
Processos Hidrológicos

CST 318 / SER 456

Tema 5 - Hidrologia de Vertentes e Escoamento Superficial
ANO 2017

Camilo Daleles Rennó
Laura De Simone Borma
<http://www.dpi.inpe.br/~camilo/prochidr/>

Níveis de Detalhamento

Escala Local (Pontual)

Interações entre a matriz de solo e os macroporos

Processos unidimensionais

Escala de Vertente

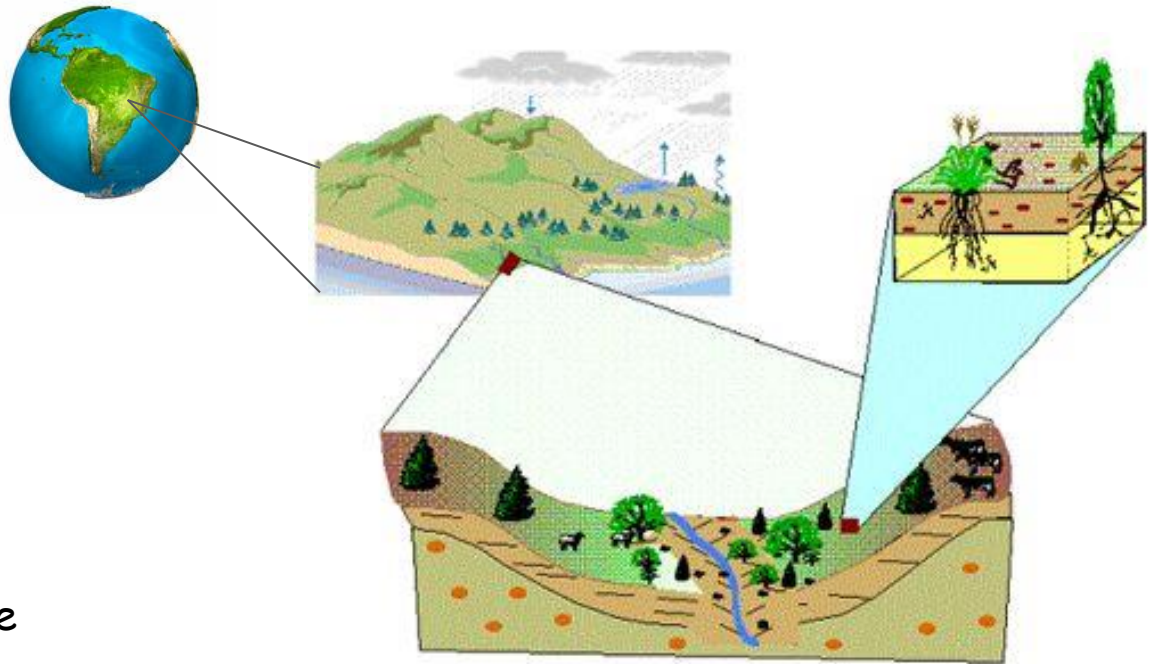
Mecanismos de geração de escoamento direto e de base

Processos bidimensionais

Escala de Bacia Hidrográfica

Variação espacial e temporal de processos - recarga

Processos tridimensionais



Hidrologia de vertente

Principais tópicos:

- Definir escoamento superficial
- (re) Apresentar os mecanismos de geração de escoamento
- Identificar os caminhos de fluxo - determinam o transporte de água e solutos através do solo



KIRKBY, M.J. (Ed.), 1978. *Hillslope Hydrology*

É importante entender de que maneira a chuva é subdividida nos diversos compartimentos da fase terrestre do ciclo hidrológico: água no solo (umidade do solo), escoamento superficial, escoamento subsuperficial e água subterrânea

Ênfase maior é dada aos mecanismos de escoamento da água de chuva e às trajetórias de fluxo, que determinarão a velocidade de escoamento da água na vertente e o potencial de lixiviação/carreamento de partículas sólidas (erosão) e substâncias químicas (empobrecimento ou contaminação do solo)

É na escala de vertente que são analisados processos tais como erosões, escorregamentos de encosta e contaminação do solo e da água superficial e subterrânea

Processos envolvidos

Entrada

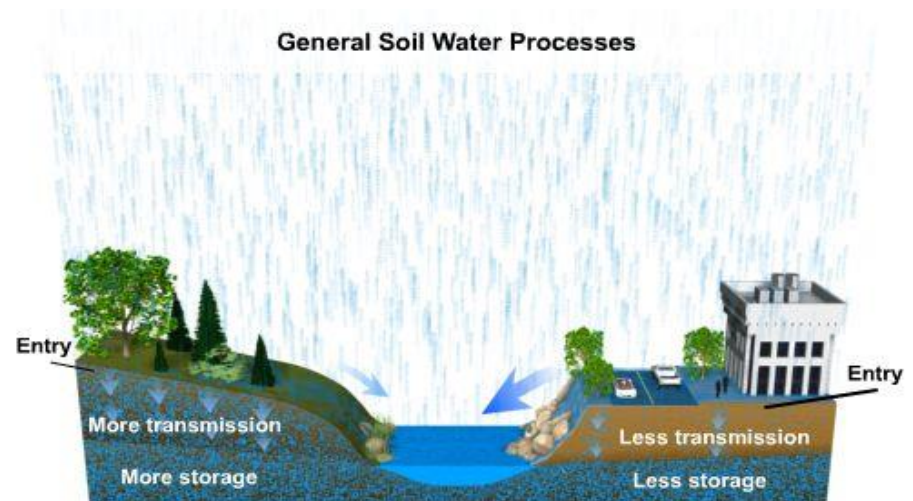
a infiltração ocorre na interface solo/ atmosfera

Transmissão

percolação que ocorre através de toda a profundidade da camada

Armazenamento

ocorre ao longo de todo o perfil de solo e se manifesta sob a forma de aumento da umidade do solo e elevação do nível do lençol freático



©The COMET Program

Menor infiltração → Maior escoamento superficial

Termos e conceitos

Infiltração

entrada de água no solo

Percolação

fluxo vertical descendente da água

Escoamento superficial (*surface runoff*)

fluxo que ocorre sobre o solo

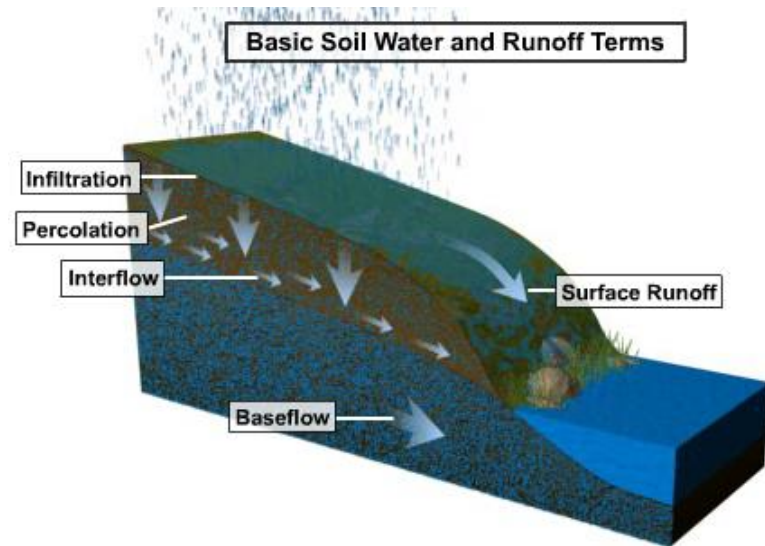
Escoamento subsuperficial (*interflow*)

fluxo lateral que ocorre no interior do solo

Fluxo de base (*baseflow*)

fluxo lateral que ocorre na zona saturada

runoff

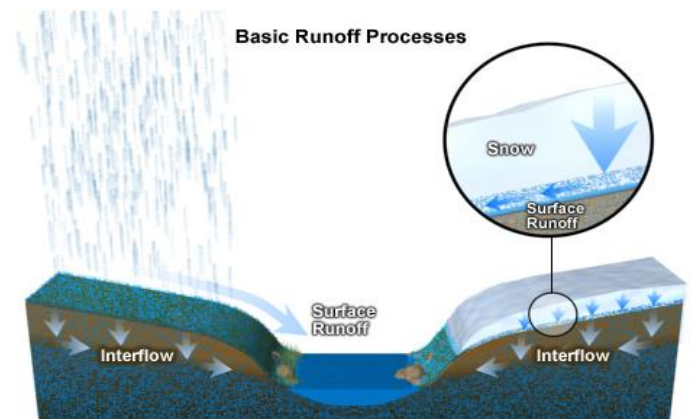


Runoff

escoamento superficial (*surface runoff*): porção de água de chuva, derretimento de neve e/ou água de irrigação que, ao invés de se infiltrar no solo, corre sobre a superfície do terreno em direção ao corpo hídrico mais próximo - fluxo rápido

escoamento subsuperficial (*interflow*): parcela de água de chuva que, assim como o fluxo de superfície, chega relativamente rápido ao corpo hídrico

escoamento superficial + subsuperficial: formam, juntos, o volume de água que os hidrólogos costumam chamar de *runoff*



Escoamento subsuperficial (*interflow*)

Fluxo relativamente rápido que ocorre abaixo da superfície em direção ao canal (cessa em menos de 72h)

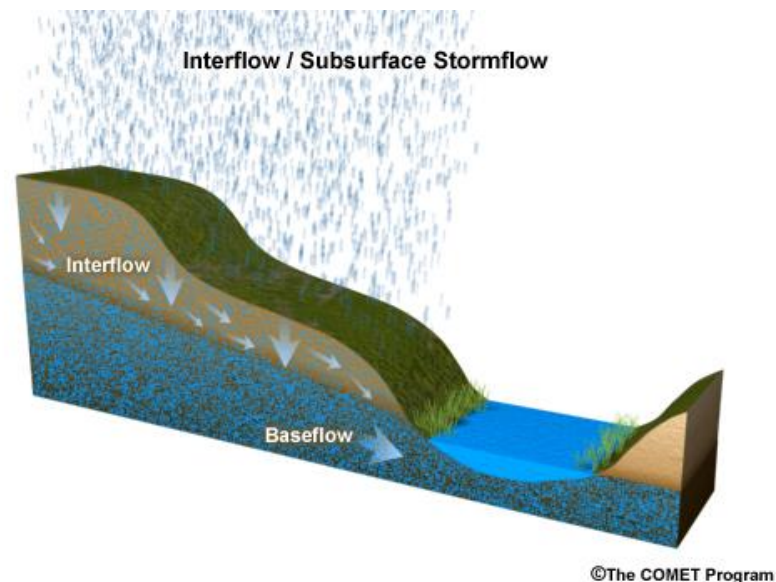
É mais rápido que o fluxo de base, porém mais lento que o fluxo de superfície (*runoff*)

Pode ser tão importante quanto o fluxo de superfície para efeito de previsão de cheias

Ocorre regiões com elevadas taxas de infiltração e terreno inclinado - processo dominante pelo qual os rios reagem rapidamente à chuva

Pode ocorrer em áreas úmidas com solos profundos ou solos finos com ocorrência de camada impermeável

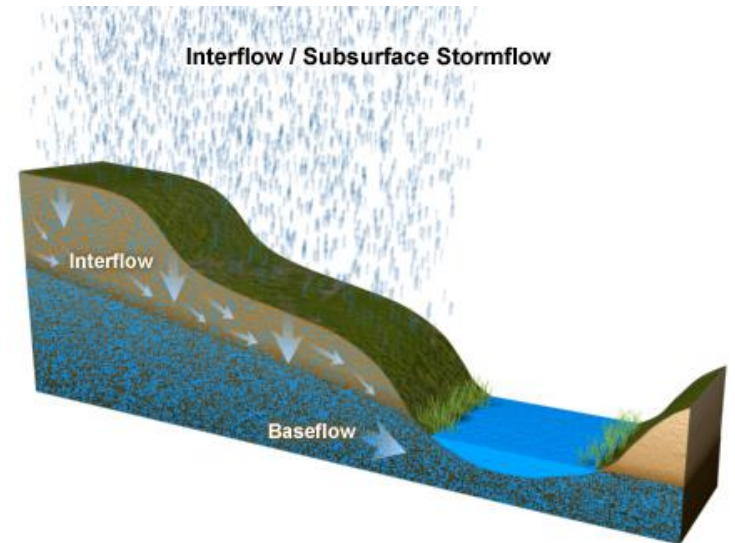
É o principal mecanismo de transporte de solutos (transporte de contaminantes, lixiviação de nutrientes) dentro do solo e de escorregamento de encostas



Escoamento de base

Responsável pelo suprimento de longo prazo da água, que mantém o nível de base dos rios durante longos períodos de seca.

É proveniente da água que percola para as camadas mais profundas

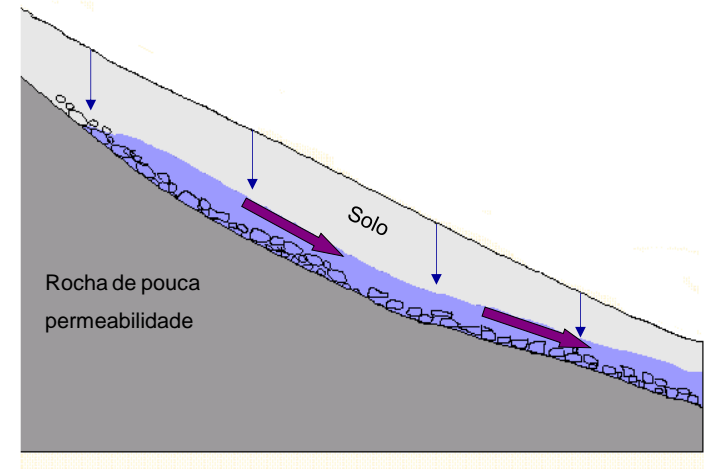


Camada impermeável

De modo geral, quanto mais profundo for o solo, menor o escoamento superficial

Solos pouco profundos saturam-se rapidamente, contribuindo para o escoamento superficial

A profundidade da camada impermeável (*bedrock*) pode variar amplamente em pequenas áreas: nos vales, a camada pode estar a vários metros de profundidade, ao passo que nas regiões mais declivosas pode estar a poucos centímetros de profundidade

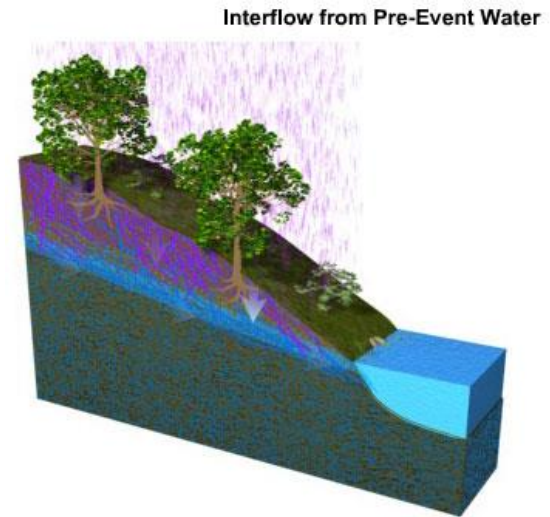


Água preexistente

Parte da água que flui por subsuperfície e que atinge o corpo hídrico não é necessariamente proveniente da chuva mais recente

Existe uma considerável quantidade de água existente dentro do solo (*pre event water*) que é deslocada quando uma certa quantidade de água nova se infiltra

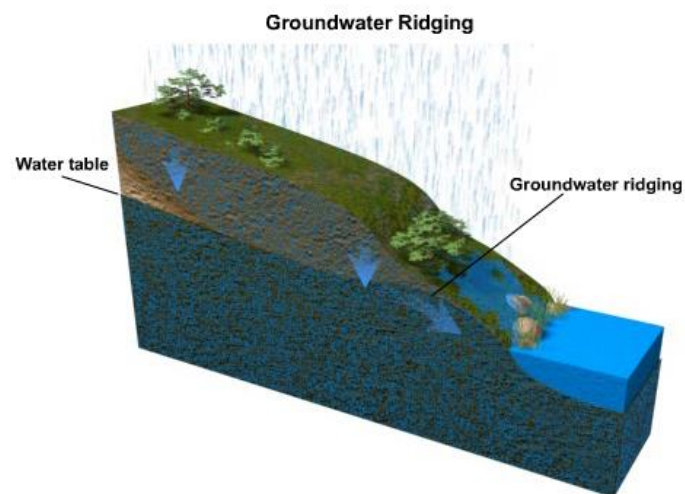
Em regiões de climas úmidos, estudos têm mostrado que a água preexistente frequentemente corresponde a uma parcela significativa na ascensão do nível dos rios



Ascensão do lençol freático

Em terrenos inclinados, a água infiltrada atinge o lençol freático nas regiões mais baixas mais rapidamente do que nas regiões mais elevadas

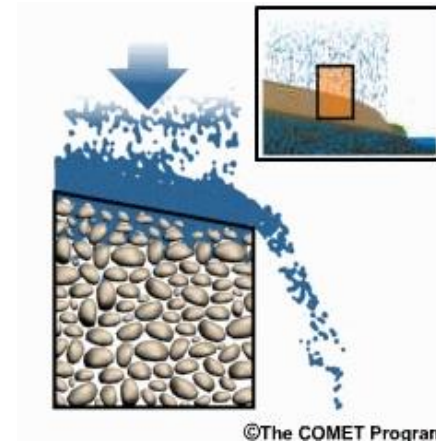
Isso cria um fluxo de subsuperfície que eventualmente aflora nas regiões próximas ao curso d'água, transformando-se em fluxo de superfície (mecanismo de Dunne)



Tipos de escoamento

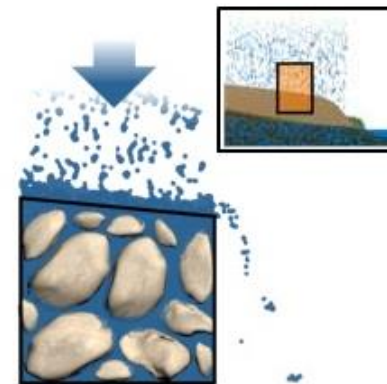
Fluxo por excesso de infiltração

Mecanismo de Horton



Fluxo por excesso de saturação

Mecanismo de Dunne



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

Fluxo por excesso de infiltração

Mecanismo de Horton

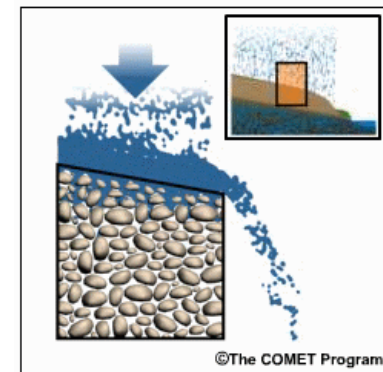
Ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração, podendo ocorrer mesmo com o solo seco

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



Fluxo por excesso de saturação

Mecanismo de Dunne

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

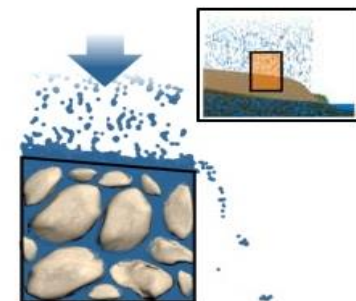
Associado a chuvas moderadas e de longa duração ou após sucessivos eventos de chuva

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



Creative Commons StripeyAnne



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

Área de contribuição variável

Partial Area Contributions to Storm Runoff in a Small New England Watershed

THOMAS DUNNE¹ AND RICHARD D. BLACK²

In the upland watersheds of Vermont the major portion of storm runoff seems to be produced as overland flow on small saturated areas close to streams. The remainder of the watershed acts mainly as a reservoir during storms, and between storms it supplies base flow and maintains the wet areas that produce storm flow. Runoff from these wet areas is supplied by water escaping from the ground surface to reach the channel as overland flow and by direct precipitation onto the saturated area, which is essentially an expanded stream system.

