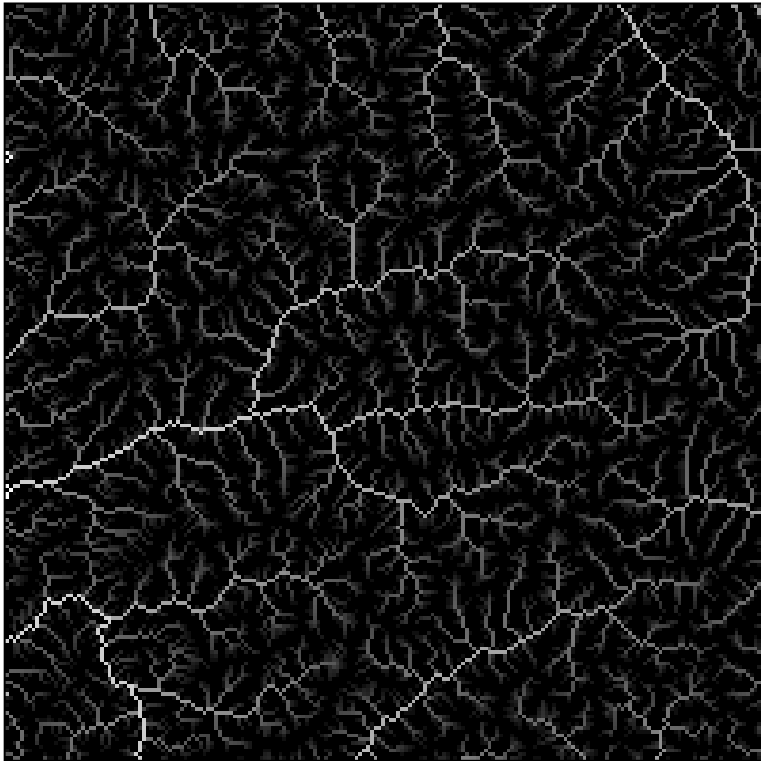
área de contribuição



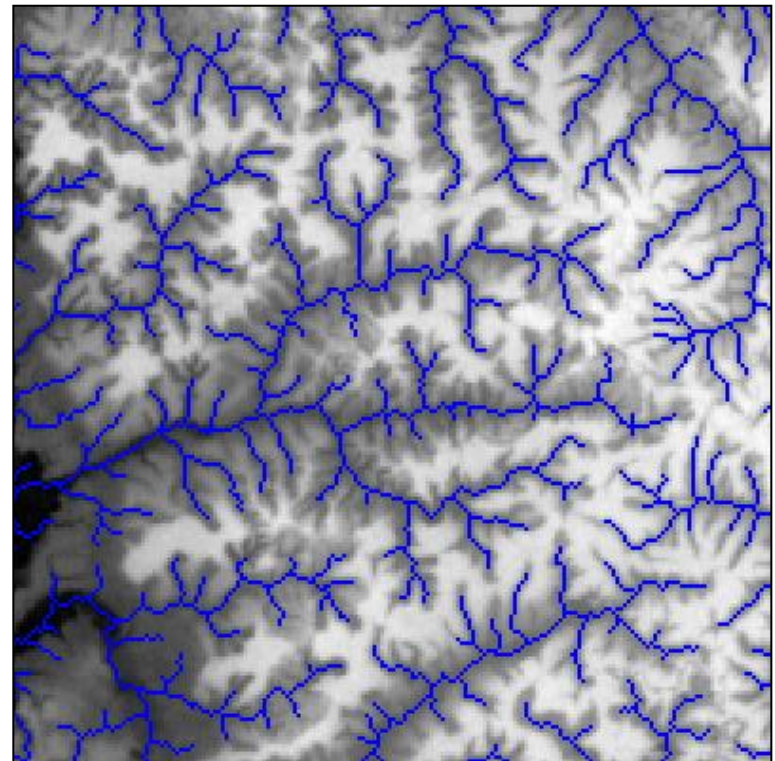
limiar = 500



# Extração Automática da Rede de Drenagem



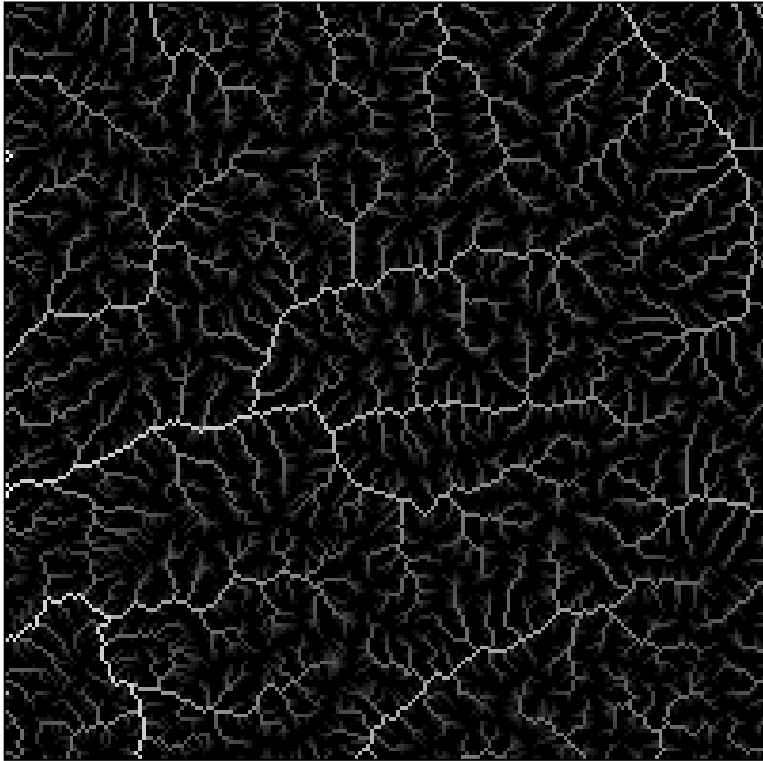
área de contribuição



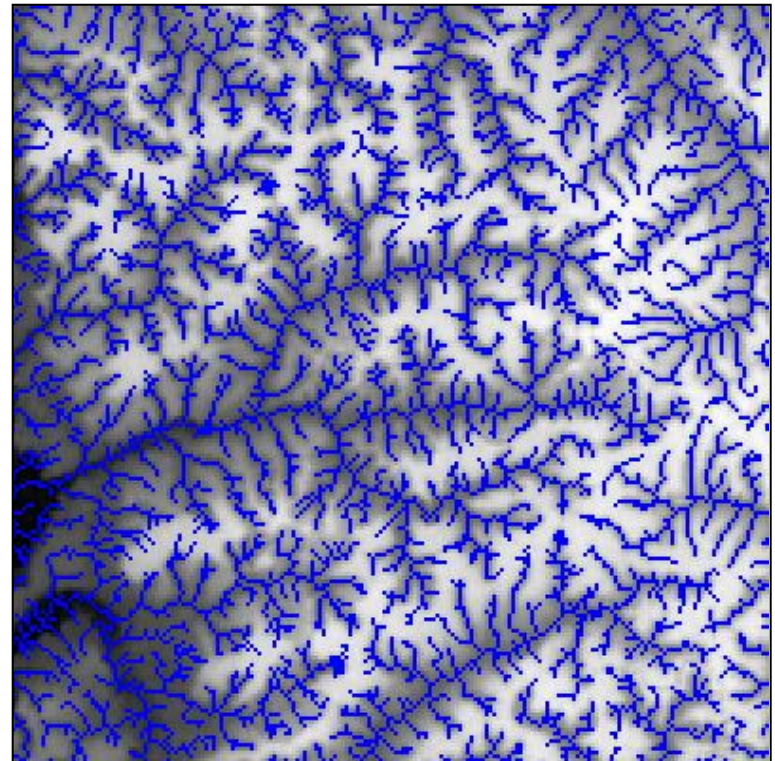
limiar = 50



# Extração Automática da Rede de Drenagem

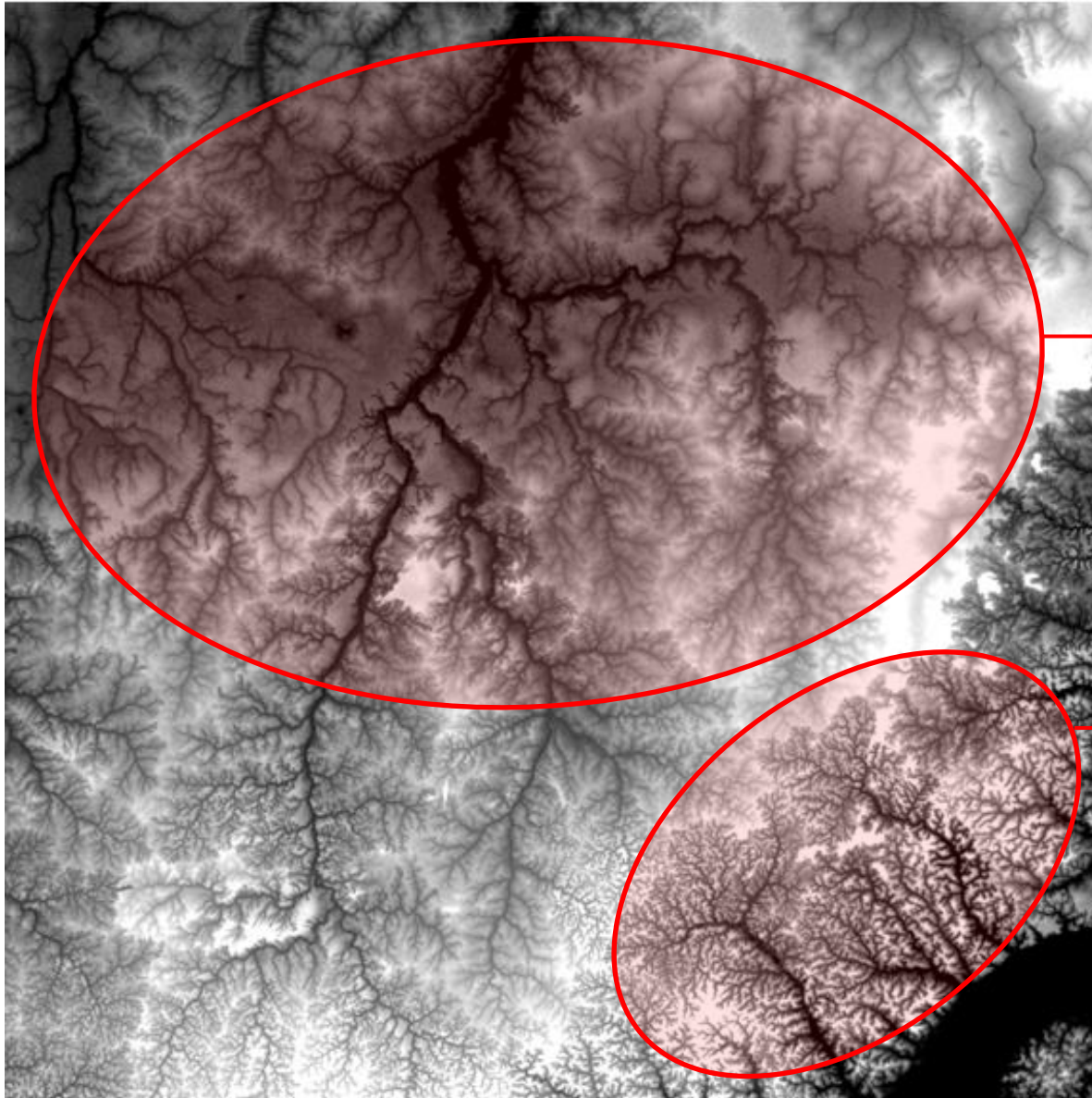


área de contribuição



limiar = 5