Water Resources Research, 1970



Realizou uma série de experimentos para entender a dinâmica do escoamento superficial por "excesso de saturação"

Área de contribuição variável

Introduzido por Hewlett e Ribbert (1967)

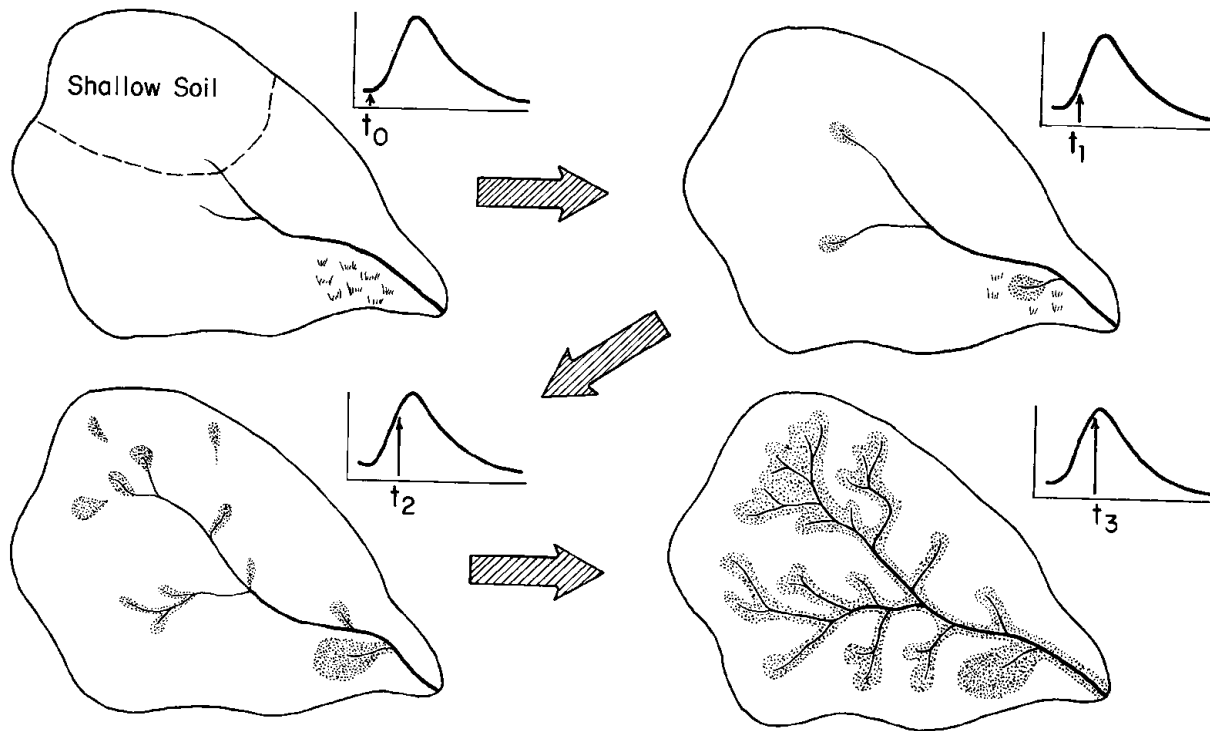
Em bacias com boa estrutura florestal, o escoamento direto não é produzido ao longo de toda a superfície da bacia

O escoamento direto é proveniente de áreas de origem dinâmica, que sofrem contrações e expansões, e que normalmente representam uma pequena fração da área total da bacia

Provém principalmente de terrenos que margeiam a rede de drenagem, sendo que, nas porções mais altas da encosta, a água tende a infiltrar-se e escoar até o canal mais próximo devido ao fluxo subsuperficial



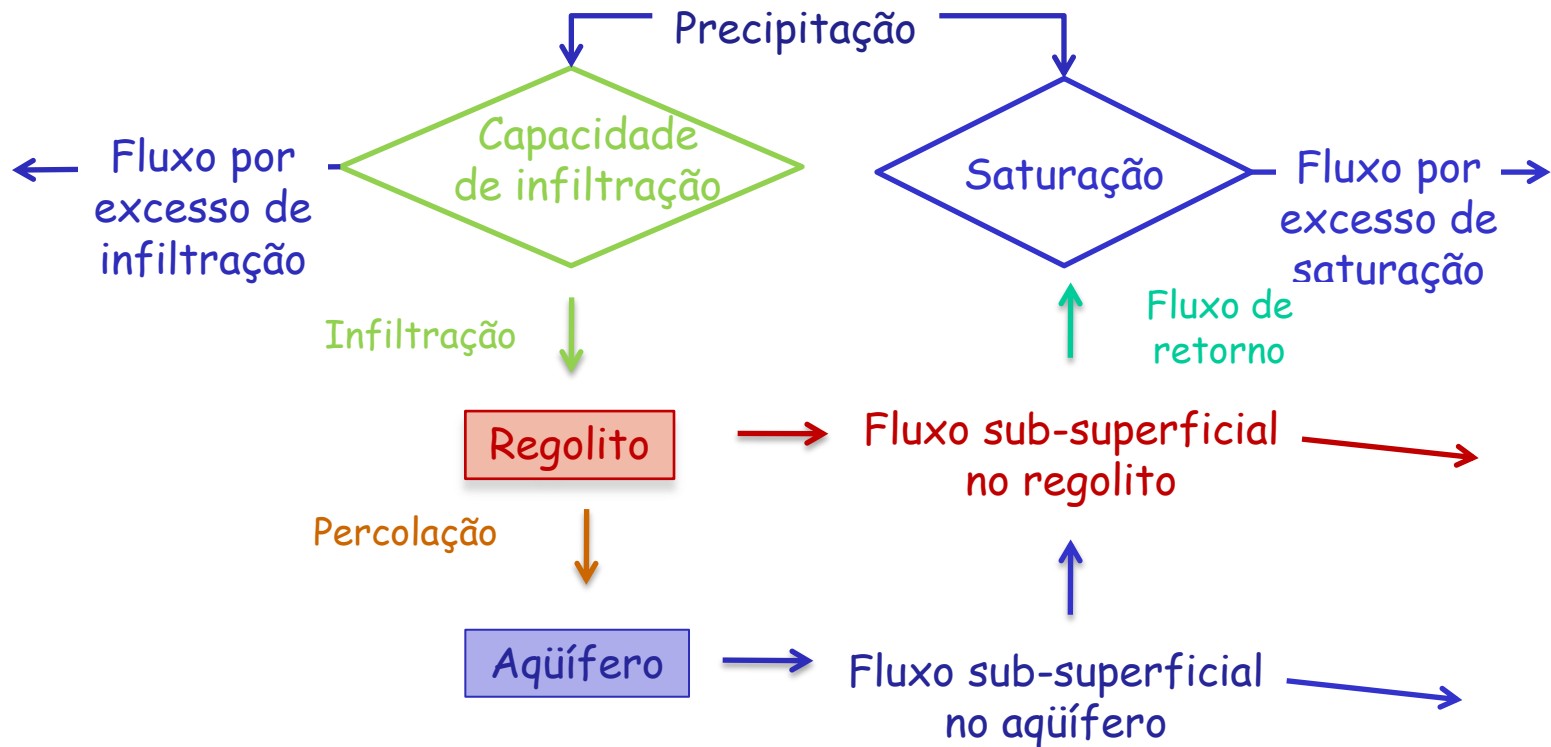
Área de contribuição variável



FONTE: ANDERSON, M.G. & T.P. BURT, 1978. Towards more detailed field monitoring of variable source area. Water Resource Research, 14 (6): 1123-1131.

Os hidrogramas indicam como o escoamento aumenta na medida que as áreas saturadas se estendem sobre a várzea, nas áreas com solos rasos e nos córregos efêmeros. Este processo se reverte à medida que o escoamento diminui

Caminhos do fluxo: mecanismos de geração de escoamento



Interdisciplinaridade

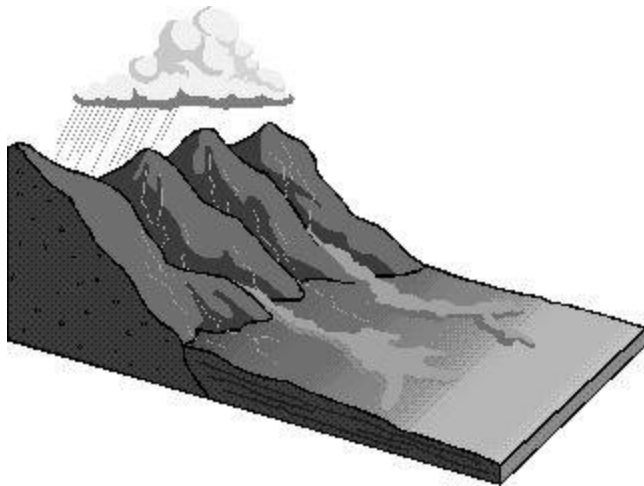
Escoamento superficial x

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

Escorregamento de encostas



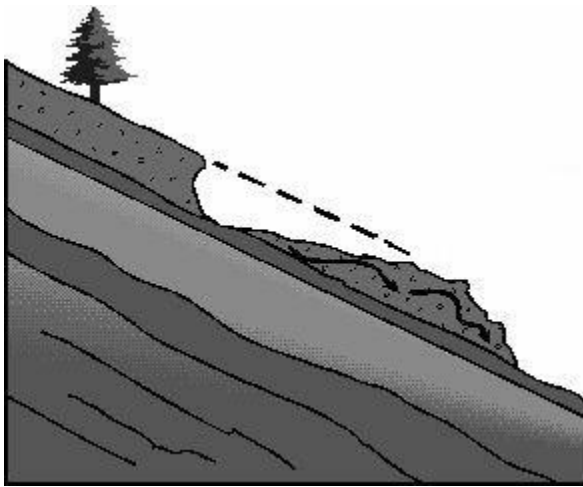
Fluxo de escombros (*debris flow*)



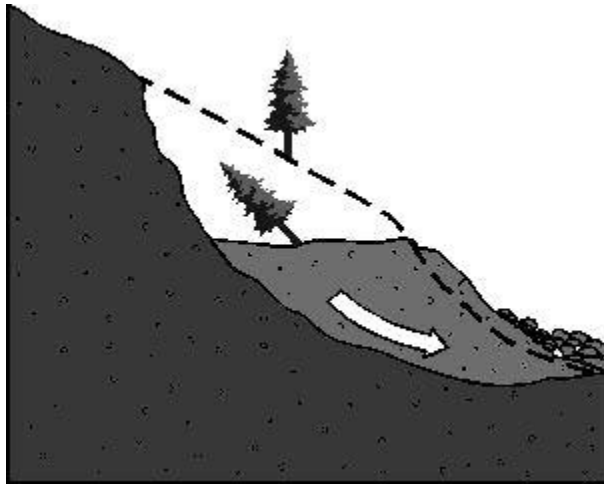
Timbé do Sul, SC - 1995



Deslizamento translacional (*shallow*)



Deslizamento rotacional



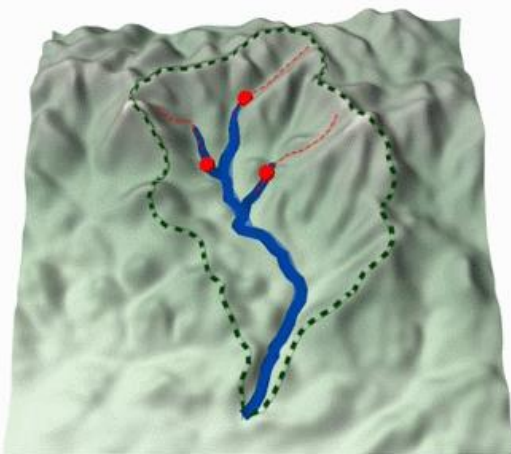
Escoamento Superficial x Enchentes

O escoamento superficial (direto) é um dos principais componentes da predição de cheias

As condições da bacia determinam a proporção de água de chuva que se transformará em escoamento superficial direto



A Drainage Basin



©The COMET Program



Creative Commons Daquella Manera



Photo by Lynn Betts, USDA / NRCS

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

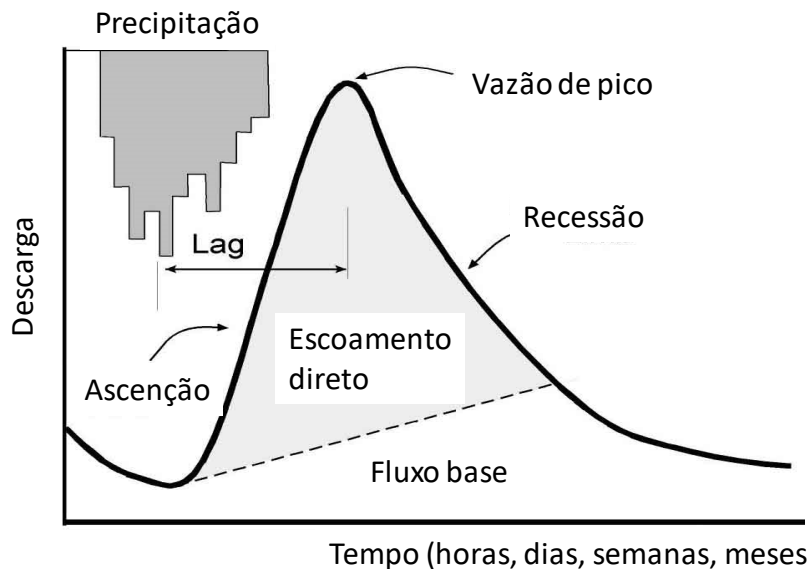
Superfícies vegetadas

Superfícies impermeáveis - solo compactado, estradas, estacionamentos, etc

Hidrograma

Após o início da chuva, há um tempo de retardo até que a descarga (vazão) comece a se elevar. Isso ocorre devido às perdas iniciais (interceptação, depressões no solo e deslocamento de água pela bacia)

No período de estiagem, o aquífero regional domina o hidrograma através do fluxo de base



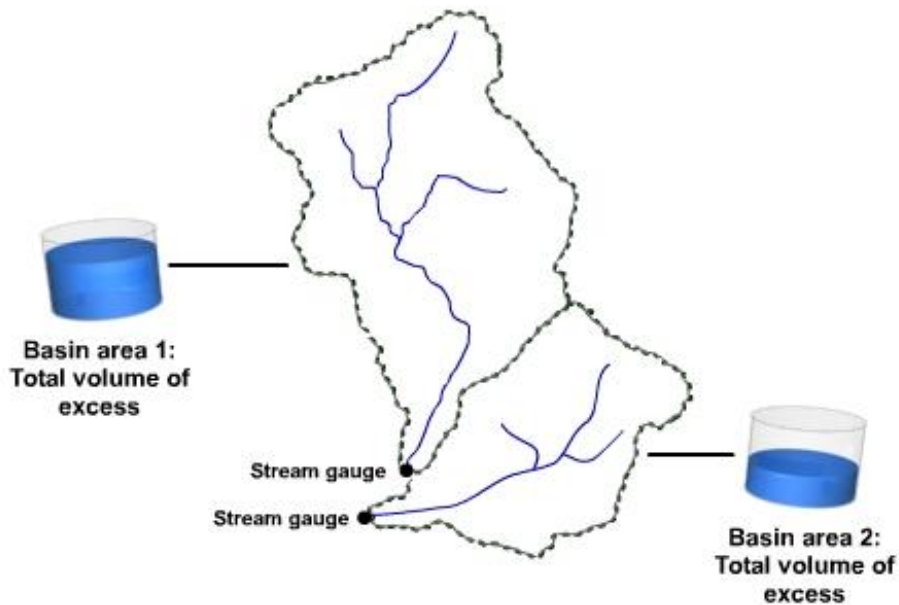
Ascensão: relacionada diretamente com a intensidade da precipitação

Pico: ponto de inflexão como resultado da redução das chuvas e/ou amortecimento da bacia

Recessão: o escoamento superficial diminui e o escoamento subterrâneo contribui para a vazão do rio

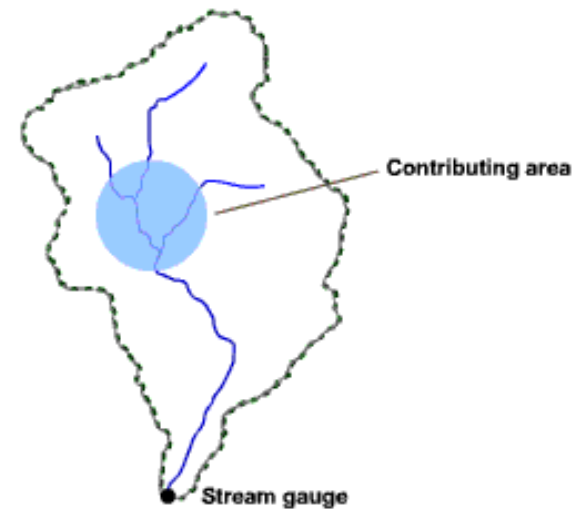
Área de Bacia Hidrográfica

Influence of Basin Area on Runoff Volume



©The COMET Program

Contributing Area of Storm Determines Runoff



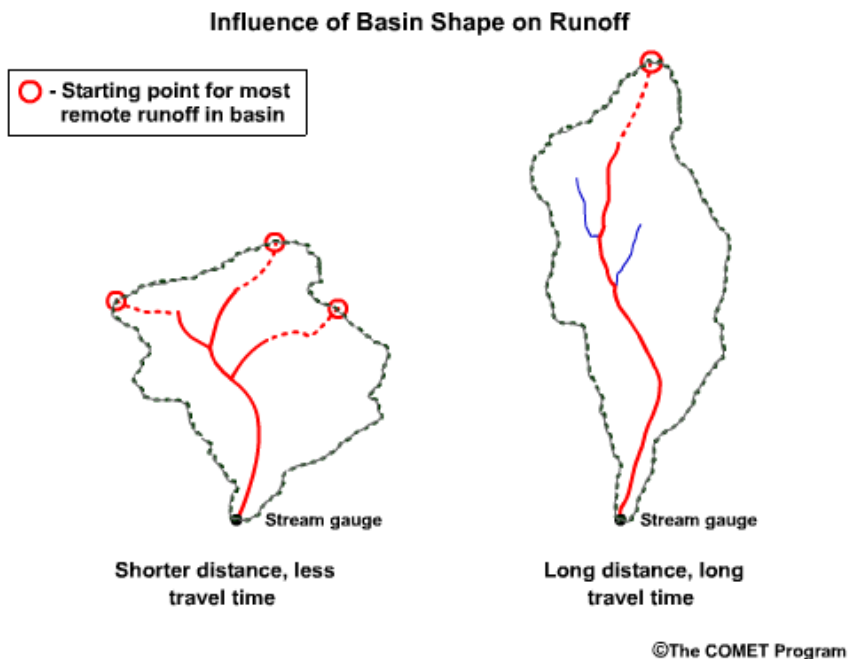
©The COMET Program

O tamanho da bacia hidrográfica exerce influência direta no escoamento superficial (volume de água que drena de uma bacia)

Grandes bacias terão maior descarga, maior pico e maior tempo de retardo

Um evento intenso de precipitação geralmente só ocorre em uma parte da bacia

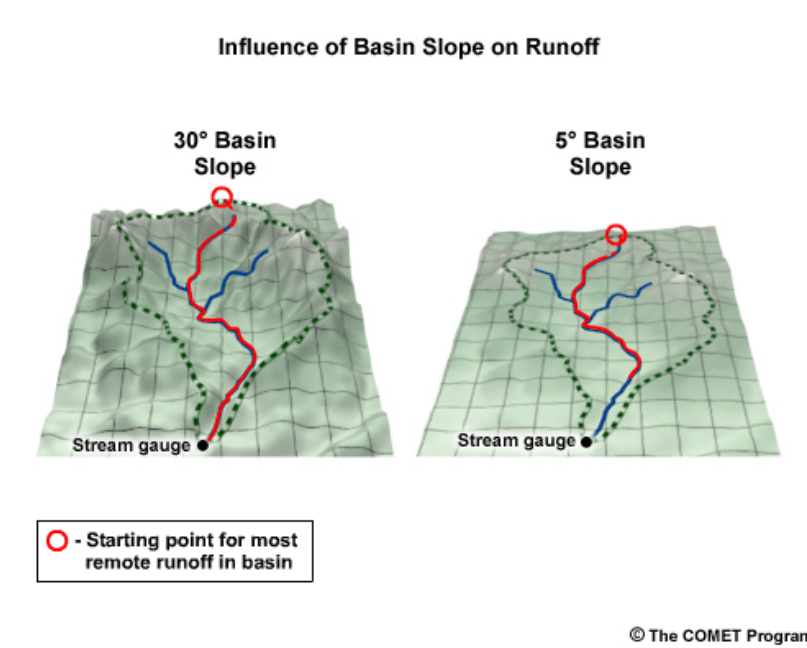
Forma da Bacia Hidrográfica



Está relacionada com a velocidade de deslocamento da água na bacia

Considerando uma chuva espacialmente uniforme, a água proveniente de vários pontos de uma bacia mais circular têm maior chance de atingir o exutório ao mesmo tempo, diminuindo o tempo de ascensão da hidrograma nesse ponto, ou seja, o pico de vazão é atingido mais rapidamente

Declividade da Bacia Hidrográfica



O aumento da declividade diminui a infiltração, aumenta o *runoff* e diminui o tempo de resposta da bacia

A maior declividade também contribui para o aumento da erosão e da importância da cobertura vegetal como proteção do solo

Forma dos Cursos D'água

Influence of Straight vs. Meandering Flowpath on Runoff

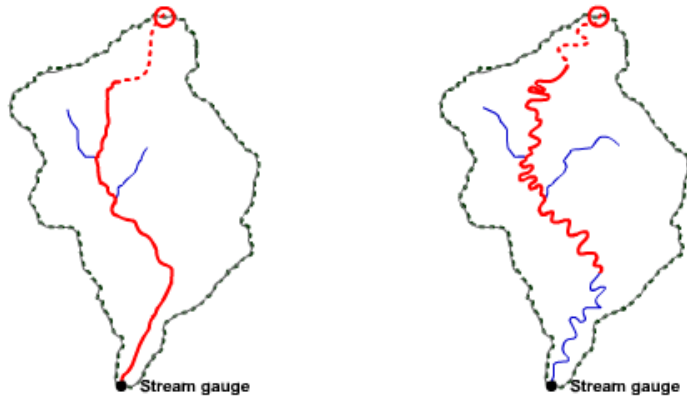


Image Courtesy of FISRWG

○ - Starting point for most remote runoff in basin

©The COMET Program

Os meandros de um rio aumentam a distância que a água tem que percorrer até chegar ao exutório, atrasando o tempo de resposta da bacia

A maior sinuosidade dos cursos d'água tendem a diminuir a vazão, na medida em que aumentam o tempo de permanência da água na bacia, promovendo uma maior infiltração/evaporação

Densidade de Drenagem

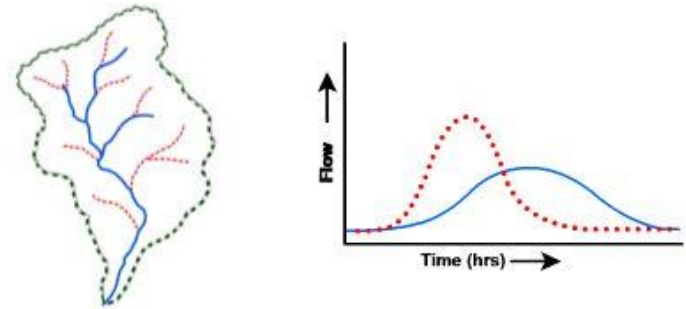
Densidade de drenagem: comprimento de todos os canais dentro da bacia dividido pela área da bacia

Uma das características mais importantes para avaliação do potencial de *runoff*

Baixa densidade de canais em geral indica solos profundos e bem desenvolvidos, o que favorece a infiltração da água no solo, diminuindo o *runoff*

Grande densidade de canais sugere uma drenagem mais eficiente após um evento de chuva - picos de descarga ocorrem mais rápido e são mais intensos

Influence of Stream Density on Runoff



For uniform rain coverage:

Compare high-stream density vs. low stream density

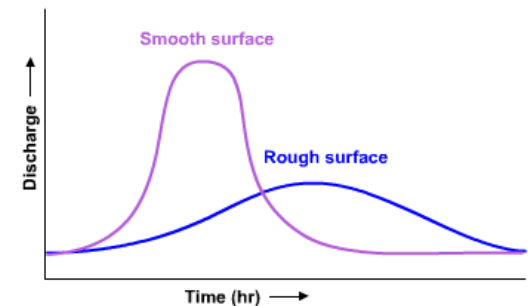
High stream density

Low stream density

Rugosidade do canal



Hydrographs for Rough vs. Smooth Channels



©The COMET Program

A rugosidade atua como um desacelerador da água no canal

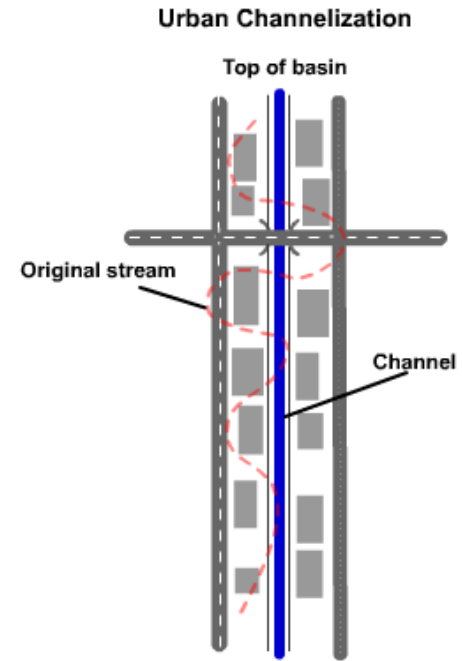
A rugosidade do canal aumenta com a presença de pedras, vegetação e detritos

Canais artificiais aumentam muito a velocidade da água, fazendo com que a água de chuva deixe a bacia muito rapidamente: diminuição do fluxo de base e aumento do *runoff*

Urbanização

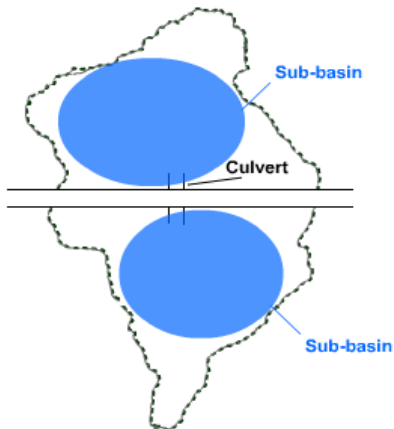


Creative Commons natecull



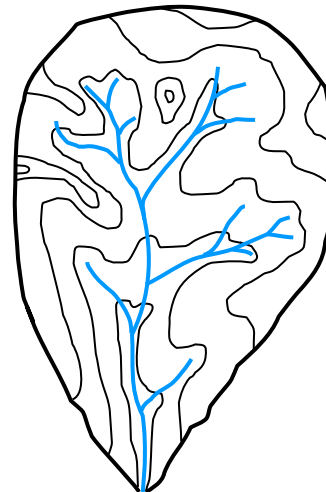
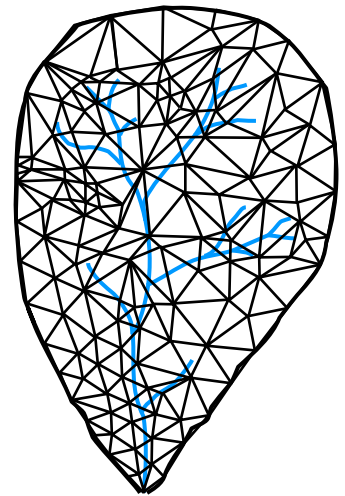
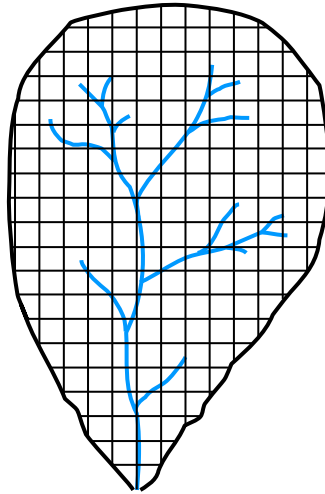
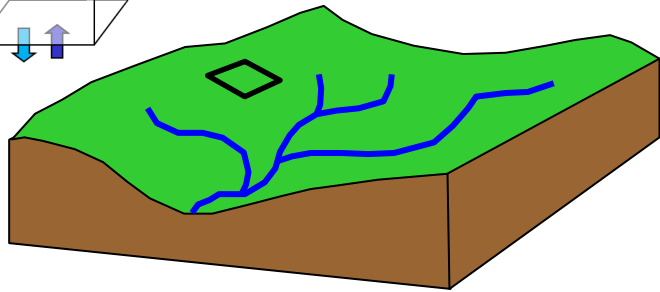
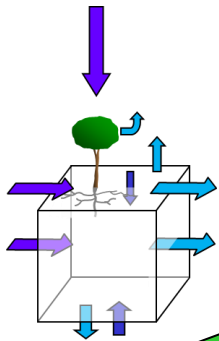
©The COMET Program

Effects of Urban Grid on Runoff



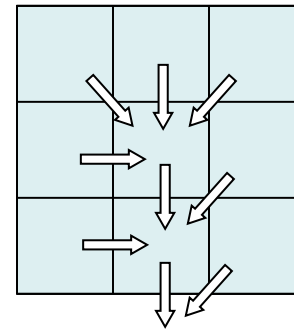
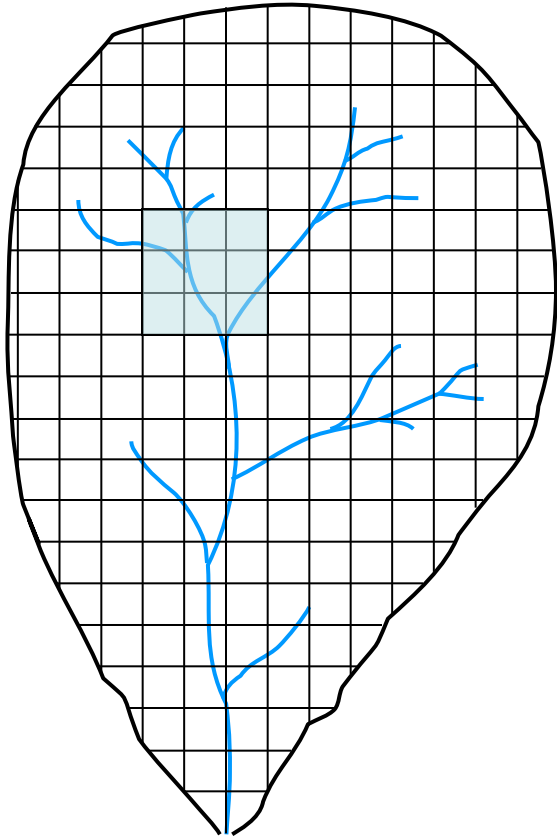
©The COMET Program

Modelos Digitais de Elevação (MDE)

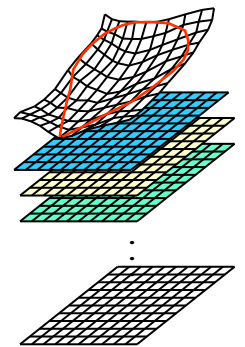


Simplificação da realidade

MDE Grade Regular



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



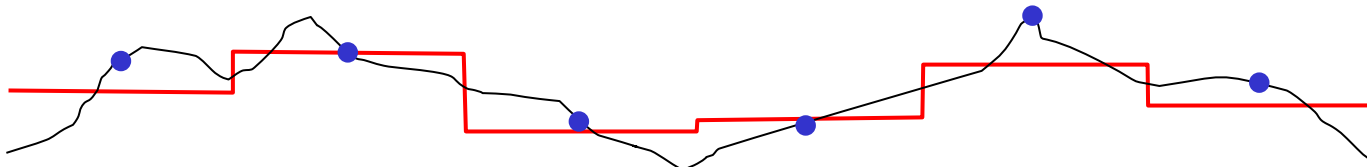
MDE Grade Regular

Resolução da grade

		45

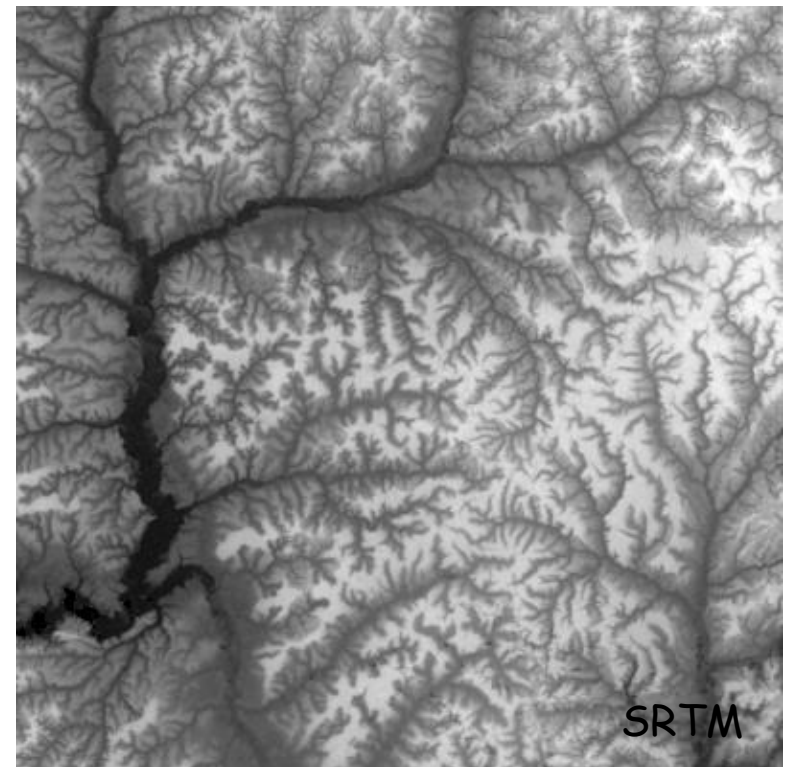
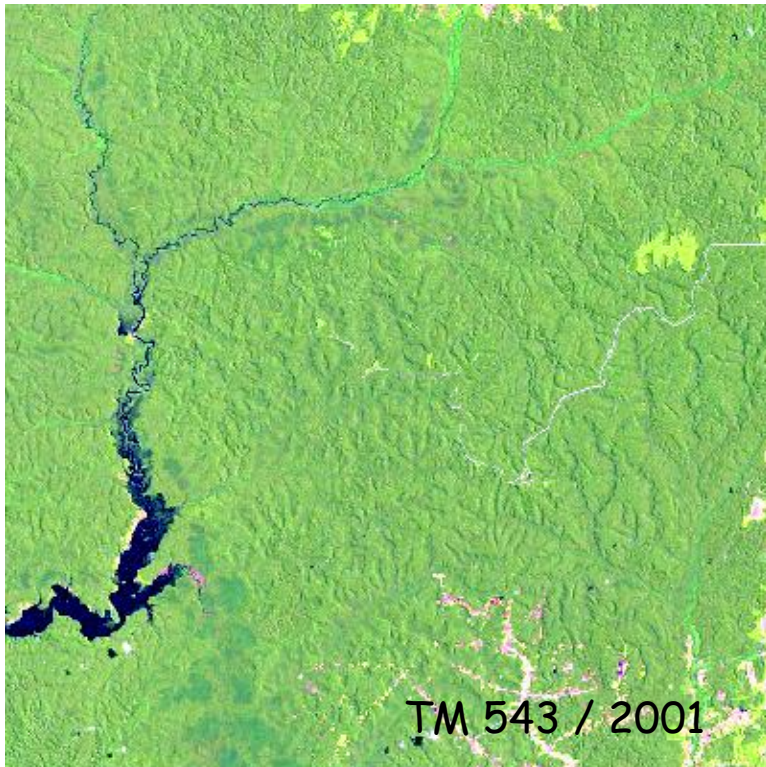
+ + +
+ + +
+ + +
45

média na janela ou cota do ponto central?



perfil altimétrico

MDE SRTM



região próxima a Manaus/AM

Vegetação X MDE

Dependendo da origem do Modelo Digital de Elevação, a influência da vegetação pode se dar de dois modos:

- atenuando ou exagerando feições do relevo
- criando artefatos

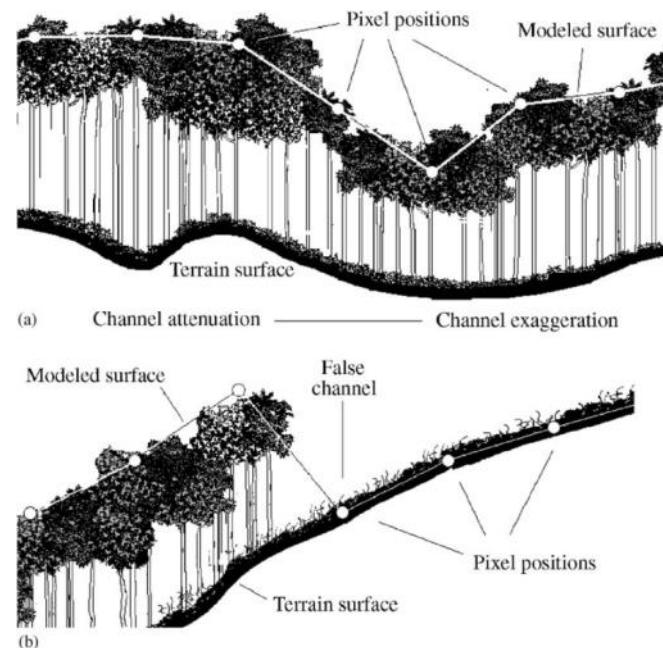
SRTM

Radars banda C:

- pouca penetração em vegetação densa

Resultado:

- em geral o modelo não representa perfeitamente a superfície do terreno
- há o aparecimento de artefatos (estradas, desmatamentos, etc)



Fonte: Valeriano et al. (2006)

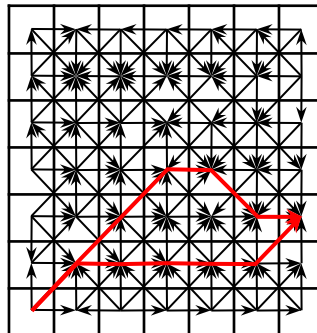
MDE hidrológicamente consistente

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

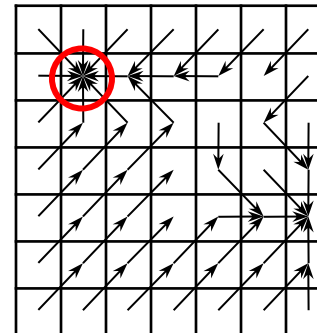
MDE
(Modelo Digital de Elevação)

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)

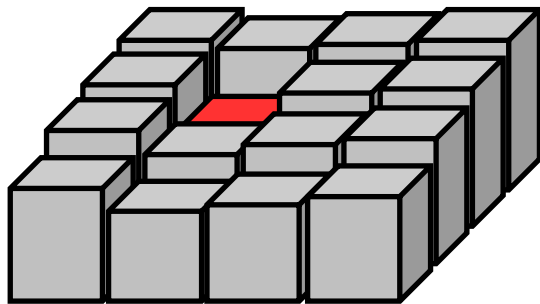


sumidouros

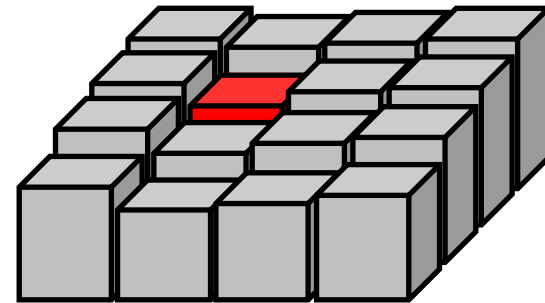
Eliminação dos Sumidouros

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

No método de escavação, deve-se procurar qual o melhor caminho

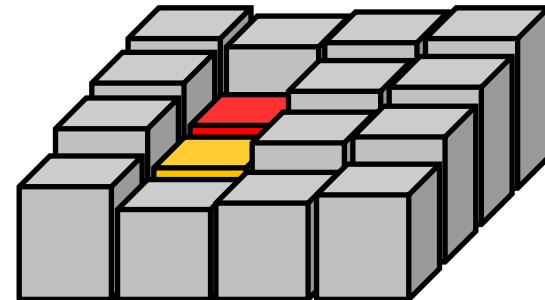


preenchendo



Modelos hidrológicamente consistentes

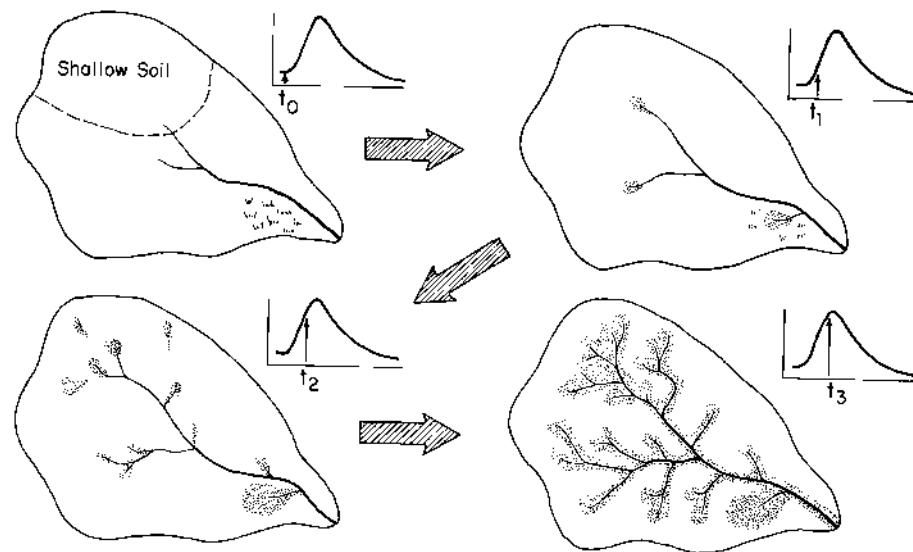
escavando



Extração Automática da Rede de Drenagem

O que representa a rede de drenagem?

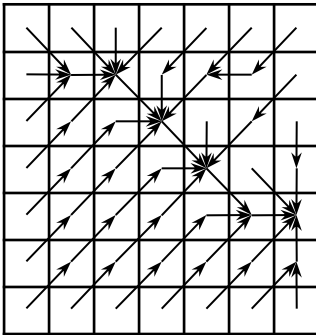
- considera canais intermitentes e perenes, áreas saturadas (lençol freático superficial)?
- a largura do canal é importante (representação por linhas e polígonos)?
- a hierarquia da rede deve ser considerada (ordem)?
- como definir os inícios da rede (nascentes)?