# Limitações do Método Clássico



REGIÃO HETEROGÊNEA

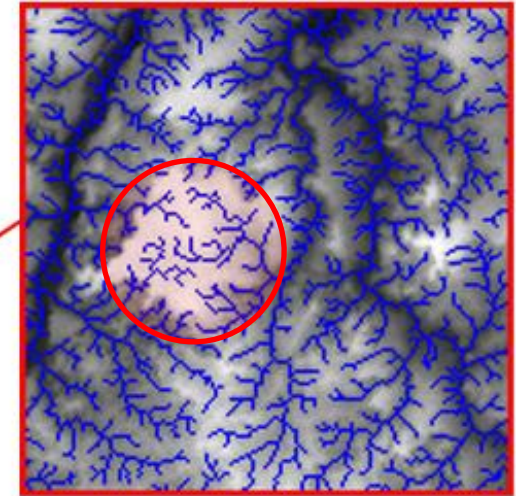
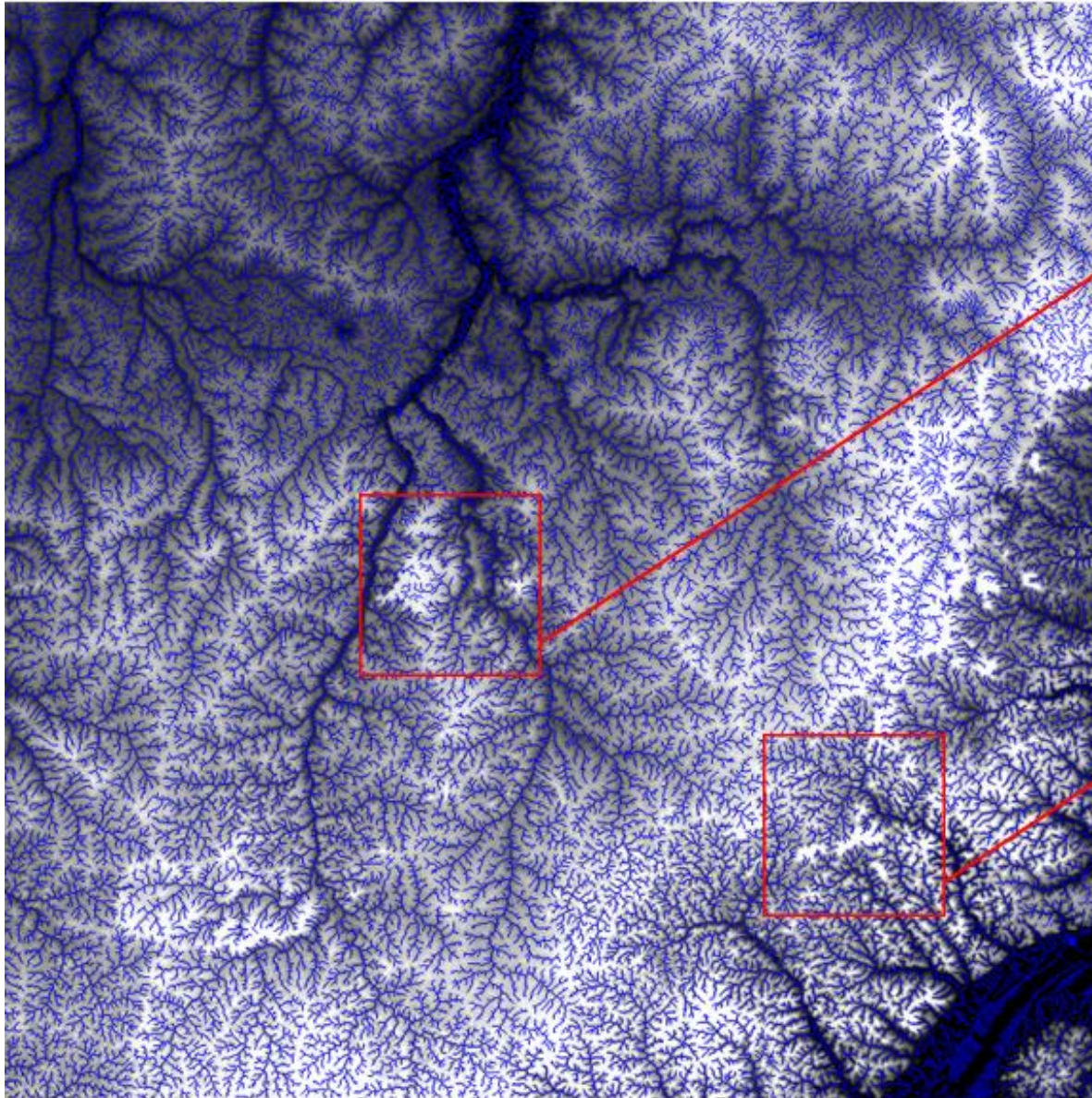
Região com baixa  
densidade de  
drenagem

Região com alta  
densidade de  
drenagem

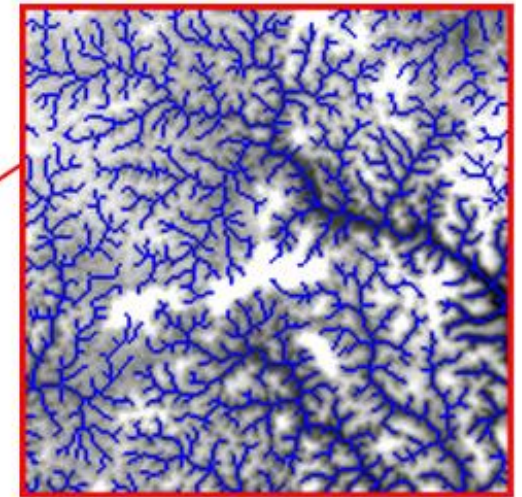
Qual limiar escolher?



# Utilizando um limiar baixo...



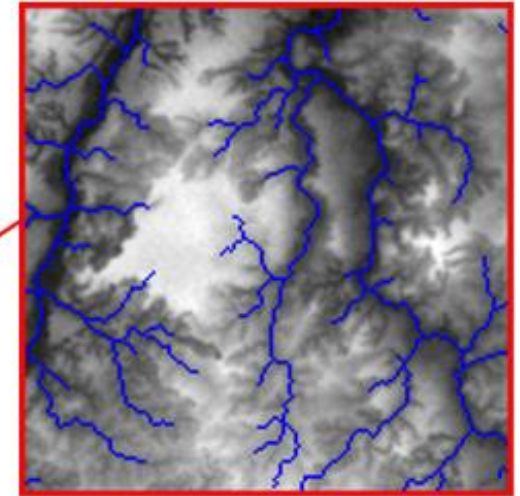
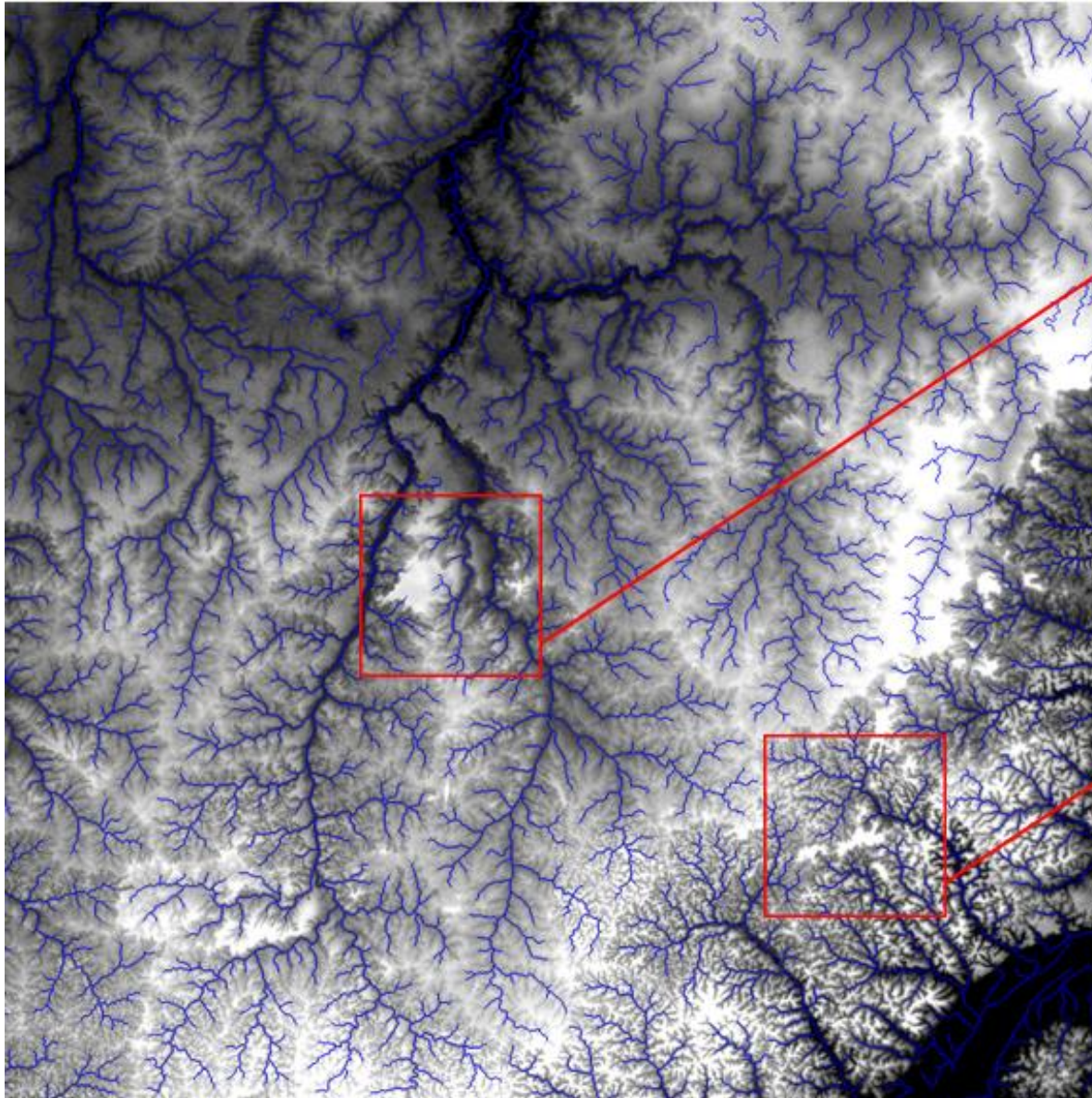
**CRIAÇÃO DE FEIÇÕES  
INEXISTENTES**



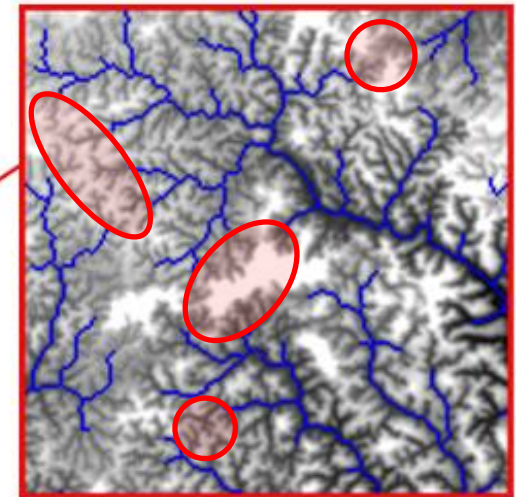
**CLASSIFICAÇÃO  
ADEQUADA**



# Utilizando um limiar alto...

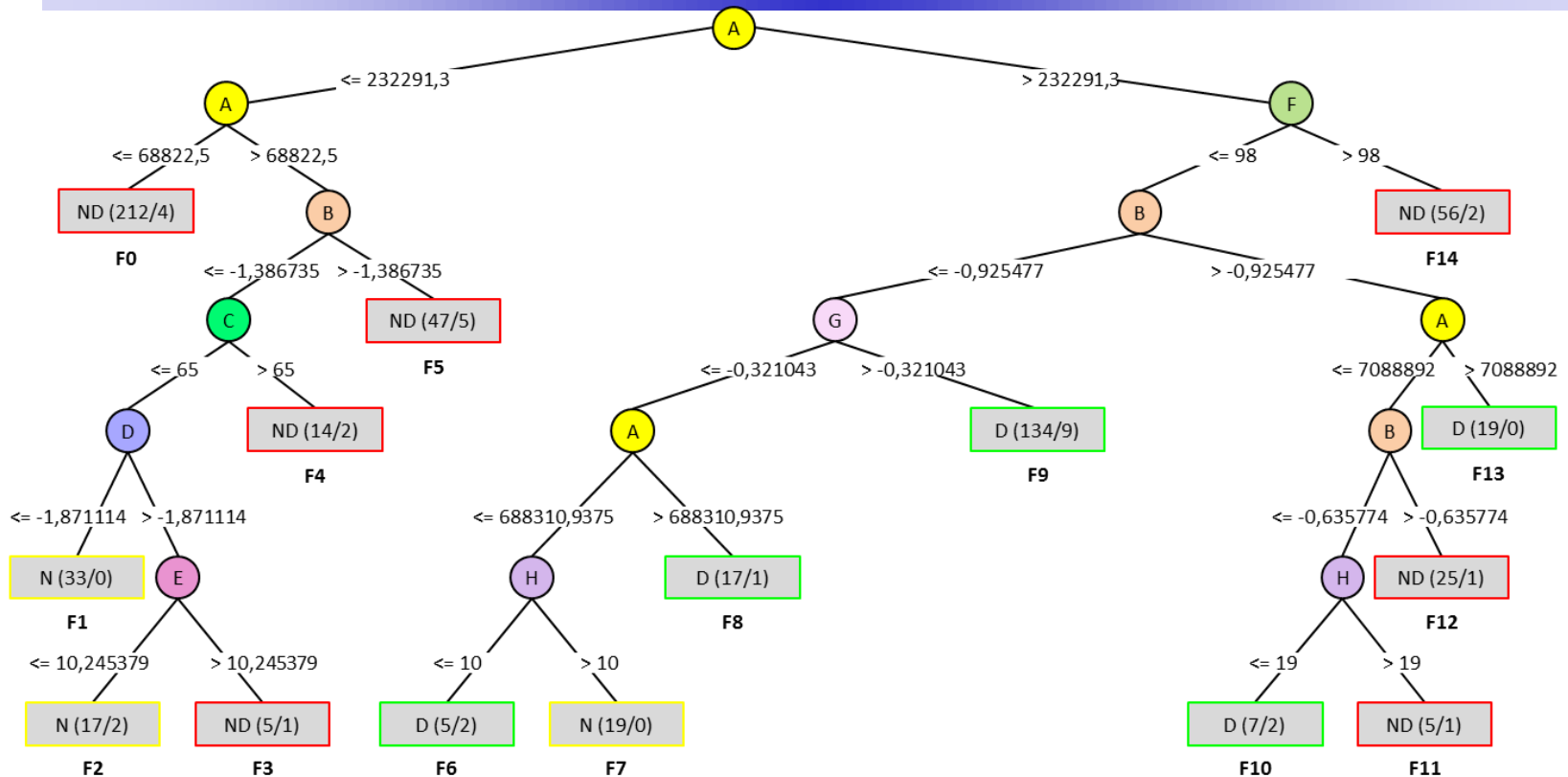


**CLASSIFICAÇÃO  
ADEQUADA**



**SEM A CLASSIFICAÇÃO DAS  
EXTREMIDADES**

# Método baseado em Múltiplos Atributos

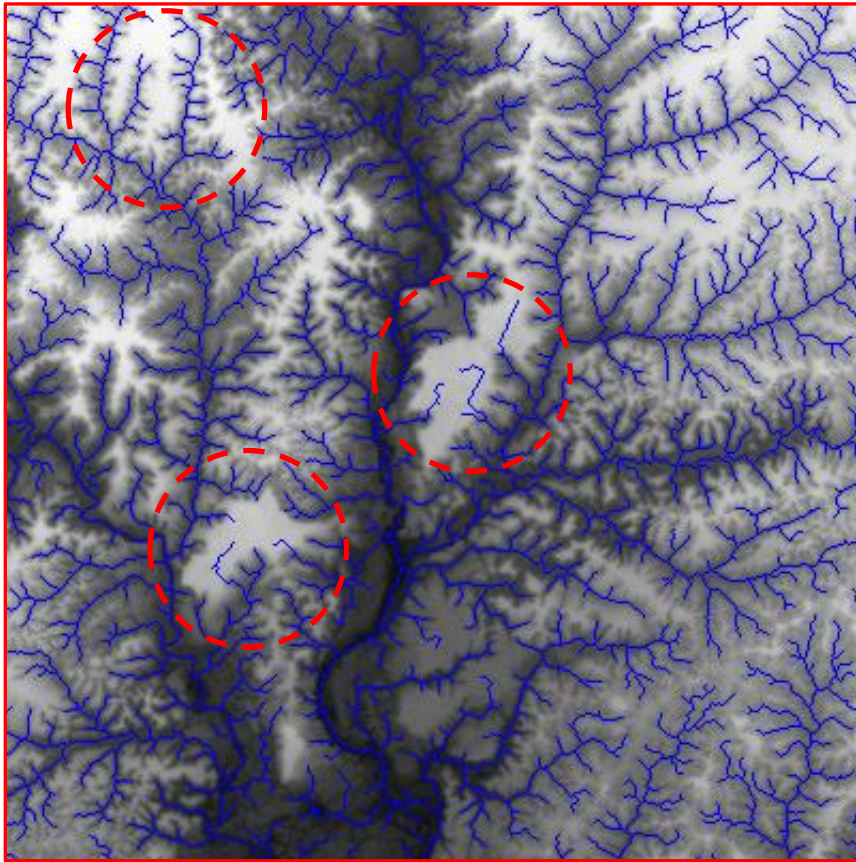


## LEGENDA

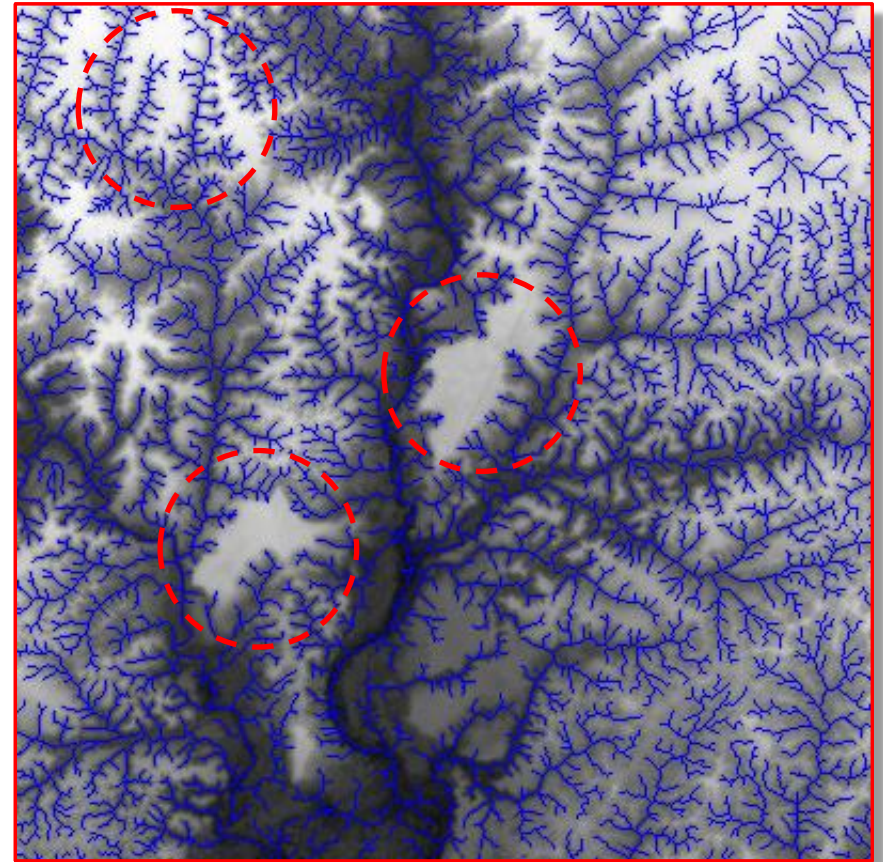
<b>A</b> Área de Contribuição	<b>C</b> Desnível (16 vizinhos à jusante)	<b>E</b> Declividade	<b>G</b> Curvatura Máxima
<b>B</b> Curvatura Mínima	<b>D</b> Curvatura Horizontal	<b>F</b> Desnível (64 vizinhos à jusante)	<b>H</b> HAND (ordstrmax 5)
<b>ND</b> Não Drenagem	<b>N</b> Nascente	<b>D</b> Drenagem	



# Comparação dos Resultados



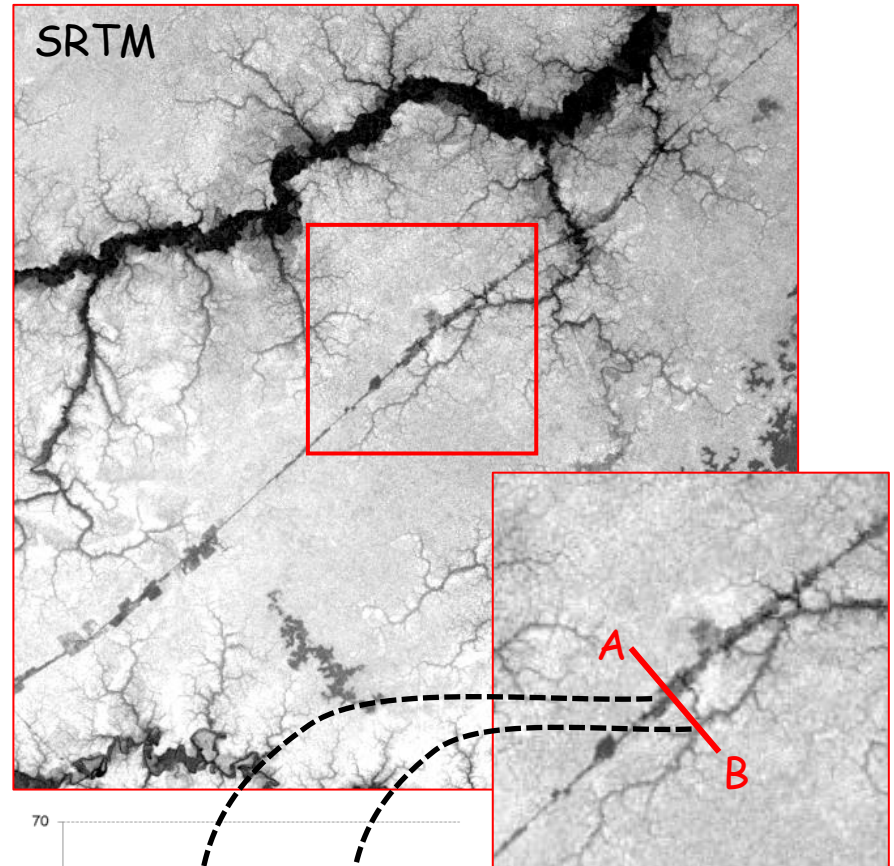
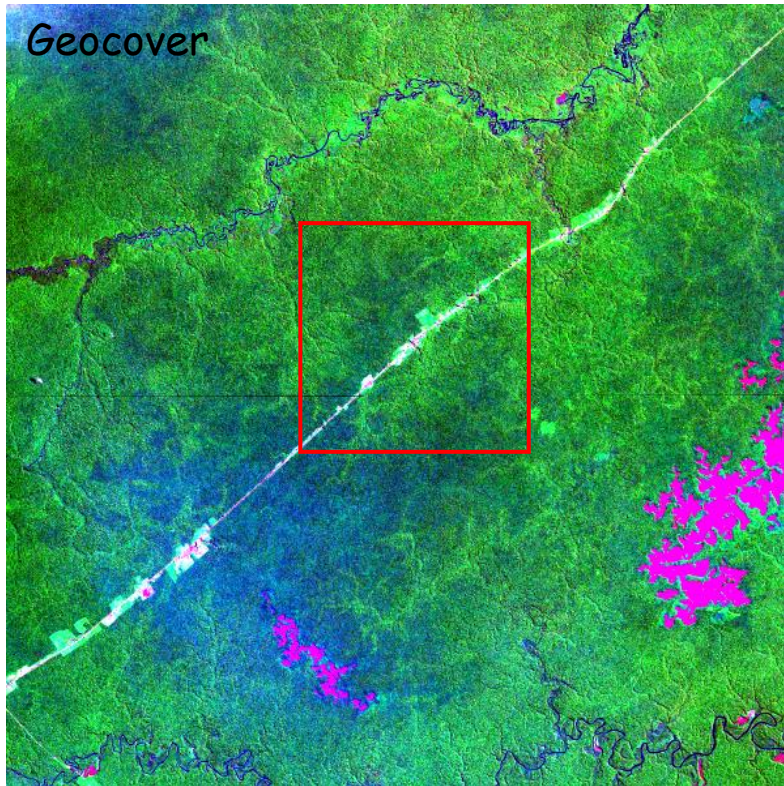
Método Clássico (baseado na Área de Contribuição)