Extração Automática da Rede de Drenagem

Método Clássico

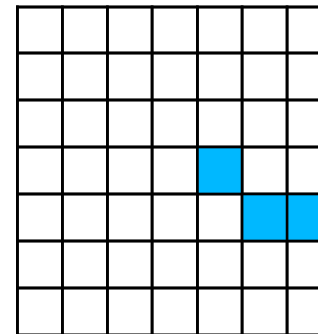
Direção de Fluxo



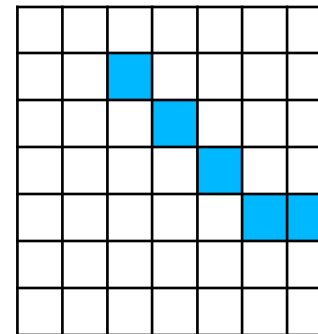
Área de Contribuição

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

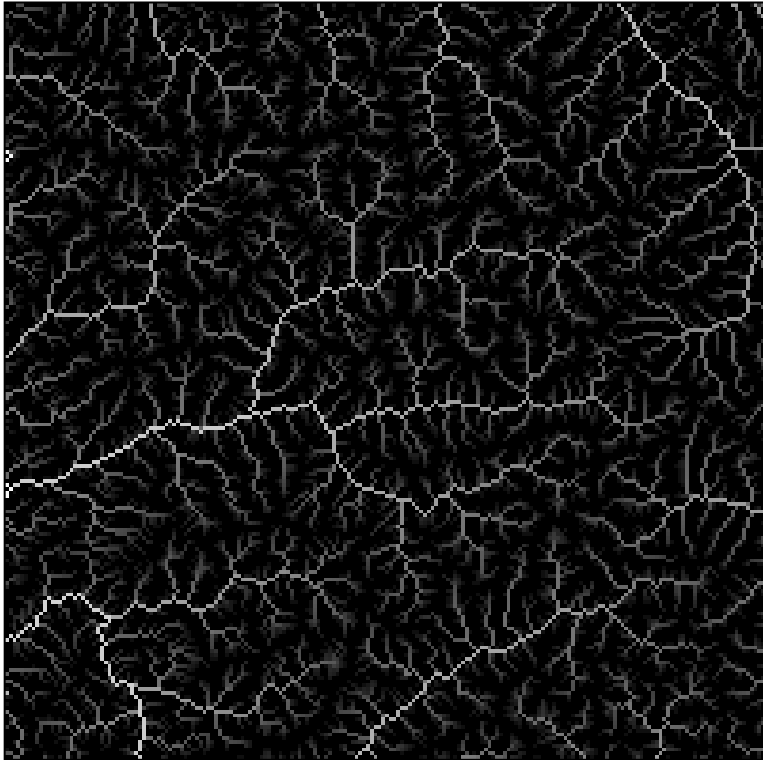


limiar = 30

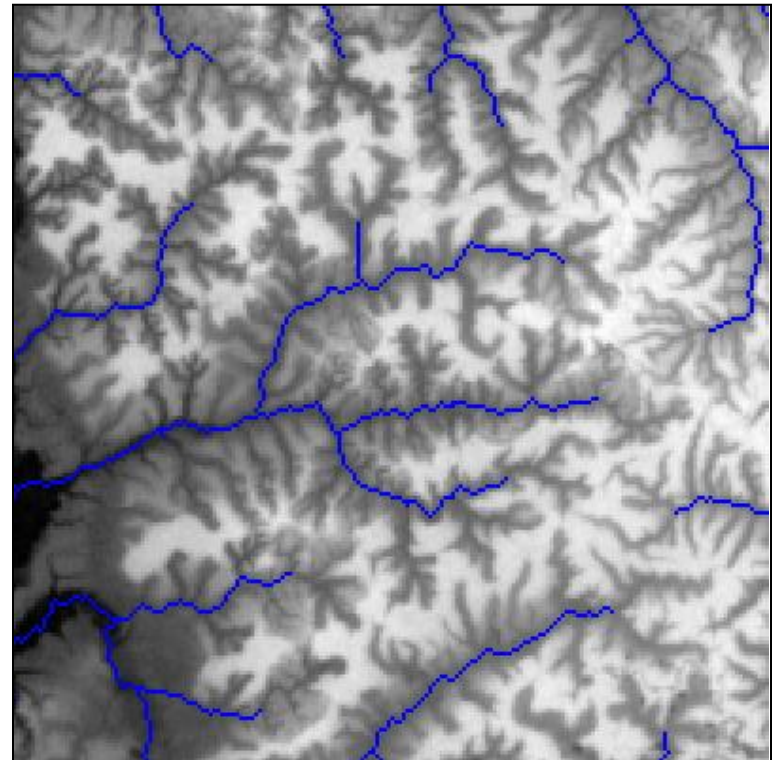


limiar = 10

Extração Automática da Rede de Drenagem

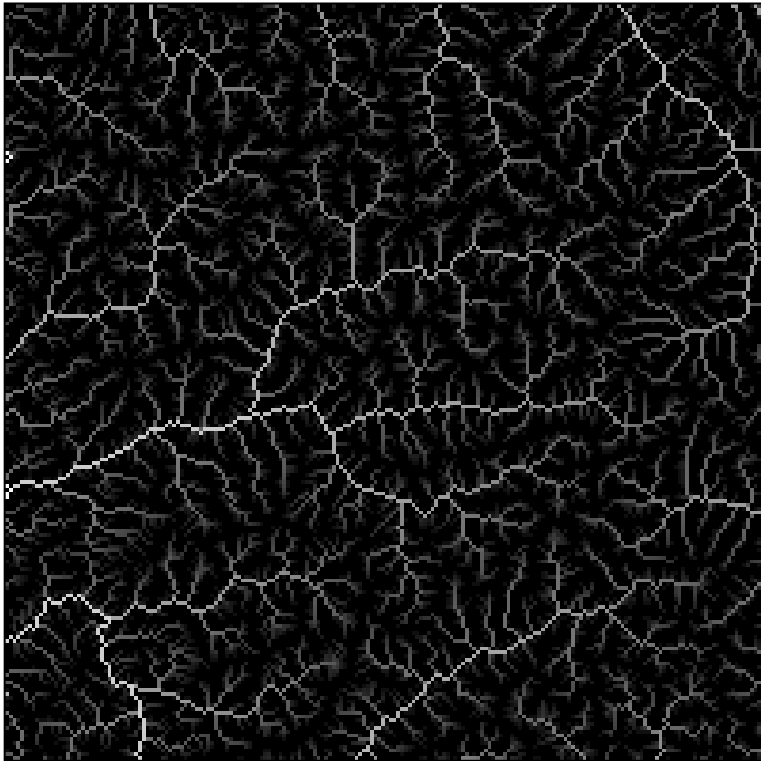


área de contribuição

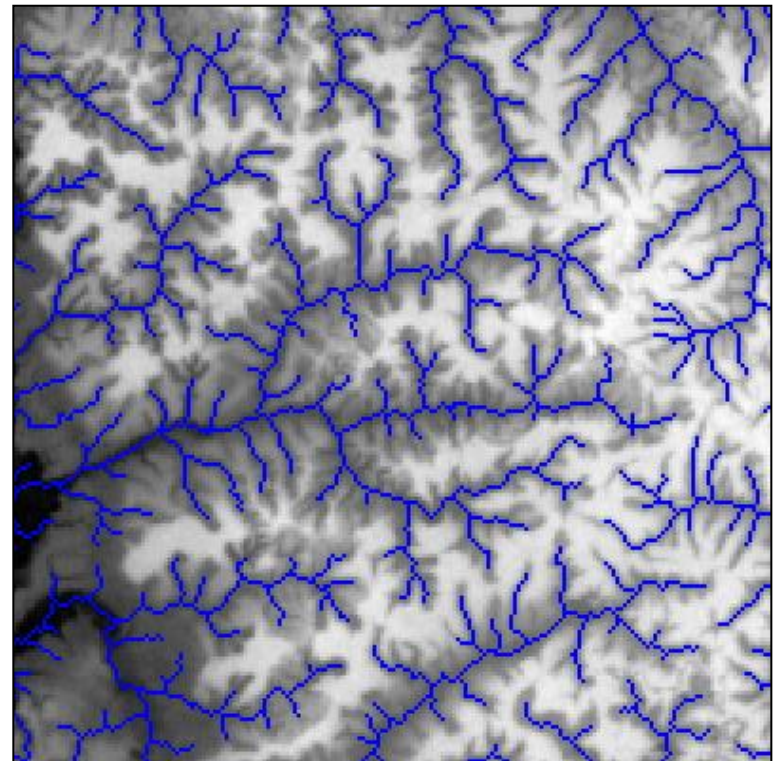


limiar = 500

Extração Automática da Rede de Drenagem

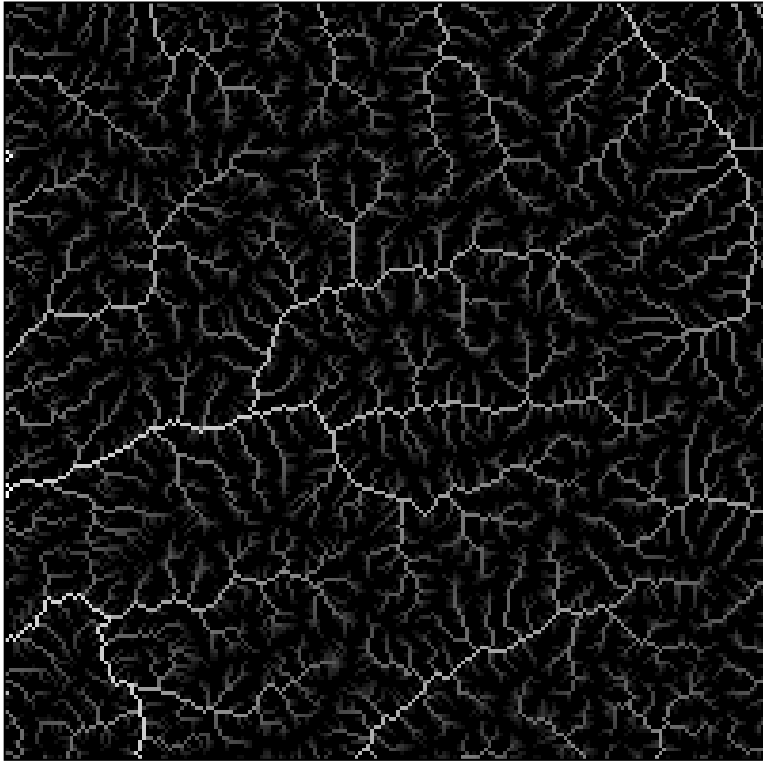


área de contribuição

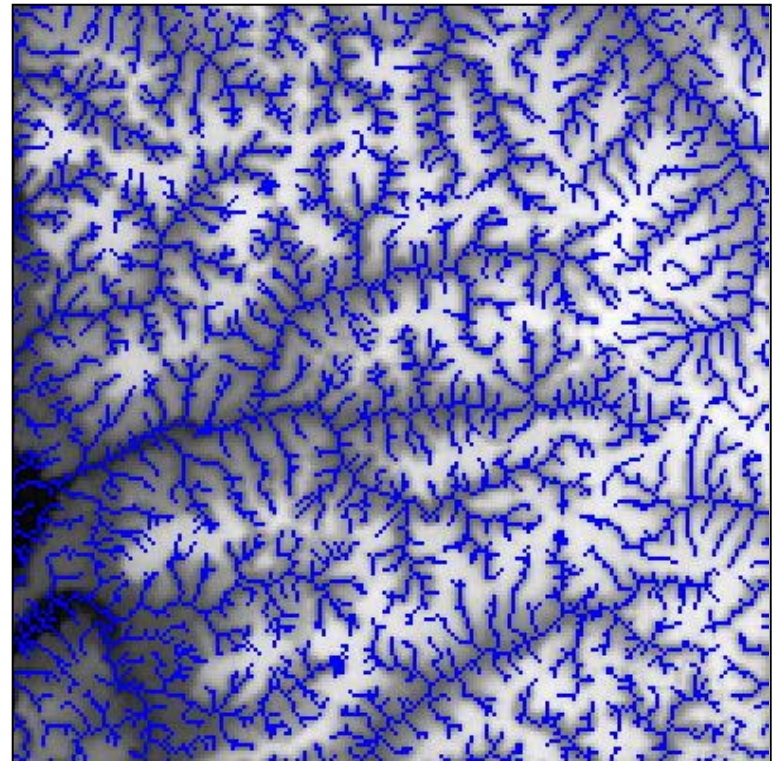


limiar = 50

Extração Automática da Rede de Drenagem

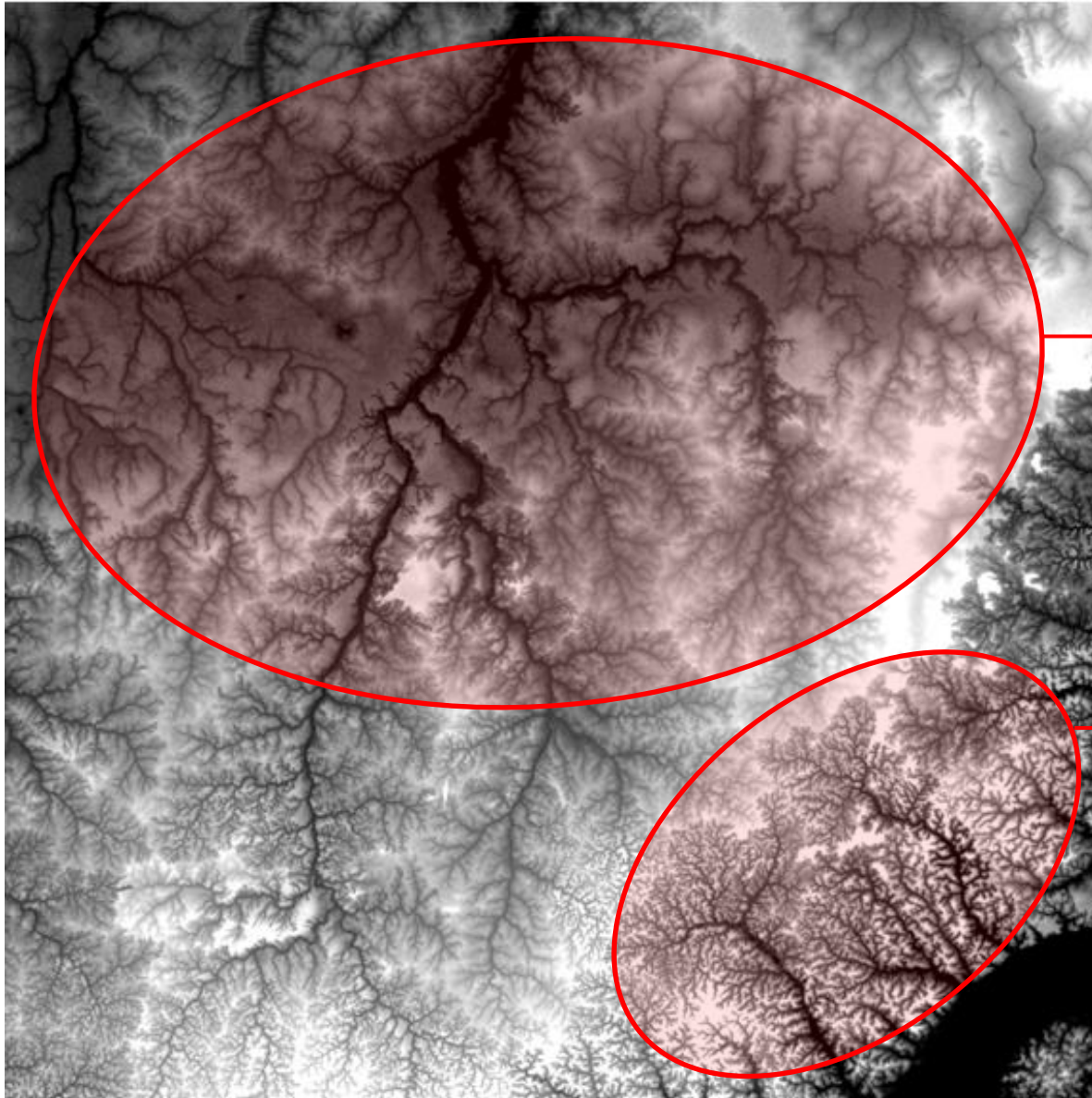


área de contribuição



limiar = 5

Limitações do Método Clássico



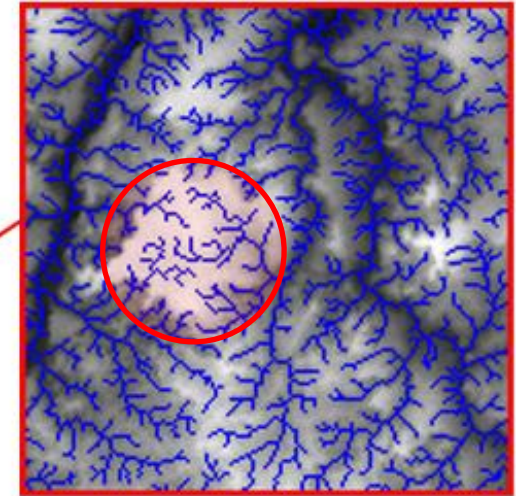
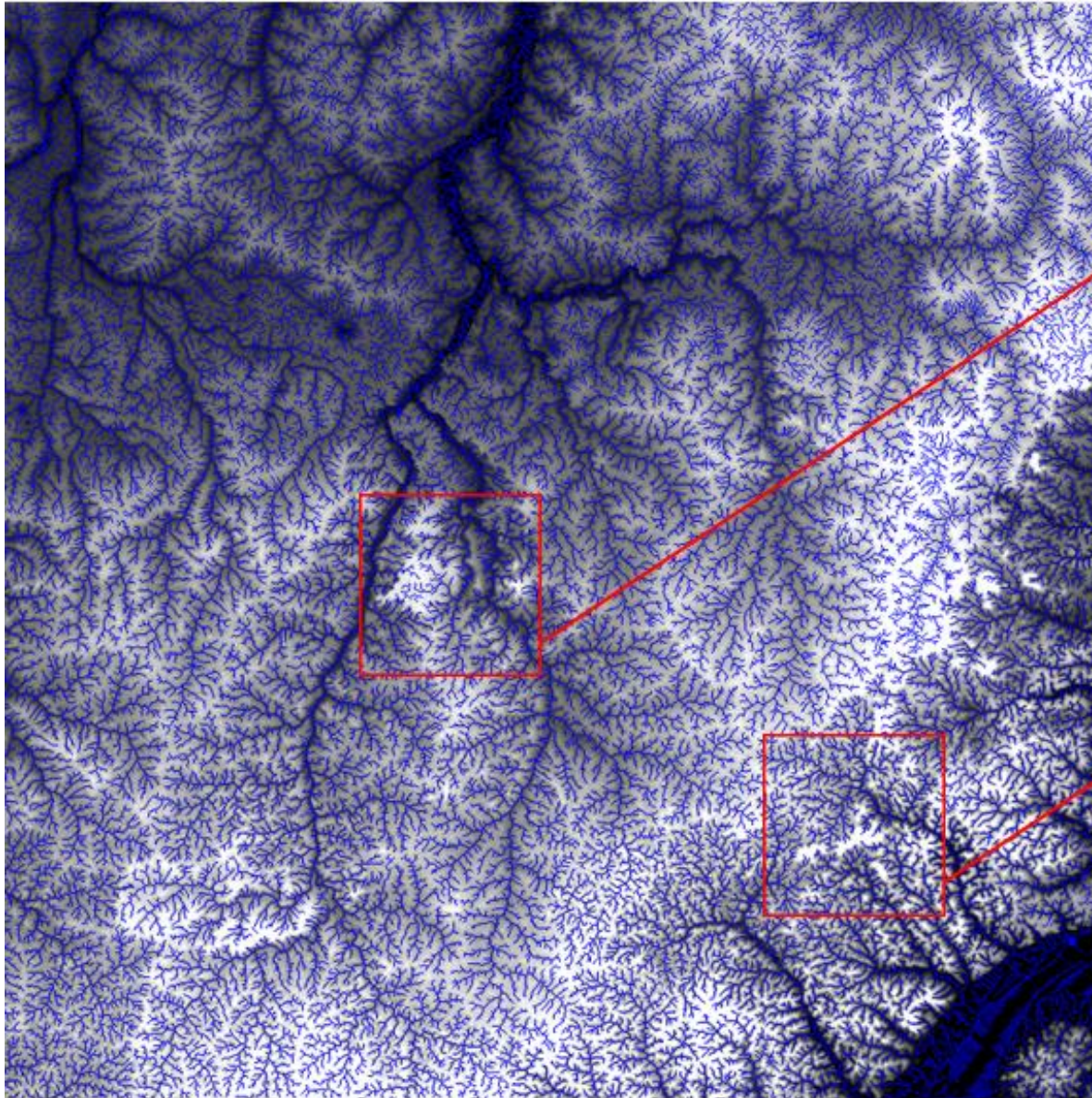
REGIÃO HETEROGÊNEA

Região com baixa
densidade de
drenagem

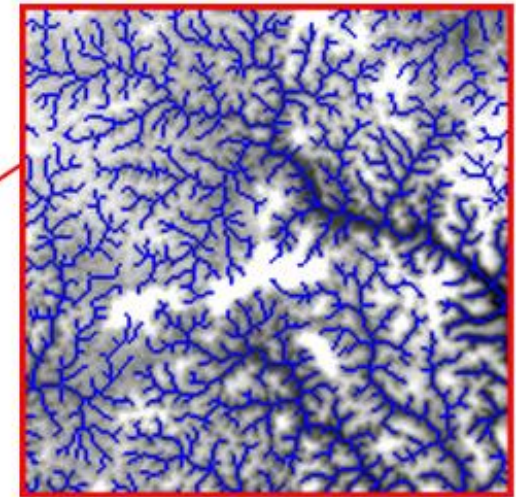
Região com alta
densidade de
drenagem

Qual limiar escolher?

Utilizando um limiar baixo...

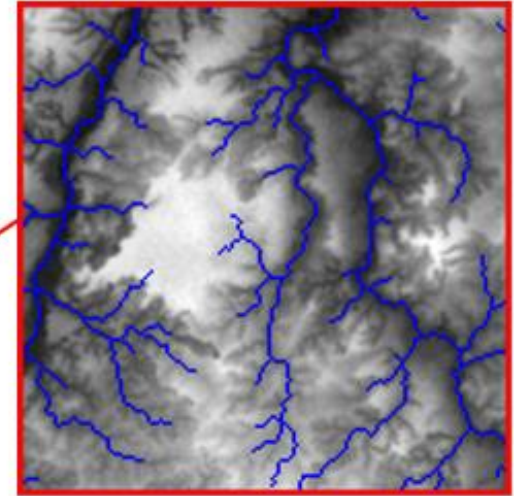
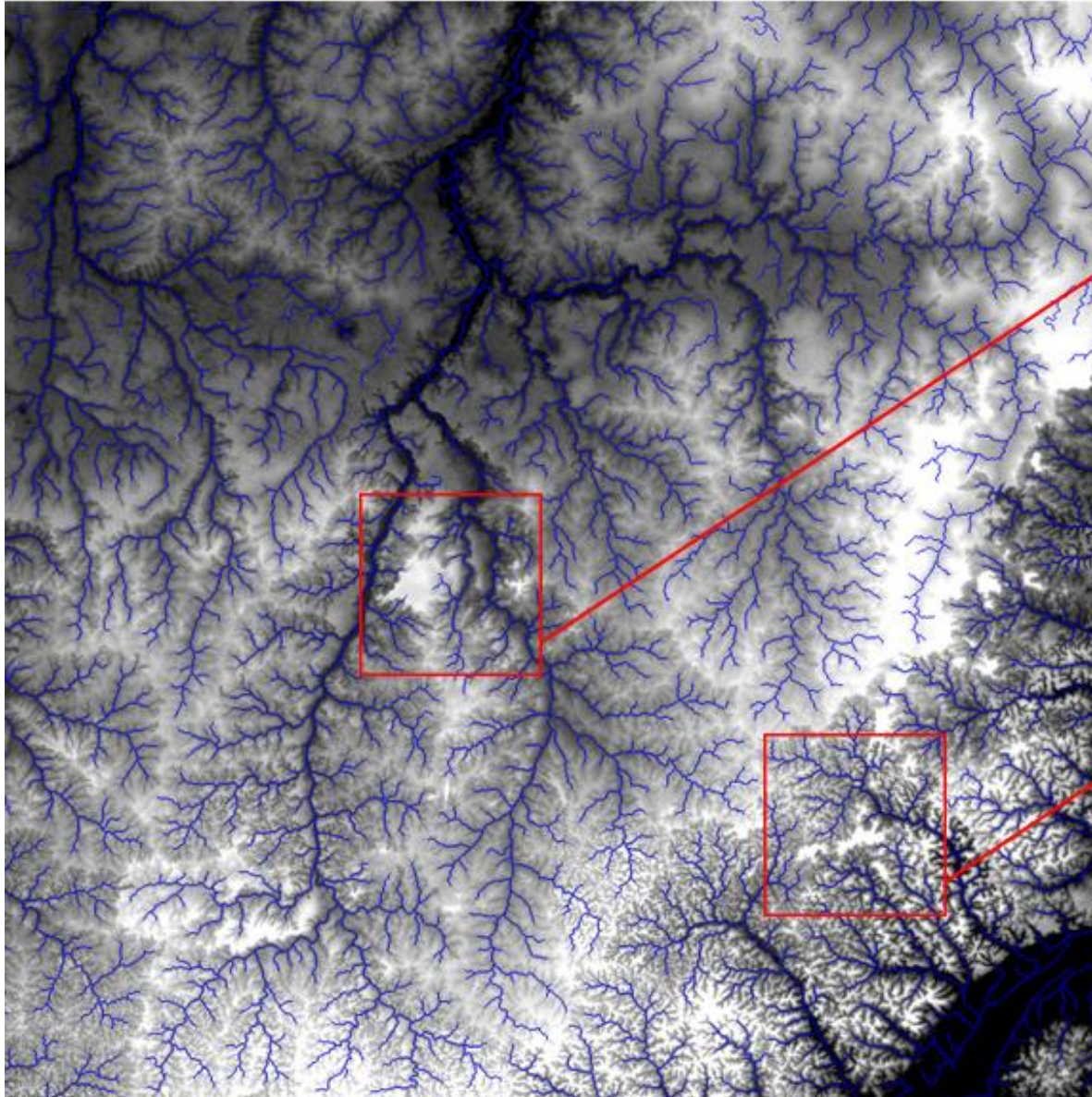


**CRIAÇÃO DE FEIÇÕES
INEXISTENTES**

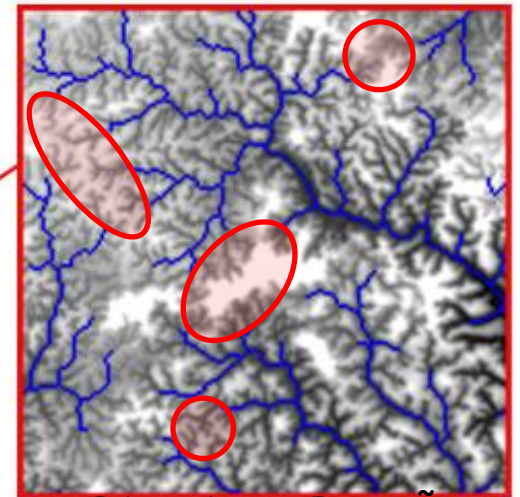


**CLASSIFICAÇÃO
ADEQUADA**

Utilizando um limiar alto...