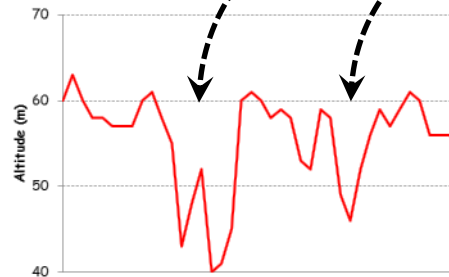
Método baseado em Múltiplos Atributos



# Artefatos no SRTM



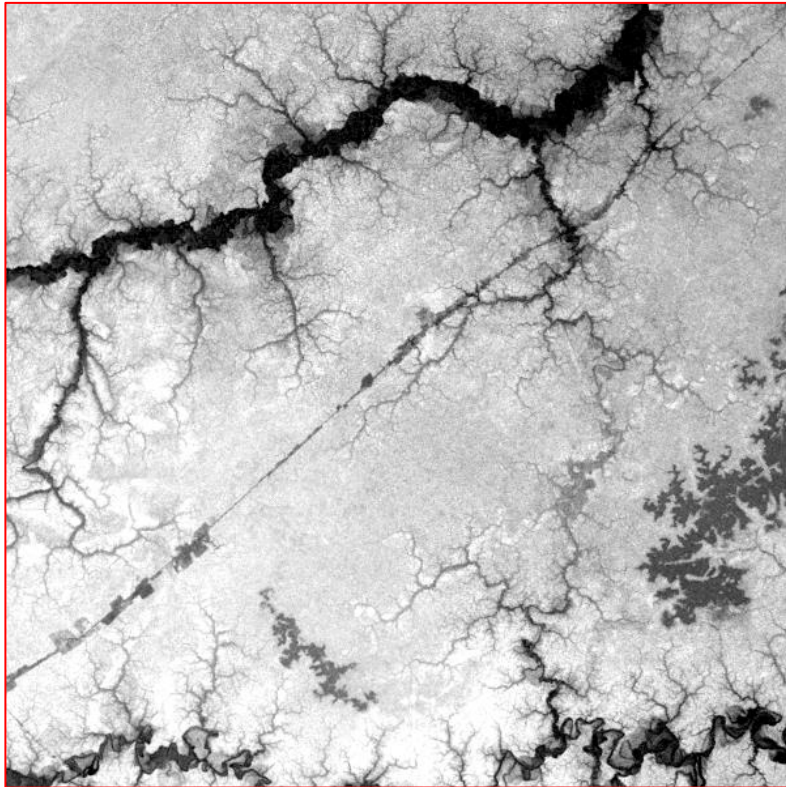
BR319 - Interflúvio Purus/Madeira



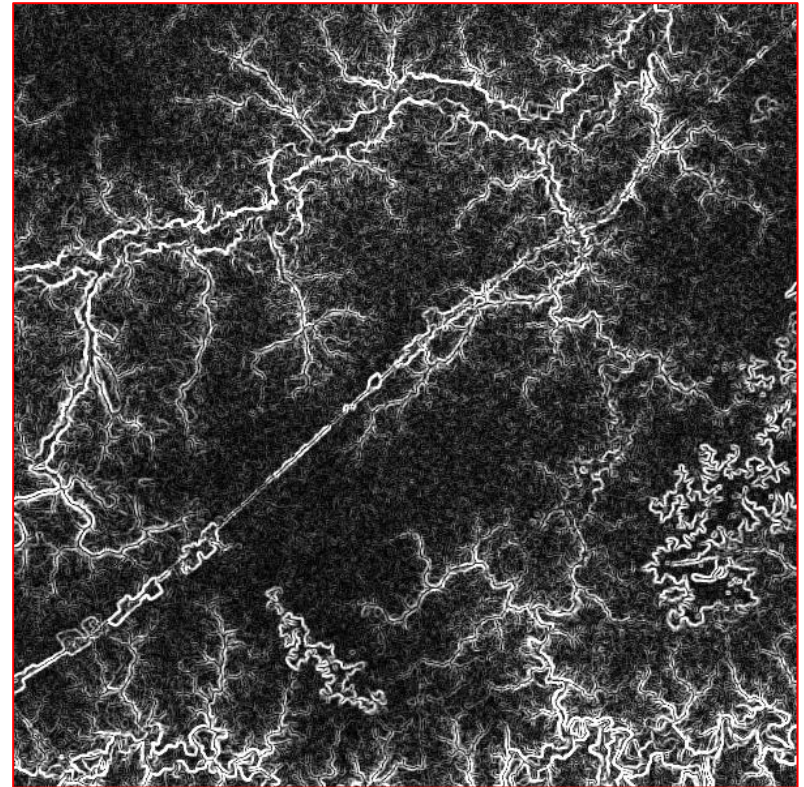


# Artefatos no SRTM

---



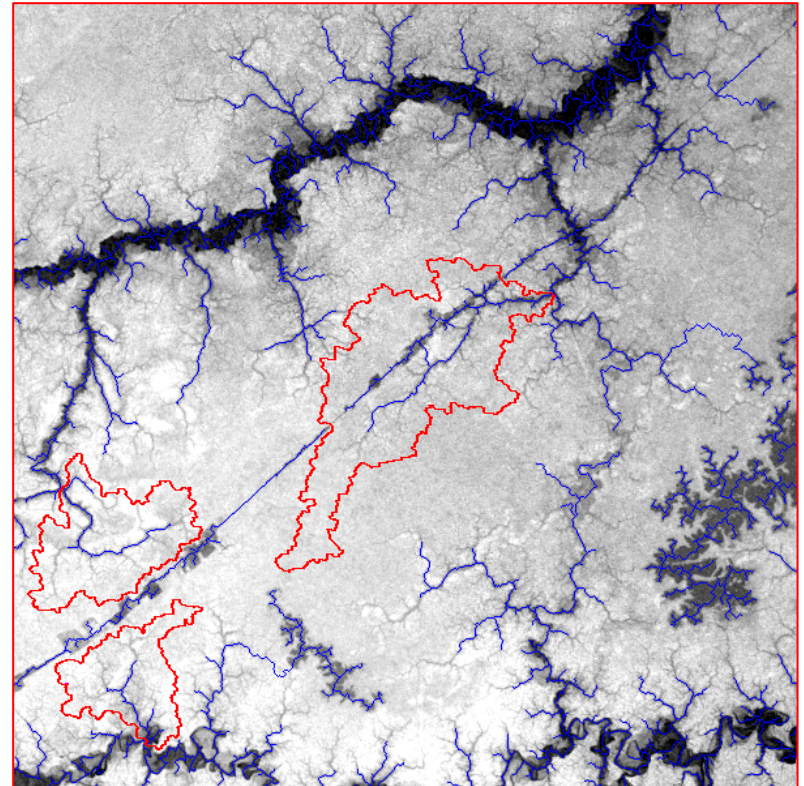
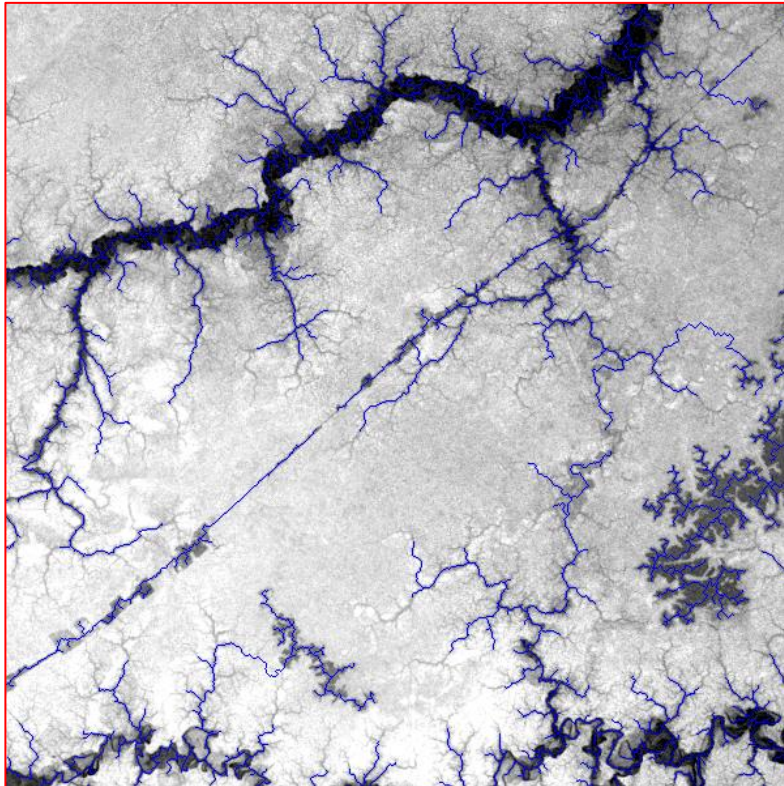
SRTM original



Declividade

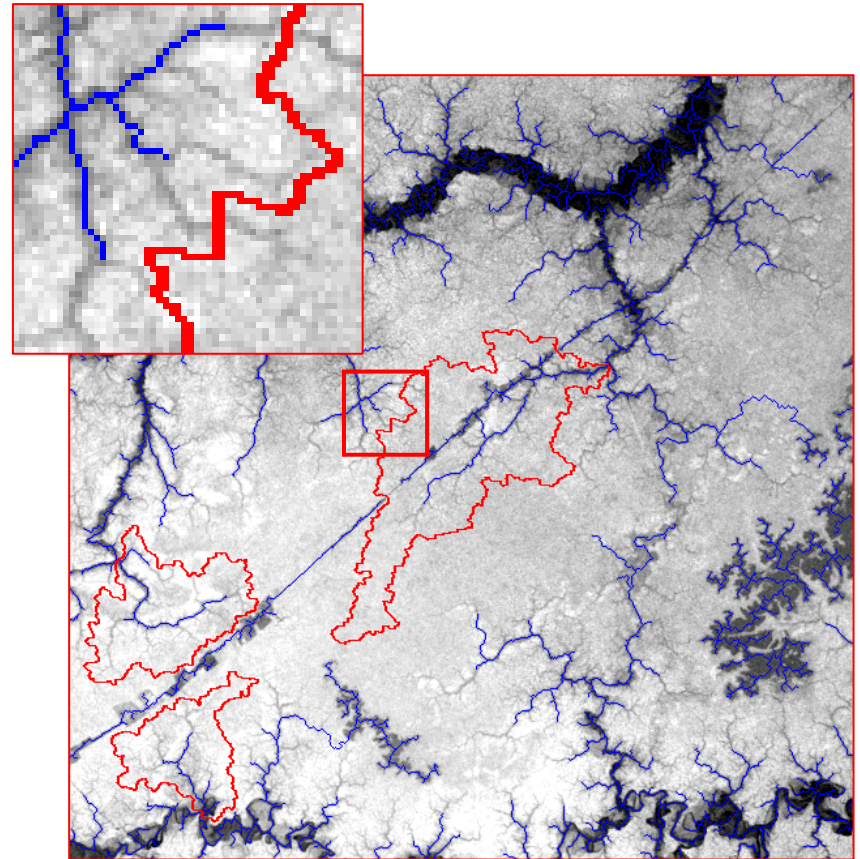
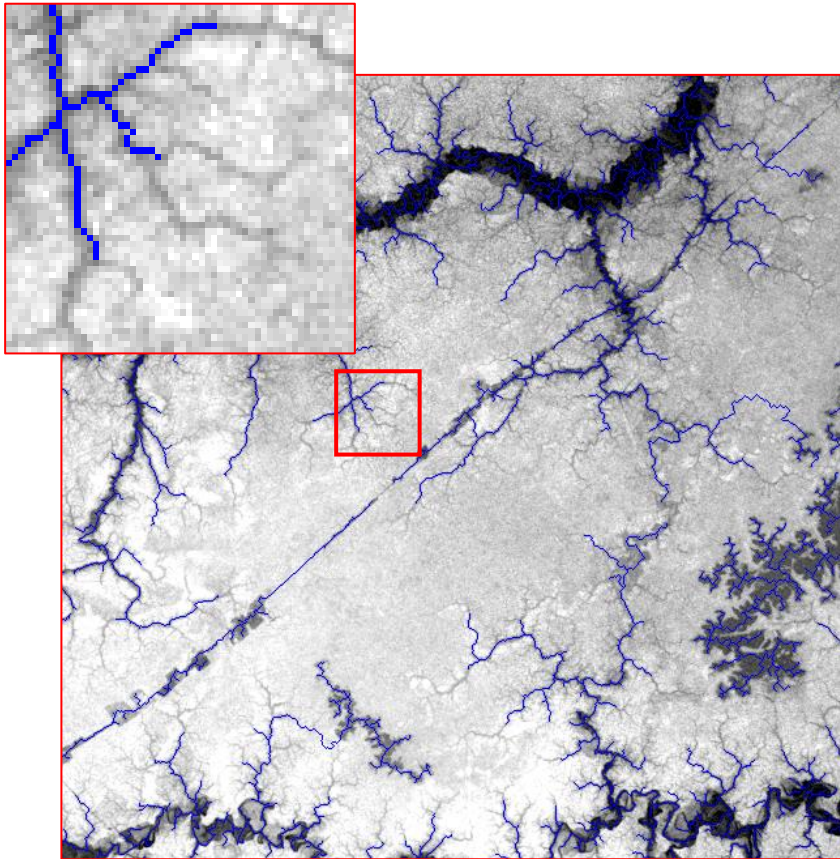
# Drenagem e Bacia Hidrográfica

---

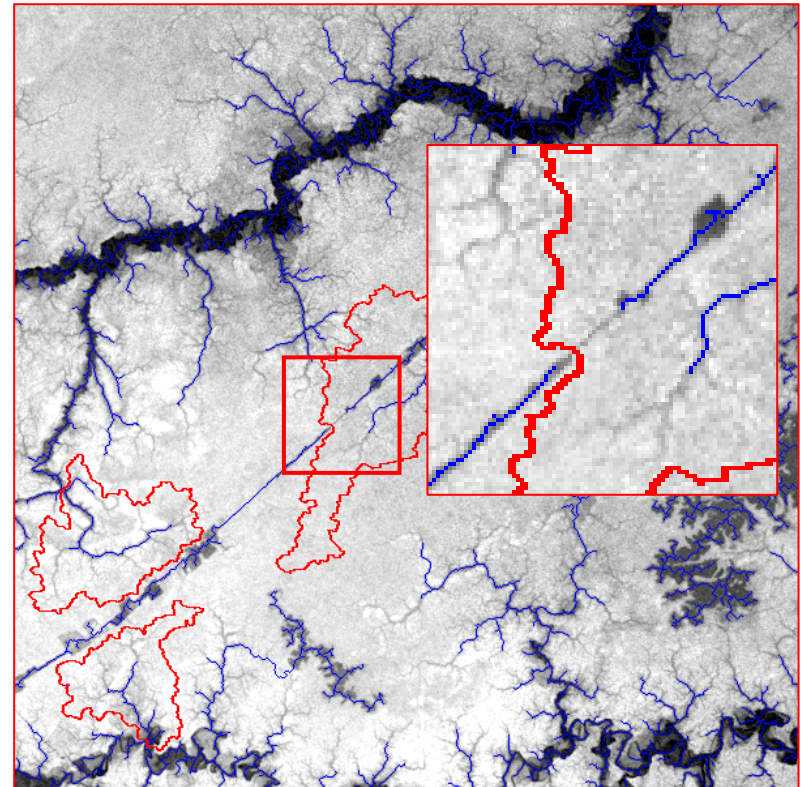
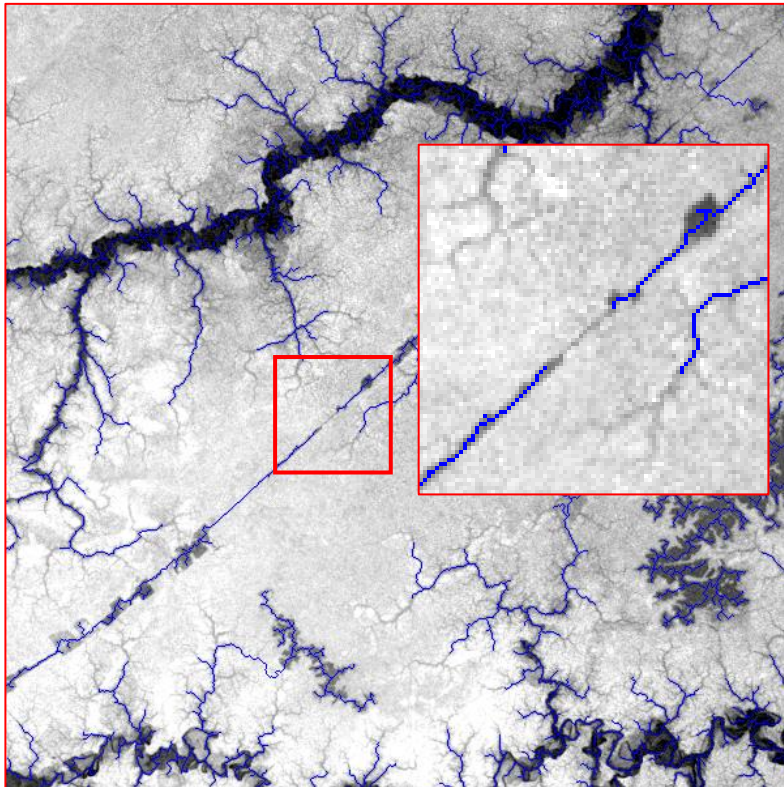




# Drenagem e Bacia Hidrográfica

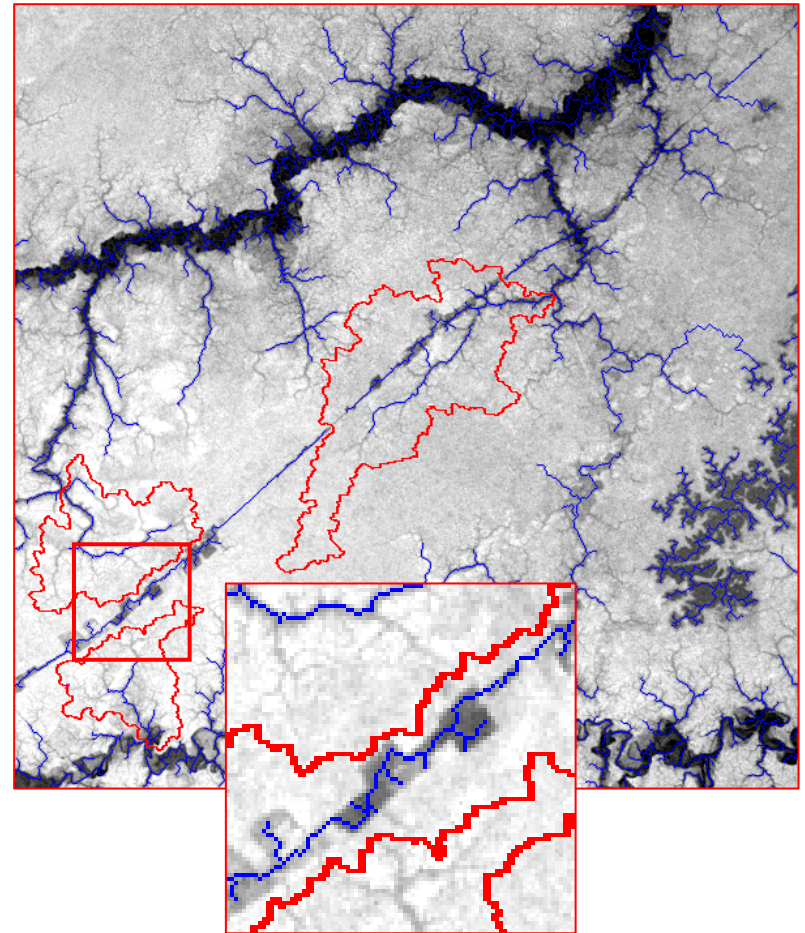
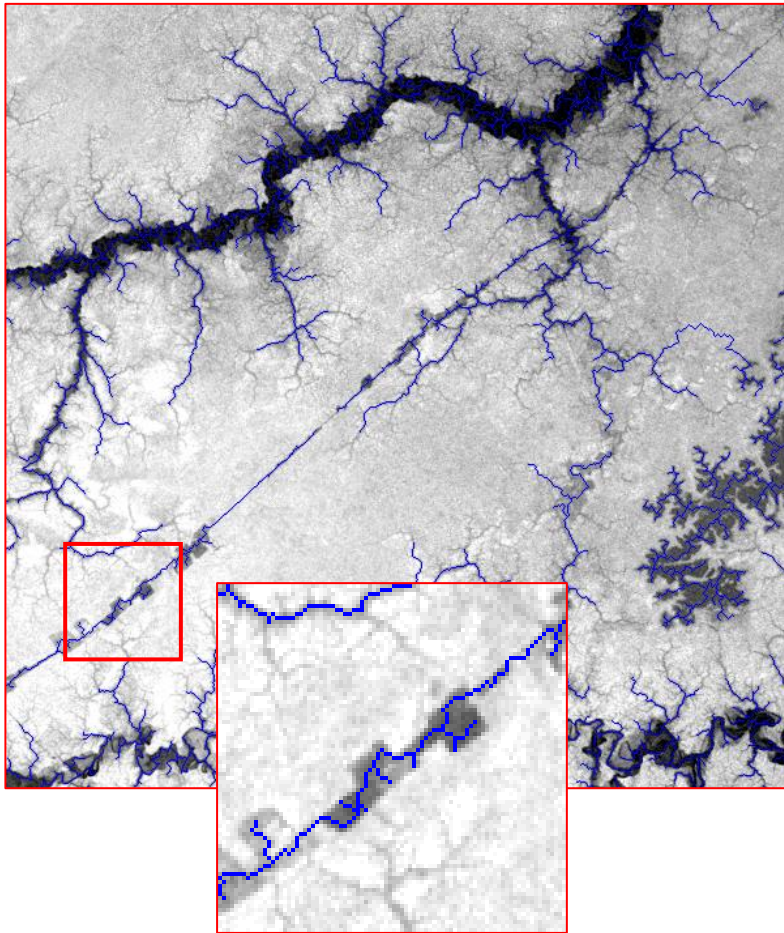