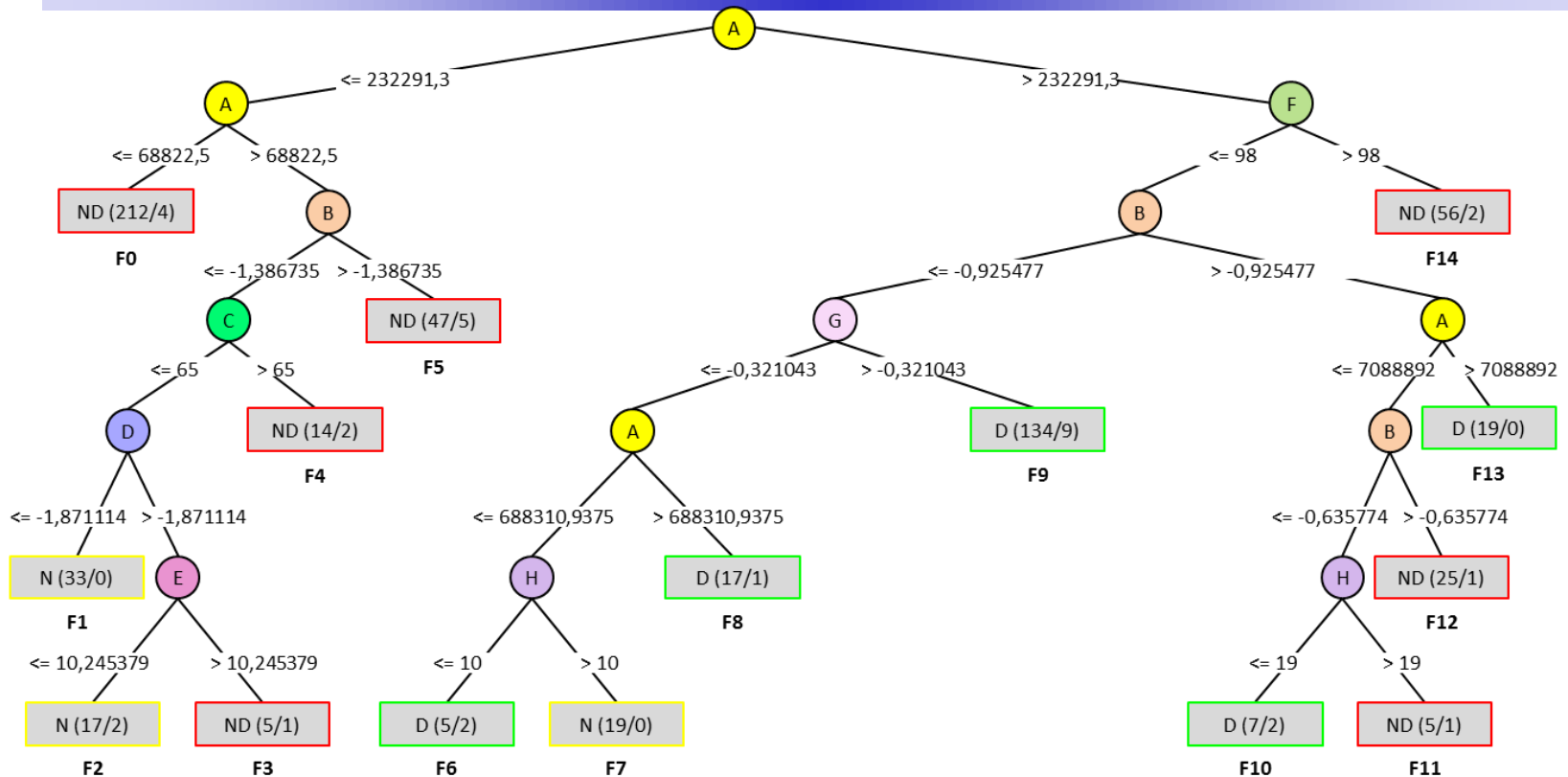


**CLASSIFICAÇÃO
ADEQUADA**



**SEM A CLASSIFICAÇÃO
DAS
EXTREMIDADES**

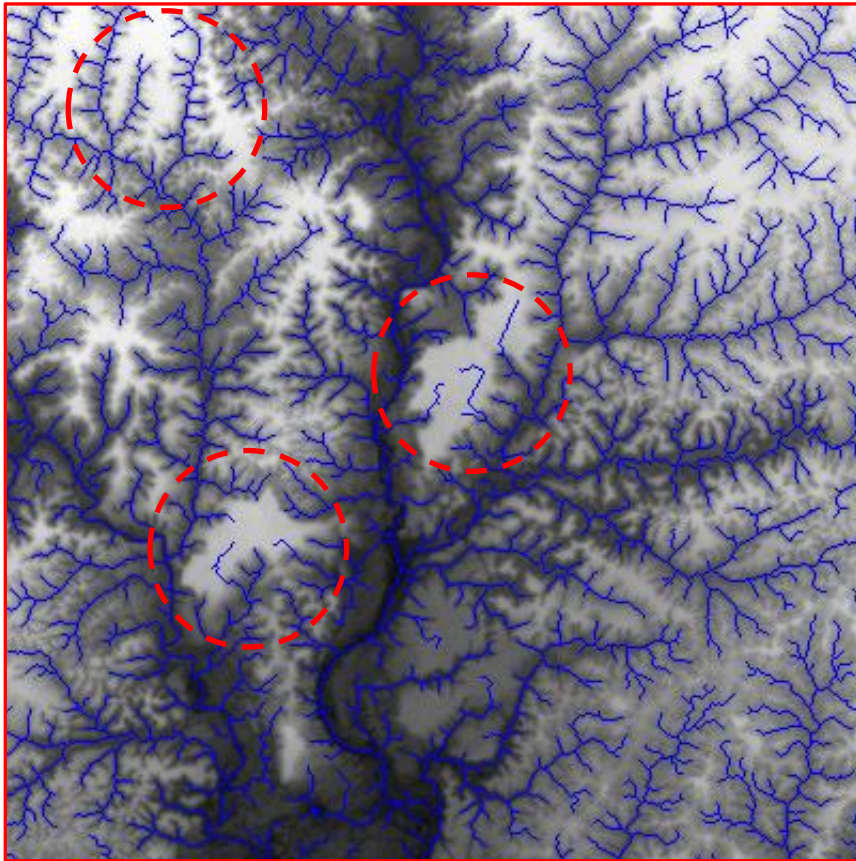
Método baseado em Múltiplos Atributos



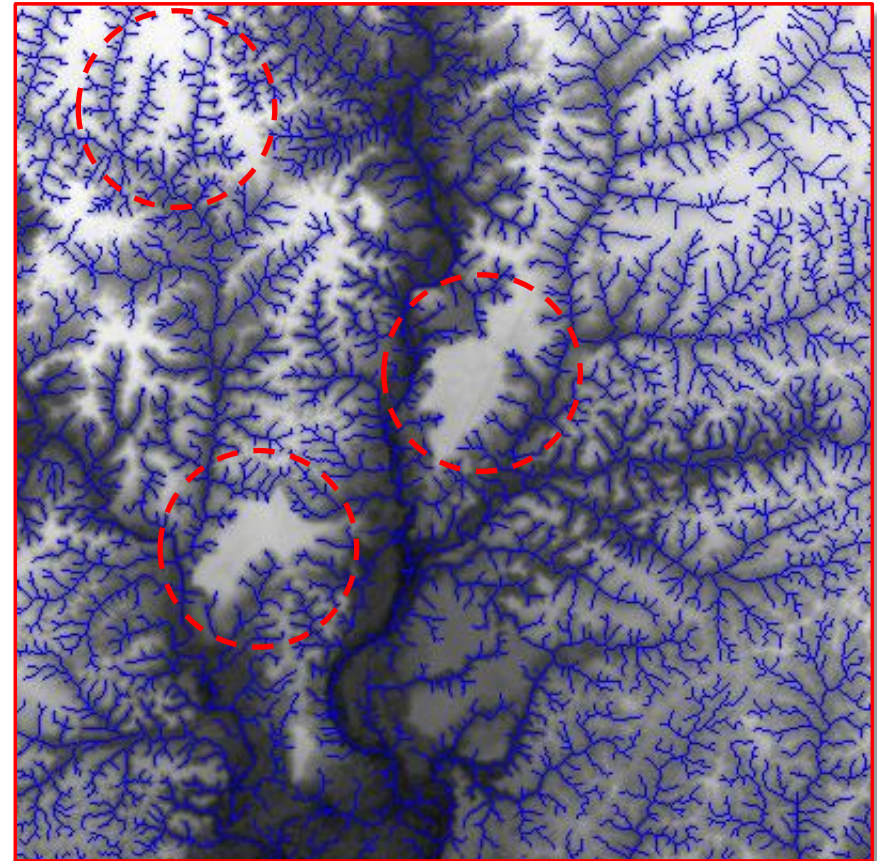
LEGENDA

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

Comparação dos Resultados

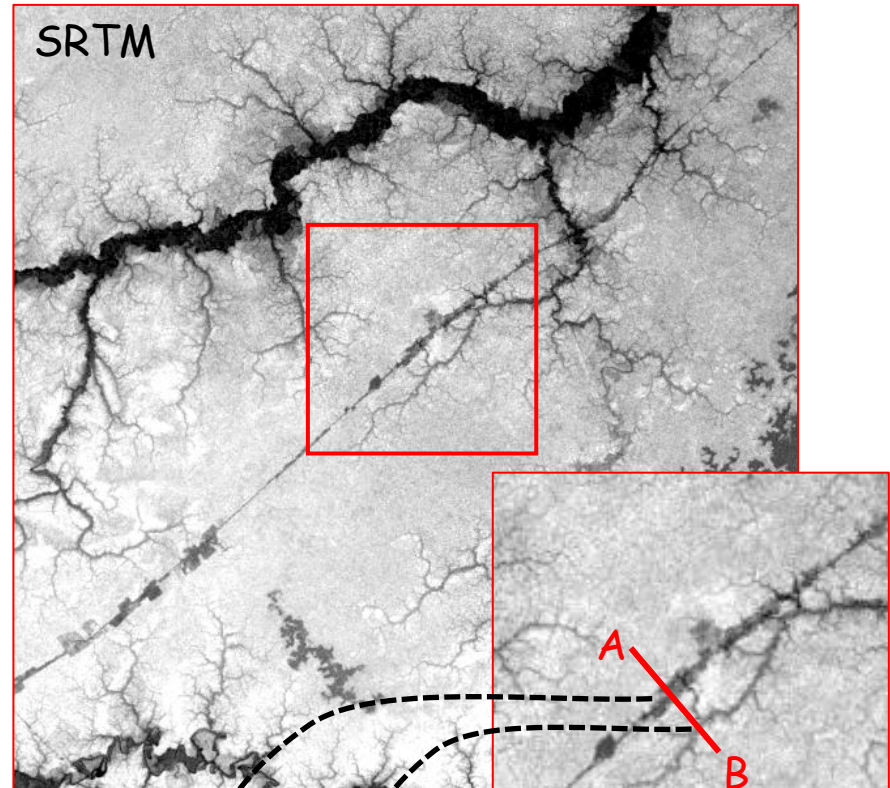
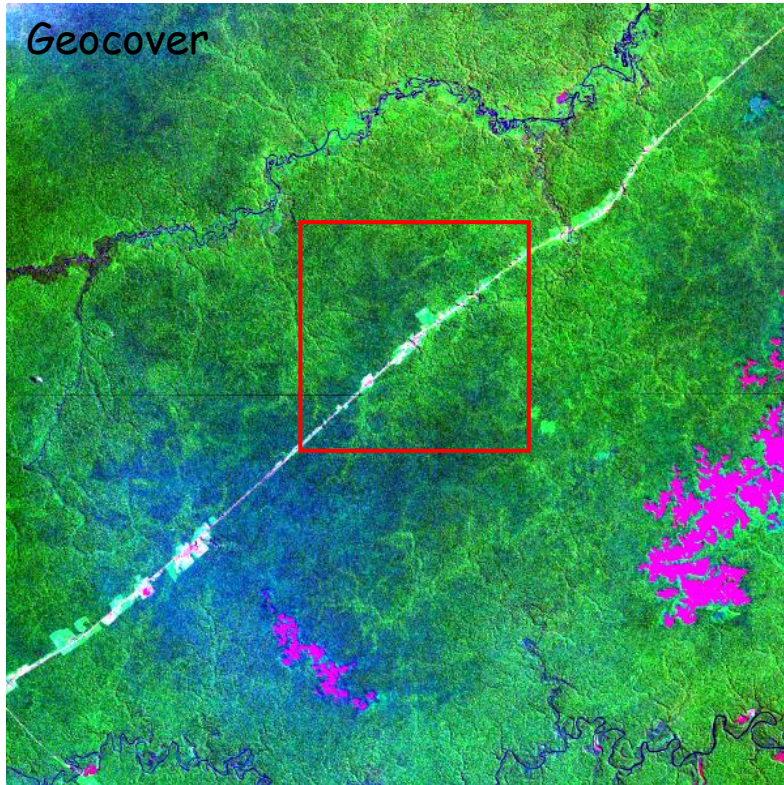


Método Clássico (baseado na Área de Contribuição)

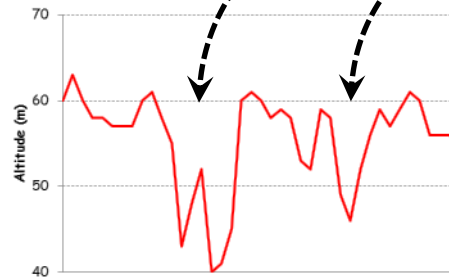


Método baseado em Múltiplos Atributos

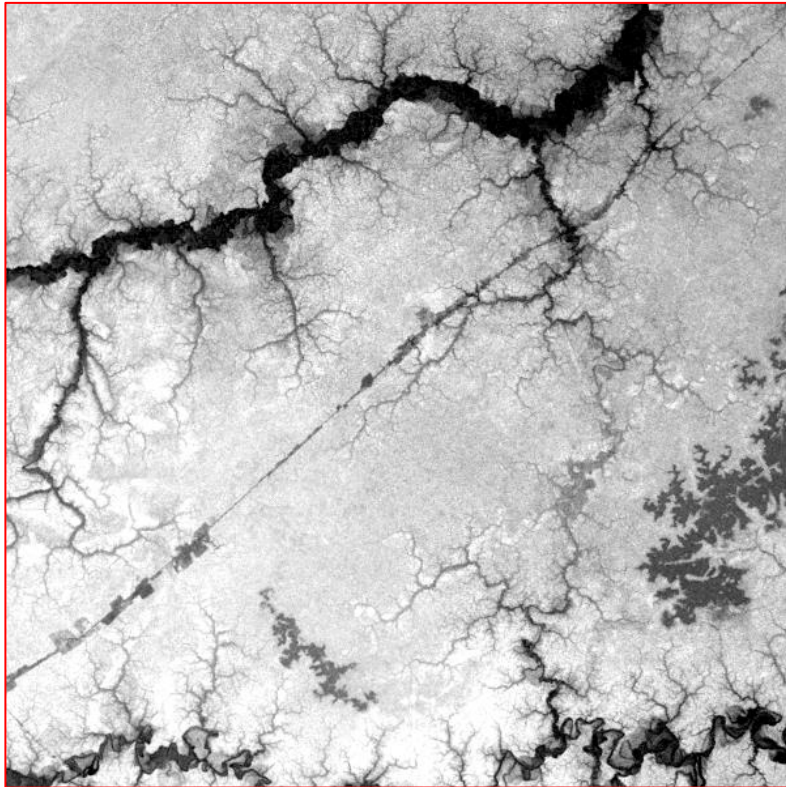
Artefatos no SRTM



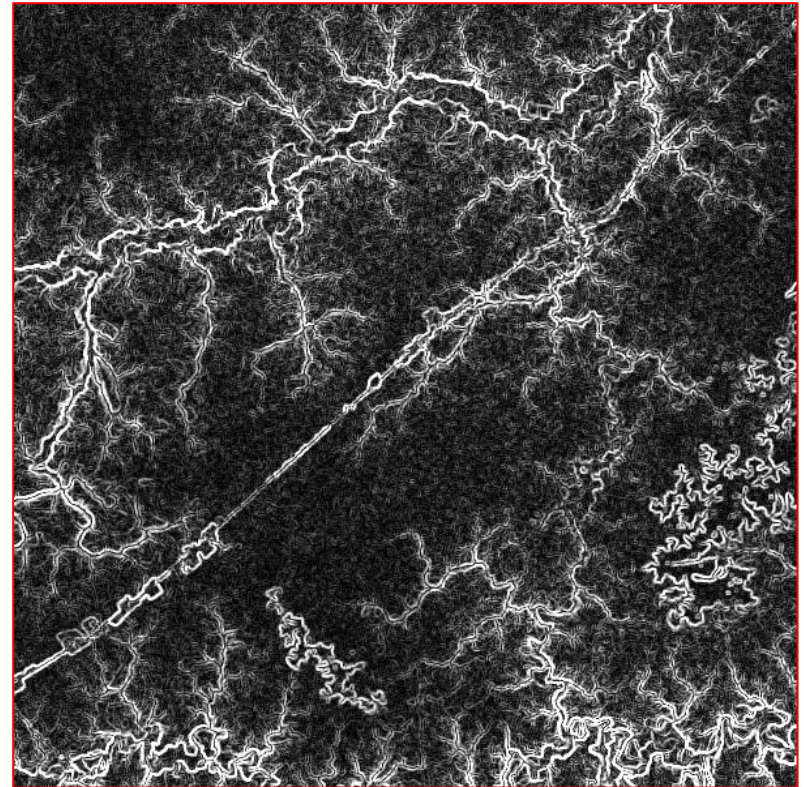
BR319 - Interflúvio Purus/Madeira



Artefatos no SRTM

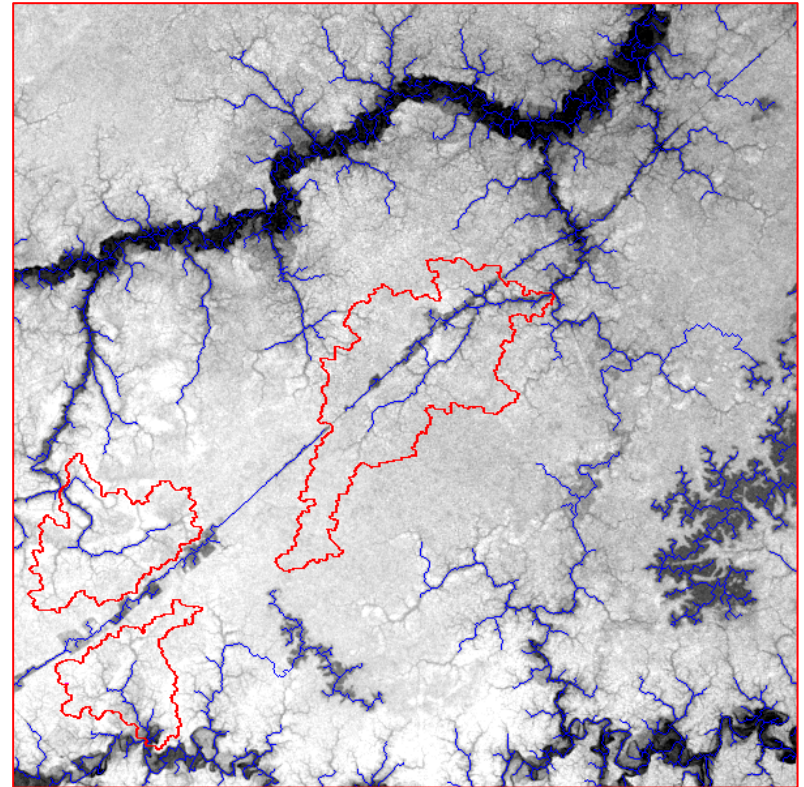
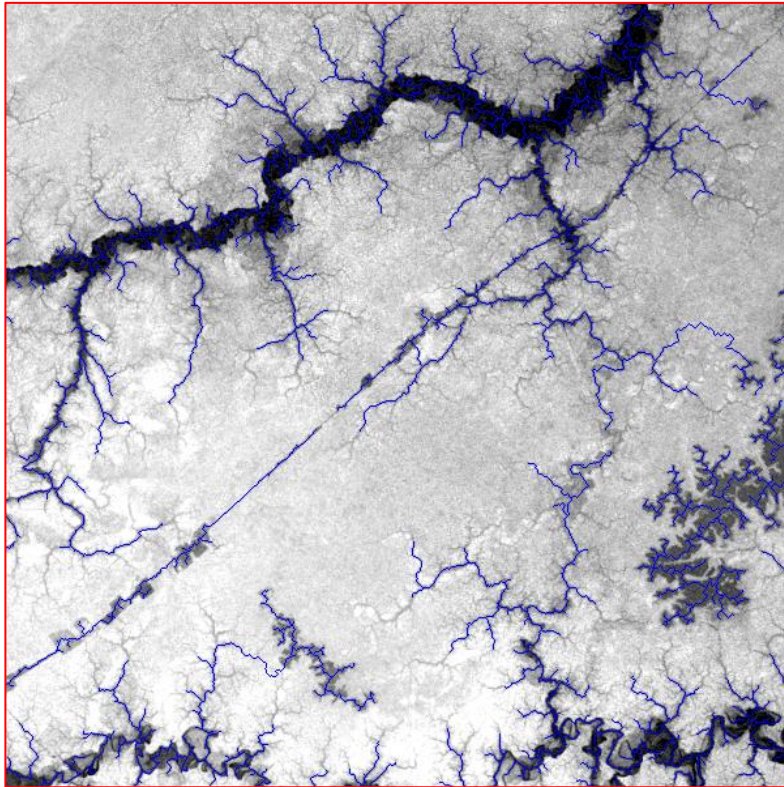


SRTM original

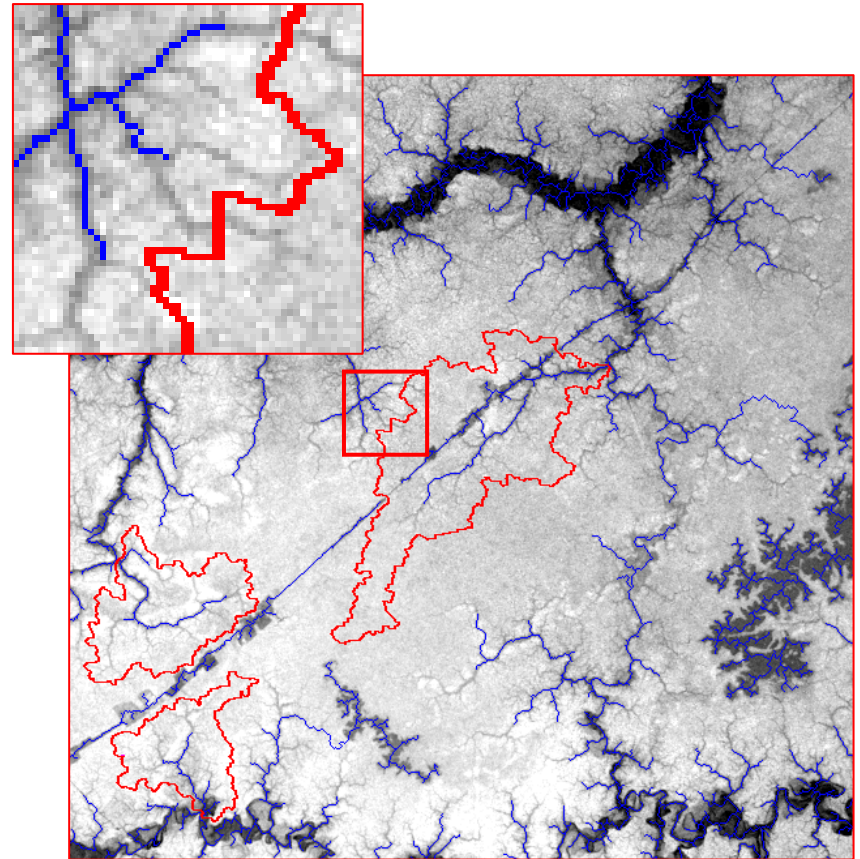
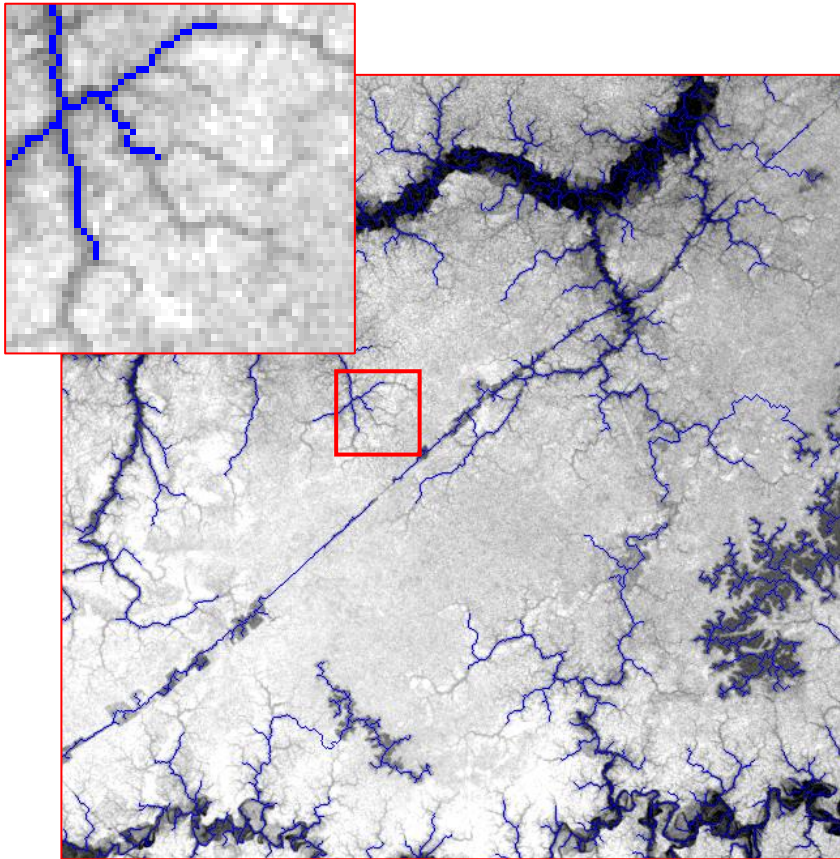


Declividade

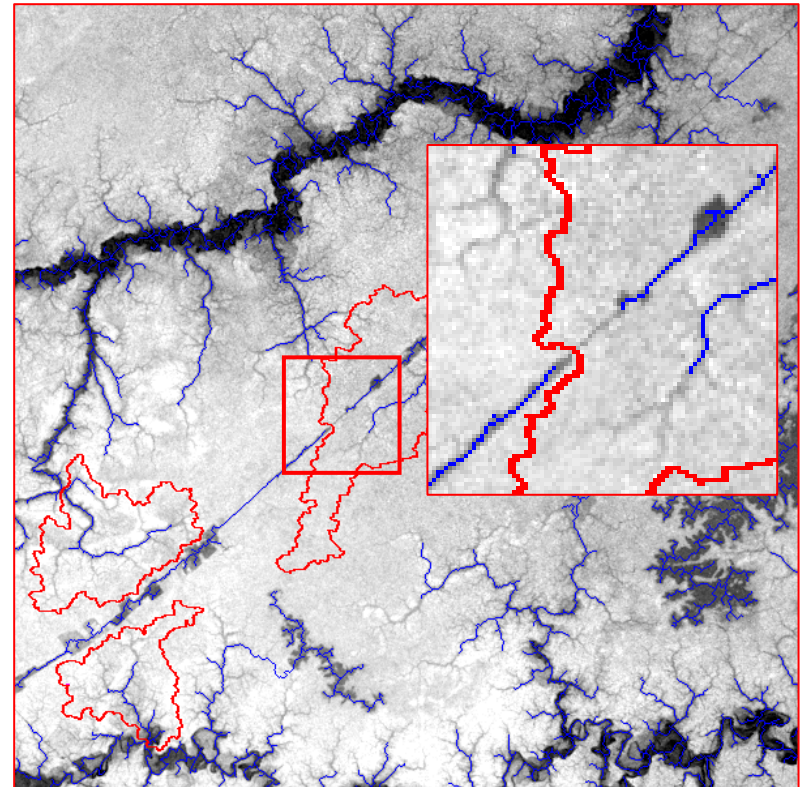
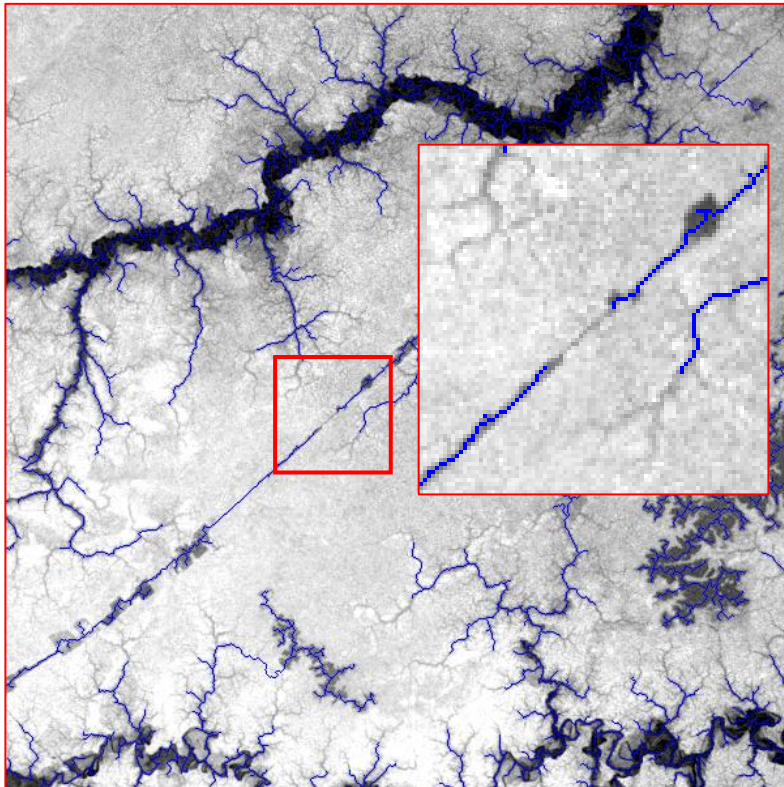
Drenagem e Bacia Hidrográfica



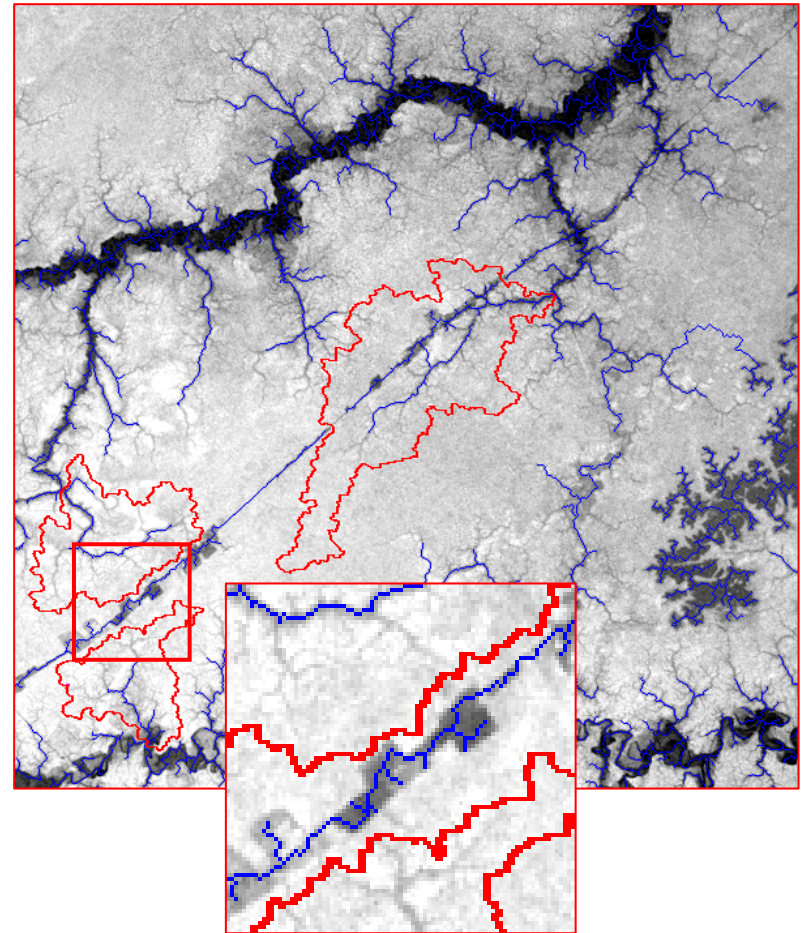
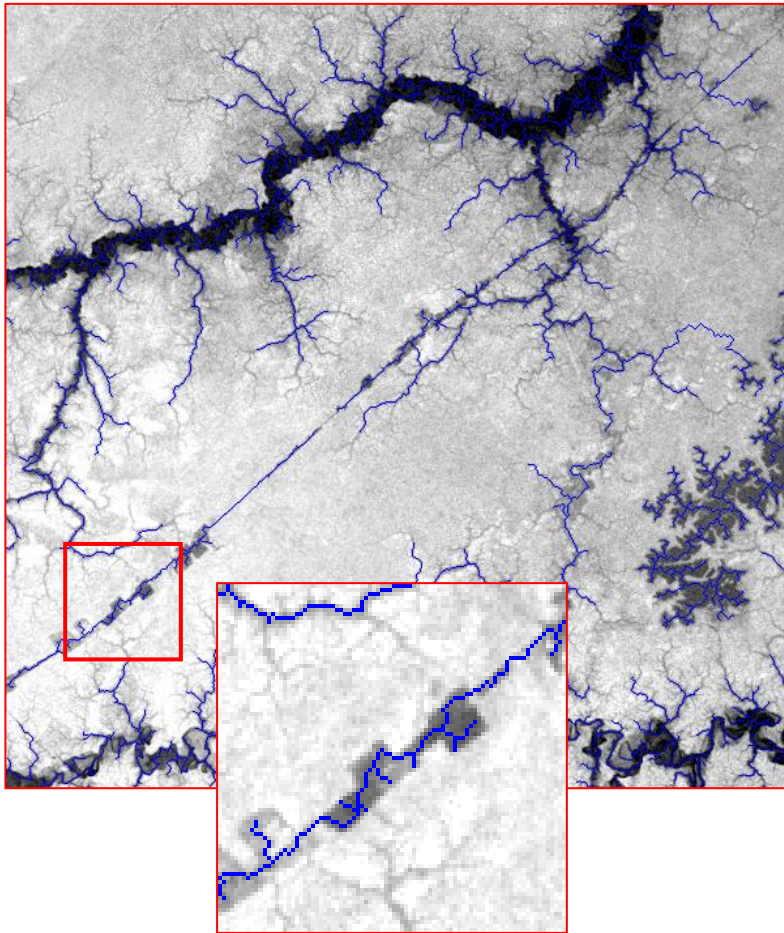
Drenagem e Bacia Hidrográfica



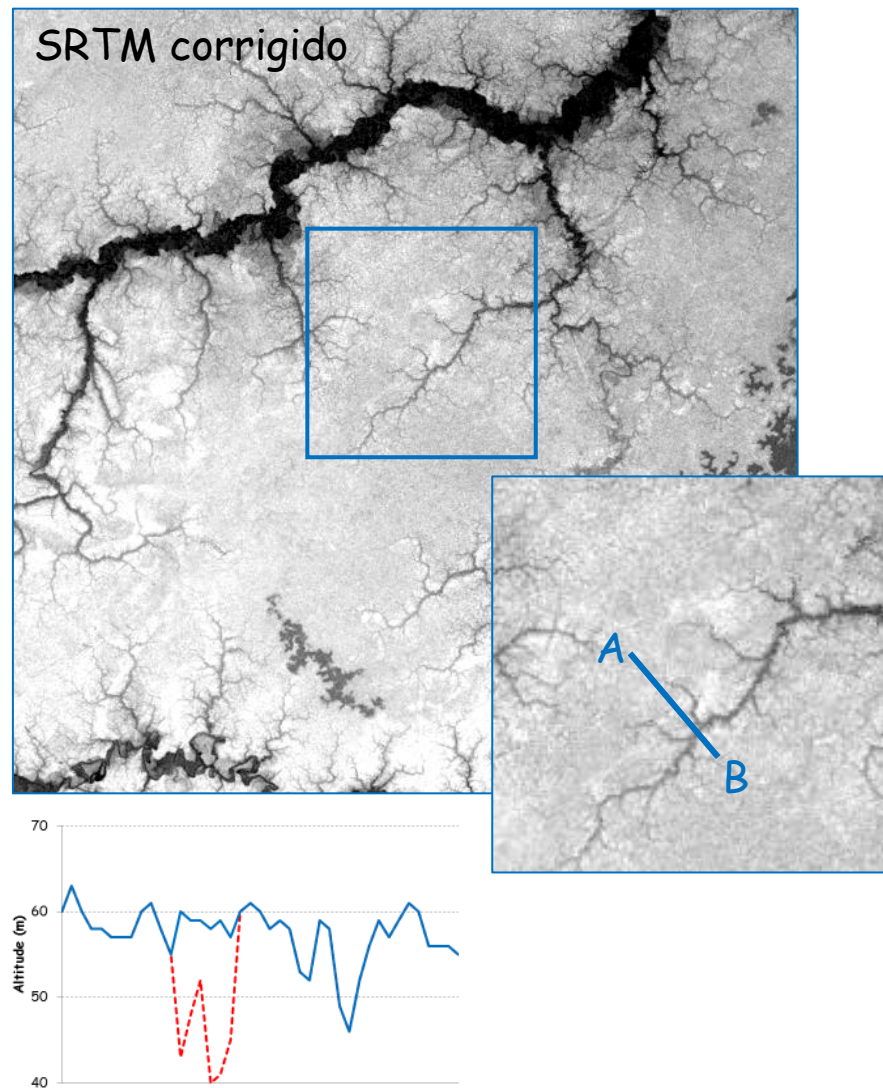
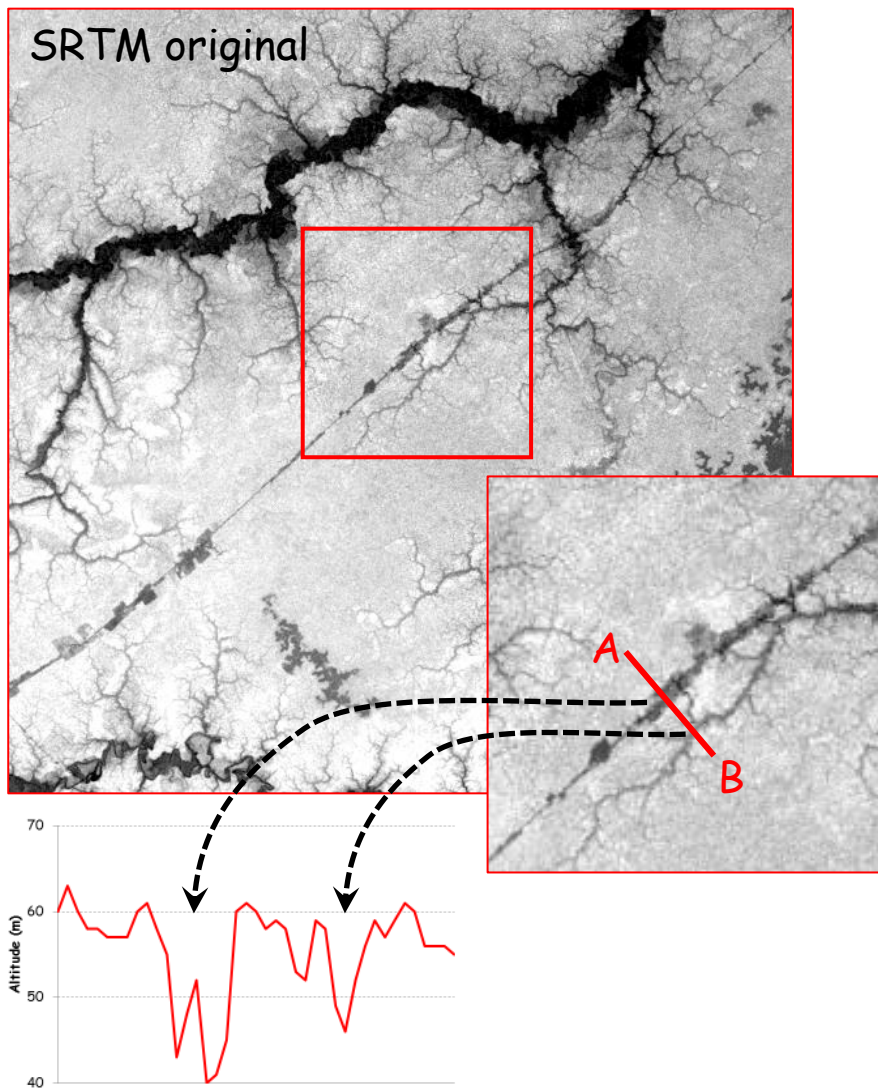
Drenagem e Bacia Hidrográfica



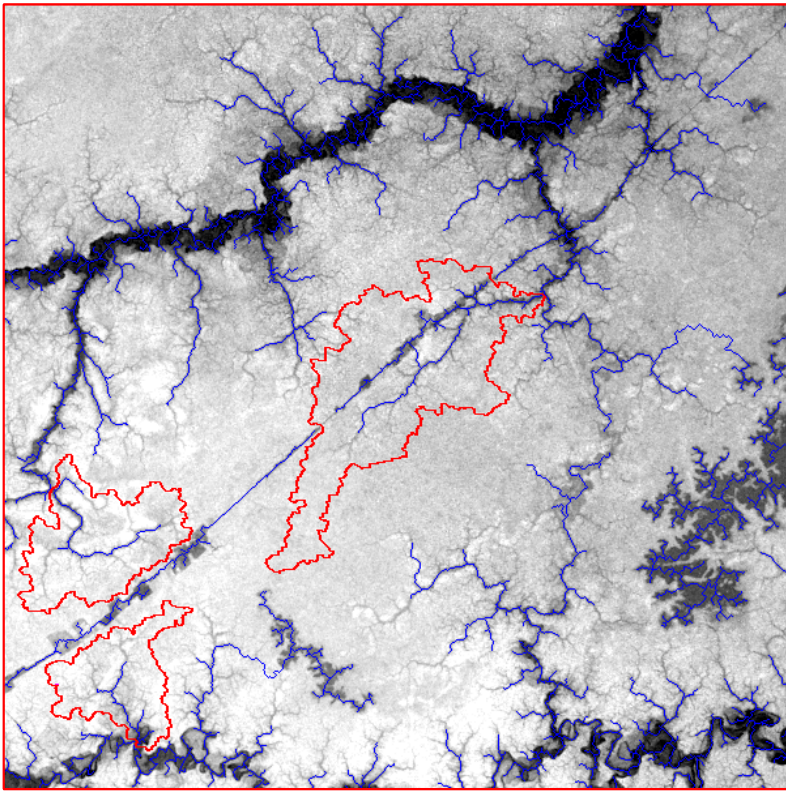
Drenagem e Bacia Hidrográfica



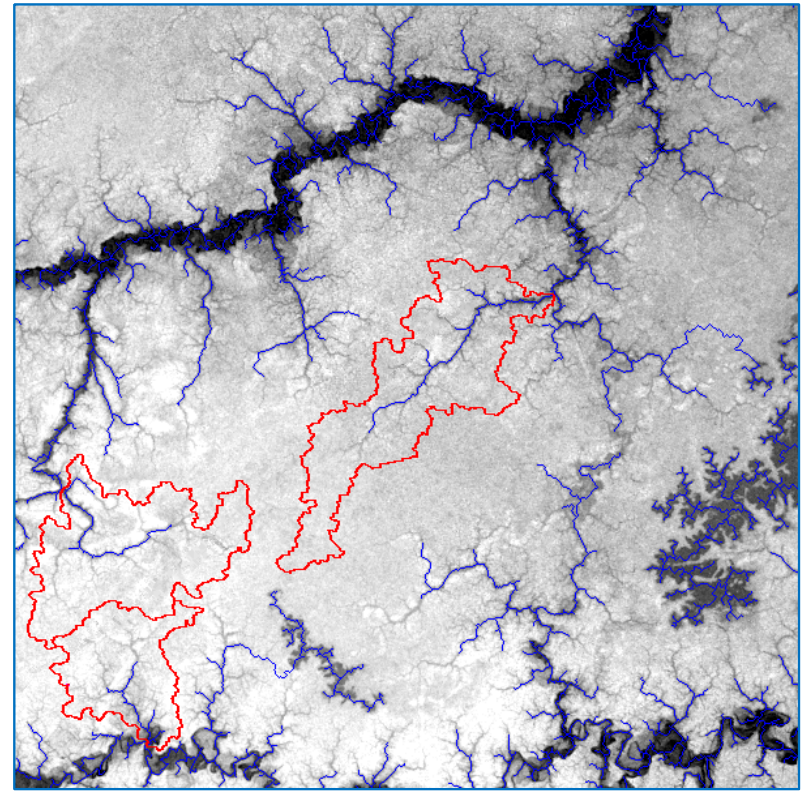
Efeito da Correção



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")