# Drenagem e Bacia Hidrográfica

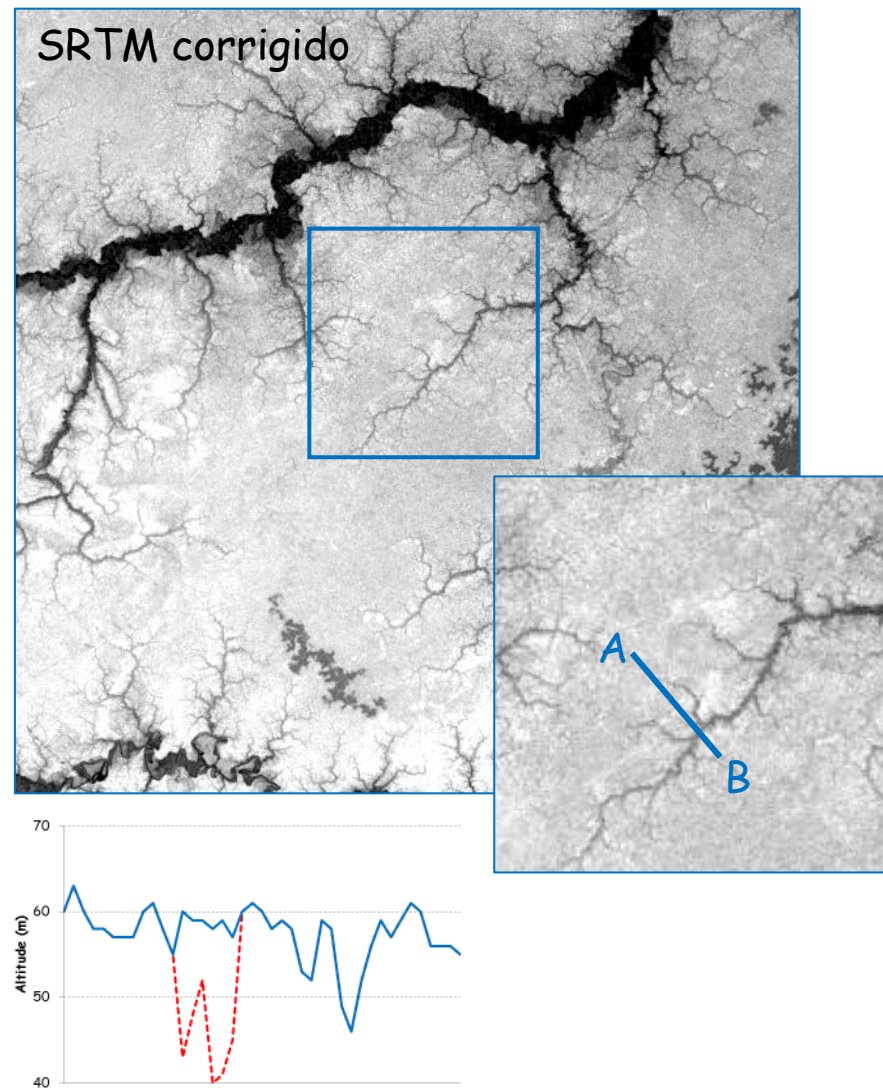
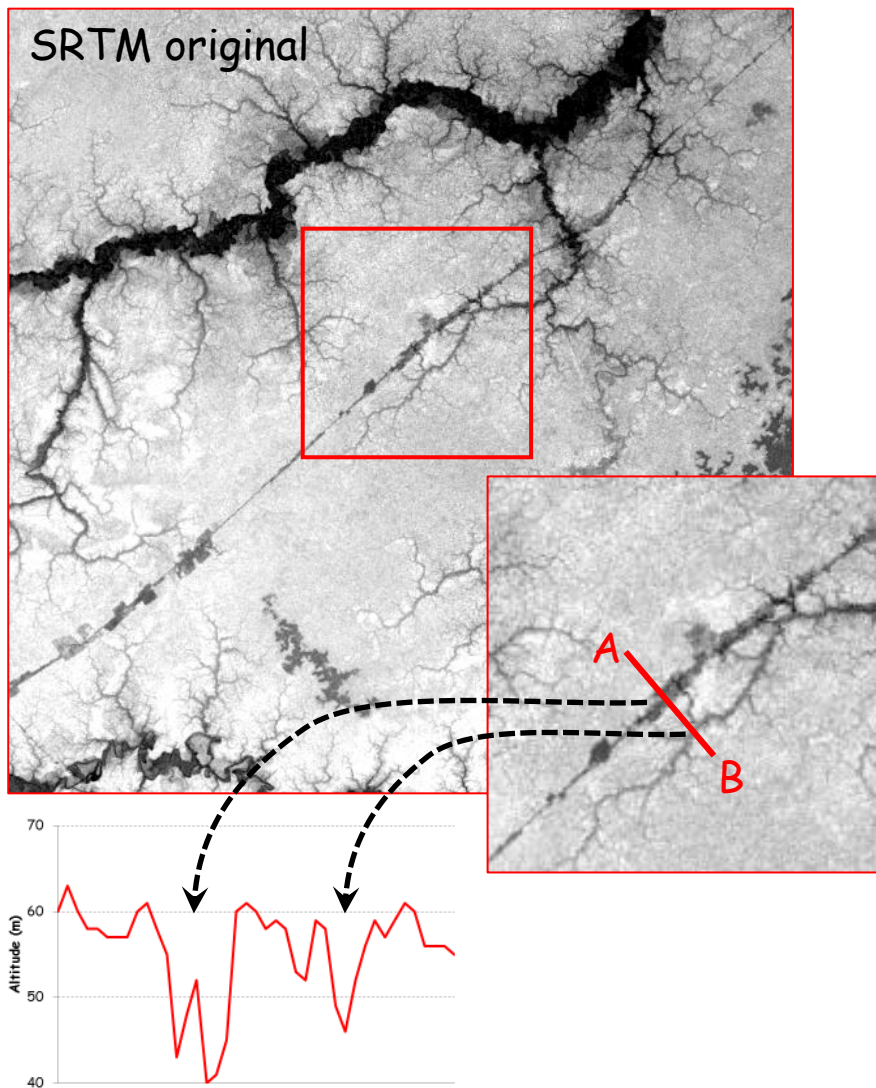




# Drenagem e Bacia Hidrográfica



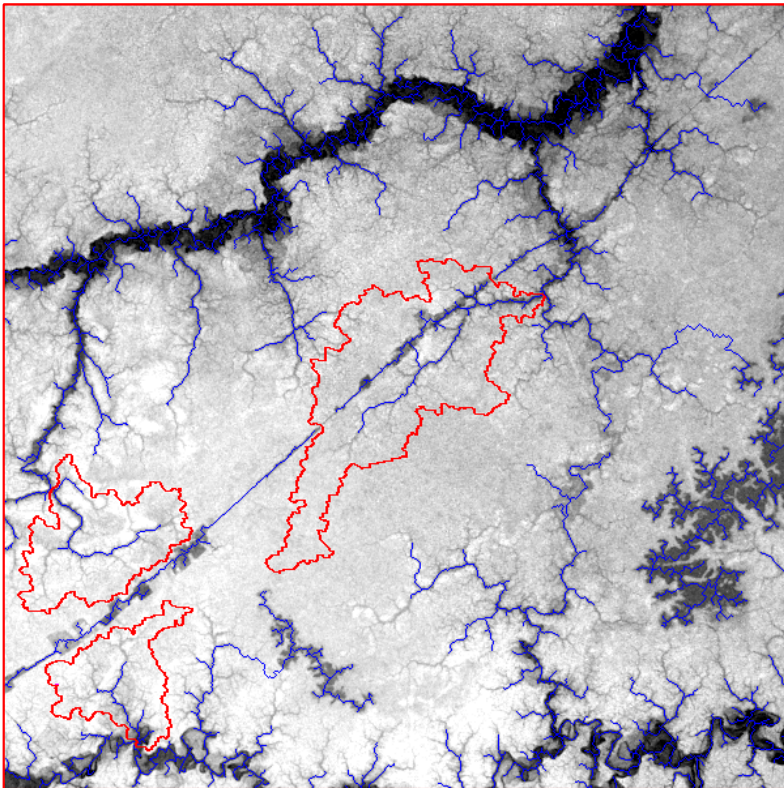
# Efeito da Correção



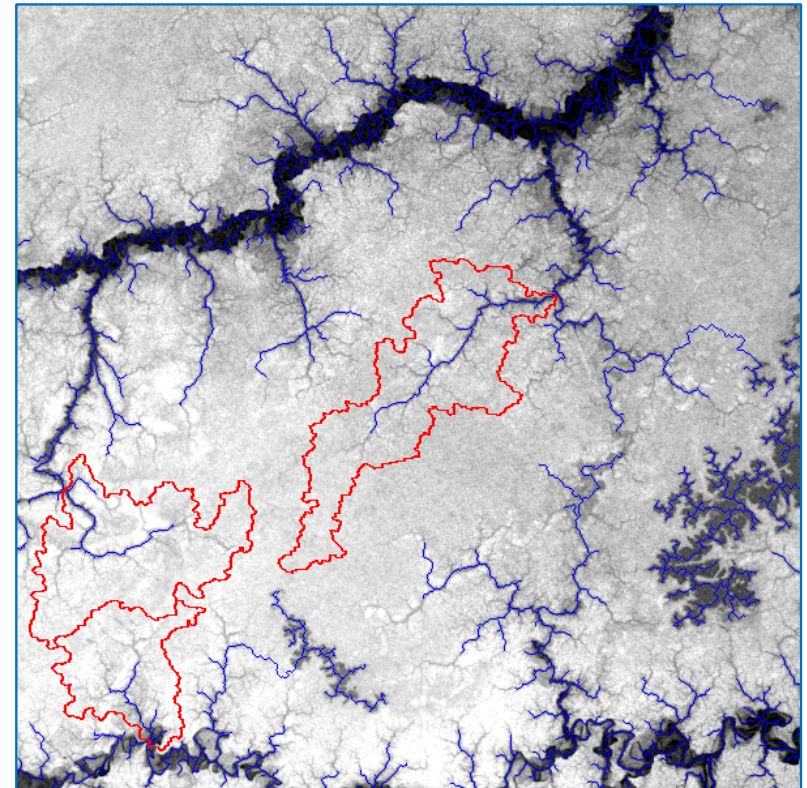


# Drenagem e Bacia Hidrográfica

---



SRTM original



SRTM corrigido



# Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")

---

## Clássicas

- declividade (*slope*)  
relaciona-se com a velocidade de escoamento  
quanto maior o declive, maior a velocidade de escoamento (maior erosão, solos mais rasos, menor disponibilidade hídrica)
- direção de vertente (aspecto ou exposição)  
relaciona-se com a exposição a luminosidade, vento e chuva
- curvatura vertical (*profile curvature*) - forma da vertente (côncava ou convexa )  
terrenos côncavos estão associados às bases de elevações, onde há a desaceleração dos escoamentos e portanto são áreas de deposição  
terrenos convexos são mais expostos e secos
- curvatura horizontal (*plan curvature*) - forma do terreno (convergente ou divergente)  
regiões convergentes formam caminhos preferenciais para a água ("grotas")