Parametrização da Superfície

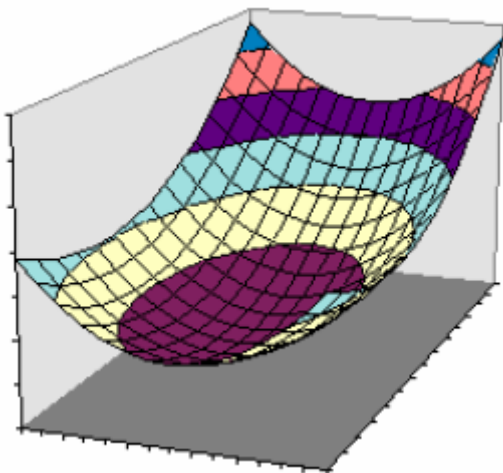
$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f$$

ou na forma geral canônica:

$$ax^2 + 2hxy + by^2 + 2jx + 2ky + m = 0$$

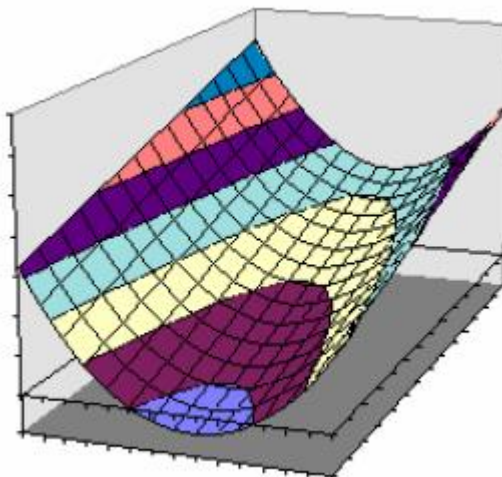
onde $h = c/2$, $j = d/2$, $k = e/2$ e $m = f - z$

Elíptica



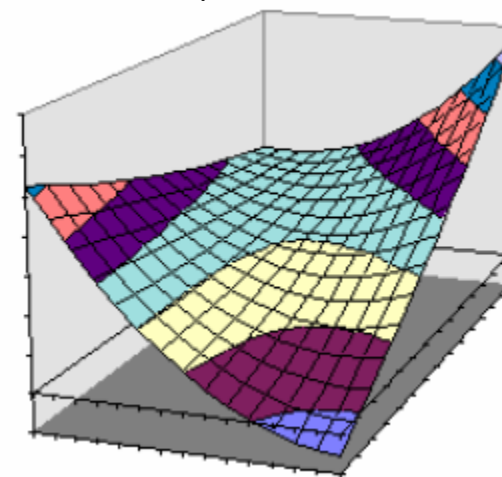
$$ab - h^2 = 1$$

Parabólica



$$ab - h^2 = 0$$

Hiperbólica



$$ab - h^2 = -0,28$$

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f$$

d {	z_1	z_2	z_3
	z_4	z_5	z_6
	z_7	z_8	z_9

$$a = (z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9)/6d^2 - (z_2 + z_5 + z_8)/3d^2$$

$$b = (z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9)/6d^2 - (z_4 + z_5 + z_6)/3d^2$$

$$c = (z_3 + z_7 - z_1 - z_9)/4d^2$$

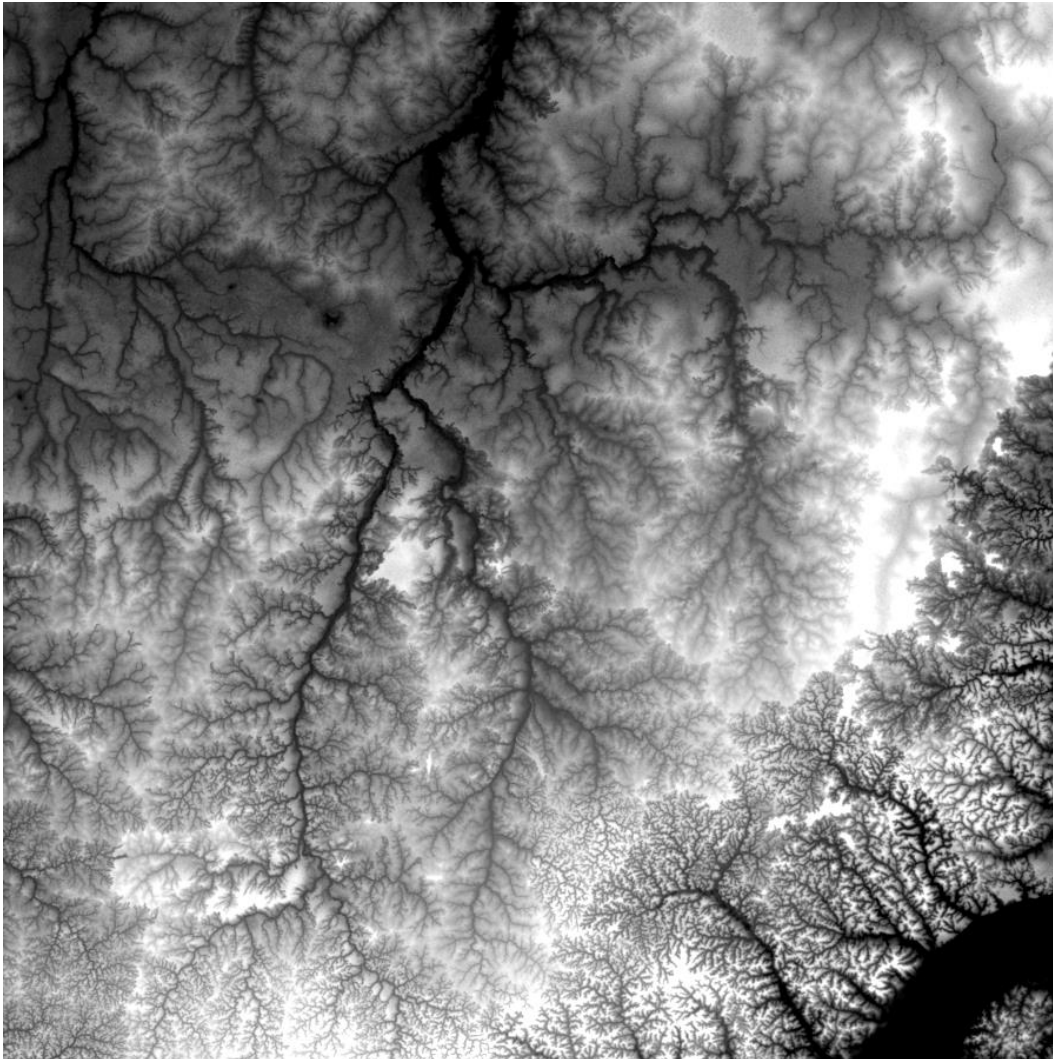
$$d = (z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7)/6d$$

$$e = (z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9)/6d$$

$$f = (2(z_2 + z_4 + z_6 + z_8) - (z_1 + z_3 + z_7 + z_9) + 5z_5)/9$$

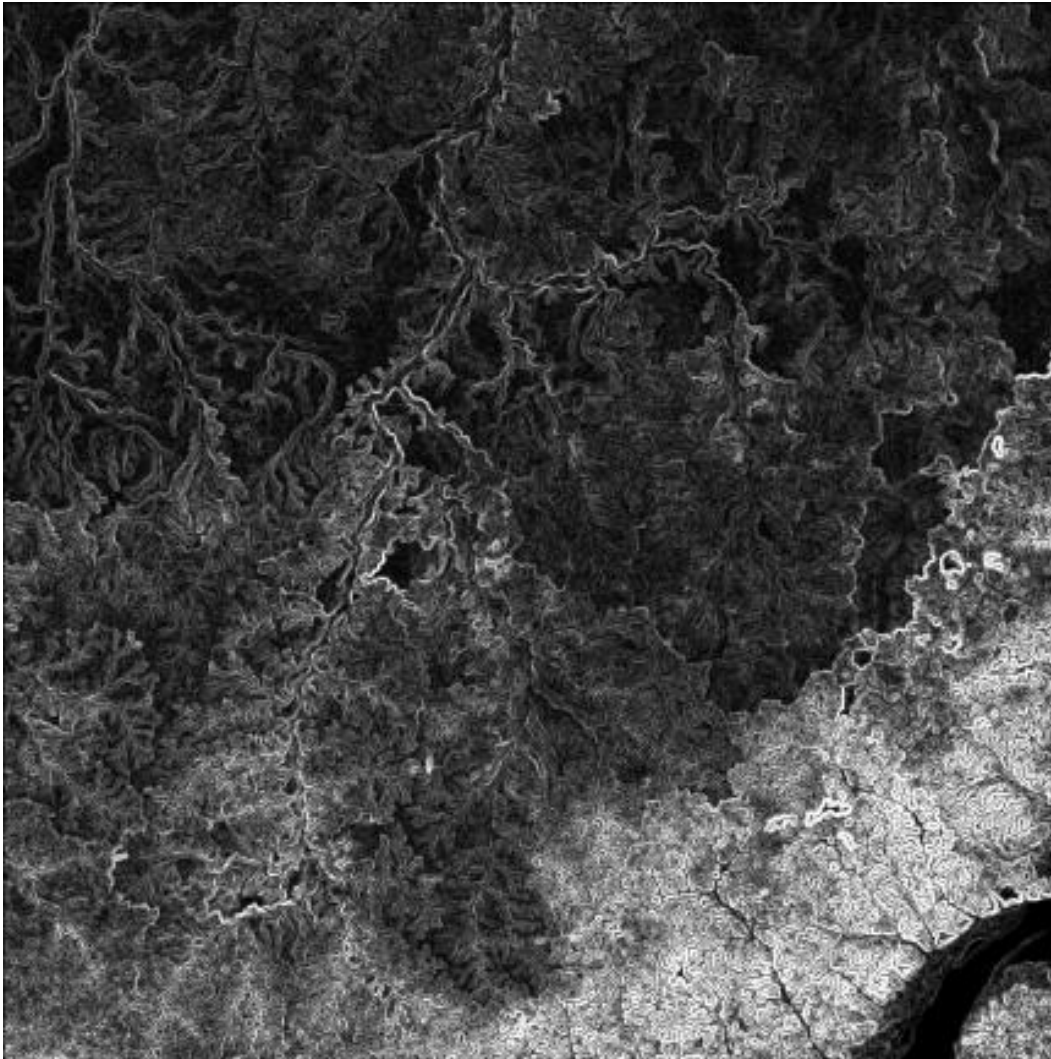
Atributos	Fonte
Declividade	Wood (1996); Shary et al (2002)
Fator de Gradiente	Shary et al (2002)
Curvatura Horizontal	Shary et al (2002)
Curvatura Plana	Wood (1996); Shary et al (2002)
Curvatura Vertical	Wood (1996), Shary et al (2002)
Curvatura Média	Wood (1996), Shary et al (2002)
Não Esfericidade	Shary et al (2002)
Diferença de curvatura	Shary et al (2002)
Rotor	Shary et al (2002)
Excesso de Curvatura Horizontal	Shary et al (2002)
Excesso de Curvatura Vertical	Shary et al (2002)
Curvatura Mínima	Wood (1996); Shary et al (2002)
Curvatura Máxima	Wood (1996); Shary et al (2002)
Curvatura Gaussiana Total	Shary et al (2002)
Curvatura Circular Total	Shary et al (2002)
Curvatura de Acumulação Total	Shary et al (2002)
Curvatura Longitudinal	Wood (1996)
Curvatura Transversal	Wood (1996)

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



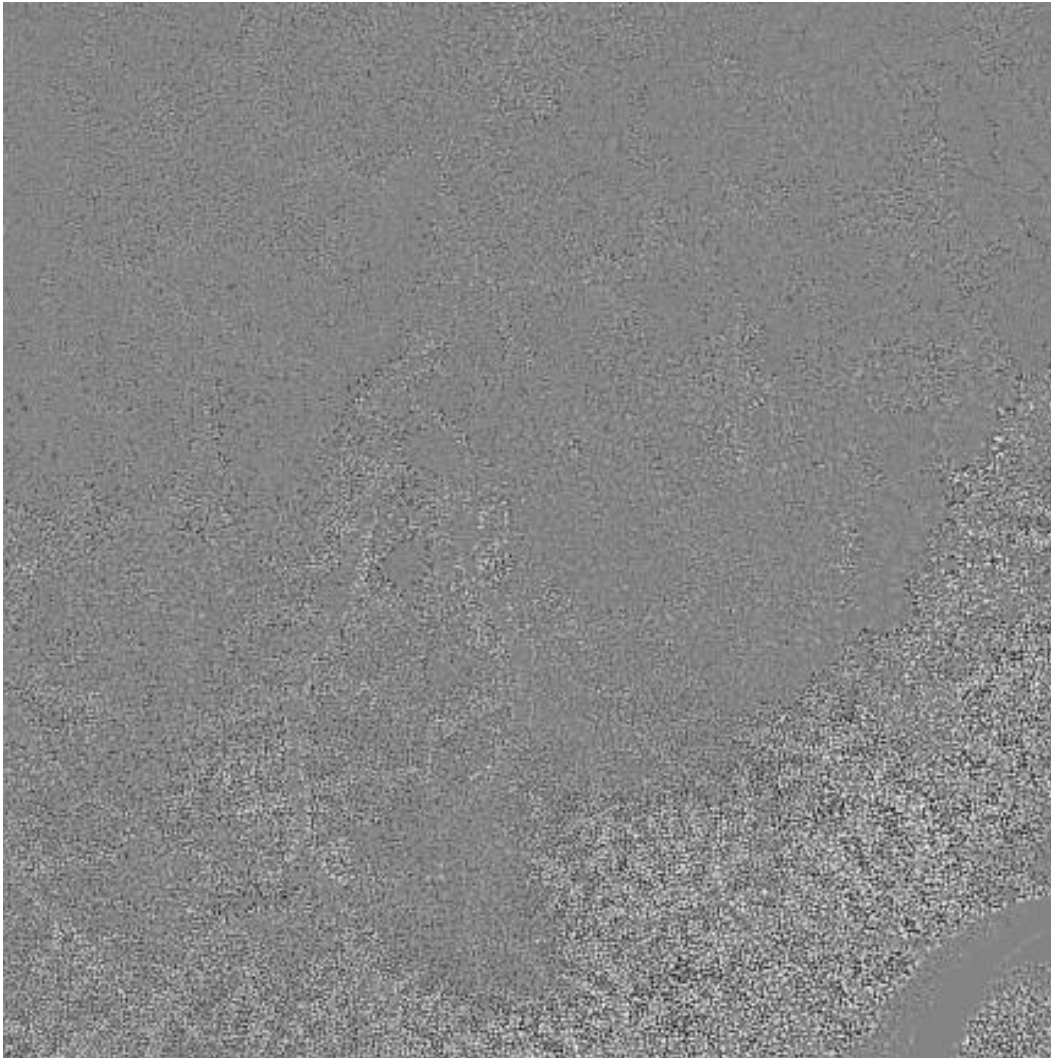
Atributos
Declividade
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal
Curvatura Plana
Curvatura Vertical
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal


Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



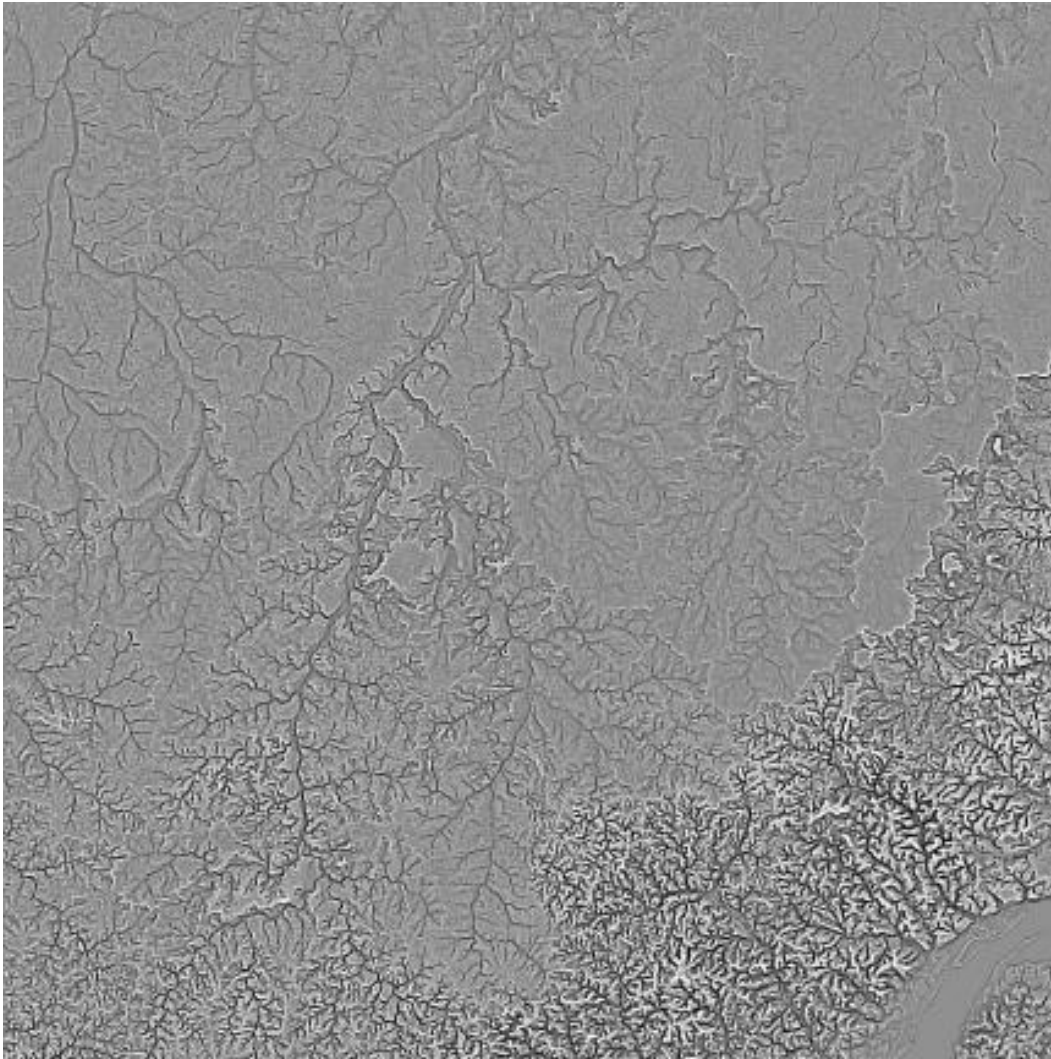
Atributos
Declividade ←
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal
Curvatura Plana
Curvatura Vertical
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



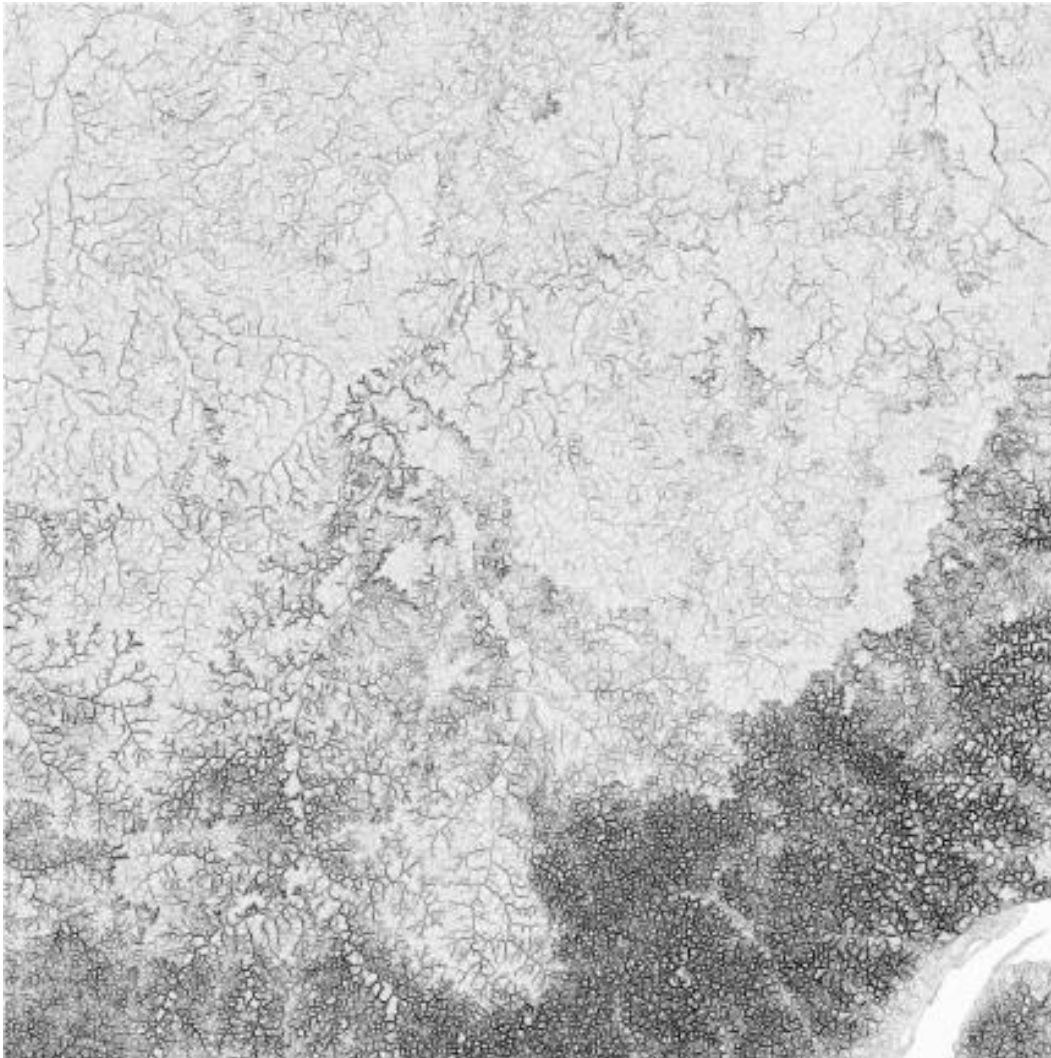
Atributos
Declividade
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal 
Curvatura Plana
Curvatura Vertical
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



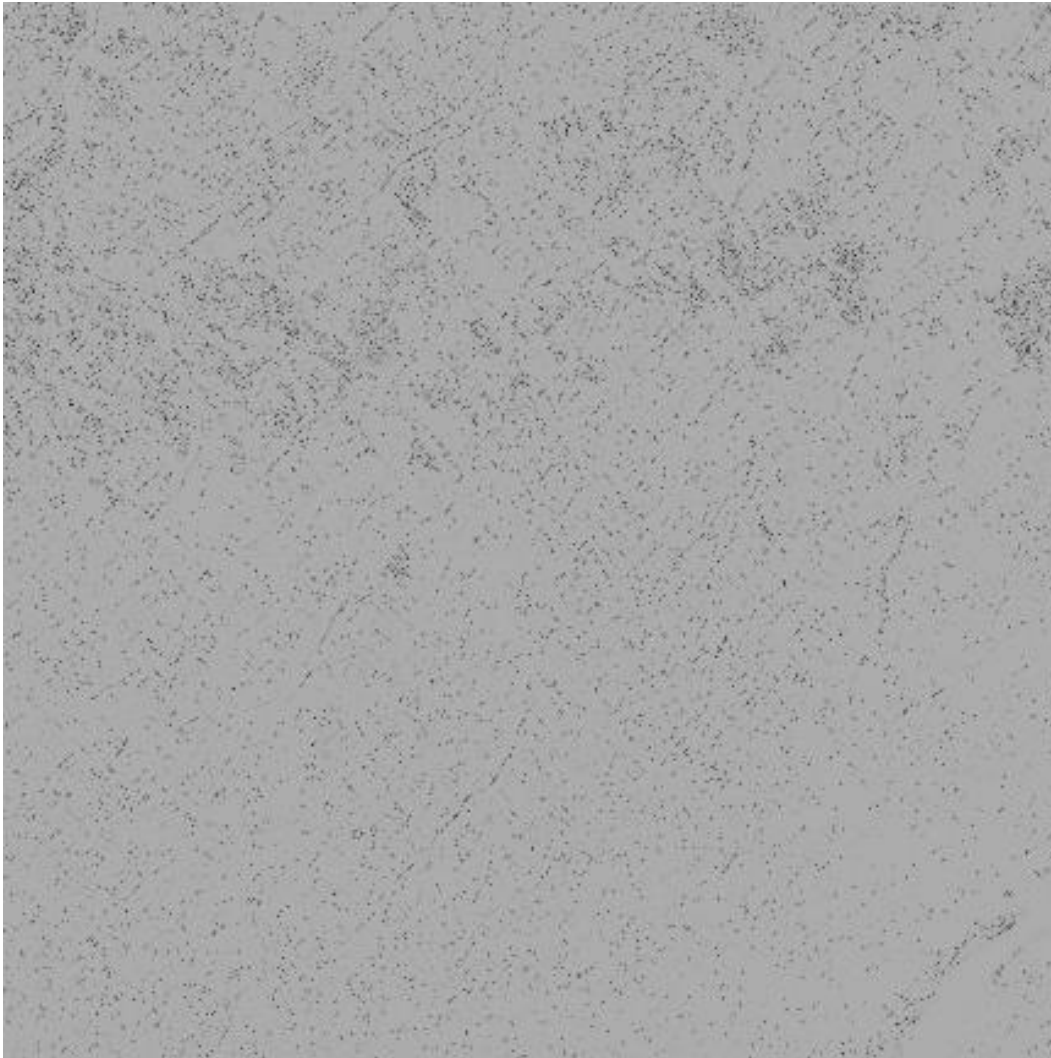
Atributos
Declividade
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal
Curvatura Plana
Curvatura Vertical ←
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



Atributos
Declividade
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal
Curvatura Plana
Curvatura Vertical
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima ←
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal

Métricas Topográficas ("Geomorfológicas")



Atributos
Declividade
Fator de Gradiente
Curvatura Horizontal
Curvatura Plana
Curvatura Vertical
Curvatura Média
Não Esfericidade
Diferença de curvatura
Rotor
Excesso de Curvatura Horizontal
Excesso de Curvatura Vertical
Curvatura Mínima
Curvatura Máxima
Curvatura Gaussiana Total
Curvatura Circular Total ←
Curvatura de Acumulação Total
Curvatura Longitudinal
Curvatura Transversal

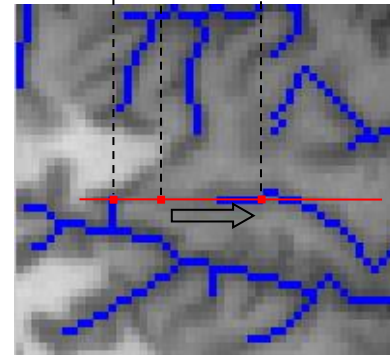
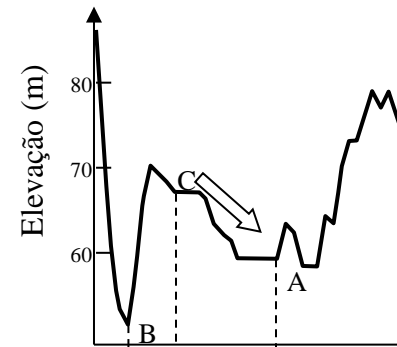
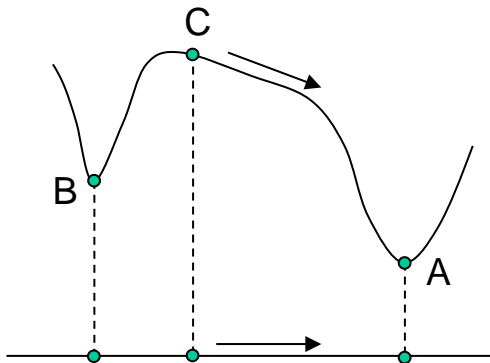
Métricas Topográficas (“Hidrológicas”)

Considera os caminhos da água

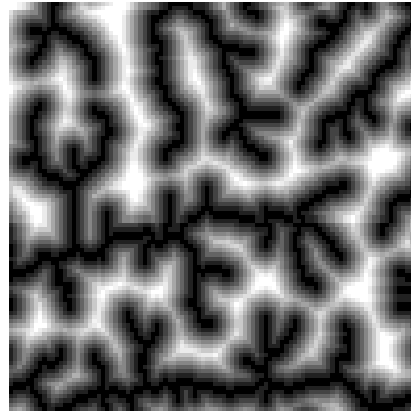
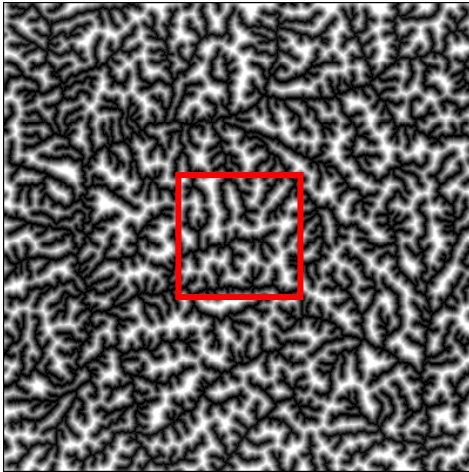
- área de contribuição
indica área de captação/acúmulo de água
- índice topográfico
identifica áreas com similaridade hidrológica
- distâncias vertical, horizontal e ao longo da superfície a corpos d'água
relacionada com a disponibilidade hídrica do solo,
com o tempo de residência da água no solo, e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

Distâncias Horizontal e Vertical

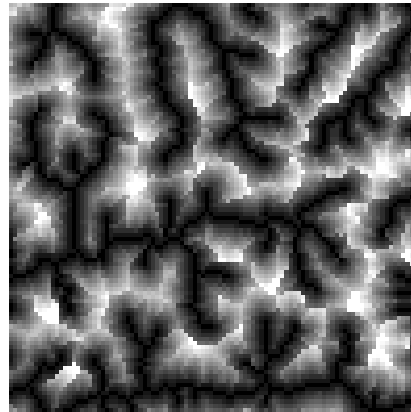
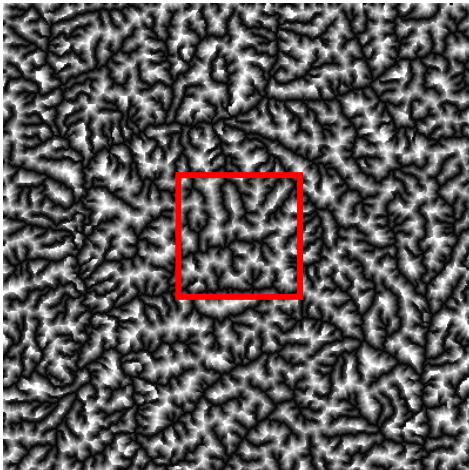
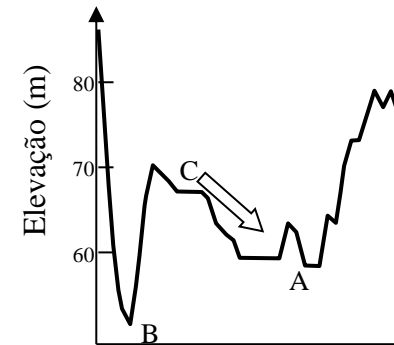
Distância euclidiana (vizinho mais próximo) ou seguindo a direção de escoamento?



Distância Horizontal à Drenagem mais Próxima



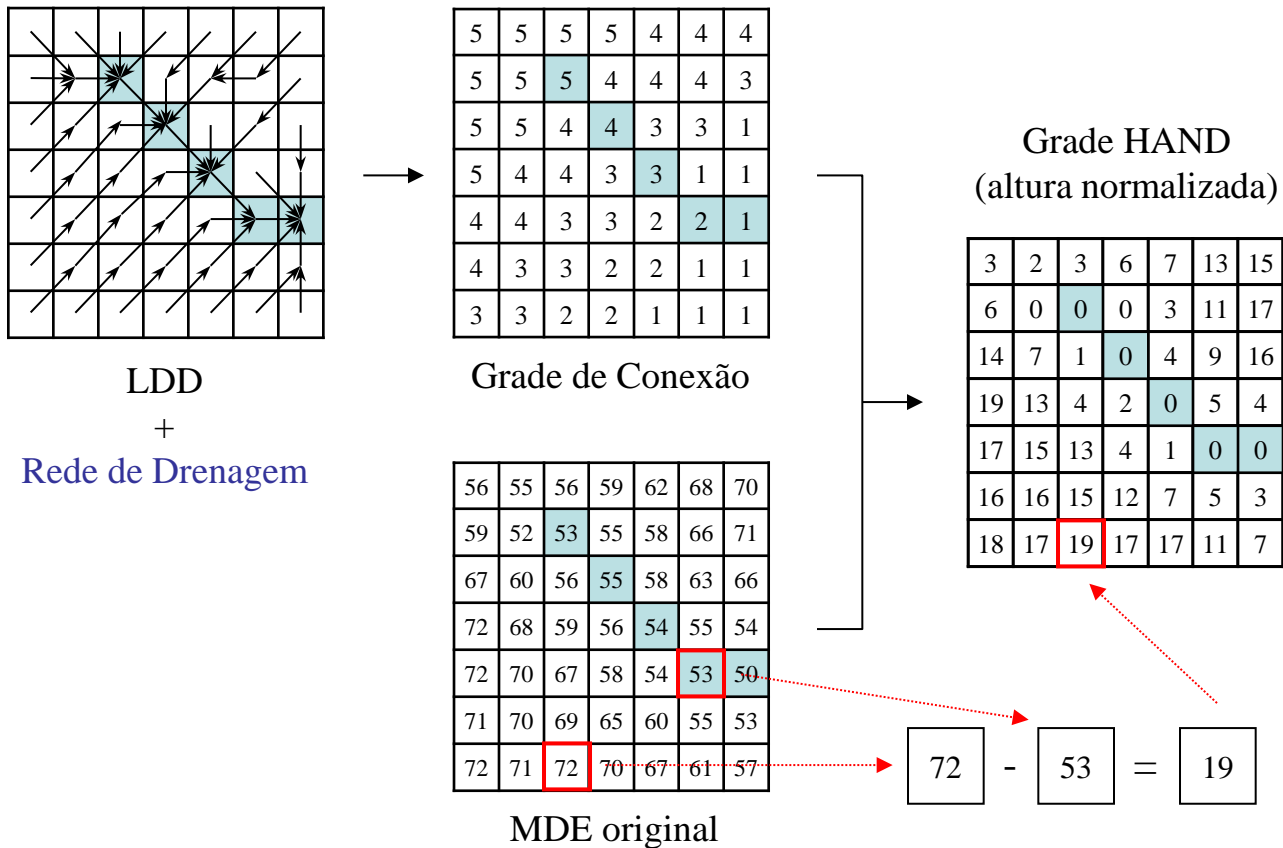
Distância Euclidiana
(vizinho mais próximo)



Distância seguindo
a direção de escoamento

Distância Vertical à Drenagem mais Próxima

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



MDE x HAND

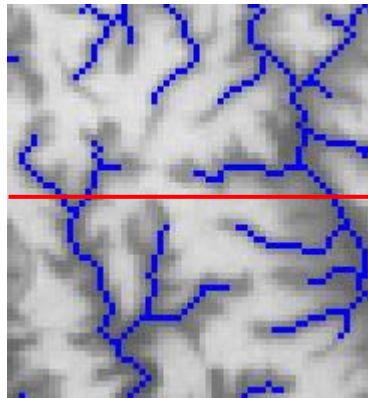
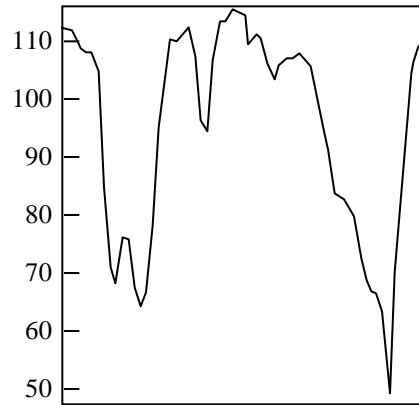


MDE SRTM

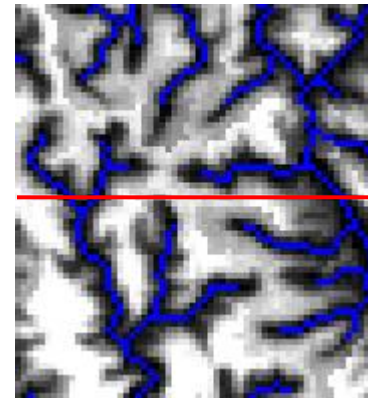
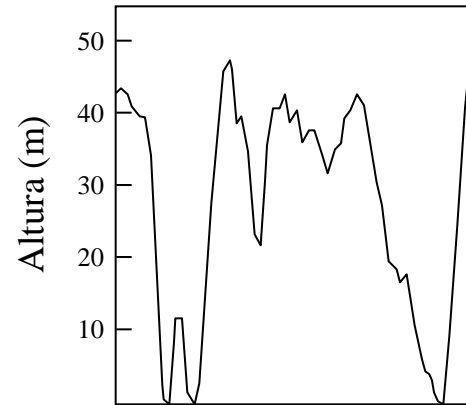


HAND

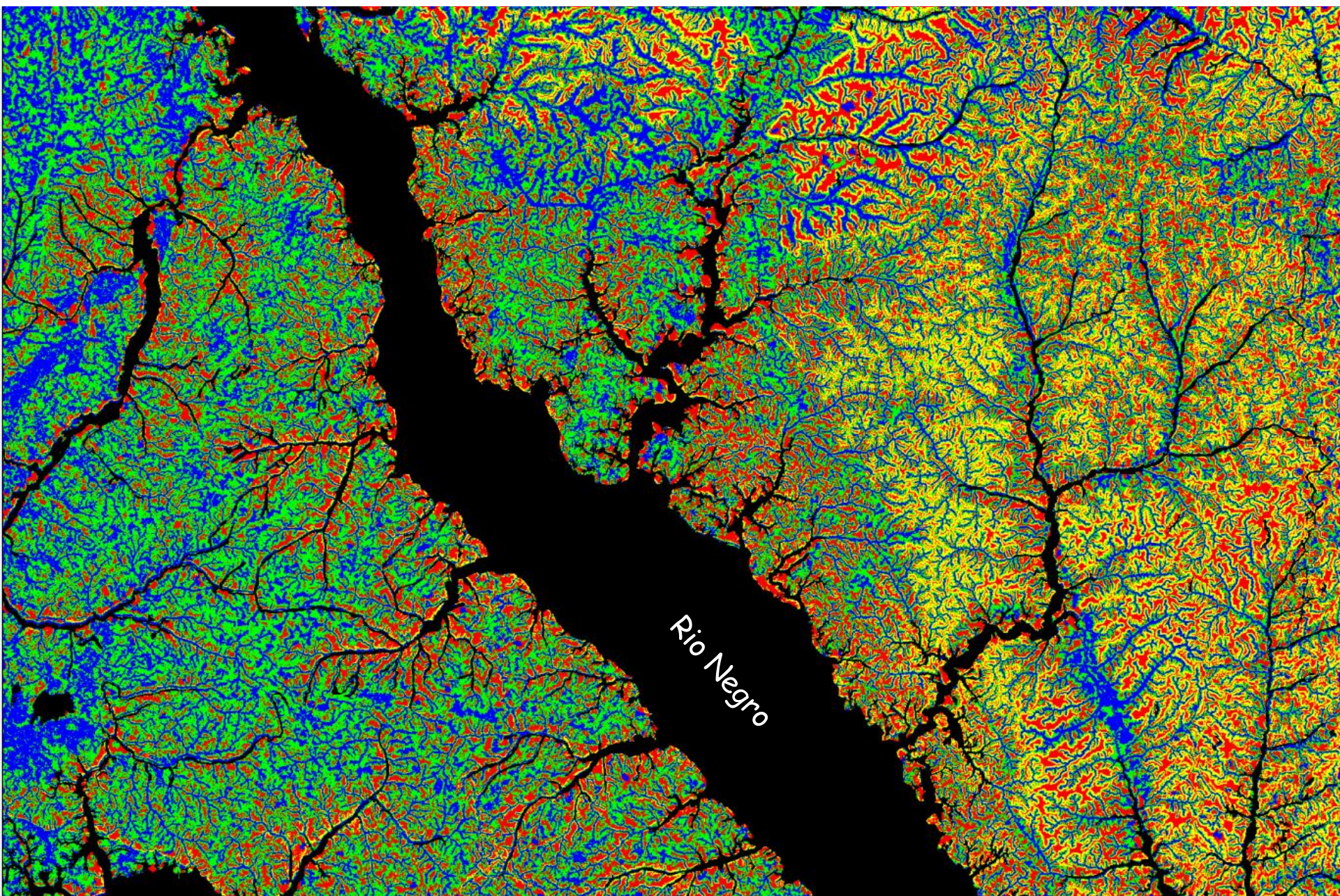
Altimetria x HAND



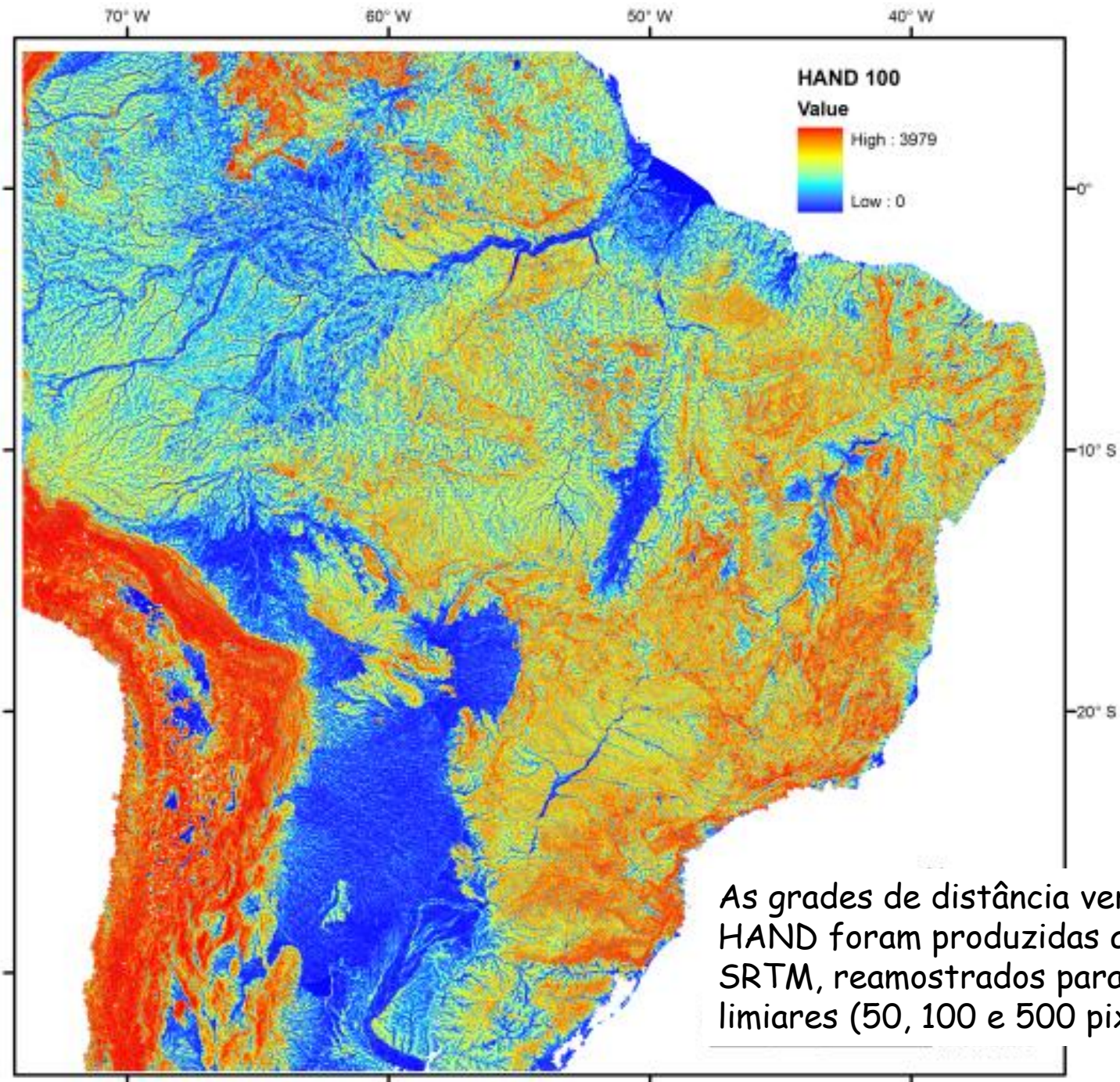
MDE



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)