# Métricas Topográficas (“Hidrológicas”)

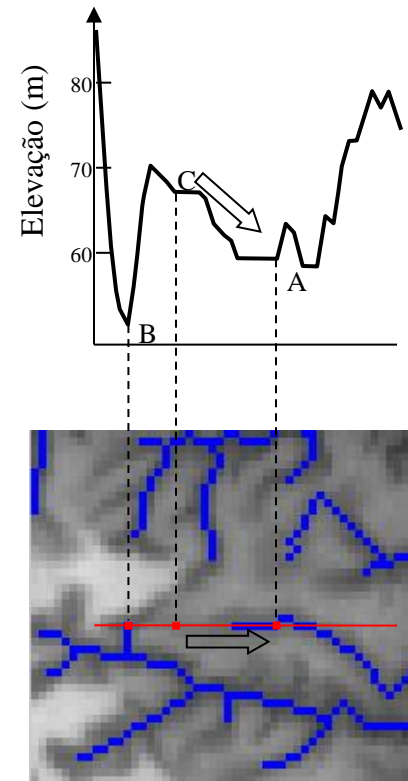
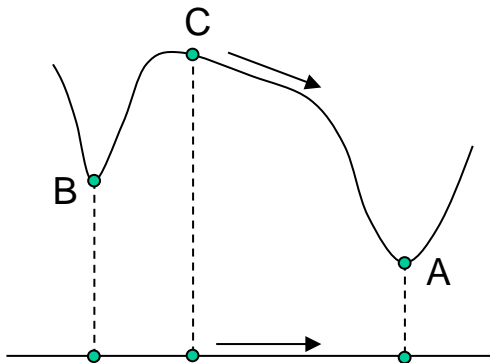
---

## Considera os caminhos da água

- área de contribuição
  - indica área de captação/acúmulo de água
- índice topográfico
  - identifica áreas com similaridade hidrológica
- distâncias vertical, horizontal e ao longo da superfície a corpos d'água
  - relacionada com a disponibilidade hídrica do solo,
  - com o tempo de residência da água no solo, e
  - com a velocidade de escoamento superficial
- comprimento de rampa
  - utilizada na equação universal de perda de solos

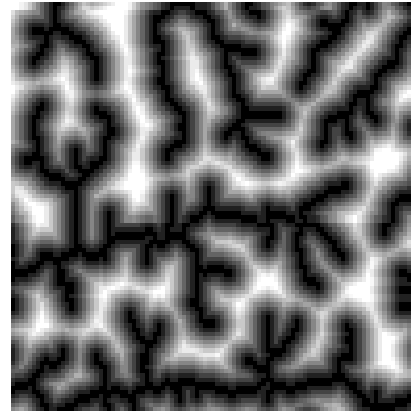
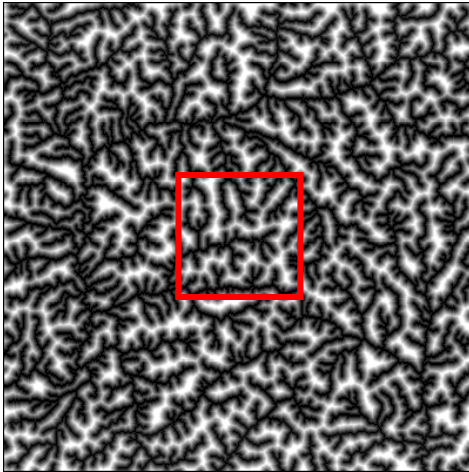
# Distâncias Horizontal e Vertical

Distância euclidiana (vizinho mais próximo) ou seguindo a direção de escoamento?

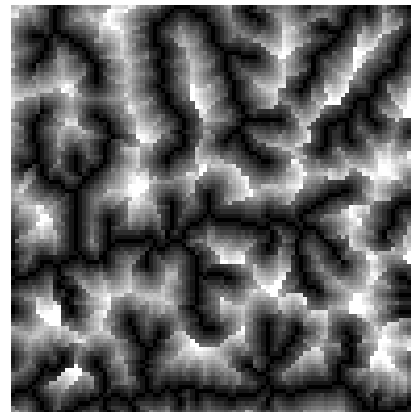
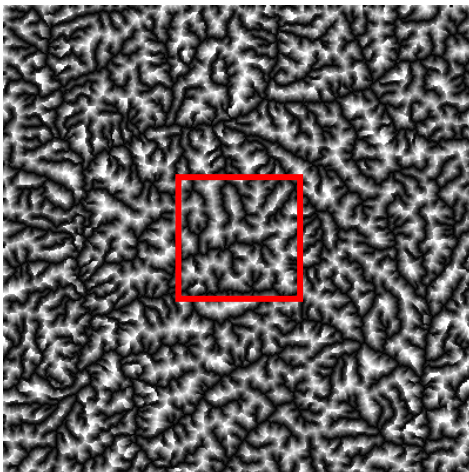


# Distância Horizontal à Drenagem mais Próxima

---



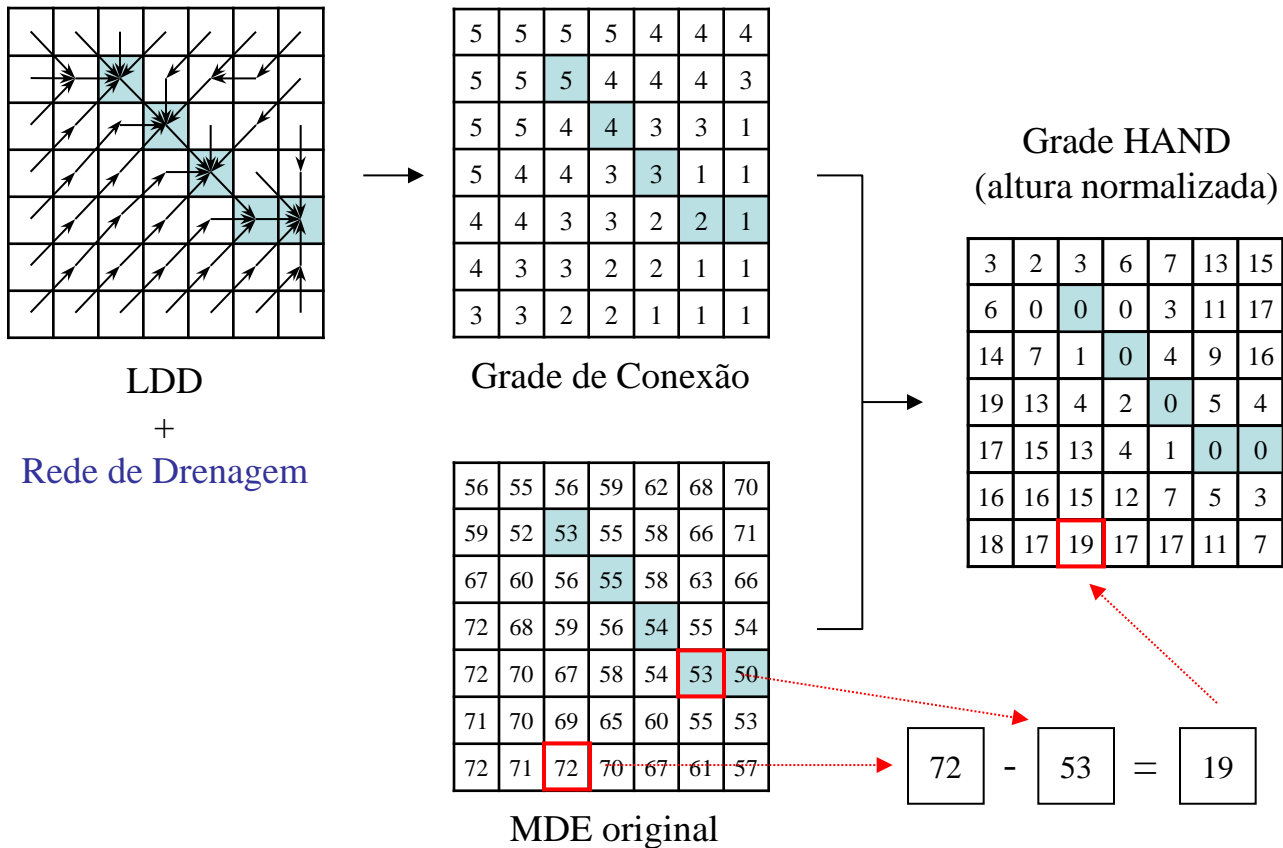
Distância Euclidiana  
(vizinho mais próximo)



Distância seguindo  
a direção de escoamento

# Distância Vertical à Drenagem mais Próxima

Algoritmo **HAND** (*Height Above to the Nearest Drainage*)



# MDE x HAND

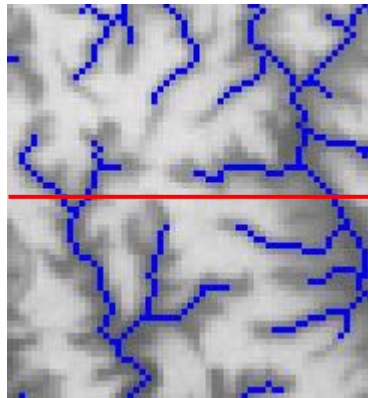
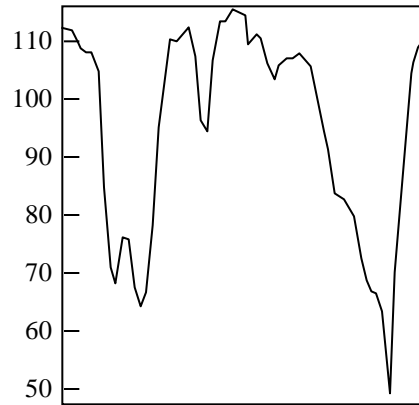


MDE SRTM

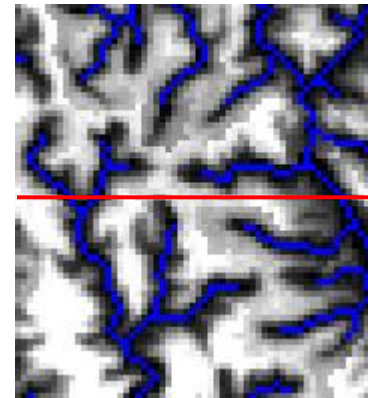
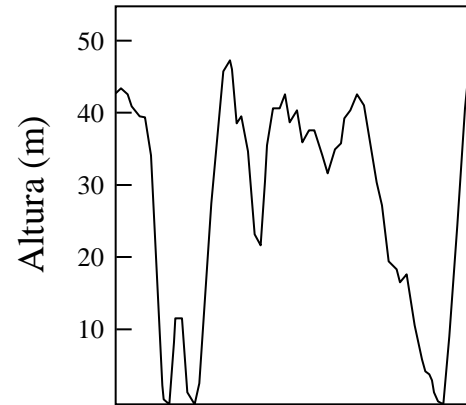


HAND

# Altimetria x HAND

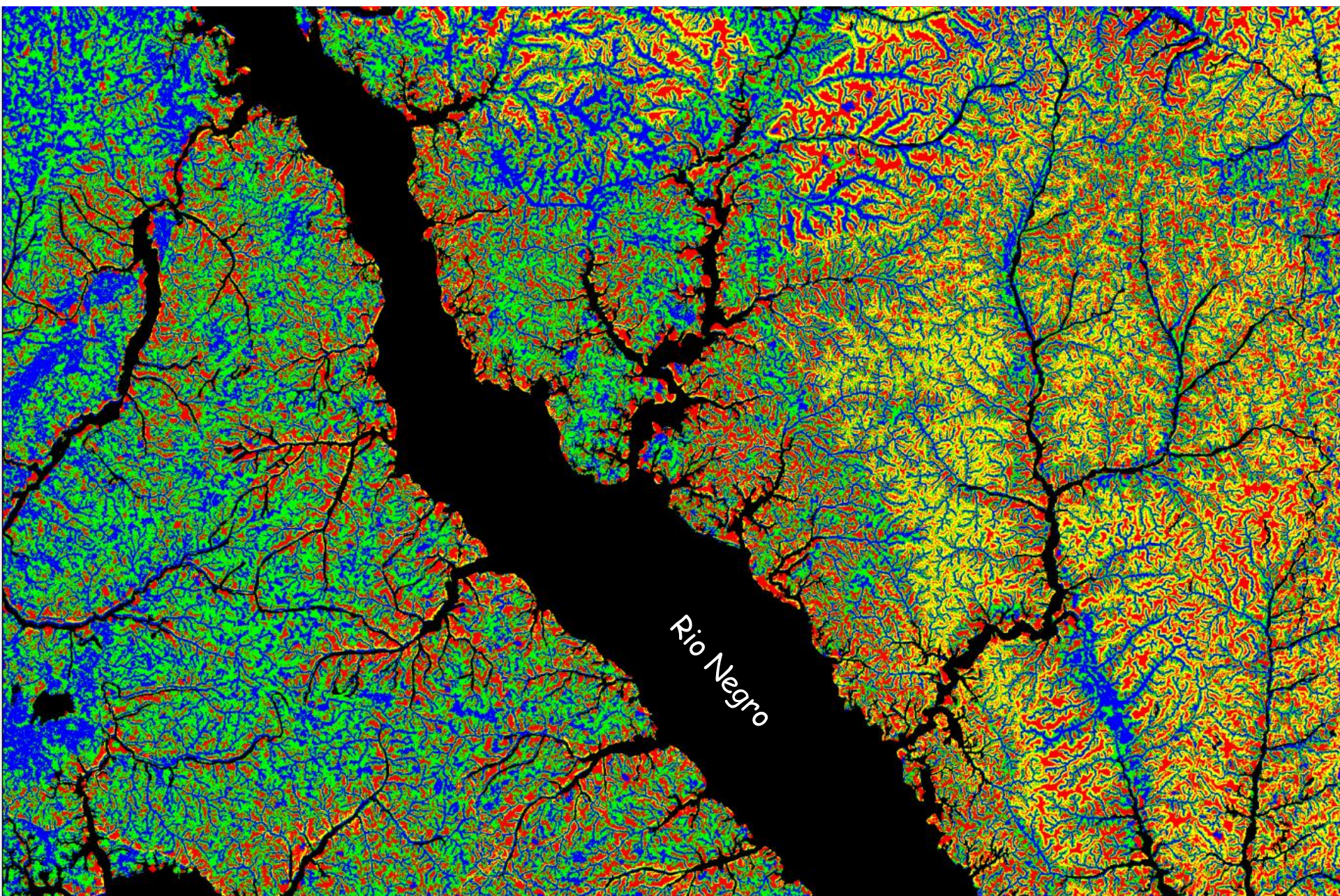


MDE



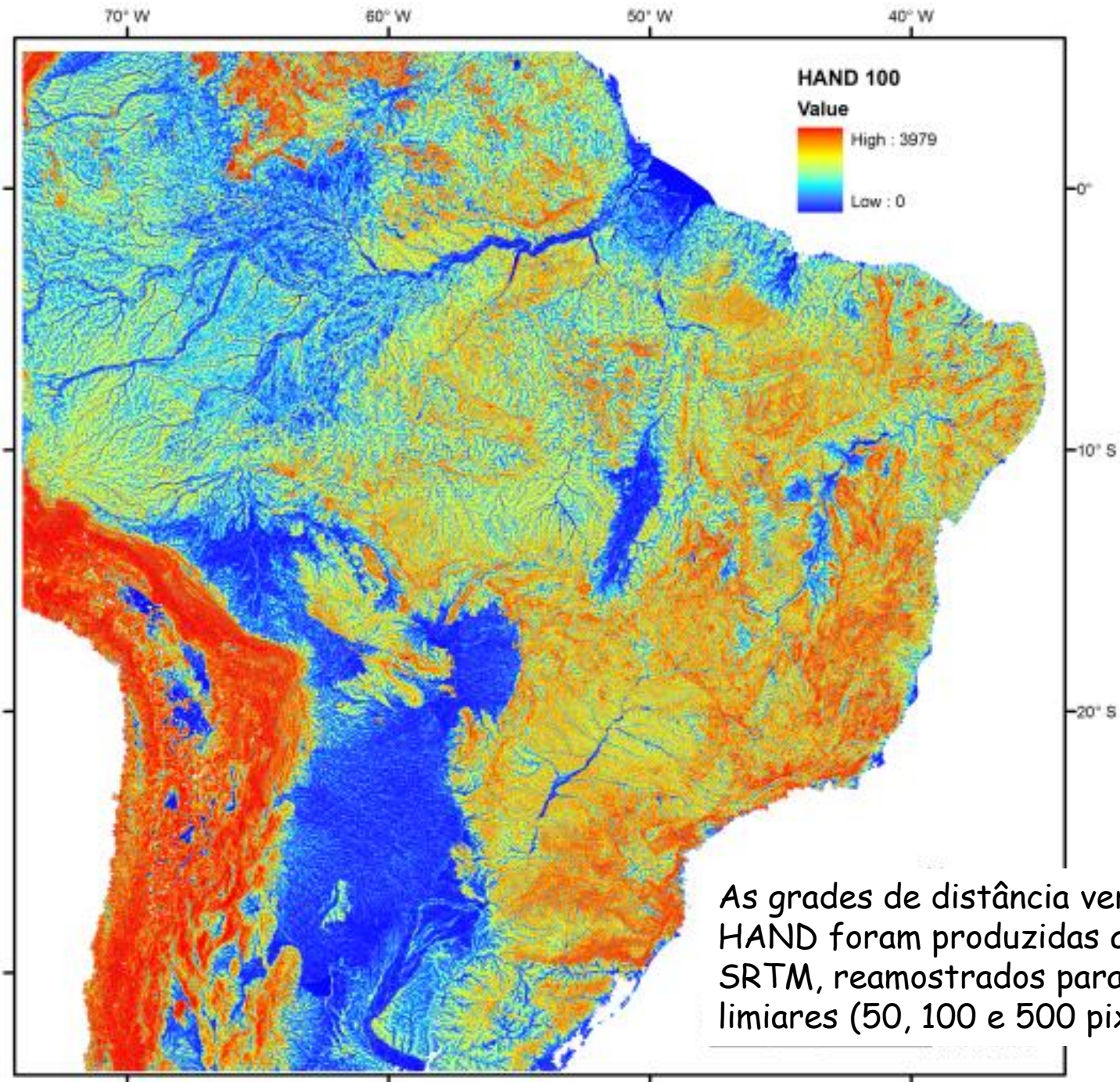
HAND





HAND 4 classes (declividade)

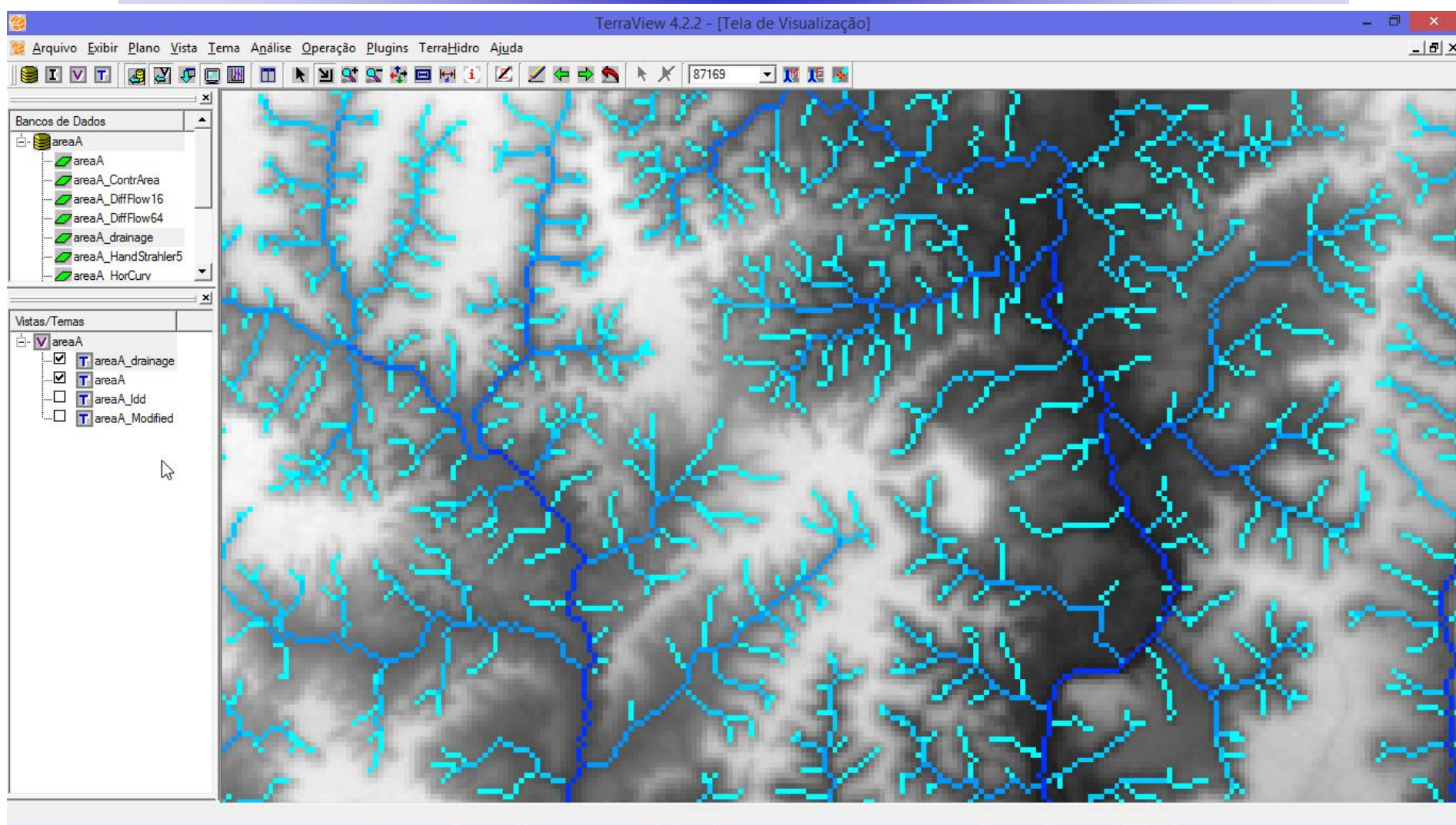




As grades de distância vertical geradas pelo HAND foram produzidas a partir dos dados SRTM, reamostrados para 500m, usando três limiares (50, 100 e 500 pixels)



# TerraHidro



# Referências

- BANON, L. C. Árvores de decisão aplicadas à extração automática de redes de drenagem. 2013. 111 p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - INPE)
- BANON, L. C.; SANTOS, R. D. C.; VIJAYKUMAR, N. L.; RENNÓ, C. D. Definição de critérios a partir da mineração de dados para a extração automática de redes de drenagem. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013.
- FELGUEIRAS, C. M. B. Geoprocessamento para projetos ambientais. 1998. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/~gilberto/>>. Acesso em: 02 abr. 2013.
- NAMIKAWA, L. M. Um método de ajuste de superfícies para grades triangulares considerando a quebra de continuidade das linhas características. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8. (SBSR), 1996, Salvador. Anais... São José dos Campos: INPE, 1996. p. 717-724. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6191-PRE/2280). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.16.54>>. Acesso em: 12 abr. 2013.
- RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, p. 3469-3481, 2008. doi: <10.1016/j.rse.2008.03.018>.
- RENNÓ, C. D. Redução dos efeitos do desmatamento sobre modelo digital de elevação do SRTM usando imagem TM/LANDSAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7095-7102. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.15.22.13>>. Acesso em: 12 abr. 2013.
- SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, v. 107 (1-2), p. 1-32, 2002.
- WOOD, J. D. The geomorphological characterisation of digital elevation models. 1996. Thesis - University of Leicester, UK, 1996. Disponível em: <<http://www soi.city.ac.uk/~jwo/phd>>. Acesso em: 02 abr. 2013.



**Obrigado!**

**Camilo Daleles Rennó**  
Coordenação de Observação da Terra  
Divisão de Processamento de Imagens  
camilo@dpi.inpe.br  
<http://www.dpi.inpe.br/~camilo>

